



Respuesta Agronómica y Fisiológica del Almendro al Riego Deficitario. Indicadores de Estrés Hídrico

**Pedro Antonio Nortes Tortosa
Ingeniero Agrónomo**

**Directores: Rafael Domingo Miguel
Alejandro Pérez Pastor**

**Memoria presentada para optar al grado de Doctor por la
Universidad Politécnica de Cartagena**

Cartagena, 2008

El ingeniero agrónomo Pedro Antonio Nortes Tortosa, ha disfrutado durante el tiempo de realización de su Tesis Doctoral, de una beca del programa de Formación de Profesorado Universitario (FPU), del Ministerio de Educación y Ciencia. La parte experimental de la presente Memoria de Tesis se ha desarrollado en el marco del proyecto “*Riego Inteligente para un Manejo Sostenible en Frutales (RIMAS): Mejora de la Gestión y Productividad para Asegurar la Competitividad*” (AGL2000-0387-C05-05), del Ministerio de Educación y Ciencia.



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
Comisión de Doctorado

**AUTORIZACIÓN DE LA PRESENTACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL
POR LOS DIRECTORES**

D. Rafael Domingo Miguel y D. Alejandro Pérez Pastor, Profesores Doctores del Área de Producción Vegetal en el Departamento de Producción Vegetal.

AUTORIZAN:

La presentación de la Tesis Doctoral titulada “Respuesta Agronómica y Fisiológica del Almendro al Riego Deficitario. Indicadores de Estrés Hídrico”, realizada por D. Pedro Antonio Nortes Tortosa, bajo nuestra dirección y supervisión, en el Departamento de Producción Vegetal, y que presenta para la obtención del grado de Doctor por la Universidad Politécnica de Cartagena.

En Cartagena, a 18 de febrero de 2008

LOS DIRECTORES DE TESIS

Fdo.: Rafael Domingo Miguel

Fdo.: Alejandro Pérez Pastor



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Comisión de Doctorado

**AUTORIZACIÓN DE LA PRESENTACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL
POR EL DEPARTAMENTO RESPONSABLE**

D. Sebastián Bañón Arias, Director del Departamento de Producción Vegetal.

INFORMA:

Que la Tesis Doctoral titulada “Respuesta Agronómica y Fisiológica del Almendro al Riego Deficitario. Indicadores Biológicos”, ha sido realizada por D. Pedro Antonio Nortes Tortosa, bajo la dirección y supervisión de D. Rafael Domingo Miguel y D. Alejandro Pérez Pastor y que el Departamento ha dado su conformidad para que sea presentada ante la Comisión de Doctorado.

En Cartagena, a 18 de febrero de 2008

EL DIRECTOR DEL DEPARTAMENTO

Fdo.: Sebastián Bañón Arias

A Lourdes

Agradecimientos

Probablemente sea este uno de los apartados de mayor importancia y dificultad de este trabajo, ya que en él debieran de aparecer todas aquellas personas e instituciones que de alguna manera han ayudado en la realización del mismo, y han contribuido a mi formación tanto investigadora, como personal.

A Rafael Domingo y Alejandro Pérez, por haber dirigido la presente Tesis Doctoral, por haberme iniciado en este mundo, por haber puesto a mi disposición todos los medios tanto materiales como humanos necesarios, así como por los consejos y conocimientos traspasados y por la amistad que nos une.

A Alain Baille y Mayla, por haberme brindado la oportunidad de trabajar junto a ellos, por todos los ofrecimientos desinteresados hacia mí, por motivarme a finalizar el presente trabajo y por toda la comprensión en estos últimos meses. *Merci beaucoup* por todo.

Del mismo modo, quisiera agradecer de forma especial al Proyecto Europeo “Sustainable orchard irrigation for improving fruit quality and sfatety” (IRRIQUAL FP6-2004-FOOD-3B), sin cuya financiación no hubiera sido posible la finalización del presente trabajo.

A Gregorio Egea, por encima de todo amigo y gran compañero de fatigas. Gracias de todo corazón por todos tus consejos en los momentos difíciles, por todas tus aportaciones al presente trabajo y por todos los buenos momentos que hemos pasado juntos, esperemos poder seguir en esta andadura que comenzamos hace años prácticamente juntos, siempre será un placer trabajar junto a ti.

A los integrantes del proyecto coordinado del que ha salido la financiación para la realización de este trabajo, en especial a los compañeros del CEBAS, Arturo Torrecillas y Juan José Alarcón, del IRTA, Carmen Biel, Joan Bonany y Jaume Casadeseus, del IVIA, Juan Ramón Castel y Diego Intrigliolo e IRNAS, José Enrique Fernández y Félix Moreno.

Al todo el personal de la finca experimental “Tomas Ferro”, en especial a Francisco Solano, José Anastasio Egea, Pedro Mateo y José Antonio García, por haber llevado de forma tan brillante todas las labores culturales de la parcela experimental y por haber colaborado en la toma de datos experimentales.

A la empresa agrícola Arroyo Marín S.L., por haber puesto de forma desinteresada la finca la Corverica a nuestra disposición.

A los compañeros del Área de Ingeniería Agroforestal, por haberme acogido tan calurosamente desde el principio entre ellos, en especial a Bernardo, Victoriano, Joaquín, José Miguel y mis compañeros de laboratorio Belén, Maliko, José y Paco.

A los compañeros del departamento de Producción Vegetal, en especial a Elisa, Manolón, Ana María, Manolo y Lucia.

A los colegas del INRA d'Avignon, por haberme hecho disfrutar de mi estancia entre ellos, en especial a Gilles Vercambre, Michel Gènard, Françoise Lescourret, Wu BenHong, Emilio Nicolás, Thomas, Magali, Ruth, Caroline, ..., lista como casi todas interminable, por ello gracias a todos y perdonad todos aquellos que no figuren en ella.

A Wenceslao Conejero y Pedro Sánchez, por haber colaborado durante la realización de sus trabajos fin de carrera en todas las tareas de toma y elaboración de resultados experimentales.

A los grandes amigos y compañeros de la Universidad Politécnica de Cartagena, destacar en esta gran familia a los amigos de la ETSII, Roque Torres, José María Fernández Meroño y Jesús Rubio, así como a Francisco Alcón y María Dolores de Miguel, del departamento de Economía de la Empresa, gracias a todos por la ayuda prestada tanto a nivel personal como en la puesta a punto de algunos equipos.

A Oussama Mounzer y Mona Kassen, por haber estado desde que llegaron a estas tierras junto a mi, ha sido un placer conocerlos y espero formar parte de vuestras vidas durante siempre.

A mis amigas Toñi y Merche, por todos los buenos momentos que hemos pasados juntos, por los grandes recuerdos que quedan de nuestros viajes, tanto por tierras francesas, que bonito el festival, como tantos lugares visitados, cenas, comidas y demás eventos, no cambiéis nunca y recordar que siempre estaré a vuestro lado.

A mi familia, por haberme apoyado siempre, por aguantar mis cambios de humor, en ocasiones frecuentes y por vuestro cariño, Mama, te sientes identificada. Mis hermanos Diego y Patxi, y mis padres Paco y Reme, mis cuñados y cuñadas y como no a las dos alegrías y juguetes de la casa Alejandro y Marco, a todos y de todo corazón gracias por ser como sois.

Y finalmente, a la persona que desde hace ya muchos años me acompaña, ella y sólo ella sabe todos los buenos momentos y los malos que hemos pasado desde el inicio de esta andadura, de hecho fue la que me animó en principio a tomar este camino, de ella es el 51 % del trabajo presentado, por no decir más. Muchas gracias Lourdes, mi futura mama.

Resumen

El objetivo global de esta memoria fue estudiar la respuesta agronómica y fisiológica de almendros jóvenes y adultos a la aplicación de distintas estrategias de riego deficitario, y evaluar la utilidad y aplicabilidad de distintos indicadores del estado hídrico del árbol en la programación del riego. Para ello se establecieron tres ensayos en dos parcelas experimentales: uno en almendros adultos cv. ‘Colorada’ regados con agua de elevada salinidad y que constó de tres tratamientos de riego: (i) T_{CTL} , regado al 125 % ET_c durante todo el ciclo de cultivo; (ii) T_{RDC} , regado al 100 % del T_{CTL} hasta alcanzar el tamaño exterior del fruto, 70 % hasta el inicio de la fase IV, 30 % hasta recolección y 70 % durante el resto de la estación de riego y (iii) T_{SCO} , sin riego durante todo el año, y otros dos en almendros jóvenes cv. ‘Marta’, con agua de buena calidad y con un total de cinco tratamientos: (i) T_{CTL} , regado al 120 % ET_c durante todo el ciclo de cultivo; (ii, iii) T_{RD80} y T_{RD60} , regado al 80 y 60 % de la ET_c durante todo el ciclo de cultivo y (iv, v) T_{RDC40} y T_{RDC20} , regados al 100 % ET_c durante todo el ciclo de cultivo excepto en la fase IV, donde recibieron el 40 y 20 % de la ET_c respectivamente.

Los principales mecanismos desarrollados por los almendros adultos bajo condiciones de estrés hídrico y salino fueron: (i) una disminución del potencial hídrico foliar, al objeto de generar un mayor gradiente de potencial hídrico entre el suelo y la hoja, y de este modo favorecer la absorción de agua, (ii) una temprana regulación estomática, desde las primeras horas del día, permitiéndole una mayor eficiencia en la absorción de CO_2 respecto a las pérdidas de agua, (iii) un ajuste osmótico durante la mayor parte de la estación de crecimiento, lo que permitió mantener la turgencia celular y compensar las disminuciones de potencial hídrico foliar y (iv) una disminución del índice de área foliar (LAI), lo que supuso una contribución adicional al mantenimiento de la turgencia, ya que al disminuir el ratio brotes/raíz se redujo la tasa transpirativa para idéntica demanda evaporante.

En cuanto a los rendimientos obtenidos, los tratamientos control y de riego deficitario controlado (RDC) mostraron valores superiores a los esperados para la salinidad presente en el agua de riego. Por otro lado, el tratamiento RDC, con un ahorro de agua del 50 % obtuvo una producción similar al control. Estos resultados muestran una buena adaptación de esta variedad autóctona al estrés hídrico y salino, lo que le permite utilizar más eficazmente el agua disponible.

De los parámetros evaluados en almendros jóvenes fue el crecimiento vegetativo el más sensible al déficit hídrico, y en especial el diámetro del tronco. Los tratamientos más afectados fueron aquéllos en los que el estrés hídrico fue más intenso y aplicado desde el primer año de plantación (T_{RD60} y

T_{RD40}). Sin embargo, el rendimiento no se vio, prácticamente, afectado, ya que tan sólo T_{RD60} y en su tercer año de ensayo presentó valores inferiores al control. La disminución del diámetro de tronco y consecuentemente del volumen de copa supone un menor espacio para el asentamiento de frutos y, en definitiva, una menor carga productiva. Cabría, por lo tanto, esperar una acentuación de estas diferencias a más largo plazo. Todo ello, muestra la conveniencia de realizar una programación del riego con criterios de crecimiento y desarrollo en los primeros años de la plantación al objeto de alcanzar el estado adulto lo más rápidamente posible.

De los diferentes indicadores evaluados del estado hídrico del árbol fue la máxima contracción diaria del tronco (MCD) la que presentó la mayor correlación con el potencial hídrico foliar al alba (Ψ_a) y de tallo a mediodía (Ψ_t), parámetros utilizados tradicionalmente de referencia en este tipo de estudios. Lo mismo sucedió en las correlaciones con la evapotranspiración de referencia (ET_o) y el déficit de presión de vapor (DPV). Esto unido al hecho de detectar rápidamente cambios de humedad en el suelo, de su posible automatización y del seguimiento en tiempo real del estado hídrico del árbol le convierte en una herramienta muy útil para el manejo y automatización del riego. Dentro de esta línea, es de destacar la estrecha relación observada a nivel estacional y mensual entre la máxima contracción diaria (MCD) y el déficit de presión de vapor (DPV), lo que ha permitido establecer líneas de referencia de posible aplicación a la programación automática del riego en el cultivo del almendro.

Abstract

The main objective of this Doctoral Thesis was to evaluate the agronomic and physiologic responses of both young and adult almond trees to distinct deficit irrigation strategies, as well as to assess the applicability and utility of several plant water status indicators for irrigation scheduling. To this aim, three experiments were planned on two different experimental plots:

- a) one of them carried out on adult ‘Colorado’ almond trees irrigated with highly saline water, where three irrigation treatments were established: (i) T_{CTL} , irrigated at 125 % ET_C throughout all growing season; (ii) T_{RDC} , receiving 100 % T_{CTL} until the fruit reached its definitive external size, then 70 % T_{CTL} until the beginning of stage IV, 30 % during stage IV and 70 % T_{CTL} in postharvest; and (iii) T_{SCO} , rainfed treatment.
- b) two of them carried out on young ‘Marta’ almond trees, where five irrigation treatments were defined (i, ii, iii) T_{CTL} , T_{RD80} and T_{RD60} , irrigated at 120, 80 and 60 % ET_C all growing season and (iv, v) T_{RDC40} and T_{RDC20} , irrigated at 100 % ET_C during all year except during stage IV, when 40 and 20 % ET_C was supplied, respectively.

The most significant mechanisms of adult almond trees under both water and salt stresses (Experiment 1) were: (i) a decrease in predawn leaf water potential, which allows the plant to preserve a water potential gradient between soil and leaves in order to maintain root water uptake; (ii) an early stomatal regulation, evidenced since the first hours of the day, that maximizes CO_2 assimilation efficiency with respect to water losses; (iii) osmotic adjustment which took place during most of the growing season, and allowed the plant to maintain cell turgor and thus compensating leaf water potential decline; and (iv) leaf area index (LAI) decrease, which supposed an additional contribution to maintain cell turgor, since it reduces shoot/root ratio and therefore the transpiration rate for a similar evaporative demand.

With respect to the productive response, both control and regulated deficit irrigation (RDI) treatments showed higher values than expected taking into account the salinity level of irrigation water. On the other hand, RDI treatment, which saved 50 % of the irrigation water volume, presented similar yield to control treatment. These results evidence a good degree of adaptation of this autochthon variety to both water and salt stresses, leading to a more efficient use of soil available water.

From the results of Experiments 2 and 3, vegetative growth indicators were the most sensitive to water stress, in particular trunk diameter. Trees growing under the most severe water stress conditions (T_{RD60} and T_{RDC40}) were

the most affected in terms of tree growth, particularly those trees that suffered water restriction since the beginning of the plantation. The analysis of the productive response showed no significant changes between water restricted and control treatments, except for T_{RD60} which presented lower yield values than control treatment in the third year of study. The general tree growth decrease observed in water-restricted young almond trees when compared to fully irrigated trees lead to smaller tree crowns, and is likely to reduce the number of fruit positions and thus crop load once the trees reach the productive period. Consequently, it results highly convenient to establish irrigation scheduling criteria aimed to allow young trees to reach the productive period as fast as possible.

Among all the tree water status indicators considered in this study, maximum daily shrinkage (MDS) presented the best correlation with predawn leaf water potential (Ψ_a) and midday stem water potential (Ψ_s), indicators traditionally considered as reference in this kind of studies. A similar result was found when analyzing the correlations with crop reference evapotranspiration (ET_o) and vapour pressure deficit (VPD). In addition, we obtained a close relationship between MDS and VPD on both seasonal and monthly basis, which allowed establishing reference baselines that might be used for irrigation scheduling. These results, joined to the reliability of this indicator to detect soil moisture changes as well as the possibility of continuously monitoring tree water status, makes MDS a pertinent and useful plant state variable to be used in almond irrigation scheduling, provided reference baselines are available.

Índice

1. Justificación y objetivos	1
2. Antecedentes.....	7
2.1. El cultivo del almendro	9
2.2. Estrategias de riego para optimizar el uso del agua.....	10
2.3. Programación del riego.....	13
2.3.1. Cálculo de las necesidades hídricas del cultivo.....	14
2.3.1.1. Métodos climáticos.....	14
2.3.1.2. Métodos basados en el estado hídrico del suelo	18
2.3.1.3. Métodos basados en el estado hídrico de la planta	25
3. Métodos y técnicas utilizadas.....	31
3.1. Introducción.....	33
3.2. Medida de las variables climáticas	33
3.3. Medida del estado hídrico del suelo.....	39
3.4. Medida del estado hídrico de la planta.....	40
4. Respuesta agronómica y fisiológica de almendros jóvenes al riego deficitario	47
4.1. Introducción.....	49
4.2. Material y métodos	49
4.3. Resultados y discusión	57
4.4. Conclusiones	85
5. Relaciones hídricas y producción de almendros regados con agua salina.....	87
5.1. Introducción.....	89

5.2. Materiales y métodos.....	89
5.3. Resultados y discusión	95
5.3.1. Relaciones hídricas	95
5.3.2. Contenido mineral en hoja	115
5.3.3. Crecimiento vegetativo.....	122
5.3.4. Producción y componentes	128
5.4. Conclusiones.....	131
6. Estudio de la sensibilidad de indicadores biológicos en la caracterización del estado hídrico del árbol.....	135
6.1. Introducción	137
6.2. Materiales y métodos.....	138
6.3. Almendros jóvenes no productivos	141
6.3.1. Tratamientos de riego.....	141
6.3.2. Resultado y discusión	141
6.3.3. Conclusiones.....	147
6.4. Almendros jóvenes al inicio de su entrada en producción.....	148
6.4.1. Tratamientos de riego.....	148
6.4.2. Resultados y discusión.....	148
6.4.3. Conclusiones.....	165
7. Bibliografía	167

Índice de figuras

Figura 2.1. Disposición de tubos de acceso para realización de balance hídrico (izquierda) y componentes del balance hídrico y de energía en riego localizado (adaptado de Fereres <i>et al.</i> , 1981b) (derecha).....	18
Figura 3.1. Estación climática automática de la ESEA ‘Tomás Ferro’ y disposición de los distintos sensores.....	33
Figura 3.2. Sensor de humedad relativa, modelo HUMICAP 180.	34
Figura 3.3. Sensor de radiación global.....	36
Figura 3.4. Sensor de radiación neta.....	36
Figura 3.5. Pluviómetro con sensor FSS500 colocado a 1.5 m del suelo.	37
Figura 3.6. Sensor de velocidad y dirección de viento.....	37
Figura 3.7. Sistema de gestión de datos.....	38
Figura 3.8. Batería de tensiómetros y sensor Watermark con medidor digital.....	39
Figura 3.9. a) Equipo TDR y sondas instaladas en suelo, b) sensores FDR sobre guía y c) sensores FDR instalados en campo.	40
Figura 3.10. Cámara de presión.	41
Figura 3.11. a) Elección de las hojas, b) colocación de plástico negro y c) envoltura con papel de aluminio.....	42
Figura 3.12. Osmómetro ROEBLING mod. 13DR.....	43
Figura 3.13. Porómetro LICOR LI-1600.....	43
Figura 3.14. Sensor LVDT y portasensor en tronco.....	44
Figura 3.15. Representación gráfica de la máxima contracción diaria (MCD) y tasa de crecimiento diaria de tronco (TCD) a partir de la variación del diámetro de tronco (VDT) en almendros.....	45
Figura 3.16. Equipos MicroIsis en parcela experimental.....	45
Figura 4.1. Plano de localización de la parcela experimental	50

Figura 4.2. Vista general de la parcela experimental de almendros (ETSIA-UPCT)	50
Figura 4.3. Vista aérea de la Estación Experimental Agroalimentaria (ESEA) ‘Tomás Ferro’	51
Figura 4.4. Tasas de evapotranspiración de referencia, precipitación y riego mensual aplicado al tratamiento control durante el período 2001-2004.	52
Figura 4.5. Porcentaje de la ET _c aplicado en cada tratamiento de riego y período fenológico del cultivo.	53
Figura 4.6. Detalle del método de la recogida de raíces. ‘Trinchera’	54
Figura 4.7. Detalle del punto de medida del tronco	55
Figura 4.8. Recogida de hojas al final de la estación.....	56
Figura 4.9. Relación peso fresco <i>vs</i> peso seco de los restos de poda, para los cinco tratamientos de riego T _{CTL} (•), T _{RD80} (▲), T _{RD60} (△), T _{RDC40} (◻) y T _{RDC20} (◊) en 2003.....	56
Figura 4.10. Secado al aire de la cosecha individualmente.....	57
Figura 4.11. Evolución del potencial matricial (Ψ_m) en los 5 tratamientos de riego: T _{CTL} (—●—), T _{RD80} (—▲—), T _{RD60} (—△—), T _{RDC40} (—◊—) y T _{RDC20} (—■—), durante el 2002, a 30, 60 y 90 cm de profundidad. * ¹ y * ² indican el cambio de riego en los tratamientos T _{RDC40} y T _{RDC20} al 40 % y 20 % de la ET _c respectivamente; * indica la restitución del riego al 100 %.	58
Figura 4.12. Evolución del contenido de humedad volumétrica relativa al valor máximo obtenido tras una lluvia de 80 mm, en 4 tratamientos de riego y para 6 profundidades diferentes. Julio de 2002.....	60
Figura 4.13. Evolución estacional de potencial hídrico al alba (Ψ_a), potencial de presión (Ψ_p) y potencial osmótico saturado (Ψ_{OS}) de los tratamientos de riego ensayados: T _{CTL} (—●—), T _{RD80} (—▲—), T _{RD60} (—△—), T _{RDC40} (—◊—) y T _{RDC20} (—■—) durante 2002 (a) y 2003 (b). Cada punto corresponde a la media de 3 repeticiones \pm ES. La línea de puntos delimita el período de aplicación del RDC. Las barras indican los valores del déficit de presión de vapor máximo diario (DPV).....	62

Figura 4.14. Evolución diaria de la radiación fotosintéticamente activa (RFA $\text{---}\bullet\text{---}$), potencial hídrico de tallo (Ψ_t) y conductancia foliar (g_l) en los distintos tratamientos de riego: T_{CTL} ($\text{---}\bullet\text{---}$), T_{RD80} ($\text{---}\blacktriangle\text{---}$), T_{RD60} ($\text{---}\blacktriangle\text{---}$), T_{RDC40} ($\text{---}\bullet\text{---}$) y T_{RDC20} ($\text{---}\blacksquare\text{---}$). (a) septiembre de 2002 y (b) agosto de 2003. Cada punto corresponde a la media de tres repeticiones \pm ES..... 64

Figura 4.15. a) Relación entre el potencial hídrico foliar antes del alba (Ψ_a) y la humedad volumétrica en el perfil de suelo 0-90 cm (θ_v) ($\Psi_a = -27.01 \theta_v^{-1.022}$; ($R^2 = 0.77$) $P < 0.05$). b) Relación entre el potencial de tallo a mediodía (Ψ_t) y la humedad volumétrica en el perfil de suelo 0-90 cm (θ_v) ($\Psi_t = -49.76 \theta_v^{-0.977}$; ($R^2 = 0.74$) $P < 0.001$). Para los tratamientos de riego, T_{CTL} (\bullet), T_{RD80} (\blacktriangle) y T_{RDC20} (\blacksquare)..... 65

Figura 4.16. Distribución de la densidad de longitud de raíces (DLR, cm de raíz cm^{-3} de suelo) en el tratamiento control, para la profundidad y distancia perpendicular a la línea portagoteros de 0 a 110 cm. Las figuras a y b corresponden a raíces menores de 1 mm de diámetro y c y d, a mayores de 1 mm, en 2002 y 2003, respectivamente..... 67

Figura 4.17. Distribución de la densidad de peso seco del total de raíces (mg de raíz cm^{-3} de suelo) en el tratamiento control, para la profundidad y distancia perpendicular a la línea portagoteros de 0 a 110 cm, en 2002 (a) y 2003 (b)..... 67

Figura 4.18. Dinámica de crecimiento en longitud de los brotes del tratamiento control. Cada punto corresponde a la media de 3 repeticiones \pm ES..... 68

Figura 4.19. Dinámica de crecimiento en longitud de los brotes en los 5 tratamientos de riego: T_{CTL} ($\text{---}\bullet\text{---}$), T_{RD80} ($\text{---}\blacktriangle\text{---}$), T_{RD60} ($\text{---}\blacktriangle\text{---}$), T_{RDC40} ($\text{---}\bullet\text{---}$) y T_{RDC20} ($\text{---}\blacksquare\text{---}$). Cada punto corresponde a la media de 3 repeticiones \pm ES. La línea vertical de puntos indica el período de aplicación del déficit en los tratamientos T_{RDC40} y T_{RDC20} 69

Figura 4.20. Evolución del diámetro de tronco en los 5 tratamientos de riego durante el periodo experimental. T_{CTL} (---), T_{RD80} (---), T_{RD60} (---), T_{RDC40} (---) y T_{RDC20} (---). Las líneas verticales de puntos indican los períodos de aplicación del déficit en los tratamientos T_{RDC40} y T_{RDC20} 70

Figura 4.21. Relaciones entre el incremento de diámetro de tronco y la integral de estrés. $\Delta DT = -0.16 S_{\Psi_{\text{tallo}}} + 0.96$, $R^2 = 0.96$, en 2002

(●); $\Delta DT = -0.01 S_{\Psi_{\text{tallo}}} + 19.8$, $R^2 = 0.83$, en 2003 (○) y $\Delta DT = -0.246 S_{\Psi_{\text{alba}}} + 31.57$, $R^2 = 0.92$, en 2002 (●) y $\Delta DT = -0.313 S_{\Psi_{\text{alba}}} + 17.88$, $R^2 = 0.83$, en 2003 (○). $S_{\Psi_{\text{tallo}}}$ corresponde al periodo días 140-270 y $S_{\Psi_{\text{alba}}}$ al periodo 190-270.....72

Figura 4.22. Porcentaje de superficie sombreada durante el periodo experimental, en los cinco tratamientos de riego: T_{CTL} (■), T_{RD80} (■), T_{RD60} (■), T_{RDC40} (■) y T_{RDC20} (■). Columnas del mismo año seguidas de letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según el test de Tukey_{0.05}.....73

Figura 4.23. (a) Relación entre el área foliar (AF) y la dotación de agua de riego (R) durante el periodo 2001-2003 ($AF = 6.89R - 1.58$; $R^2 = 0.91$; $P < 0.05$). T_{CTL} (●), T_{RD80} (▲), T_{RD60} (▲), T_{RDC40} (○) y T_{RDC20} (■). (b) Área foliar en función de la integral de estrés ($S_{\Psi_{\text{tallo}}}$) obtenida a partir de los valores de potencial de tallo a mediodía: $AF = 18.24 - 0.11 S_{\Psi_{\text{tallo}}}$ ($R^2 = 0.54$; $P < 0.05$); $AF = 34.81 - 0.16 S_{\Psi_{\text{tallo}}}$ ($R^2 = 0.601$; $P < 0.05$), en 2002 (●) y 2003 (○), para el periodo de días 140-270.74

Figura 4.24. Relación entre el porcentaje de área sombreada (SS) y el índice de área foliar (IAF) a partir de los 4 años de ensayo y para los 5 tratamientos de riego. T_{CTL} (●), T_{RD80} (▲), T_{RD60} (▲), T_{RDC40} (○) y T_{RDC20} (■). $SS = 26.5IAF + 5.74$; $R^2 = 0.98$ $P < 0.001$75

Figura 4.25. Peso seco de poda en los 5 tratamientos de riego: T_{CTL} (■), T_{RD80} (■), T_{RD60} (■), T_{RDC40} (■) y T_{RDC20} (■) durante el periodo experimental. Cada barra corresponde a la media de tres repeticiones \pm ES. Letras diferentes dentro del mismo año indican diferencias significativas entre tratamientos según el test de Tukey_{0.05}.....75

Figura 4.26. Relación entre el peso seco de poda (Ps) y el volumen de de riego anual año (R), durante el periodo 2002-2004 ($Ps = 0.002R + 2.07$ $R^2 = 0.87$ $P < 0.05$) Cada punto corresponde a la media de 30 árboles por tratamiento en cada año, T_{CTL} (●), T_{RD80} (▲), T_{RD60} (▲), T_{RDC40} (○) y T_{RDC20} (■).76

Figura 4.27. Evolución de los estados fenológicos de yemas de flor (A-I), bajo condiciones de adecuado suministro hídrico en 2002 (a) y 2003 (b). Las cajas horizontales indican el inicio y final de cada fase fenológica, y la línea vertical interior de cada caja indica el momento en el que el 50 % de las yemas han alcanzado dicho estado.....77

- Figura 4.28.** Evolución de los estados fenológicos de las yemas de flor en almendro ‘Marta’, durante los años 2002 y 2003, en los tratamientos ensayados: T_{CTL} (—●—), T_{RD80} (—▲—), T_{RD60} (—▲—), T_{RDC40} (—●—) y T_{RDC20} (—■—). Cada punto corresponde a la media de tres repeticiones \pm ES..... 78
- Figura 4.29.** Evolución del crecimiento longitudinal del pericarpio durante los años 2002 (—●—), 2003 (—○—) y 2004 (—△—) en el tratamiento control. Cada punto corresponde a la media de 3 repeticiones \pm ES. 79
- Figura 4.30.** Evolución del diámetro longitudinal (A), ecuatorial (B) y transversal (C) en T_{CTL} (—●—), T_{RD80} (—▲—), T_{RD60} (—▲—) y T_{RDC40} (—●—) durante el 2003. Cada punto corresponde a la media de 3 repeticiones \pm ES. 80
- Figura 4.31.** Evolución del peso seco del grano durante el 2003 en los cinco tratamientos de riego: T_{CTL} (—●—), T_{RD80} (—▲—), T_{RD60} (—▲—), T_{RDC40} (—●—) y T_{RDC20} (—■—). Cada punto corresponde a la media de 3 repeticiones \pm ES..... 81
- Figura 4.32.** Porcentaje respecto al total del crecimiento longitudinal (—●—) y peso seco (—○—) del fruto y longitud de brotes (—△—) en el tratamiento control. (a) 2002 y (b) 2003..... 81
- Figura 5.1.** Evolución mensual de la temperatura máxima, mínima y media, evapotranspiración de referencia y lluvia durante el periodo experimental, 1999-2003..... 90
- Figura 5.2.** Régimen de riego, en los distintos tratamientos, de acuerdo a las fases del ciclo anual de almendros ‘Colorada’..... 91
- Figura 5.3.** Vista aérea de la plantación comercial de almendros ‘La Corverica’. El recuadro en negro señala la parcela experimental en la que se realizó el ensayo, de acuerdo con la distribución de tratamientos indicada..... 92
- Figura 5.4.** Evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo relativo al control ($\theta_{VT}/\theta_{VTctl}$), para las profundidades de 0-30, 30-60, 60-90 y 90-120 cm. Los puntos representan el promedio de tres sondas de TDR situadas a 0.5 m (A, B, C, D) y 1 m (E, F, G, H) del emisor (T_{CTL} (—), T_{RDC} (—△—) y T_{SCO} (—○—)). Los asteriscos indican el período de riego al 30 % del T_{CTL} en T_{RDC} . 2000..... 99

Figura 5.5. Perfiles de salinidad (CE) y concentración de cloruros [Cl] en el extracto de saturación, a finales de agosto de 2000, en la zona húmeda (—●—) y frente húmedo (—○·) del círculo mojado por el emisor. La línea horizontal representa el ES medio del perfil.....101

Figura 5.6. Perfiles de salinidad (CE y [Cl] en el extracto de saturación del suelo) en la capa de 0 a 1.20 m de profundidad para el tratamiento T_{RDC} , antes (—●—) y después (—○·) de 160 mm de lluvia. Los valores corresponden al frente húmedo del volumen humectado.....102

Figura 5.7. Evolución estacional del potencial hídrico foliar al alba (Ψ_a) y a mediodía (Ψ_{md}) en 2000, para los tres tratamientos de riego: T_{CTL} (—●—), T_{RDC} (··△··) y T_{SCO} (—○·). Cada punto corresponde a la media de 3 repeticiones \pm ES. ↓ indica el cambio de riego en el tratamiento T_{RDC}103

Figura 5.8. Evolución estacional de la conductancia foliar (g_i) en el año 2000, en los 3 tratamientos de riego: T_{CTL} (—●—), T_{RDC} (··△··) y T_{SCO} (—○·). Cada punto corresponde a la media de 3 repeticiones \pm ES. ↓ indica el cambio de riego en el tratamiento T_{RDC}105

Figura 5.9. Evolución diaria de la radiación fotosintéticamente activa (RFA, —■—), déficit de presión de vapor (DPV, —□—), potencial hídrico (Ψ_l) y conductancia foliar (g_i) en los tres tratamientos de riego: T_{CTL} (—●—), T_{RDC} (··△··) y T_{SCO} (—○·), en 2001. Cada punto representa la media de tres repeticiones \pm ES. * indica la existencia de diferencias significativas entre T_{CTL} y T_{SCO} , y ** entre todas las posibles comparaciones pareadas.107

Figura 5.10. Evolución diaria de la radiación fotosintéticamente activa, RFA (—■—), déficit de presión de vapor, DPV, (—□—) potencial hídrico foliar (Ψ_l), de tallo (Ψ_t) y conductancia foliar (g_i), para los 3 tratamientos: T_{CTL} (—●—), T_{RDC} (··△··) y T_{SCO} (—○·), 19 julio 2000. Cada punto corresponde a la media de 3 repeticiones \pm ES.108

Figura 5.11. Relaciones entre el potencial hídrico foliar y el déficit de presión de vapor obtenidas en las tres evoluciones diarias de 2001, para los 3 tratamientos T_{CTL} (●), T_{RDC} (△) y T_{SCO} (○).110

Figura 5.12. Conductancia foliar a mediodía (g_i) en función del potencial hídrico foliar a mediodía (Ψ_{md}), durante julio de 2000 y 2001, en los tratamientos T_{CTL} (●), T_{RDC} (△) y T_{SCO} (○). Cada punto representa la

media de 3 medidas. La ecuación de la línea de ajuste viene dado por: $g_l \text{ (mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}) = 607.8 + 169.9 \Psi_{md} \text{ (MPa)}$; $R^2 = 0.83^{***}$ 111

Figura 5.13. Variación diaria de la relación conductancia foliar (g_l) y potencial hídrico foliar (Ψ_l) de almendros ‘Colorada’, en función del tratamientos de riego: T_{CTL} (—●—), T_{RDC} (··△··) y T_{SCO} (—○·). Cada punto es la media de tres medidas por árbol en seis árboles por tratamiento. Las flechas indican el sentido horario de la evolución de los parámetros.112

Figura 5.14. Evoluciones diarias del potencial hídrico foliar (—▲—) y de las componentes osmótica (—●—) y de presión (—○—) en mayo, julio y octubre de 2001, para los tres tratamientos de riego.....113

Figura 5.15. Detalle de necrosis en puntas de hojas por toxicidad de cloruros y sodio.....117

Figura 5.16. Efecto del régimen de riego sobre el contenido y evolución en hoja de cloruros, sodio y potasio a lo largo del ciclo de cultivo de 2001, para los tres tratamientos de riego: T_{CTL} (■), T_{RDC} (■) y T_{SCO} (■). Las barras representan ES.118

Figura 5.17. Dinámica del crecimiento de brotes en longitud y tasa de crecimiento relativa en 2000 y 2001, para los tres tratamientos T_{CTL} (—●—), T_{RDC} (··△··) y T_{SCO} (—○·). Cada punto corresponde a la media de 3 repeticiones \pm ES.....122

Figura 5.18. Evolución del diámetro de brotes y tasa de crecimiento relativa durante el 2001, para los tres tratamientos T_{CTL} (—●—), T_{RDC} (··△··) y T_{SCO} (—○·). Cada punto corresponde a la media de 3 repeticiones \pm ES.....123

Figura 5.19. Diámetro de tronco al final de las campañas 1999 y 2001, para los tratamientos T_{CTL} (■), T_{RDC} (■) y T_{SCO} (■). Cada punto corresponde a la media de 3 repeticiones \pm ES.....124

Figura 5.20. Evolución del diámetro longitudinal y ecuatorial de los frutos y en peso seco del grano, para los tres tratamientos T_{CTL} (—●—), T_{RDC} (··△··) y T_{SCO} (—○·), durante los años 2000 (a) y 2001 (b). Cada punto corresponde a la media de 3 repeticiones \pm ES.....127

Figura 6.1. Vista general y evolución de la parcela experimental de almendros (ETSIA-UPCT) durante el periodo de estudio.....139

Figura 6.2. Valores diarios de temperatura máxima y mínima, pluviométrica, evapotranspiración de referencia Penman Monteith, máximo déficit de presión de vapor en la parcela experimental durante 2002-2004.....140

Figura 6.3. Evolución del potencial hídrico foliar al alba (Ψ_a), mediodía (Ψ_{md}), tallo (Ψ_t) y conductancia foliar (g_l) en los tres tratamientos de riego, T_{CTL} (—●—), T_{RDC60} (—△—) y T_{RDC40} (—□—). Los puntos corresponden a la media de tres repeticiones \pm ES. Los asteriscos indican el comienzo y final del periodo al 40 % de la ETc en T_{RDC40} . 142

Figura 6.4. Fluctuaciones medias del diámetro de tronco durante la estación de crecimiento para los tres tratamientos de riego: T_{CTL} (—), T_{RD60} (—) y T_{RDC40} (— -). Cada mes está caracterizado por un periodo de seis días. Las columnas numéricas representan la media mensual de crecimiento diario para los diferentes tratamientos. Los valores seguidos de letras distintas son estadísticamente diferentes según el test de Tukey_{0.05}.144

Figura 6.5. Evolución relativa de los parámetros: Potencial hídrico foliar al alba, mediodía y tallo a mediodía, Ψ_a y Ψ_{md} , Ψ_t (T_n/T_{CTL}), conductancia foliar, g_l (T_{CTL}/T_n), máxima contracción diaria, MCD (T_n/T_{CTL}) y crecimiento diario a partir de los máximos diámetros, TCD (T_{CTL}/T_n). Los asteriscos indican el inicio y final del periodo al 40 % de la ETc en T_{RDC40}145

Figura 6.6. Evolución anual del diámetro de tronco en los distintos tratamientos de riego, T_{CTL} (—), T_{RD60} (—) y T_{RDC40} (— -).....146

Figura 6.7.- Evolución de la máxima contracción diaria para los diferentes tratamientos de riego, T_{CTL} (—), T_{RD60} (—) y T_{RDC40} (— -).....146

Figura 6.8.- Relaciones del potencial de tallo a mediodía (Ψ_t) y máxima contracción diaria (MCD) y la evapotranspiración de referencia Penman Monteith (ETo) para el tratamiento control. $\Psi_t = -0.091 ETo - 0.35$ ($R^2 = 0.827$, $P < 0.05$); $MCD_{TCTL} = 25.2 + 22.7 ETo$ ($R^2 = 0.479$, $P < 0.05$).147

Figura 6.9. Evolución estacional del potencial de tallo (Ψ_t) y conductancia foliar a mediodía (g_l), en los cuatro tratamientos de riego T_{CTL} (—●—), T_{RD80} (—▲—), T_{RD60} (—△—) y T_{RDC20} (—○—). Cada punto corresponde a la media de 3 repeticiones \pm ES. Las

líneas de trazo discontinuo indican el inicio y fin del periodo de riego al 20 % ETc en T_{RDC20} , y las de puntos la semana de recuperación al 120 % de la ETc en todos los tratamientos. 149

Figura 6.10. Evolución de las variaciones de diámetro de tronco (VDT), radiación global (G), déficit de presión de vapor (DPV) y potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_d) en los cuatro tratamientos de riego T_{CTL} (—●—), T_{RD80} (—▲—), T_{RD60} (—△—) y T_{RDC20} (—○—) y en un tronco muerto (), durante el día 224. 151

Figura 6.11. Relación a lo largo de una jornada (día 224) entre el potencial hídrico de tallo y las variaciones de diámetro de tronco, para los tratamientos de riego T_{CTL} (—●—), T_{RD60} (—△—) y T_{RDC20} (—○—). Las flechas indican el sentido horario de la relación entre ambos parámetros. 153

Figura 6.12. Evolución estacional del diámetro máximo (MXTD) y de la tasa de crecimiento diaria de tronco (TCD), en los tratamientos T_{CTL} (—●—), T_{RD80} (—▲—), T_{RD60} (—△—) y T_{RDC20} (—○—). Cada punto corresponde a la media de 6 sensores LVDT \pm ES. La línea de trazo discontinuo indica el inicio y fin del periodo al 20 % ETc en T_{RDC20} , y la de puntos la semana de riego al 120 % de la ETc en todos los tratamientos. 154

Figura 6.13. Evolución estacional de la máxima contracción diaria (MCD) y déficit de presión de vapor máximo diario (DPV) (a) y máxima contracción diaria quincenal, en T_{CTL} (—●— ; ■■■), T_{RD80} (—▲— , ■■■), T_{RD60} (—△— , ■■■) y T_{RDC20} (—○— , ■■■) (b). Cada punto corresponde a la media de 6 sensores LVDT \pm ES. La línea de trazo discontinuo indica el inicio y fin del periodo al 20 % ETc en T_{RDC20} , y la de puntos la semana de riego al 120 % de la ETc. 155

Figura 6.14. Evolución anual de las variaciones de diámetro de tronco (VDT), en los cuatro tratamientos de riego. Cada curva corresponde a un sensor LVDT representativo de cada tratamiento, T_{CTL} (), T_{RD80} (), T_{RD60} () y T_{RDC20} (). La línea discontinua muestra el inicio y final del periodo de reducción del riego en T_{RDC20} 157

Figura 6.15. Relaciones entre TCD y MCD y el potencial hídrico foliar al alba (Ψ_a) y el de tallo a mediodía (Ψ_d), durante el periodo

experimental., para los 4 tratamientos de riego: T_{CTL} (●), T_{RD80} (▲), T_{RD60} (▽) y T_{RDC20} (○).....158

Figura 6.16. Relaciones entre MCD y el potencial de presión a mediodía: (a) hojas cubiertas (Ψ_{pv}) y (b) sin cubrir (Ψ_p), durante el periodo experimental y para los 4 tratamientos de riego T_{CTL} (●), T_{RD80} (▲), T_{RD60} (▽) y T_{RDC20} (○).....160

Figura 6.17. Relación entre la evapotranspiración de referencia Penman Monteith (ETo PM) y la máxima contracción diaria de tronco (MCD) durante el periodo experimental, para los 4 tratamientos de riego, T_{CTL} (●), T_{RD80} (▲), T_{RD60} (▽) y T_{RDC20} (○).....161

Figura 6.18. Relación entre la máxima contracción diaria de tronco (MCD) y el potencial de tallo a mediodía (Ψ_t) durante el periodo experimental, para los 4 tratamientos de riego, T_{CTL} (●), T_{RD80} (▲), T_{RD60} (▽) y T_{RDC20} (○).....161

Figura 6.19. Relaciones entre el déficit de presión de vapor máximo diario (DPV) y el potencial de tallo a mediodía (Ψ_t) (a) y la máxima contracción diaria (MCD) (b) para los distintos tratamientos de riego, T_{CTL} (●), T_{RD80} (▲), T_{RD60} (▽) y T_{RDC20} (○).....162

Figura 6.20. Relaciones mensuales entre la máxima contracción diaria de tronco (MCD) y el déficit de vapor máximo diario (DPV) para los tratamientos de riego T_{CTL} (●) y T_{RD80} (▲).164

Índice de tablas

Tabla 3.1. Características de los sensores utilizados.	38
Tabla 4.1. Volúmenes de agua aplicados durante el período experimental ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) y porcentaje respecto al control, para los 5 tratamientos de riego.....	52
Tabla 4.2. Valores medios prerriego de Ψ_m en tres momentos característicos de 2002, según la estrategia de riego y para los 5 tratamientos, a 30, 60 y 90 cm de profundidad.....	59
Tabla 4.3. Incremento anual de la sección transversal del tronco (ΔSTT) y pendiente media de crecimiento (m) durante el periodo abril-octubre.....	71
Tabla 4.4. Evolución del número de hojas y área foliar (AF) del árbol en los cinco tratamientos de riego. Período 2001 – 2003.	74
Tabla 4.5. Periodos de predominio y $^{\circ}\text{C}$ GDH acumulados en los distintos estados fenológicos del almendro ‘Marta’, bajo condiciones de adecuado suministro hídrico.....	77
Tabla 4.6. Valores medios de los parámetros productivos para los distintos tratamientos durante el periodo experimental 2002-2004.....	82
Tabla 4.7. Valores medios del peso seco del grano en los cinco tratamientos de riego durante el período 2002-2004. Cada valor representa la media de 12 árboles por tratamiento.....	83
Tabla 4.8. Índices de eficiencia productiva y de uso del agua de riego (EUA) de almendros ‘Marta’ durante el período experimental.	85
Tabla 5.1. Agua aplicada, lluvia y valores medios de potencial matricial previos al riego, durante los tres períodos de T_{RDC} en 2000.	97
Tabla 5.2. Valores de los componentes del potencial hídrico foliar en diferentes fechas y para los tres tratamientos de riego: potencial osmótico a máxima saturación (Ψ_{os}), potenciales osmótico y de presión actual a mediodía (Ψ_{omd}) y (Ψ_{pmd}). 2001.....	114
Tabla 5.3. Resultados del análisis foliar en los tratamientos: T_{CTL} , T_{RDC} y T_{SCO}	116

Tabla 5.4. Concentración de cloruro en hojas y brotes del año en base a materia seca. Julio de 2000.....	119
Tabla 5.5. Contribución de los solutos Na^+ , K^+ y Cl^- en MPa al potencial osmótico foliar a saturación (Ψ_{os}), en tres momentos representativos del manejo del riego en RDC. 2001	121
Tabla 5.6. Valores medios del área foliar unitaria y total del árbol, peso específico e índice de área foliar (IAF) de los 3 tratamientos, de acuerdo al total de hojas presentes en el árbol tras la cosecha de 2000.....	125
Tabla 5.7. Producción total y rendimiento en grano y aparente del agua (EUA, kg de almendra cáscara por m^3 de agua de riego más lluvia) ...	129
Tabla 5.8. Componentes de la producción durante el período experimental 1999-2002.....	130
Tabla 6.1. Valores medios del ratio ‘Señal/Ruido’ para los diferentes índices de estrés evaluados. Junio – mediados de septiembre de 2003.....	156
Tabla 6.2 Valores de los parámetros de las relaciones máxima contracción diaria (MDC, μm) y crecimiento diario de tronco (TCD, $\mu\text{m día}^{-1}$) versus potencial hídrico foliar al alba (Ψ_a), de tallo a mediodía (Ψ_l) y de presión en hojas expuestas y cubiertas (Ψ_p , Ψ_{pt}), en MPa.....	159
Tabla 6.3. Relaciones estacionales entre la máxima contracción diaria (MDC, μm) y el potencial tallo (Ψ_v , MPa), para los cuatro tratamientos de riego.	163
Tabla 6.4. Relaciones entre el potencial de tallo (Ψ_v , MPa) y la máxima contracción diaria (MDC, μm) frente al déficit de presión de vapor máximo a mediodía (DPV, kPa), para los cuatro tratamientos de riego.....	163

Lista de símbolos y acrónimos

Símbolos latinos	Descripción	Unidades
C	Capacitancia	F
CE_c	Conductividad eléctrica del extracto de saturación	dS m ⁻¹
e_a	Tensión de vapor actual	kPa
e_s	Tensión de vapor saturante	kPa
F	Frecuencia	Hz
G	Densidad de flujo de calor del suelo	MJ m ⁻² día ⁻¹
g_l	Conductancia foliar	mmol m ⁻² s ⁻¹
H	Flujo de calor sensible	MJ m ⁻² día ⁻¹
k_a	Constante dieléctrica	
K_c	Coefficiente de cultivo	
K_r	Coefficiente de riego	
L	Coefficiente de autoinducción	
P	Precipitación	mm
P_F	Peso fresco	g
P_s	Peso seco	g
R	Riego	mm
R_n	Radiación neta	W m ⁻²
T	Temperatura	°C
u	Velocidad del viento	m s ⁻¹
Símbolos griegos	Descripción	Unidades
Δ	Pendiente de la curva de presión de vapor	kPa °C ⁻¹
γ	Constante psicrométrica	kPa °C ⁻¹
Ψ	Potencial hídrico foliar	MPa
Ψ_a	Potencial hídrico foliar al alba	MPa
Ψ_g	Potencial gravitacional	MPa
Ψ_H	Potencial hidráulico	MPa
Ψ_m	Potencial mátrico	MPa
Ψ_{md}	Potencial hídrico foliar a mediodía	MPa
Ψ_o	Potencial osmótico foliar	MPa
Ψ_{os}	Potencial osmótico saturado	MPa
Ψ_p	Potencial de presión	MPa
Ψ_t	Potencial hídrico de hoja cubierta	MPa

\varnothing_e	Diámetro ecuatorial	mm
\varnothing_L	Diámetro longitudinal	mm
\varnothing_t	Diámetro transversal	mm
θ_g	Contenido gravimétrico de agua del suelo	%
θ_v	Contenido volumétrico de agua del suelo	%
S_Ψ	Integral de estrés	MPa día

Acrónimo	Descripción	Unidades
ABA	Ácido abscísico	
AF	Área foliar	m ²
CA	Crecimiento acumulado	μm
Cc	Capacidad de capo	%
CWSI	Crop water stress index	%
DLR	Densidad de longitud radicular	cm cm ⁻³
DPR	Densidad de peso radicular	g cm ⁻³
DPV	Déficit de presión de vapor	kPa
ES	Error estándar	
ESEA	Estación Experimental Agroalimentaria 'Tomás Ferro'	
ETc	Evapotranspiración del cultivo	mm día ⁻¹
ETo	Evapotranspiración de referencia	mm día ⁻¹
EUA	Eficiencia de uso del agua	kg m ⁻³
FAO	Food and Agriculture Organization	
FDR	Reflectometría en dominio de la frecuencia	
GDH	Hora grado de crecimiento	
HR	Humedad relativa	%
IAF	Índice de área foliar	m ² m ⁻²
LVDT	Linear variable differential transformer	
MCD	Máxima contracción diaria	μm
MCD _{ref}	Máxima contracción diaria de referencia	μm
ms	Materia seca	mg
PRD	Riego por desecación parcial del sistema radicular	
RD	Riego deficitario	
RDC	Riego deficitario controlado	
RFA	Radiación fotosintéticamente activa	W m ⁻²
RTD	Resistance temperature detector	
SS	Superficie sombrada	%
TCD	Tasa de crecimiento diario	μm día ⁻¹

TDR	Reflectometría en dominio del tiempo	
T_{mh}	Temperatura media horaria	°C
T_s	Temperatura seca	°C
UT	Universal time	
VDT	Variación de diámetro de tronco	
ΔDT	Incremento anual de diámetro de tronco	mm
ΔSTT	Área de sección transversal de tronco	cm ²

Justificación y objetivos

Las limitaciones de agua para el regadío, en las zonas del sudeste español, alcanzan dimensiones preocupantes y suponen una amenaza seria de desaparición de cultivos tradicionales y de movimiento de personas que optan por otras actividades. Esta situación ha generado un interés y preocupación creciente por el ahorro de agua, en especial en la agricultura de regadío, principal destinatario de los recursos hídricos ($\approx 80\%$) y donde las eficiencias medias de uso del agua aún se sitúan en valores bajos. La racionalización en el uso del agua es un objetivo prioritario y de plena actualidad para nuestra sociedad y es fuente de debate en diferentes esferas del ámbito social, político y económico.

El sector frutícola no es ajeno a esta problemática y por tanto debe hacer frente a la creciente disminución de un recurso limitado como es el agua, manteniendo e incluso incrementando la rentabilidad de sus explotaciones, mediante la reducción de costes y el aumento de la calidad de sus productos.

El almendro, con más de 640000 ha, ocupa tras el olivo y el viñedo el tercer lugar en superficie dedicada a cultivos leñosos en España (<http://faostat.fao.org>). Murcia es una de las regiones en la que tradicionalmente se ha cultivado y producido almendra, alcanzando en la actualidad una extensión que supera las 74000 ha, representando el 11 % de la superficie total nacional y de las que se obtiene unas 30400 t de almendra en cáscara (www.carm.es/econet). Sin embargo, su importante presencia no va asociada a la necesaria rentabilidad de las plantaciones. Su característica situación marginal, debida en parte a su inherente carácter rústico, le ha convertido en un prototipo de cultivo leñoso extensivo al que se le dedican pocos cuidados.

En la Región de Murcia, la mayor parte de las plantaciones se encuentran en secano, y la cosecha de almendra en grano, como promedio, es inferior a 150 kg ha^{-1} , producción que está muy por debajo de la que se considera como necesaria para cubrir los costes que ocasiona una hectárea en una explotación de secano mínimamente atendida (Felipe, 2000). Sin embargo, la repercusión productiva que el agua tiene sobre estas plantaciones es muy importante, con un ratio medio de 1/10 favorable a las condiciones de regadío (Girona y Marsal, 1995). Esta realidad, junto con los altos precios de la almendra en las últimas campañas ha animado a muchos agricultores a la puesta en riego por goteo de sus plantaciones de almendro, en ocasiones, a costa de reducir la superficie en regadío dedicada a otros cultivos. Además, la demostrada tolerancia del almendro al déficit hídrico durante la fase de llenado del grano (fase IV), que coincide con los meses de mayor demanda evaporativa (junio-agosto) y cuando bajo nuestras condiciones de clima mediterráneo la escasez de recursos hídricos se acentúa, hacen del almendro

un cultivo idóneo para su utilización en estrategias de riego deficitario controlado (RDC), práctica que puede contribuir a la necesaria sostenibilidad de este sistema agrario.

La generalidad de los trabajos que ponen de manifiesto la buena adaptación del almendro a estrategias de RDC (Goldhamer y Shackel, 1989; Torrecillas *et al.*, 1989a; Girona y Marsal, 1995; Romero *et al.*, 2004a; Girona *et al.*, 2005; Goldhamer *et al.*, 2006) se han realizado con aguas de buena calidad. Sin embargo, en la agricultura de regadío del sudeste español, es frecuente que al problema de la escasez de recursos hídricos vaya unido el de la baja calidad agronómica de sus aguas. Bajo este segundo escenario son escasos los estudios que abordan el efecto combinado del riego con agua salina y la reducción de los aportes hídricos sobre el crecimiento y producción del almendro. Igualmente, y para el caso de almendros jóvenes, son pocos los estudios que versan sobre las relaciones hídricas, crecimiento y desarrollo del árbol bajo estrés hídrico ligero-moderado de larga duración, estudiando la mayoría de ellos la respuesta del almendro a estreses severos de corta duración a partir de ciclos de supresión del riego.

El conocimiento de cada uno de estos tipos de respuesta de la planta a las condiciones del entorno es clave con fines de programación y optimización del riego. Comúnmente, se han utilizado medidas basadas en el suelo o en el clima para la programación y manejo del riego, y aunque ambos métodos presentan la ventaja de la facilidad en la toma de medidas, tienen la limitación de no reflejar con exactitud el estado hídrico de la planta. Además, las medidas en el suelo muestran una gran variabilidad, la que se agrava bajo riego por goteo debido al carácter tridimensional de distribución del agua. Por ello, recientemente se está prestando mucha atención a las técnicas de medida del estado hídrico de la planta, al integrar ésta la influencia del entorno (clima y suelo) y método de riego.

Uno de los indicadores tradicionales del estado energético del agua en la planta es el potencial hídrico foliar y las medidas más útiles con fines de diagnóstico las realizadas al alba y a mediodía, éstas últimas en hojas cubiertas. Distintos autores, trabajando con especies leñosas, han señalado la alta sensibilidad de ambos parámetros al régimen de riego y su relación con la respuesta productiva, sugiriendo su uso como indicadores de referencia en estudios tendentes a evaluar la idoneidad de nuevos indicadores de estrés hídrico de la planta. Aunque el método más práctico para la medida del potencial hídrico foliar es la cámara de presión, presenta el inconveniente de la laboriosidad de las medidas y el no estar adaptado para el registro de datos en continuo y por tanto para la automatización del riego. Sin embargo, el continuo avance en las técnicas de medida e informática, está abriendo grandes posibilidades de futuro a nuevas técnicas de programación en base a

la información continua y en tiempo real suministrada por sensores colocados en planta.

En relación a este último aspecto, es de destacar que en los últimos años se están llevando a cabo importantes investigaciones tendentes al establecimiento de protocolos de programación del riego, en base a distintos parámetros derivados de la medida de las variaciones continuas de diámetro de tronco, mediante el uso de sensores de desplazamiento variable y respuesta lineal. Un gran número de ensayos en distintas especies arbóreas han confirmado la sensibilidad de éstos a la disponibilidad de agua en el suelo cuando son sometidas a diferentes regímenes hídricos (Ginestar y Castel, 1996; Goldhamer y Fereres, 2001; Fereres y Goldhamer, 2003; Remorini y Massai, 2003; Intrigliolo y Castel, 2004; Moreno *et al.*, 2006; García-Orellana *et al.*, 2007; Vélez *et al.*, 2007), y plantean su uso como indicadores de riego. Sin embargo, la aplicación práctica no es sencilla, ya que sus valores son muy específicos de la especie, edad y estado fenológico, por lo que implica la necesidad de una experimentación previa para buscar los valores de referencia antes de poder aplicarlos en protocolos de programación del riego.

Con la situación descrita anteriormente, las perspectivas de futuro del cultivo del almendro, y por tanto, de continuidad del sector, pasan por incrementar su rentabilidad y competitividad en un escenario de suministro hídrico limitado. Para hacer frente a la escasez de recursos hídricos y maximizar la productividad del agua y otros insumos, el riego deficitario es visto como una herramienta de manejo del riego muy útil y prometedora. Sin embargo, su estado actual requiere de investigaciones adicionales que conduzcan a un manejo óptimo del déficit hídrico a nivel explotación comercial. Para ello, será fundamental poder contar con indicadores de estrés hídrico robustos y sensibles a los cambios del estado hídrico de la planta o/y del suelo.

Por todo ello y con esta idea central, el objetivo global del presente trabajo fue evaluar desde un punto de vista fisiológico y agronómico la respuesta de almendros jóvenes y adultos a la aplicación de distintas estrategias de riego (capítulos IV y V), y estudiar la utilidad y aplicabilidad de indicadores de estrés hídrico en planta con fines de optimización del riego (capítulo VI).

Para la consecución de este objetivo global se plantearon los siguientes objetivos parciales:

- i) Analizar la respuesta fisiológica y agronómica de almendros jóvenes y adultos sometidos a diferentes estrategias de riego deficitario y compararla con la correspondiente a un tratamiento bien regado.

- ii) Evaluar el estado hídrico de almendros jóvenes, bajo diferentes regímenes hídricos, a través del registro de las variaciones de diámetro de tronco, usando sensores de desplazamiento variable y respuesta lineal, (LVDT, *Linear Variable Displacement Transducers*).
- iii) Estudiar la aplicabilidad y limitaciones de los indicadores biológicos del estado hídrico del árbol: máxima contracción diaria y crecimiento diario de tronco, a partir del estudio comparado entre éstos y los tradicionalmente empleados.
- iv) Caracterizar, mediante ecuaciones matemáticas, las relaciones entre aporte de agua y comportamiento hídrico del almendro y los parámetros ambientales que influyen en el mismo.

Antecedentes

2.1. El cultivo del almendro

Origen y medio ambiente

La especie cultivada en las zonas productoras de almendra es *Prunus dulcis* (Miller) D.A.Webb (Felipe, 2000). Pertenece a la familia de las Rosáceas, subfamilia Prunoidea. Su origen se sitúa en el proceso de hibridaciones naturales que ocurrieron en las regiones de Azerbaidjan y el Tien Shau en Asia Central a partir de sus tres ancestros salvajes: *Prunus fenzliana* Fritsh, *P. bucharica* Korschinsky y *P. ulmifolia* Franch (Vavilov, 1930; Evreinoff, 1952; Grasselly y Crossa-Raynaud, 1984).

El almendro puede cultivarse entre los 30° y 45° de latitud, abarcando climas templados, cálidos y subtropicales, con temperaturas medias anuales entre 8 y 15 °C y mínimos riesgos de heladas (López Ritas, 1972). Su adaptación a la sequía le permite sobrevivir en climas semiáridos donde las lluvias no superan los 150 mm anuales. Bajo estas condiciones y sin el complemento necesario de agua de riego no suele alcanzar producciones medianamente rentables (El-Sharkawi y El-Monayeri, 1976). Altitudes entre 200 y 400 m son las idóneas para obtener una buena respuesta del cultivo (Felipe, 1999).

El almendro posee una gran capacidad de adaptación edáfica, llegando a crecer en suelos pobres, secos y sin materia orgánica; siempre y cuando sean profundos y permeables (Felipe, 1999), e incluso con un elevado contenido de caliza (Rebour, 1971). El almendro es una especie xerofítica y rústica, adaptada a ecosistemas de reducido valor agrícola. Aunque se han observado diferencias de comportamiento entre variedades y patrones respecto a sequía e iluminación, éste es un cultivo típicamente mediterráneo, y por tanto, condicionado por este tipo de clima (Martin y Kester, 1978; Grasselly y Crossa-Raynaud, 1984).

Aspectos socio-económicos

El almendro es el cultivo leñoso más extendido en nuestro país después del olivo y la viña. La superficie cultivada en España es de 641600 ha, encontrándose tan sólo el 6 % en regadío (M.A.P.A., 2004), de ahí que sea considerado como uno de los cultivos más representativos de los sistemas leñosos de secano. La producción de almendra cáscara en 2003 fue de 214500 t (MAPA., 2004) lo que nos sitúa como segundo productor mundial (12.5 %) después de Estados Unidos (45 %). Sin embargo, España triplica a Estados Unidos en superficie dedicada. Este hecho se debe al carácter marginal del cultivo en España: baja intensificación y tecnificación, escasa

fertilidad de gran parte de los suelos, deficiente polinización, daños por heladas de primavera, etc.

El mercado de la Unión Europea es deficitario en almendra (Vargas, 1990), con un balance de mercancías netamente importador (> 105000 t almendra grano año⁻¹) y con tendencia creciente en los últimos años. El nivel de autoabastecimiento comunitario varía, entre el 50 y el 60 % según los años. El resto es suministrado casi en su totalidad por Estados Unidos (> 95 %). De ahí la necesidad de incrementar nuestras producciones para reducir la dependencia externa.

Además, es importante destacar el papel ecológico que desempeña esta especie en la conservación del medio, protegiendo al suelo de la erosión; y como no, el papel jugado en el asentamiento de la población rural. Por todo ello, existe una clara necesidad de incidir en actuaciones tendentes a su modernización, tales como: reducción del número de variedades, aumento de las densidades de plantación, aplicación del laboreo mínimo, mecanización de la recolección, transformación de secano a riego localizado, aplicación de técnicas racionales de fertirrigación y de protección del cultivo, utilización de patrones clonales híbridos (melocotonero x almendro), etc.

2.2. Estrategias de riego para optimizar el uso del agua

El desequilibrio entre una demanda hídrica en aumento y una oferta de recursos hídricos estable o en declive expresa el gran problema de la agricultura de regadío (Martín de Santa Olalla y De Juan Valero, 1993). Ante las limitaciones actuales para emprender acciones dirigidas al incremento lineal de los recursos, adquieren prioridad las orientadas al aumento de la eficiencia y del ahorro.

Dentro de esta línea de actuación se encuentra el denominado riego deficitario controlado (RDC). Éste se basa en reducir los aportes hídricos en aquellos períodos fenológicos considerados no críticos para la producción y calidad de la cosecha y cubrir plenamente la demanda de la planta durante el resto del ciclo del cultivo (Torrecillas *et al.*, 1996).

Para la elaboración de estrategias de RDC debe atenderse a la consideración de aquellos factores que puedan condicionar de forma importante su viabilidad. Entre otros, adquiere una especial importancia el conocimiento de los períodos críticos del cultivo, el nivel de coincidencia entre el crecimiento vegetativo y el del fruto, las características del suelo, el sistema de riego, el clima, el material vegetal, los mecanismos de resistencia a la sequía, etc. (Domingo, 1994; Torrecillas *et al.*, 1996).

La separación natural de los períodos durante los cuales los tejidos y los órganos de los frutales crecen activamente da la posibilidad de inhibir un

órgano o proceso, sin afectar seriamente a otros. En términos de demanda de fotoasimilados, existe una clara separación entre los períodos de activo crecimiento vegetativo y del fruto en numerosos cultivos arbóreos. Esto favorece la aplicación de estrategias de RDC, ya que permite controlar el crecimiento vegetativo sin reducir el tamaño del fruto (Chalmers *et al.*, 1981; Goldhamer y Shackel, 1989; Domingo, 1994; Torrecillas *et al.*, 1996). Además, algunos frutos al recuperarse de un déficit hídrico temporal experimentan un crecimiento compensatorio que les permite alcanzar un tamaño similar al de los frutos que no han sufrido déficit (Chalmers *et al.*, 1986).

De hecho el RDC surge de los experimentos realizados por el equipo del Profesor David J. Chalmers en Australia (1973-1978), sobre la fisiología de melocotoneros con relación al riego y al estrés hídrico. En dichos trabajos identificaron un período del crecimiento del fruto del melocotón (período de crecimiento lento que coincide con el endurecimiento del hueso), en el que dicho crecimiento es bastante independiente del potencial fotosintético del árbol y además poco sensible al déficit hídrico. Sin embargo, el crecimiento de los brotes vegetativos resultó ser muy sensible a la falta de agua durante todo el período de crecimiento del fruto (Chalmers *et al.*, 1981; Mitchell y Chalmers, 1982; Chalmers *et al.*, 1986; Mitchell *et al.*, 1989).

Otra estrategia de riego cuyo uso se ha extendido en los últimos años es el riego por desecación parcial del sistema radicular (PRD, Dry *et al.*, 1996). Con esta técnica, una mitad del sistema radicular se deja en proceso de desecación mediante la alternancia del riego entre ambas mitades del sistema radicular cada cierto período de tiempo. En muchas especies, se ha comprobado que cuando una parte del sistema radicular se expone a desecación se pone en marcha un mecanismo de señales químicas raíz-brote (Dodd, 2005) que es capaz de inducir un cierre parcial estomático. Éste reducirá las pérdidas de agua por transpiración con mínimo impacto sobre la fotosíntesis, aumentando de este modo la eficiencia de uso del agua (Dry *et al.*, 1996; Dry *et al.*, 2000; Loveys *et al.*, 2004). Son numerosas las evidencias que sugieren la implicación de la hormona vegetal ácido abscísico (ABA) en el control de la conductancia estomática cuando el suelo se seca (Davies y Zhang, 1991; Dodd, 2005). Al mismo tiempo, la parte del sistema radicular adecuadamente regada se encarga de mantener un estado hídrico favorable en la parte aérea de la planta (Dry y Loveys, 1999). Otro efecto observado con la aplicación del PRD es la limitación del crecimiento vegetativo (Dry y Loveys, 1999), tal y como observaron Gowing *et al.* (1990) en plántulas de manzano.

Ahora bien, el éxito de ambas estrategias es muy dependiente de la aplicación correcta del déficit hídrico, exigiendo un control continuado del estado hídrico de la planta o suelo para ajustar en todo momento los aportes de agua, o en su caso, de la alternancia de éstos. Para ello, es fundamental

apoyarse en indicadores de estrés hídrico robustos y sensibles a los cambios del estado hídrico de la planta o/y del suelo (Domingo *et al.*, 2005).

El riego deficitario controlado en frutales

Resulta difícil señalar con precisión los períodos críticos de cada cultivo. Algunos autores indican como períodos de máxima sensibilidad al déficit hídrico las fases de crecimiento del fruto. Así, en melocotonero el déficit hídrico durante la segunda fase de rápido crecimiento del fruto (Fase III) es más trascendente que en otras (Mitchell y Chalmers, 1982; Cohen *et al.*, 2001; Goldhamer *et al.*, 2002). Sin embargo, Lampinen *et al.* (1995) y posteriormente Intrigliolo y Castel (2005a) señalan que en ciruelo los efectos de la supresión del riego son más dependientes de la duración y del nivel de coincidencia con períodos de alta demanda evaporativa, que del momento en el que ocurre. Estos autores encontraron una alta sensibilidad a la supresión del riego durante el período de endurecimiento del hueso, contrariamente a lo observado en melocotonero.

Según Torrecillas *et al.* (2000) el período más crítico al déficit hídrico del albaricoquero es la segunda fase de rápido crecimiento del fruto (fase III). Otro período sensible es el de postcosecha inicial (Ruiz-Sánchez *et al.*, 1999), período en el que se registran altos consumos de agua. La supresión del riego durante este período afecta a la diferenciación floral, lo que provoca un desarrollo tardío de las yemas florales (Brown, 1953), disminución del número y alteración de las mismas, además de largos tallos con hojas pequeñas.

En cítricos, dos son los períodos críticos señalados: uno que abarca desde la floración hasta el cuajado, donde el déficit hídrico condiciona el número de frutos, y otro que corresponde a la fase de rápido crecimiento del fruto y que determina el tamaño final de los mismos (Domingo *et al.*, 1996; Ruiz-Sánchez *et al.*, 1997).

En ensayos realizados en manzano (Naor *et al.*, 1995; Naor *et al.*, 1997; Mpelasoka *et al.*, 2001), el déficit hídrico impuesto durante las fases I y II de crecimiento del fruto redujo el crecimiento vegetativo sin afectar al tamaño de los frutos ni al rendimiento. Igualmente Kilili *et al.* (1996), a partir de distintos tratamientos de supresión del riego en manzano, observaron que los efectos del estrés hídrico no afectaron a la calidad del fruto y que incluso ésta fue superior a la del control, no viéndose mermados los rendimientos de manera significativa, en ningún caso.

Girona (1992) indica que en el almendro el estrés hídrico después de la cosecha tiene un efecto drástico sobre la producción del año siguiente, ya que reduce el número de frutos por árbol, y que la fase de acumulación rápida en materia seca del grano (fase IV) es muy poco sensible al déficit hídrico. Según

Marsal *et al.* (1997), la alta sensibilidad al déficit hídrico del avellano, reflejada tanto en su producción total como en la calidad, aconseja satisfacer sus requerimientos hídricos totales.

Distintos grupos de investigación han llevado a cabo trabajos de riego deficitario en almendro. En ellos se observan diferentes respuestas productivas frente al déficit hídrico en función del momento en que éste se aplica (León *et al.*, 1985; Girona, 1992; Hutmacher *et al.*, 1994; Girona y Marsal, 1995; Torrecillas *et al.*, 1996; Germana, 1997; Girona *et al.*, 1997; Marsal *et al.*, 1997; Shackel *et al.*, 1997; Shackel *et al.*, 1998; Esparza *et al.*, 2001b; Klein *et al.*, 2001; Nanos *et al.*, 2002; Romero *et al.*, 2004b; Girona *et al.*, 2005; Goldhamer *et al.*, 2006).

Entre los ensayos más relevantes de RDC en almendros se encuentran los realizados con la variedad 'Marcona', en Tarragona (Girona y Marsal, 1995) y en Murcia con la variedad 'Cartagenera' (Romero *et al.*, 2004a; 2004b). Ambos equipos, aplicaron una estrategia de RDC consistente en aplicar el 20 % de la ETc durante la fase IV y el 100 % de la ETc en el resto del año. Los resultados obtenidos pusieron de manifiesto una buena adaptación del almendro a la estrategia de RDC planteada, a pesar de la ligera disminución de la producción media del tratamiento de RDC con respecto al control, debido al descenso del peso del grano. El ahorro de agua conseguido fue superior al 60 %, y la eficiencia de uso del agua (EUA), expresada en kg de almendra m⁻³ de agua, fue superior en el tratamiento de RDC.

En el Valle de San Joaquín (California), Goldhamer y Shackel (1989) observaron una respuesta productiva similar a la del experimento anterior. En este caso, la estrategia de RDC consistió en regar al 80 % de la ETc hasta completar el tamaño exterior del fruto, seguido de un 60 % hasta completar el tamaño de la pepita, para continuar durante la fase de aumento de peso seco de la pepita con un 40 % hasta finales de junio y un 60 % hasta la recolección. El ahorro de agua se cifró en el 58 %, obteniéndose producciones similares a las del tratamiento control. Las diferencias entre ambas estrategias de RDC se basan en que las variedades americanas son de cáscara blanda y conviene regar a mayores dosis en el período comprendido entre el inicio de acumulación rápida de materia seca del grano y la recolección, con el fin de evitar la formación de 'pelonas', almendras a las que se les queda adherida la pelarza, dificultando el descascarado y disminuyendo drásticamente su precio de mercado.

2.3. Programación del riego

El término de programación del riego es generalmente usado para describir el procedimiento mediante el cual se determina la frecuencia y dosis

de agua a aplicar en cada riego (Hillel, 1990). La determinación del momento y volumen de agua a aplicar en cada riego es un proceso de toma de decisiones a corto plazo, de tipo ‘control operacional’. Habitualmente se ha basado en la experiencia previa y no en procedimientos científico-técnicos. Sin embargo, en la medida en que la conservación del agua de riego pasa a ser un objetivo relevante en el manejo de una explotación de regadío, se hace cada vez más patente la necesidad de disponer de una información precisa que permita programar los riegos de forma eficiente (Fererres y Goldhamer, 2000).

Existen numerosos métodos de *programación de riegos* pero todos ellos se han agrupado tradicionalmente en tres enfoques basados en:

1. Datos climáticos. Estimaciones de la demanda climática y de las necesidades hídricas de los cultivos (fórmulas empíricas, modelos de evapotranspiración, etc.) y establecimiento del balance hídrico del suelo.
2. Estado hídrico del suelo. Medidas de las características del estado hídrico del suelo (contenido de humedad, potencial hídrico, balance hídrico, etc.).
3. Estado hídrico del cultivo. Medidas del estado fisiológico del cultivo, como temperatura de hoja, variaciones de diámetro, potencial hídrico foliar (hoja cubierta y sin cubrir), flujo de savia, etc.

2.3.1. Cálculo de las necesidades hídricas del cultivo

2.3.1.1. Métodos climáticos

Estos métodos estiman las necesidades hídricas máximas del cultivo y se basan en el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_0) y en la utilización de coeficientes de cultivo.

La FAO (Food and Agriculture Organization) definió la ET_0 como el consumo de agua de una superficie extensa de gramíneas, uniforme, de 8 a 15 cm de altura, en crecimiento activo, que sombrea la totalidad del suelo y bien provista de agua (Doorenbos y Pruitt, 1977). Posteriormente y debido a la gran variedad de gramíneas y prácticas de cultivo, la FAO propuso cambiar el concepto de cultivo de referencia y revisar los métodos de cálculo. De este modo quedaba definida la ET_0 como la tasa de evapotranspiración de un cultivo hipotético de altura fija de 12 cm, resistencia de la cubierta vegetal de 70 s m^{-1} y albedo de 0.23 (Smith *et al.*, 1990). Estas características se aproximan a las de superficie extensa de gramíneas. Actualmente, el método más completo, aceptado y recomendado para la determinación de la ET_0 es el de Penman-Monteith- FAO (Allen *et al.*, 1998), cuya fórmula es:

$$ET_o \left(\text{mm día}^{-1} \right) = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

siendo: R_n , radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$); G , densidad de flujo de calor al suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$); T , temperatura media diaria a 2 metros de altura ($^{\circ}\text{C}$); 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); Δ , pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ , constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Otros métodos de medida directa de la evapotranspiración de los cultivos son:

Modelo de renovación de volúmenes de aire (Snyder y Spano, 1994). La radiación neta puede considerarse como el factor más importante que controla la ET cuando el agua no es un factor limitante (Faci, 1996). El Modelo de renovación de volúmenes de aire calcula el flujo de calor sensible (H) que, junto con la medida de la radiación neta (R_n) y el flujo de calor que va al suelo (G), permite obtener una estima de la evapotranspiración. H se obtiene a partir de la medida de la temperatura del aire por encima de la cubierta vegetal en intervalos muy cortos.

Modelo del balance de energía y de la relación de Bowen (Hatfield, 1990). Este método se basa en el balance de energía en la superficie vegetal. En este caso, el reparto de R_n entre las componente de calor sensible (H) y el flujo de calor latente (λE) vendrá dado por el gradiente de temperatura y el gradiente de presión de vapor entre la cubierta vegetal y el aire. De este modo, la tasa de evapotranspiración puede ser determinada a partir de los gradientes verticales de temperatura del aire y vapor de agua mediante la relación de Bowen.

Covarianza de torbellinos (eddy covariance). Este método se basa en la medida de los flujos turbulentos de agua transportados verticalmente por porciones de aire, y permite conocer el flujo de calor sensible y de calor latente. La velocidad vertical de viento (u_v , m s^{-1}) se obtiene con un anemómetro sónico tridimensional y la densidad de vapor de agua (ρ_v) se mide con un higrómetro de respuesta rápida. La altura de ubicación de los sensores y la distancia entre ellos influye en la estimación de los flujos de calor sensible y calor latente (Villalobos, 1997).

La precisión con la que se obtiene ET a partir de los diferentes modelos, está estrechamente condicionada por la precisión, resolución y prestaciones de los sensores de temperatura, de humedad y de radiación, y del rigor en el cálculo del flujo de calor.

Los modelos micrometeorológicos están desarrollados para cultivos de cobertura total, lo que implica que para algunos cultivos como los frutales, presenten problemas de falta de representatividad, discontinuidades de cobertura con gradientes preferenciales suelo-planta-atmósfera y aspectos de rugosidad en la superficie, que conducen a heterogeneidades microclimáticas. Los árboles y el suelo pierden agua de forma diferente al incidir en ellos la radiación, ya que existen diferencias entre las zonas de evaporación y las superficies de intercambio de calor sensible (Valancogne y Nasr, 1989). Todo esto obliga a la aplicación de coeficientes de ajuste para las diferentes especies vegetales, según el tipo de suelo y el volumen de cubierta, principalmente. Estos factores pueden integrarse en un único coeficiente de cultivo (K_c) determinado experimentalmente para cada tipo de plantación. Este coeficiente multiplica a ET_o para obtener la evapotranspiración máxima en condiciones estándar del cultivo (ET_c).

En general se puede concluir que son métodos muy generalistas, que bien por exceso o defecto pueden alejarse sustancialmente de las necesidades hídricas reales de los cultivos y que, por ello, necesitan de una calibración local. Cabe señalar, que no siempre es fácil separar la evaporación de la transpiración y que el margen de error en el cálculo de las necesidades de riego por métodos microclimáticos puede ser alto.

Balance de agua en el suelo

El balance de agua en el suelo ha sido uno de los métodos más utilizados para determinar las necesidades hídricas de los cultivos arbóreos. Se trata de cuantificar las cantidades de agua que entran, salen o permanecen en un volumen de suelo durante un tiempo determinado (Domingo, 1994).

El balance de agua se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$P + R = ET_c + D \pm \Delta\theta \pm E$$

donde: P es la lluvia, R el riego, ET_c la evapotranspiración del cultivo (a despejar), $\Delta\theta$ la variación de la humedad del suelo en la zona radicular durante el período de medida, D el drenaje neto (percolación profunda menos el ascenso capilar) y E el aporte o pérdida de agua por escorrentía superficial. Todos estos parámetros se expresan en unidades de altura de agua (mm).

En ausencia de escorrentía superficial (E) y de aportes laterales de humedad, la ET_c puede ser calculada como:

$$ET_c = P + R - D \pm \Delta\theta$$

de modo que si:

$$\theta_F > \theta_I \Rightarrow + \Delta \theta$$

$$\theta_F < \theta_I \Rightarrow - \Delta \theta$$

siendo: θ_F y θ_I los contenidos volumétricos de agua en el suelo al final e inicio del período de medida.

En los períodos sin riego o lluvia la ecuación del balance se simplificaría a:

$$-\Delta \theta = ET_c + D$$

A pesar de su sencillez existe dificultad en separar la parte del cambio de humedad atribuible a ET_c del debido a D . Este problema se puede resolver mediante cálculos del plano de flujo nulo (Daudet y Vachaud, 1977).

Cuando se utilizan sistemas de riego localizado las dificultades aumentan, siendo necesario realizar pruebas para la ponderación de las zonas afectadas y no afectadas por los aportes localizados de agua durante el período de riego (Figura 2.1), así como la realización de un estudio detallado de las características hidrodinámicas del suelo, en especial de la relación entre la conductividad hidráulica y el contenido de humedad del suelo. Una vez establecidas las relaciones funcionales entre conductividad hidráulica y contenido de humedad del suelo, definida la ponderación de áreas en función de los aportes de agua, determinada la profundidad del sistema radical y el gradiente hidráulico, las diferencias de contenido volumétrico pueden ser utilizadas para calcular el flujo de agua a través del perfil y de este modo cuantificar el drenaje durante el ciclo de cultivo.

Lisimetría de pesada

Los lisímetros de pesada constituyen el método más preciso y directo de medida del consumo de agua de las plantas. Éstos permiten determinar la evapotranspiración real del cultivo a intervalos de tiempo cortos, durante períodos diarios, de horas, e incluso inferiores. Además, bajo condiciones no limitantes de suministro hídrico, permiten la determinación de los coeficientes de cultivo, a partir de la relación:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o}$$

Para ello, es fundamental que tanto el árbol cultivado en él como los circundantes sean representativos de la explotación frutal. Éste suele ser el problema principal con el que se encuentran los lisímetros de pesada, pero no el único. Allen y Fisher (1990) indicaban nueve recomendaciones para preservar el buen funcionamiento de este tipo de instalaciones.

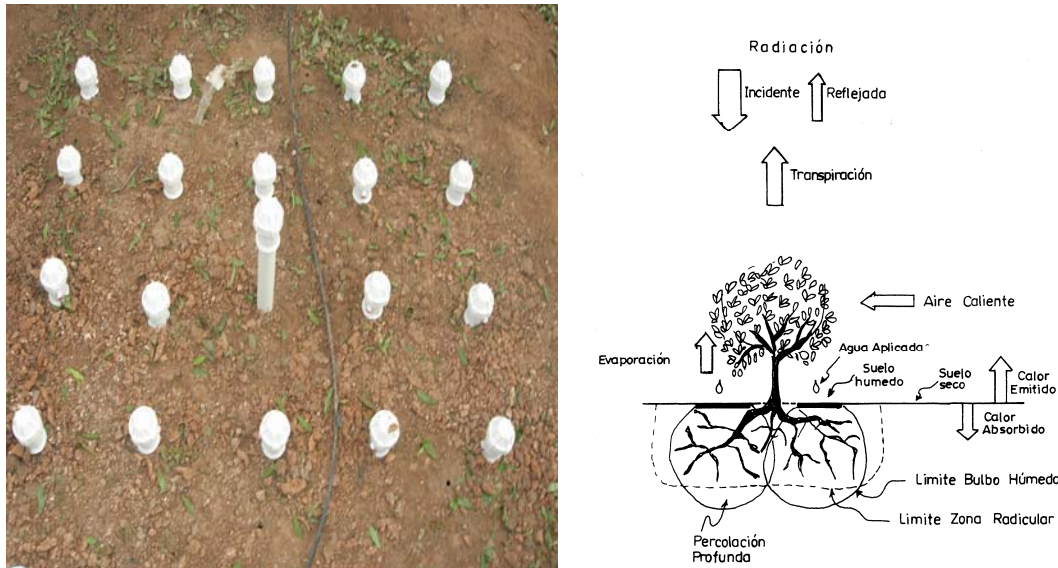


Figura 2.1. Disposición de tubos de acceso para realización de balance hídrico (izquierda) y componentes del balance hídrico y de energía en riego localizado (adaptado de Fereres *et al.*, 1981b) (derecha).

2.3.1.2. Métodos basados en el estado hídrico del suelo

Estos métodos engloban tanto las técnicas de medida del contenido de humedad como del estado energético del agua en el suelo (potencial total o alguna de sus componentes). Las medidas pueden ser discretas o estar automatizadas proporcionando valores continuos y en tiempo real.

Medida del agua en el Suelo

Muestreo del suelo. Método gravimétrico y volumétrico

Es un método directo de medida del agua en el suelo y suele ser utilizado para calibrar otros métodos de medida, tales como: sonda de neutrones, equipos basados en sensores dieléctricos, bloques de resistencia eléctrica, etc. El contenido de humedad de la muestra puede ser expresado en forma gravimétrica o volumétrica y ambas formas están relacionadas a través de la densidad aparente del suelo.

El contenido gravimétrico de humedad (θ_g) viene dado por:

$$\theta_g = \frac{\text{Masa de agua}}{\text{Masa de suelo}} = \frac{P_f - P_s}{P_s}$$

donde P_f y P_s son la masa de la muestra de suelo húmedo y de suelo seco, respectivamente.

La expresión correspondiente al contenido volumétrico de humedad, θ_v , viene dada por:

$$\theta_v = \frac{\text{Volumen de agua}}{\text{Volumen de suelo}} = \frac{(M_h - M_s) / d_{H_2O}}{V_a}$$

donde: V_a es el volumen aparente de la muestra. Las unidades vendrán expresadas en cm^3/cm^3 (adimensional). Sin embargo, en este caso, es más práctico expresar el contenido de agua del suelo como *mm* de lámina de agua por *m* de profundidad de suelo.

Los dos métodos son sencillos, baratos y muy exactos, en lo que respecta a la muestra reunida. Sin embargo, se les puede achacar algunos inconvenientes, tales como: i) carácter destructivo, en el sentido de que es necesario retirar la muestra del campo, lo que no permite tomar otra medida en el mismo punto, ii) alta demanda de mano de obra, iii) necesidad de tomar un número elevado de muestras, como consecuencia de la gran variabilidad espacial del contenido de agua en el suelo, iv) dificultad para la toma de muestras en suelos pedregosos, v) posibilidad de cometer errores en suelos con alto contenido en materia orgánica, bien por oxidación y/o combustión, en estos casos se recomienda el secado de la muestra a 50-70 °C, vi) pérdida de humedad de las muestras antes de su secado y vii) necesitan como mínimo 24 horas para el secado de la muestra.

Sonda de neutrones

Es un instrumento que proporciona una metodología indirecta para medir el contenido volumétrico de agua del suelo. Los dos propósitos principales de su uso son: i) medir el contenido de agua del suelo y relacionarlo con otras propiedades físicas del suelo (conductividad hidráulica, tensión del agua del suelo, etc.), y ii) medir cambios del contenido de agua en el suelo. Este segundo uso es más frecuente en estudios de riego y evapotranspiración.

El fundamento de medida consiste en la emisión, por parte de una fuente radioactiva (Americio 241-Berilio), de un haz de neutrones con alta energía cinética (neutrones rápidos), que se propaga a través del suelo (Daudet

y Vachaud, 1977; Evett y Steiner, 1995). La energía de estos neutrones se pierde rápidamente si colisionan con los átomos de hidrógeno, al ser de similar tamaño y masa. El detector de neutrones lentos registrará, por lo tanto, mayor número de neutrones ralentizados, cuantos más átomos de hidrógeno haya en el medio. En el suelo la principal fuente de átomos de hidrógeno es el agua.

El radio de influencia de la sonda de neutrones es inversamente proporcional al contenido de agua en el suelo. Así, en un suelo de textura media, el radio puede variar de 25 a 30 cm para contenidos de humedad próximos al punto de marchitez y hasta unos 10 a 20 cm en saturación. No miden bien en superficie, existiendo peligro de emisión de neutrones al exterior. La precisión de este método depende en gran medida de una correcta calibración de la sonda. Existe una relación lineal entre el cociente de cuentas (cociente entre la lectura que da el apartado al hacer una medida y la lectura estándar) y la humedad volumétrica del suelo.

Los principales inconvenientes de la sonda de neutrones son: técnica cara, no automatizable y necesidad de una curva de calibración para cada tipo de suelo como la descrita en Gardner (1986). Además, si se requieren mediciones en puntos cercanos a la superficie debe procederse a una calibración especial. Sin embargo, presenta claras ventajas respecto a los métodos anteriores, como son: la rapidez en la toma de medidas, medidas en el mismo sitio, volumen de muestreo considerable y medidas no afectadas por la salinidad del suelo.

Reflectometría de dominio del tiempo, TDR

Esta técnica se basa en la medida del tiempo de propagación de un pulso electromagnético a lo largo de una línea de transmisión (sonda) insertada en el suelo. La velocidad de propagación del pulso depende de la constante dieléctrica del medio (k_a), al tiempo que la forma del pulso y el tiempo en que se transmite dependen de las propiedades de los electrodos, de su longitud y de su terminación. Topp *et al.* (1980) obtuvieron una ecuación empírica que relaciona el contenido volumétrico de humedad (θ_v) con la constante dieléctrica del suelo (k_a).

$$\theta_v = -5.3 \cdot 10^{-2} + 2.29 \cdot 10^{-2} k_a - 5.5 \cdot 10^{-4} k_a^2 + 4.3 \cdot 10^{-6} k_a^3$$

La sonda, en general, se presenta bajo la forma de varillas paralelas (dos o tres) si bien puede encontrarse con otros perfiles. La medida integra la constante dieléctrica entre los dos electrodos a lo largo de toda la sonda, la cual, para ser suficientemente precisa, deberá tener una longitud mínima de 10

cm (Chanzy *et al.*, 1997). La cantidad de agua presente en el medio influye en la constante dieléctrica de éste, pudiendo determinarse así el contenido volumétrico de agua (θ_v). La relación entre θ_v y k_a es poco dependiente de la textura del suelo, densidad, salinidad y temperatura, permitiendo aplicar la técnica a un amplio rango de suelos (Parchomchuck *et al.*, 1997).

El TDR depende de las discontinuidades en los mecanismos de almacenamiento de energía del medio. La presencia de agua en el suelo afecta a la velocidad de propagación de la onda electromagnética disminuyéndola ligeramente.

Existen diversos sensores comerciales que miden el contenido volumétrico de agua en el suelo o sustrato basados en esta técnica. El TDR está formado principalmente por un osciloscopio y un generador de señal que es el que da el pulso eléctrico. Su rango de medida oscila de 0.065 a 0.5 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. La ventaja de estos sensores es que son estables y las medidas son repetitivas en el tiempo, además de precisas. Pueden tomarse lecturas en continuo y puntuales y, dentro de unos límites, no se ven afectadas por la salinidad. Se trata de una medida integradora de la humedad de toda la longitud de la sonda y, en principio, para las principales clases de suelo no se requiere una calibración, aunque en el caso de ciertos sustratos, de suelos arcillosos o con elevado contenido de materia orgánica, puede ser necesaria.

Como desventajas principales pueden citarse su complicada electrónica y el tratarse de un equipamiento relativamente caro, si bien las sondas pueden ser fabricadas por el propio usuario (Parchomchuck *et al.*, 1997). Al tratarse de medidas puntuales, con una esfera de influencia mínima, debe considerarse la representatividad de la ubicación de la sonda así como el número de medidas para minimizar la variabilidad espacial. No siempre es fácil la inserción de las sondas en el terreno, al tiempo que es de vital importancia asegurar el contacto entre las sondas y el suelo evitando la formación de cámaras de aire que distorsionarían la medida. Estas cámaras también pueden formarse por la contracción del suelo al secarse. Además, en ciertos suelos con elevados niveles de salinidad, puede perderse la señal reflejada al final de los extremos de la sonda.

La medida de la humedad volumétrica mediante TDR ha sido utilizada en experimentos con objetivos diversos. Pittinelli *et al.* (1998) demostraron que la técnica es apropiada para estimar el contenido hídrico del suelo a diferentes profundidades; Mastroilli *et al.* (1998) indicaron su utilidad para estimar la ET diaria en suelos sin cavidades verticales bajo condiciones de clima mediterráneos. Parchomchuk *et al.* (1997) programaron el riego de una plantación de manzanos jóvenes a partir de las medidas de contenido de humedad obtenidas con TDR, si bien para ello requirieron de 64 sondas.

Reflectometría de dominio de frecuencias, FDR

Son los denominados *sensores capacitativos* basados, al igual que el TDR, en las diferentes propiedades dieléctricas del aire, del suelo y del agua, y que han venido desarrollándose en las últimas tres décadas. Estos sensores utilizan un oscilador para crear un campo eléctrico y detectar los cambios en las propiedades dieléctricas del mismo en relación con su contenido en agua. El sensor mide la frecuencia de resonancia correspondiente a la capacidad del condensador, formado por un par de electrodos dispuestos en paralelo y que se relaciona con la permitividad dieléctrica relativa del suelo (Gaudu *et al.*, 1993). El método capacitativo puede operar a frecuencia única o en una estrecha banda de frecuencias (Gardner, 1986; Shinn *et al.*, 1998). Los cambios de contenido de agua son detectados como cambios en la frecuencia operacional, disminuyendo ésta al incrementarse la humedad. Para el cálculo de la humedad volumétrica (θ_v) se requiere una calibración para los diferentes tipos de suelos y sustratos. Dentro del rango natural de variación de humedad en condiciones de campo, las curvas de calibrado pueden aproximarse a relaciones lineales (Gardner *et al.*, 1998).

La longitud de los electrodos es sensiblemente menor que en el caso del TDR, pudiendo llegar a ser menor de 2 cm (Hilhorst y Dirksen, 1994). Los sensores capacitativos permiten una mayor flexibilidad de diseño de la geometría del electrodo y de la frecuencia operacional que el TDR, manteniendo una precisión del mismo orden que éste (Hilhorst y Dirksen, 1994). Son sensores más robustos y de más bajo coste que el TDR (Hilhorst y Dirksen, 1994). La conversión analógica de la señal no precisa de un equipo específico para el registro de los datos, por lo que esta técnica se presta fácilmente a la automatización a partir del uso de dataloggers (Gaudu *et al.*, 1993; Chanzy *et al.*, 1997). La mayoría operan a bajas frecuencias (100 MHz o menos) y pueden detectar el agua ligada a partículas finas del suelo. Este tipo de agua fuertemente retenida por las partículas puede llegar a constituir más del 10 % de la humedad del suelo.

Entre los inconvenientes que presentan los sensores FDR pueden citarse: i) están muy influenciados por la humedad de los espacios intersticiales en el volumen de suelo cercano al sensor, y por tanto por los procesos de contracción y expansión en el punto de contacto con el sensor (Gardner *et al.*, 1998), debiendo procurarse un buen contacto con el suelo, ii) sensores con bajas frecuencias operacionales (<50 MHz) por lo que pueden estar más influenciados por la salinidad (Gardner *et al.*, 1998), aunque no siempre se ha observado este efecto (Gaudu *et al.*, 1993). Hilhorst y Dirksen (1994) adoptan un sistema que, operando a 20 MHz, mide las componentes real e imaginaria de la permitividad dieléctrica, minimizando así la influencia de la conductividad. La temperatura influye en la permitividad relativa del agua

(Evelt y Steiner, 1995), si bien este efecto puede ser corregido por el propio dispositivo de medida (Gaudu *et al.*, 1993), iii) menor cantidad de información referente al análisis de las curvas espectrales del FDR en comparación con el TDR.

Potencial Hídrico del Suelo

Tensiómetros

El tensiómetro fue uno de los primeros instrumentos desarrollados e implementados para la programación del riego (Ferer y Goldhamer, 2000), siendo utilizado por agricultores y técnicos, principalmente en riego localizado.

Los tensiómetros miden la succión o tensión del agua en el suelo. Ahora bien, la lectura obtenida en el vacuómetro corresponde al potencial hidráulico del agua en el suelo (Ψ_H), si se desprecia la altura del vacuómetro sobre el nivel del suelo. El potencial hidráulico viene dado por la expresión:

$$\Psi_H = \Psi_m + \Psi_g$$

donde, Ψ_m y Ψ_g son las componentes matricial y gravitacional del potencial del agua en el suelo.

El fundamento del tensiómetro es que el agua dentro de la cápsula cerámica tiende a adquirir la misma tensión que el agua del suelo en contacto con ella. Esta tensión se transmite dentro del tensiómetro y es medida mediante el vacuómetro. De ahí la necesidad de que exista un buen contacto entre cápsula porosa y suelo.

El rango de medida es de 0 a -80 kPa. Este rango limitado no constituye un obstáculo serio ya que más del 50 % del agua disponible para las plantas está en este rango de tensión. En suelos arenosos esta fracción puede llegar hasta el 75 % o más. Estos sensores presentan las ventajas de: bajo coste, medidas en el mismo sitio, sus lecturas no se ven afectadas por la presencia de sales y no necesitan curva de calibrado. Los inconvenientes principales son: pequeña zona de influencia del elemento sensor, vida limitada, muestra efectos de histéresis y necesidad de reponer el agua perdida.

El vacuómetro del tensiómetro puede sustituirse por un transductor de presión (electrotensiómetros) y de este modo permitir la automatización del riego. Assaf *et al.* (1989) obtuvieron buenos resultados en una plantación de manzanos adultos automatizada con electrotensiómetros. Sin embargo, otros estudios relativos al riego en frutales donde se compararon diferentes métodos de programación, obtuvieron mejores resultados en tratamientos de riego

programados a partir de medidas directas en planta con dendrómetros en tronco y ramas, que los programados a partir de tensiómetros (Li *et al.*, 1989a; Huguet *et al.*, 1992; Besset *et al.*, 2001).

Bloques de resistencia eléctrica

Son sensores formados por una matriz granular y miden indirectamente el potencial matricial del agua en el suelo a partir de su resistencia eléctrica. La matriz granular que va fijada a un soporte de metal o plástico lleva insertados dos electrodos (Eldredge *et al.*, 1993). La resistencia eléctrica entre estos dos electrodos varía en función de la humedad del suelo.

El rango de lectura es superior al del tensiómetro (10 – 200 kPa) y además, cubre las condiciones de humedad entre capacidad de campo y saturación, limitación presentada por los tradicionales bloques de yeso. Las lecturas pueden ser tomadas con un lector manual o bien de forma automática y continua mediante el uso de dataloggers (Phene *et al.*, 1971; Campbell, 1988; Campbell *et al.*, 2006). La información proporcionada puede servir para el control y revisión de dosis y frecuencias de riego establecidas por otros métodos (Eldredge *et al.*, 1993), o bien, ser directamente responsables de la apertura y cierre de válvulas de acuerdo a valores consigna definidos en estudios previos (Cohen *et al.*, 2001; Intrigliolo y Castel, 2004).

Las principales ventajas son: bajo coste, no requieren mantenimiento, medidas en el mismo sitio, miden tensiones mucho mayores que los tensiómetros, etc. Y como desventajas: lenta respuesta a los cambios de humedad del suelo, muestran fenómenos de histéresis, influencia de la temperatura, pueden requerir calibraciones puntuales (Eldredge *et al.*, 1993; Thompson *et al.*, 2006), existe cierto riesgo de que con el tiempo el yeso se deshaga, pequeña zona de influencia del elemento sensor, etc.

Psicrómetro

Su funcionamiento se basa en el enfriamiento del aire sobre un termopar por debajo de su punto de condensación. Al calentarse nuevamente, el agua se evapora y el termopar se enfría por debajo de la temperatura del aire. De este modo, se obtiene la diferencia de temperatura entre el bulbo húmedo y el bulbo seco de la que se deriva el potencial hídrico (Campbell y Gardner, 1971; Gaudu *et al.*, 1993; Chanzy *et al.*, 1997). El vapor en el condensador se encuentra en equilibrio con el potencial de la muestra.

Este sistema mide el potencial total de la muestra en un amplio rango de medida que va desde -0.02 MPa a -10 MPa. Estas lecturas pueden ser muy precisas, al tiempo que automatizadas. La calibración de estos sensores y su lectura es independiente del tipo de suelo y de su tamaño de partícula. Sin

embargo se trata de un sistema de elevado coste, fuera del alcance no sólo del agricultor o técnico sino también para su uso en la agricultura experimental o de investigación (Itier, 1996). Uno de sus principales inconvenientes es que se ve ampliamente influenciado por los gradientes preferenciales de temperatura en el suelo. La salinidad también puede condicionar la validez de las medidas.

2.3.1.3. Métodos basados en el estado hídrico de la planta

Potencial hídrico foliar y de tallo

El potencial hídrico foliar (Ψ) es, quizás, el parámetro más utilizado para definir el estado hídrico de las plantas (Klepper *et al.*, 1971; Goode y Higgs, 1973) y determinar el momento de riego (Peretz *et al.*, 1984). Es comúnmente utilizado como indicador del estado hídrico de los frutales, y resulta afectado tanto por factores de origen ambiental como de carácter endógeno (Jones, 1990). Esto provoca variaciones en sus niveles en base al momento del día (Elfving *et al.*, 1972), estación de crecimiento (Winkel y Rambal, 1993), edad de las hojas (Knipling, 1967) y de la orientación y posición de las mismas en el árbol. Esta situación puede restringir su uso para indicar sólo la dirección del flujo del agua en el árbol, siendo cuestionado como indicador del estado hídrico (Garnier y Berger, 1985). No obstante, la medida de Ψ es universalmente admitida, como la forma más rápida, fiable y económica de evaluar el estado hídrico de las plantas (Elfving *et al.*, 1972; Garnier y Berger, 1985; Ameglio *et al.*, 1998; McCutchan y Shackel, 1992; Lampinen *et al.*, 2001; Girona *et al.*, 2006).

La medida del potencial hídrico foliar antes del alba (Ψ_a), proporciona información indirecta del nivel energético del agua en el suelo, así como del grado de estrés con el que la planta comienza el día (Aussenac y Valette, 1982). Esto se debe a que la transpiración es mínima durante la noche, por lo que la planta alcanzará, teóricamente, el equilibrio con el suelo en ese momento (Slatyer, 1967).

El instrumento utilizado para la medida de Ψ en campo es la cámara de presión (Scholander *et al.*, 1965). Según Hsiao (1990) la designación del Ψ medido con la cámara de presión como Ψ del xilema es erróneo, excepto en aquellos casos donde el equilibrio hídrico existía antes de la escisión; en este caso el Ψ de la hoja es igual al Ψ del xilema y la presión medida en la cámara (P) representa la tensión a la que se encontraba la savia en el xilema antes del corte. Como el potencial osmótico (Ψ_o) de la savia es muy pequeño generalmente se desprecia con lo que:

$$- P = \Psi_{\text{xilema}} = \Psi_{\text{hoja}} \text{ (sin transpiración)}$$

Fundamentalmente se han utilizado como indicadores del estado hídrico de la planta el potencial hídrico foliar a mediodía (Ψ_{md}), y el potencial hídrico foliar antes del alba (Ψ_a). Los valores de Ψ_{md} son muy variables ya que dependen de las condiciones climáticas reinantes en el momento de la medida, mientras que Ψ_a es más estable, pero con la limitación de que no es indicativo del estado al que llega la planta en el momento de máxima demanda. Más recientemente, Shackel *et al.* (1997) propusieron la utilización del potencial de xilema o de tallo (Ψ_j) como indicador del estado hídrico de la planta. Para su determinación se cubren las hojas con bolsas de plástico y papel de aluminio, al menos durante 2 horas. El objetivo es impedir la transpiración de la hoja, de modo que se alcanza el equilibrio hídrico entre la hoja y el tallo. Entre sus ventajas destacan su menor variabilidad, mejor correlación con el déficit de presión de vapor (DPV) y que refleja mejor la falta de agua en el suelo que el potencial hídrico foliar (Ψ) (McCutchan y Shackel, 1992; Naor *et al.*, 1995; Shackel *et al.*, 2000; Chone *et al.*, 2001; Fulton *et al.*, 2001; Fereres y Goldhamer, 2003; Intrigliolo *et al.*, 2005; Intrigliolo y Castel, 2005b; Ortuño *et al.*, 2006a; Vélez *et al.*, 2007). En cuanto a sus desventajas, destaca el hecho de que es una técnica destructiva, muy laboriosa y que no permite la automatización de su medida (Hsiao, 1990).

Variaciones de diámetro de tronco o frutos

Las variaciones estacionales del diámetro del tronco dependen principalmente del crecimiento (Kozlowsky y Winget, 1964). Sin embargo, a escala diaria también tienen lugar ciclos de contracción y expansión del diámetro del tronco (Kozlowski, 1967), resultado del desequilibrio entre transpiración y absorción de agua durante el día (Simonneau *et al.*, 1993). Los aumentos de diámetro durante la noche y en días nublados son debidos a una mayor proporción en la absorción de agua (Kozlowski, 1966), permitiéndose una redistribución interna de la misma en los distintos tejidos vegetales (Kozlowski, 1968). Dado que el xilema es prácticamente inelástico (Gènard *et al.*, 2001), los cambios en el diámetro de los troncos parecen deberse a cambios en el estado hídrico del floema (Molz *et al.*, 1973). Irvine y Grace (1997) determinaron que más del 90 % de las fluctuaciones diarias del diámetro del tronco tienen lugar en los tejidos del floema.

Estas variaciones diarias, cifradas en decenas de micras pueden ser determinadas mediante sensores de desplazamiento lineal montados en materiales fabricados con aleaciones no dilatables por efecto de la temperatura (Huguet *et al.*, 1992). Uno de estos sensores es el LVDT o “*Linear Variable Differential Transformer*”, capaces de detectar variaciones micrométricas del tallo con una precisión de 1 a 10 micras.

Las variaciones diarias de los tejidos se encuentran directamente relacionadas con variables climáticas y con la disponibilidad de agua que determina el estado hídrico de la planta. Por esta razón, ha suscitado un gran interés la utilización de este indicador, tanto para evaluar el comportamiento hídrico de la planta como para gestionar el agua de riego de una forma más precisa (Katerji *et al.*, 1990; Simonneau *et al.*, 1993; Tardieu y Simonneau, 1998; Fereres y Goldhamer, 2003; Goldhamer y Fereres, 2004; Intrigliolo y Castel, 2004; 2005b; Ortuño *et al.*, 2004; Moreno *et al.*, 2006; García-Orellana *et al.*, 2007).

La amplitud de las variaciones determina la intensidad con que la planta utiliza sus reservas internas como aporte a la transpiración. En diversas especies frutales se ha encontrado que la magnitud de la amplitud se incrementa en condiciones hídricas adversas (Li *et al.*, 1989b; 1989a; Cohen *et al.*, 2001; Fereres y Goldhamer, 2003; Naor y Cohen, 2003; Goldhamer y Fereres, 2004; Intrigliolo y Castel, 2004; Vélez *et al.*, 2007), aunque en manzano se ha comprobado que el efecto puede ser contrario (Huguet *et al.*, 1992). De la evolución del diámetro del tallo pueden obtenerse diversos parámetros que describen el estado hídrico del vegetal: la máxima contracción diaria, el crecimiento diario y el crecimiento acumulado. La máxima contracción diaria, viene dada por la diferencia entre el máximo diámetro que se produce cuando el órgano se encuentra más hidratado (normalmente a primera hora de la mañana, tras la absorción radicular nocturna) y el mínimo diámetro del órgano que generalmente se da una vez transcurrida la transpiración máxima (a primera hora de la tarde). La diferencia entre dos diámetros máximos diarios consecutivos determina el crecimiento diario del órgano, y la suma de éste proporciona el crecimiento acumulado.

Medida Térmica del Flujo de Savia

La medida térmica del flujo de savia que circula por el interior de los elementos conductores de los vegetales proporciona una estimación directa de la transpiración. Se basa en la aplicación y transporte de calor como indicador del movimiento de la savia en el tejido xilemático. Huber (1932) fue el primero en utilizar esta técnica para estimar la velocidad de circulación de la savia a partir de la medida de la velocidad del calor a través del tallo.

En los últimos años se han desarrollado y perfeccionando diferentes métodos basados en la interacción entre el flujo de savia bruta y el transporte de calor suministrado por estas técnicas. Las posibilidades de aplicación de estos métodos han aumentado paralelamente con la mejora de los sistemas de detección de la temperatura y desarrollo de la informática ligada a la agricultura. En general, se basan en la gran capacidad calorífica de la savia en comparación con la del aire y de la madera húmeda. Las principales técnicas

de medida del flujo de savia pueden agruparse en tres métodos: fuente de calor radial constante (Granier, 1985), balance de calor (Valancogne y Nasr, 1989) y pulso de calor (Green y Clothier, 1988; Fernández *et al.*, 2001; Giorio y Giorio, 2003; Nicolás *et al.*, 2005). La elección de una u otra técnica dependerá principalmente de la especie considerada y del tamaño del tallo o tronco.

Cavitación

Se puede definir la cavitación como una interrupción del paso del agua en los vasos conductores del xilema funcional a consecuencia de la entrada de aire. Esta interrupción en las columnas de agua libera energía en forma de emisiones acústicas, sonidos audibles y/o ultrasonidos que pueden ser registrados (Cochard, 1992; 2006; Cruiziat *et al.*, 2002). Dichos registros podrían servir en un futuro para programar el riego (Jones y Sutherland, 1991), dado que el número de procesos de cavitación es directamente proporcional al grado de déficit hídrico sufrido por la planta. En cualquier caso, es importante apuntar que el estrés hídrico no es el único factor que puede causar la cavitación en los vasos del xilema, también las heladas y los agentes patógenos pueden influir en la aparición de la cavitación.

Se han propuesto varios mecanismos, para explicar cómo el estrés hídrico causa la cavitación (Tyree y Sperry, 1989). Se ha comprobado que el desarrollo de procesos de cavitación no está directamente relacionado con el diámetro del elemento conductor (Tyree y Sperry, 1989), sino con el diámetro de las punteaduras del vaso. Los conductos con poros más pequeños son menos vulnerables a la cavitación debido a que el paso del aire a través de sus poros está dificultado, en contrapartida, este tipo de conductos tendrán una conductividad hidráulica menor.

Conductancia foliar

La conductancia foliar (g_l) es un índice del grado de apertura de los estomas, estructuras foliares que juegan un papel esencial en la fisiología de la planta ya que regulan el intercambio gaseoso. Al igual que el potencial hídrico, g_l sigue un ritmo circadiano y está influenciada por la intensidad luminosa, la temperatura, el incremento de humedad absoluta entre la hoja y el aire, la edad de la hoja, la concentración de CO_2 y el propio potencial hídrico (Jones, 1983). Las revisiones realizadas por Lösch (1979) y Schuzle y Hall (1982) pusieron de manifiesto la influencia del déficit de presión de vapor sobre g_l . Así en la mayoría de las especies, pero no en todas, el aumento del déficit de presión de vapor en el entorno de la hoja o planta se traduce en cierre estomático. Sin embargo, la forma en cómo el déficit de presión de vapor influye sobre la conductancia foliar no está clara (Turner *et al.*, 1984).

Dada la influencia del estrés hídrico sobre g_i , éste puede ser considerado como un buen índice del estado hídrico de la planta. Además g_i , está bien correlacionada con la tasa de fotosíntesis (Farquhar y Sharkey, 1982; Wong *et al.*, 1985; Torrecillas *et al.*, 1999), la cual depende también del estado hídrico. Como el estoma responde también a otros factores ambientales y fisiológicos (Hsiao, 1973) es necesario realizar muestreos continuos de g_i para poder separar el efecto del estrés hídrico de los debidos a otras variables. La medida de g_i es útil para evaluar la recuperación de las plantas después de un estrés hídrico (Gebre y Kuhns, 1993).

Por otro lado, la gran variabilidad entre hojas del mismo árbol (Leverenz *et al.*, 1982), la diferencia en la apertura estomática entre ciertas áreas de la hoja (Pospisilova y Santrucek, 1994), la necesidad de hacer un escalonamiento de toda la copa, etc., dificulta la posibilidad de determinar la transpiración del árbol en función de las medidas de g_i . Sin embargo, existen modelos más o menos complejos de estimación de la transpiración en base a un reducido número de medidas de conductancia foliar (Williams *et al.*, 1996).

Temperatura del cultivo

Desde hace años se conoce que las medidas de temperatura foliar son un método fiable para evaluar el estado hídrico de la planta (Idso *et al.*, 1981; Jackson, 1982). El desarrollo de aparatos más precisos y con mayor resolución espacial para medir la temperatura foliar (radiotermómetros ubicados *in situ*, o a partir de datos procedentes de satélite) ha impulsado el uso de métodos térmicos para evaluar la respuesta de las plantas a condiciones de estrés (Moran *et al.*, 1994; Jones, 2004; Jones, 2007). La mayoría de los métodos térmicos están basados en el cálculo de un índice de estrés (Idso *et al.*, 1981), partiendo de la base que las diferencias que presentan las superficies en el nivel de cobertura vegetal y en su tasa de transpiración resultan en diferencias de temperatura (de índice de estrés) inducidas por el proceso de enfriamiento por evaporación. Sin condiciones de estrés, el agua que transpira la planta se evapora contribuyendo a enfriar las hojas. Bajo condiciones de restricción hídrica, la tasa de transpiración disminuye y la temperatura foliar aumenta. Sin embargo, la dificultad que conlleva la medida de la temperatura de la vegetación cuando ésta no alcanza un nivel de cobertura cercano al 100 %, ha limitado su aplicación a estos casos.

El cálculo del “Crop Water Stress Index” o CWSI se basa en la ecuación de Penman-Monteith y el balance de energía (Penman, 1948; Monteith, 1965; 1973) para estimar las temperaturas teóricas máxima y mínima de una cubierta vegetal que están asociadas con condiciones de transpiración mínima y máxima, respectivamente. Estos valores extremos, junto con la medida de la temperatura foliar de la vegetación y de datos

climáticos, dan acceso a evaluar el índice CWSI, función de la tasa de evapotranspiración actual y potencial del cultivo, que ha tenido aplicaciones importantes en agricultura entre las que cabe destacar la gestión de la frecuencia de riego.

Métodos y técnicas utilizadas

3.1. Introducción

En este capítulo se recoge el instrumental, técnicas y metodologías utilizadas en la obtención de datos y determinación de los parámetros de clima, suelo y planta analizados en los diferentes ensayos realizados y que conforman la presente Memoria de Tesis.

3.2. Medida de las variables climáticas

Estación climática automática

Se utilizó una estación climática automática para la toma de datos de las variables climáticas reinantes en el ensayo de almendros cv. ‘Marta’, ubicada en el centro de una parcela de 25 m x 25 m, cultivada de césped, perteneciente a la Estación Experimental Agroalimentaria ‘Tomás Ferro’ (ESEA) - Universidad Politécnica de Cartagena (Figura 3.1). La finca experimental de almendros dista tan sólo 100 m de dicha estación. Para el ensayo de almendros cv. ‘Colorada’ se emplearon los datos de la estación ‘El Campillo’ (CA91) de la red de estaciones meteorológicas del SIAM situada a 1 km de la parcela.



Figura 3.1. Estación climática automática de la ESEA ‘Tomás Ferro’ y disposición de los distintos sensores.

Sensores de temperatura y humedad relativa del aire

La temperatura y humedad relativa del aire fue obtenida a partir de una sonda HMP45C, colocada a 2 m de altura. Esta sonda consta de dos sensores: i) de temperatura ambiente, Pt 1000, que es un tipo sensor RTD (resistance temperature detector) basado en el platino y que se fundamenta en la variación de la resistencia del metal conductor con la temperatura, y ii) de humedad relativa, sensor capacitivo modelo HUMICAP 180, que es un polímero de plástico que tiende a absorber la humedad y que cambia sus características eléctricas en función de la humedad ambiental (Figura 3.2).



Figura 3.2. Sensor de humedad relativa, modelo HUMICAP 180.

La sonda HMP45C lleva como accesorio un protector (Figura 3.2) a fin de evitar el efecto de la radiación directa y difusa sobre el sensor de temperatura, y por tanto los posibles efectos de histéresis que podrían producirse.

A partir de la información proporcionada por estos sensores: temperatura seca (T_s) y humedad relativa (HR) del aire, se calculó el déficit de presión de vapor (DPV) del aire, según las siguientes ecuaciones.

$$DPV = e_s - e_a \quad (kPa)$$

donde, e_s es la tensión de vapor saturante a la temperatura seca (kPa) y e_a la tensión de vapor actual (kPa), que fueron determinadas a partir de:

$$e_s = 0.6107 \cdot \left[1 + \sqrt{2} \cdot \text{sen}\left(\frac{T_s}{3}\right) \right]^{8.827} \quad (\text{kPa})$$

$$e_a = \text{HR} * e_s$$

Así mismo, y a partir de los modelos propuestos por Richardson *et al.* (1976), se estimaron las necesidades de calor requeridas para completar los distintos períodos fenológicos del cultivo.

Richardson *et al.* (1976), para el cultivo del melocotonero definieron una hora grado de crecimiento Celsius (1 °C GDH) como una hora a una temperatura de 1 °C por encima de la temperatura base de 4.5 °C. Es decir, cada GDH °C se obtiene restando 4.5 °C a cada temperatura media horaria (T_{mh}) en el intervalo comprendido entre 4.5 y 25 °C. Considerando iguales aquellas temperaturas superiores a 25 °C.

De esta forma los GDH °C se calculan, según la siguiente expresión:

$$GDH = \sum_1^{24} (T_{mh} - T_{base})$$

donde, T_{mh} es la temperatura media horaria (°C).

En el ensayo con almendros jóvenes se modificó ligeramente la metodología de Richardson *et al.* (1976) para adaptarla al clima de la finca, más suave que el de Utah. Esta modificación consistió en la eliminación del límite superior de 25 °C para el computo del calor acumulado y en fijar la temperatura base del almendro en 6 °C, tal y como sugirieron Tabuenca y Herrero (1966).

Sensor radiación solar global

La radiación solar global fue registrada mediante un piranómetro modelo SP1110 (Figura 3.3). La parte superior del sensor está formada por una fotocélula con un recubrimiento especial de silicona, asegurando una respuesta en la banda espectral entre 350 y 1100 nm.



Figura 3.3. Sensor de radiación global.

Sensor de radiación neta

La radiación neta fue registrada a partir de un sensor Q-7.1 Net Radiometer (Figura 3.4). Este sensor registra la suma algebraica de todas las longitudes de onda (componentes de onda corta y onda larga) entrantes y salientes. La radiación entrante se compone de la radiación solar directa y de la difusa más la radiación de onda larga de la bóveda celeste. La radiación saliente está compuesta por la radiación solar reflejada más la componente terrestre de onda larga emitida por la superficie.



Figura 3.4. Sensor de radiación neta.

Pluviometría

La precipitación fue registrada a partir de un sensor FSS500. Éste consiste en un balancín que oscila sobre su eje, de forma que cada vez que gira para verter el agua cierra el circuito, hecho que es registrado por el sistema de adquisición de datos (Figura 3.5). El sensor realiza medidas a partir de incrementos de 0.1 mm.



Figura 3.5. Pluviómetro con sensor FSS500 colocado a 1.5 m del suelo.

Sensores de velocidad y dirección del viento

Para la determinación de la velocidad del viento se empleó un anemómetro de cazoletas modelo A100R, situado a 2 metros de altura (Figura 3.6).

Su fundamento se basa en un imán que gira sobre el eje del molinete generando un campo variable, que provoca el cierre de un contacto tipo lengüeta para cada revolución del rotor, este sensor no precisa de alimentación externa ya que es alimentado por la propia energía eólica.

Para la medida de la dirección del viento se utilizó una veleta modelo W200P, se trata de un potenciómetro de 1 kohm, que es un resistor con un contacto móvil, en el que el desplazamiento es función del recorrido entre dos terminales (Figura 3.6). El rango de medida es de 0 - 360° con una precisión de $\pm 3^\circ$.



Figura 3.6. Sensor de velocidad y dirección de viento.

Las principales características de los sensores descritos anteriormente, rango de señal, tipo de salida, precisión y modelo empleado aparecen descritas en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Características de los sensores utilizados.

Variable Climática	Rango de Señal	Tipo de Salida	Precisión	Sensor
Temperatura	0-1 V	-40 a + 60 °C	± 2 °C	Pt 1000
Humedad Relativa	0-1 V	0 a 100 % HR	± 1 %HR	HUMICAP 180
Radiación Global		1 mV por 100 W m ⁻²	3 %	SP1110
Radiación Neta		10 mV por W m ⁻²	1 %	Q-7.1 Net Radiometer
Lluvia		12 mA- 0.2 mm	0.2 mm	FSS500
Velocidad viento	0.2-75 ms ⁻¹		± 0.1 % ms ⁻¹ para 0.3-10 ms ⁻¹ ± 1 % ms ⁻¹ para 10-55 ms ⁻¹ ± 2 % ms ⁻¹ para > 55 ms ⁻¹	A100R

Sistema de adquisición de datos

La adquisición de datos de todos los sensores se realizó a partir de un datalogger Campbell modelo CR10X (Figura 3.7), cuyo voltaje diferencial máximo de salida es de ± 2.5 V. Todas las variables fueron registradas cada minuto y se almacenó la media de las lecturas cada quince minutos.



Figura 3.7. Sistema de gestión de datos.

3.3. Medida del estado hídrico del suelo

Potencial matricial

El seguimiento del potencial matricial del agua en el suelo, Ψ_m , se realizó mediante baterías de tensiómetros con vacuómetro tipo Bourdon (mod. Irrometer INC) y sensores de matriz granular (Watermark, mod. 200ss, Irrrometer Co.), colocados a 30, 60 y 90 cm de profundidad y a 30 cm del emisor (Figura 3.8).



Figura 3.8. Batería de tensiómetros y sensor Watermark con medidor digital.

Contenido de humedad del suelo

El contenido volumétrico de agua en el suelo fue evaluado a partir de sensores TDR, reflectometría en el dominio del tiempo (Moisture Point, mod. MP-917) y FDR, reflectometría en dominio de la frecuencia (EnviroSCAN) (Figura 3.9).



Figura 3.9. a) Equipo TDR y sondas instaladas en suelo, b) sensores FDR sobre guía c) sensores FDR instalados en campo.

3.4. Medida del estado hídrico de la planta

Potencial hídrico foliar y potencial de hoja cubierta

El estado hídrico de la planta fue evaluado a partir de medidas del potencial hídrico foliar antes del alba (Ψ_a) y a mediodía (Ψ_{md}) (Scholander *et al.*, 1965), y potencial hídrico de hoja cubierta o tallo (Ψ_c) a mediodía (McCutchan y Shackel, 1992), con cámara de presión (Soil Moisture Equipment Corp. modelo 3000) (Figura 3.10). Las medidas de Ψ_a y Ψ_{md} se realizaron sobre hojas sanas y adultas, procedentes del tercio medio de las

ramas del árbol en su orientación sur, según el procedimiento descrito por Scholander *et al.* (1965) y Turner (1981).



Figura 3.10. Cámara de presión.

Las medidas de Ψ_t se realizaron sobre hojas sanas, adultas y sombreadas, próximas a ramas principales, las cuales fueron envueltas dos horas antes de cada medida con una bolsa de plástico negro y cubiertas con papel de aluminio, a fin de evitar la transpiración e igualar su estado energético con el del tronco o tallo donde se encuentra insertada (Passioura, 1988; McCutchan y Shackel, 1992). La figura 3.11 ilustra los pasos a seguir para la preparación de las hojas seleccionadas para la determinación de Ψ_t .

La fiabilidad y rapidez de la medición, así como la facilidad para interpretar sus resultados hacen de este método uno de los más usados para determinar el estado hídrico de la planta. Sin embargo, es un método destructivo y no automatizable lo que limita en cierta medida su uso.

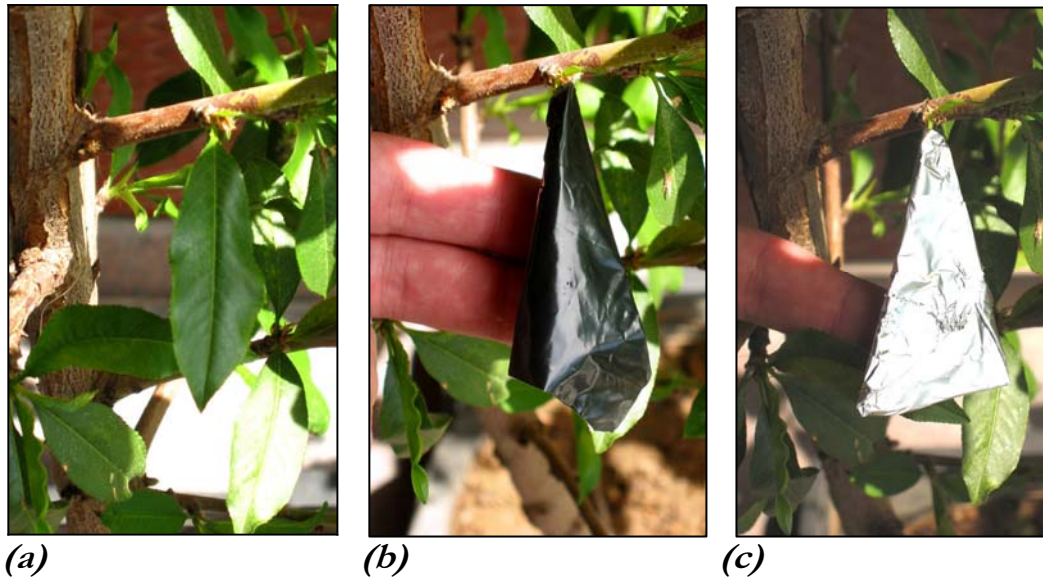


Figura 3.11. a) Elección de las hojas, b) colocación de plástico negro y c) envoltura con papel de aluminio.

Así mismo, se evaluó la intensidad y duración del déficit hídrico a partir de la integral de estrés (S_{Ψ}), determinada a partir de las medidas de potencial hídrico foliar al alba y de tallo, según la ecuación de Myers (1988):

$$S_{\Psi} = \left| \sum_{i=0}^{i=t} (\bar{\Psi}_{i,i+1} - C)n \right| \quad (\text{MPa día})$$

donde: $\bar{\Psi}_{i,i+1}$ es la media del potencial hídrico para el intervalo $i, i+1$ y C , es el valor máximo del potencial hídrico medido durante cada periodo y n el número de días del intervalo.

Potencial osmótico y potencial de presión

El potencial osmótico foliar (Ψ_o) fue medido con un osmómetro Roebling mod. 13DR (Figura 3.12), calibrado con una solución patrón de osmolalidad conocida ($300 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$) y agua destilada ($0 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$). Para ello y en días señalados, tras la medida del potencial hídrico foliar las hojas fueron inmediatamente envueltas en papel de aluminio, introducidas en nitrógeno líquido y almacenadas a $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$. La determinación de Ψ_o se realizó a partir del jugo celular extraído mediante centrifugación a 10000 rpm de la muestra previamente descongelada a temperatura ambiente.

El potencial de presión (Ψ_p) fue obtenido por diferencia entre el potencial hídrico foliar (Ψ_1) y el potencial osmótico:

$$\Psi_p = \Psi_1 - \Psi_o$$

El potencial osmótico a máxima saturación (Ψ_{os}) fue determinado en hojas tomadas antes del alba, adyacentes a las de la medida del potencial hídrico, las cuales eran saturadas inmediatamente después de ser muestreadas, introduciendo los pecíolos en vasos de agua destilada y mantenidas en oscuridad durante 24 h, tras lo cual eran congeladas en nitrógeno líquido. Las medidas se realizaron igualmente con un osmómetro Roebling mod. 13DR.



Figura 3.12. Osmómetro ROEBLING mod. 13DR.

Conductancia foliar

La conductancia foliar (g_j) fue medida en el mismo tipo de hojas que Ψ_j , usando un porómetro de estado estacionario (LI-COR Inc., modelo LI-1600) (Figura 3.13). El sensor de humedad se calibró regularmente con soluciones salinas de referencia y el material desecante se sustituyó antes de cada medida.

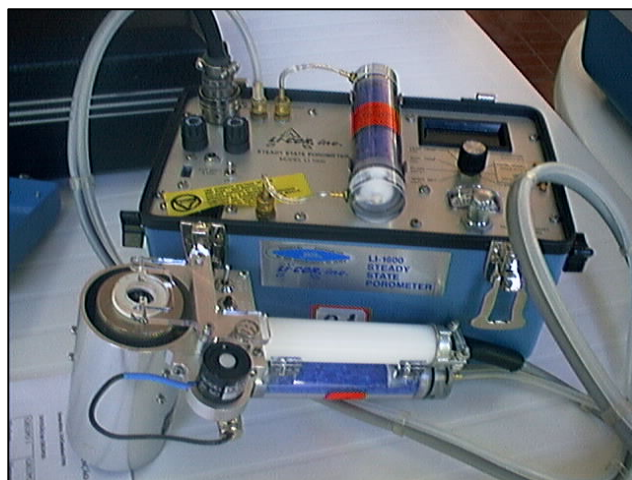


Figura 3.13. Porómetro LICOR LI-1600.

Variaciones de diámetro de tronco

Las variaciones de diámetro de tronco fueron medidas con sensores de desplazamiento variable y de respuesta lineal tipo LVDT o “Linear Variable Differential Transformer” de la marca Solartron, con un rango de medida lineal de 5 mm y 1 a 10 micras de precisión (Figura 3.14). Estos sensores constan de un núcleo magnético que se mueve impulsado por una aguja en contacto con el tronco. Dicho núcleo discurre por el interior de un cilindro, entre un embobinado primario y otro secundario. A la bobina primaria se le aplica una señal portadora (corriente alterna ≈ 10 V) que produce un campo magnético alrededor del núcleo, y este campo magnético induce un voltaje en la bobina secundaria, que es proporcional al desplazamiento experimentado por el órgano vegetal donde esté instalado.

A partir de las variaciones de diámetro de tronco se determinaron los parámetros indicadores del estado hídrico propuestos por Kozlowski (1967): máxima contracción diaria de tronco (MCD), tasa de crecimiento diaria de tronco (TCD) y crecimiento acumulado (CA). MCD se calculó como la diferencia entre el diámetro máximo alcanzado antes del alba y el mínimo a mediodía (Ferreles y Goldhamer, 2000). TCD a partir de la diferencia entre el máximo diámetro de dos días consecutivos y CA como la suma de los TCD en un intervalo de tiempo determinado (Figura 3.15).



Figura 3.14. Sensor LVDT y portasensor en tronco.

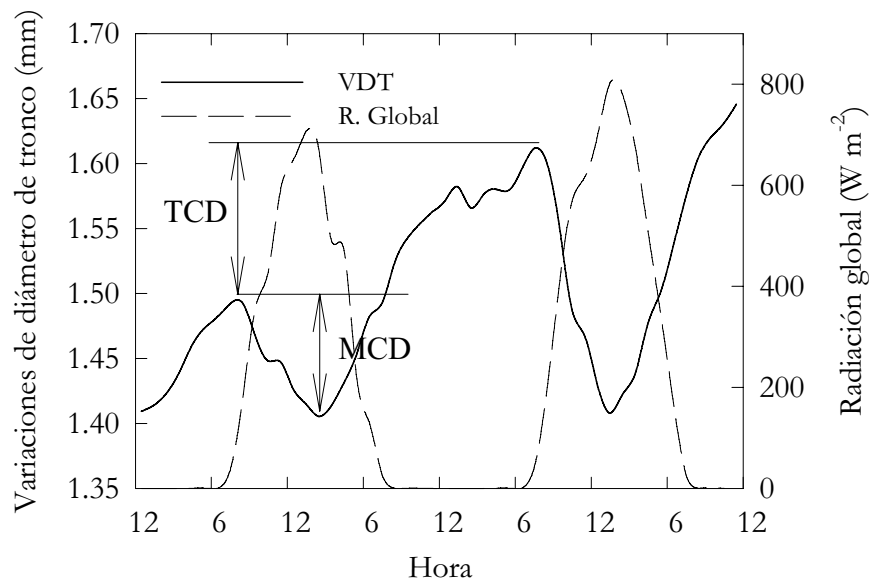


Figura 3.15. Representación gráfica de la máxima contracción diaria (MCD) y tasa de crecimiento diaria de tronco (TCD) a partir de la variación del diámetro de tronco (VDT) en almendros.

Sistema de adquisición de datos

Los sensores LVDT fueron conectados a 4 dataloggers MicroIstis, conectados entre si mediante comunicación RS-485 (Figura 3.16), los datos fueron registrados cada 10 minutos y recogidos vía módem GSM.



Figura 3.16. Equipos MicroIstis en parcela experimental.

**Respuesta agronómica y fisiológica
de almendros jóvenes al riego
deficitario**

4.1. Introducción

El riego deficitario controlado (RDC) se ha constatado como una estrategia de riego altamente eficiente en numerosas especies leñosas, especialmente cuando son cultivadas en zonas semiáridas. Su objetivo principal es reducir los aportes de agua de modo que la producción y calidad de las cosechas sean poco o nada afectadas.

El almendro, considerado como un cultivo tolerante al estrés hídrico (Fereres y Goldhamer, 1990; Hutmacher *et al.*, 1994; Torrecillas *et al.*, 1996) es uno de los cultivos en el que, tanto los riegos deficitarios constantes (RD) (León *et al.*, 1985; Ruiz-Sánchez *et al.*, 1988), como el RDC (Girona, 1992; Girona y Marsal, 1995) han sido más exitosos. Los porcentajes de ahorro de agua en RDC rondan el 50 % respecto a las máximas necesidades del cultivo (Girona, 1992; Girona *et al.*, 1993a; 1997; 1995; Nortes *et al.*, 2002; Romero *et al.*, 2004a; Girona *et al.*, 2005), siendo el período más adecuado para la aplicación de un déficit hídrico la fase IV del cultivo. Además, los resultados derivados de estudios realizados en diferentes ubicaciones y con variedades distintas son muy similares en cuanto ahorro de agua y producciones obtenidas con respecto a árboles bajo condiciones no limitantes de agua en el suelo (Goldhamer y Viveros, 2000; Esparza *et al.*, 2001b; Nortes *et al.*, 2002; Romero *et al.*, 2004a; Girona *et al.*, 2005; Goldhamer *et al.*, 2006).

Aunque existe un gran número de trabajos sobre riego deficitario en almendro, la generalidad de ellos se ha realizado en plantaciones adultas. De ahí, la conveniencia de evaluar los efectos del riego deficitario a corto y medio plazo sobre la respuesta agronómica y fisiológica de plantaciones jóvenes, y de este modo, poder prever su posible influencia a más largo plazo.

4.2. Material y métodos

Material vegetal condiciones experimentales y tratamientos

Los ensayos se realizaron durante el periodo 2001-2004 en una parcela experimental de almendros (*Prunus dulcis* (Mill.) Webb, cv 'Marta' injertada sobre el portainjerto 'Mayor'). La parcela, de aproximadamente 1 ha (Figura 4.1, 4.2 y 4.3), pertenece a la Estación Experimental Agroalimentaria (ESEA) 'Tomás Ferro' de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) situada en La Palma, Cartagena (37° 41' N, 0° 57' E; Figura 4.1). La plantación, inicialmente de patrón 'Mayor', se realizó en 1999 y en la primavera de 2000 se injertó con yemas de la variedad 'Marta'. Los árboles dispuestos a marco de 7 m x 6 m, se regaron por goteo, a partir de un único lateral por hilera de árboles con 4 goteros por árbol, y desde mediados de 2002, momento en el que se alcanzó la situación definitiva del diseño agronómico planteado, a partir

de 6 goteros árbol⁻¹ de 4 L h⁻¹, con los que se alcanzó un porcentaje de humectación del suelo del 25 %.

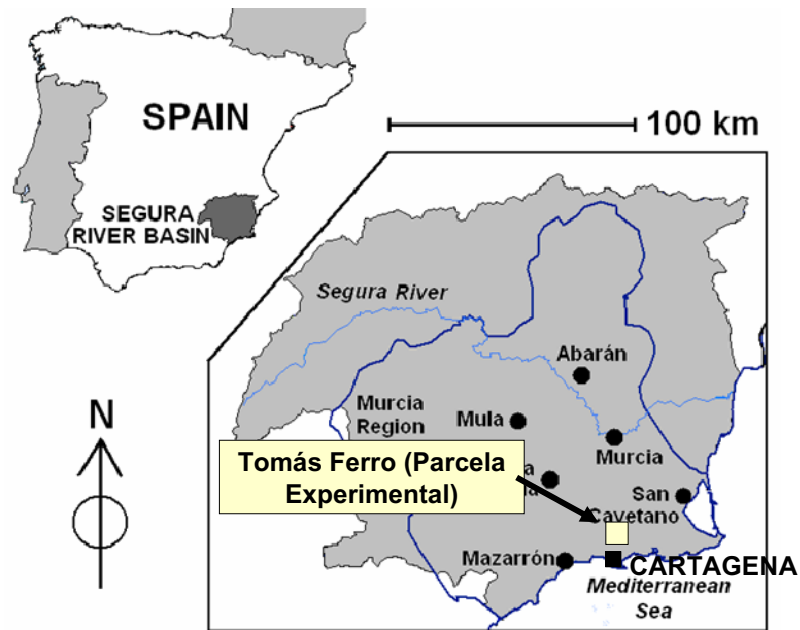


Figura 4.1. Plano de localización de la parcela experimental.



Figura 4.2. Vista general de la parcela experimental de almendros (ETSIA-UPCT).

La climatología, de acuerdo con los datos registrados en una estación climática automática situada a 100 m de la parcela experimental, fue típicamente mediterránea, con una evapotranspiración de referencia (ET_o) y precipitación media anual de 1200 y 350 mm, respectivamente (Figura 4.4).

El suelo, de textura franco-arcillo-limosa, con un contenido de agua útil de 0.18 m m⁻¹ y densidad aparente entre 1.3 y 1.55 g cm⁻³, es pobre en potasio (120 ppm) y materia orgánica (0.77 %), rico en fósforo (82 ppm) y no presenta problemas de salinidad (CE extracto de saturación 1.4 dS m⁻¹). El agua de

riego mantuvo una conductividad eléctrica media ($CE_{25^{\circ}C}$) de 1.2 dS m^{-1} . Todos los árboles recibieron idénticos cuidados agrícolas a excepción del riego que varió de acuerdo con el tratamiento.



Figura 4.3. Vista aérea de la Estación Experimental Agroalimentaria (ESEA) ‘Tomás Ferro’.

Se ensayaron 5 tratamientos de riego (Figura 4.5): un control, T_{CTL} , regado al 120 % de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) durante toda la campaña de riego; dos de riego deficitario continuo (RD), T_{RD80} y T_{RD60} , regados al 80 y 60 % de la ET_c , respectivamente; y dos de riego deficitario controlado (RDC), T_{RDC40} y T_{RDC20} , regados al 100 % de la ET_c durante todo el año, excepto en la fase IV del crecimiento de fruto, período considerado no crítico (Girona y Marsal, 1995), que se regó al 40 y 20 % de la ET_c , respectivamente. La ET_c fue calculada a partir de la ET_o de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998), de los coeficientes de cultivo (K_c) proporcionados por la FAO (Doorenbos y Pruitt, 1986) y del coeficiente de corrección debido al área sombreada por el cultivo (K_r), tomado de Fereres *et al.* (1981a). El diseño experimental fue de bloques al azar, con tres repeticiones por tratamiento, cada una formada por 3 hileras de 4 árboles, siendo la central la utilizada para las medidas experimentales y el resto actuaron como bordes.

Durante el primer año de ensayo el tratamiento T_{RDC20} , recibió idéntica dotación hídrica que T_{CTL} (Tabla 4.1), al considerarse el 20% de la ET_c como déficit muy severo para el primer año de injerto.

La figura 4.4 recoge los volúmenes de riego aplicados al tratamiento control y las precipitaciones mensuales ocurridas durante todo el periodo experimental. En los cuatro años de ensayo, el inicio de la campaña de riego tuvo lugar en abril y finalizó en octubre, mientras que las lluvias más importantes tuvieron lugar, fundamentalmente, en otoño e invierno.

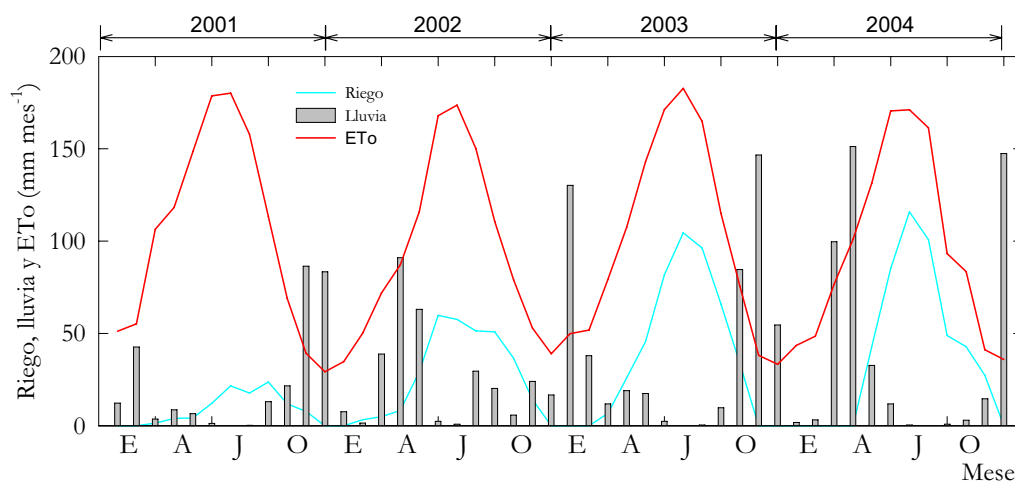


Figura 4.4. Tasas de evapotranspiración de referencia, precipitación y riego mensual aplicado al tratamiento control durante el período 2001-2004.

Tabla 4.1. Volúmenes de agua aplicados durante el período experimental ($m^3 ha^{-1}$) y porcentaje respecto al control, para los 5 tratamientos de riego.

Año	Volumen de riego ($m^3 ha^{-1}$)									
	T_{CTL}	T_{RD80}	%	T_{RD60}	%	T_{RDC40}	%	T_{RDC20}	%	
2001	1045	881	84	678	65	548	52	1049	100	
2002	3167	1936	61	1524	48	1437	45	1403	44	
2003	4610	3405	74	2662	58	2413	52	2079	45	
2004	4638	3053	66	2729	59	2708	58	2196	47	
Medio	3365	2318	69	1898	56	1776	53	1681	50	

El volumen medio de agua aplicado al tratamiento control durante los 4 años de ensayo fue de $3365 m^3 ha^{-1}$. Éste fue incrementándose en relación al crecimiento de los árboles, siendo el ahorro medio de agua respecto al control del 31, 44, 47 y 50 % en T_{RD80} , T_{RD60} , T_{RDC40} y T_{RDC20} , respectivamente (Tabla 4.1).

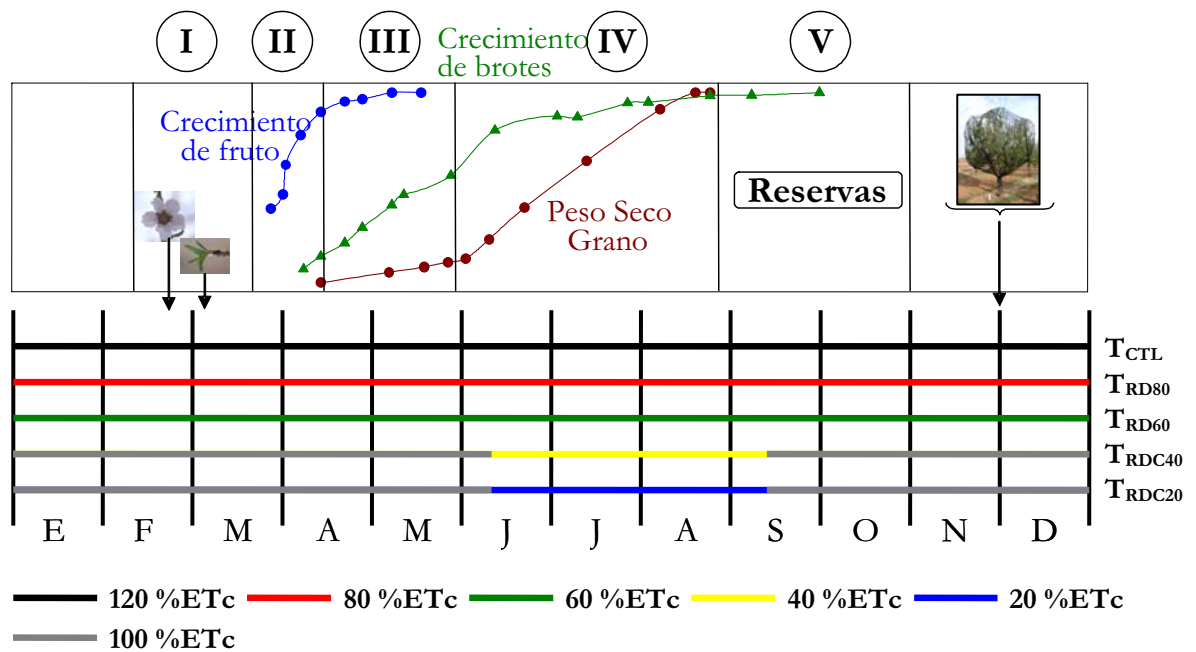


Figura 4.5. Porcentaje de la ETC aplicado en cada tratamiento de riego y período fenológico del cultivo.

Medidas

Agua-Suelo

El potencial matricial de agua en el suelo (Ψ_m) se determinó mediante tensiómetros con vacuómetro tipo Bourdon colocados a 30, 60 y 90 cm de profundidad, en tres árboles por tratamiento. Las lecturas fueron tomadas de forma periódica 2-3 veces por semana. El contenido volumétrico de agua en el suelo (θ_v) se determinó de forma continua con sensores FDR, a partir de 1 sonda por repetición situada a 15 cm del emisor y 6 sensores colocados a 10, 20, 30, 40, 50 y 90 cm de profundidad.

Agua-Planta

El potencial hídrico foliar al alba (Ψ_a) y a mediodía (Ψ_{md}) se midió cada dos semanas en 2002 y semanalmente en 2003, con cámara de presión. Para ello, se tomaron dos hojas adultas por árbol y 2 árboles por repetición. Adicionalmente a los seguimientos estacionales, se realizaron dos evoluciones diarias en 2002 y 2003, coincidiendo con el final del período de déficit en los tratamientos de RDC, del potencial de tallo a mediodía (Ψ_t) y conductancia foliar (g_f) en idéntico número de hojas que en las medidas estacionales.

El potencial osmótico actual (Ψ_o) se determinó quincenalmente con osmómetro (Roebing, mod. 13 DR), a partir de las hojas utilizadas en la

determinación de Ψ_a , las cuales fueron envueltas con papel aluminio e introducidas en nitrógeno líquido, y posteriormente, almacenadas a $-20\text{ }^\circ\text{C}$ hasta su determinación. El potencial de presión (Ψ_p) se calculó como diferencia entre Ψ_a y Ψ_o . El potencial osmótico a máxima saturación (Ψ_{os}) se midió en hojas recogidas antes del alba, las cuales fueron saturadas inmediatamente, introduciendo sus pecíolos en vasos con agua destilada y mantenidas en oscuridad durante 24 h, tras lo cual fueron congeladas en nitrógeno líquido.

Fenología

Durante los años 2002 y 2003 se realizó el seguimiento de los estados fenológicos de yemas de flor descritos por Fleckinger (1945), dos veces por semana desde el mes de febrero (yemas en ‘estado A’ o de reposo), en todos los tratamientos de riego, y a partir de una rama seleccionada por árbol y repetición de 1 m de longitud y 1.5 cm^2 de sección en su base.

Crecimiento vegetativo

El crecimiento vegetativo se evaluó en base a: i) distribución radical, ii) longitud de brotes, iii) diámetro de tronco, iv) superficie sombreada, v) área foliar, y vi) peso de la madera eliminada durante la poda.

El patrón de enraizamiento del almendro se estudió el invierno de 2002 y 2003, a partir de dos árboles control. Para ello se excavó una zanja de 2 m de profundidad y 4 m de largo, perpendicular a la línea portagoteros y en la zona de proyección de la copa (Figura 4.6). Se lavó con agua a presión una banda de 30 cm en todo el perfil descubierto y a través de una malla tridimensional de celda de $20\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ se realizó el muestreo radical. Las raíces fueron clasificadas por diámetros: $< 1\text{ mm}$ y $> 1\text{ mm}$ a partir de un sistema de análisis de imágenes (WIN RHIZO v4.0b). Los resultados fueron expresados como densidad de longitud radicular (DLR, cm de raíz por cm^{-3} de suelo) y densidad de peso radicular (DPR, g de peso seco de raíz por cm^{-3} de suelo).



Figura 4.6. Detalle del método de la recogida de raíces. ‘Trinchera’.

El diámetro del tronco se determinó dos veces al año (antes del inicio y final de la actividad del cambium, enero y noviembre, respectivamente) y en los cuatro años de estudio, a partir de medidas del perímetro de tronco, de todos los árboles testigo, y a una altura sobre el suelo de 40 cm (Figura 4.7). A partir de estos datos se obtuvo el área de la sección transversal del tronco (ΔSTT).



Figura 4.7. Detalle del punto de medida del tronco.

La superficie sombreada fue calculada a partir de los diámetros de copa de todos los árboles testigo, tanto en la dirección de las hileras como en la de las calles, asumiendo que la proyección de la copa describe un área circular.

Para la determinación del área foliar total se envolvió un árbol representativo de cada tratamiento con una malla (Figura 4.8), a fin de recoger la totalidad de sus hojas y determinar el peso seco total. Previamente, se evaluó mediante un sistema de análisis de imagen el área foliar de una muestra de 150 hojas por repetición y tratamiento, y posteriormente su peso seco. La superficie foliar total del árbol fue obtenida mediante el producto del área específica foliar por el peso seco total.

Anualmente, en invierno se realizó la poda de formación y de mantenimiento. Las ramas eliminadas de cada árbol fueron inmediatamente e independientemente pesadas con una balanza Scaltec Mod. SSH91 (capacidad 150 kg, repetibilidad $\leq \pm 5$ g). Adicionalmente, en 2003 se determinó el peso seco de la poda total de dos árboles por tratamiento. A partir de la relación obtenida entre el peso fresco y seco total se estimó el peso seco de las ramas de poda para el resto del período experimental (Figura 4.9).



Figura 4.8. Recogida de hojas al final de la estación.

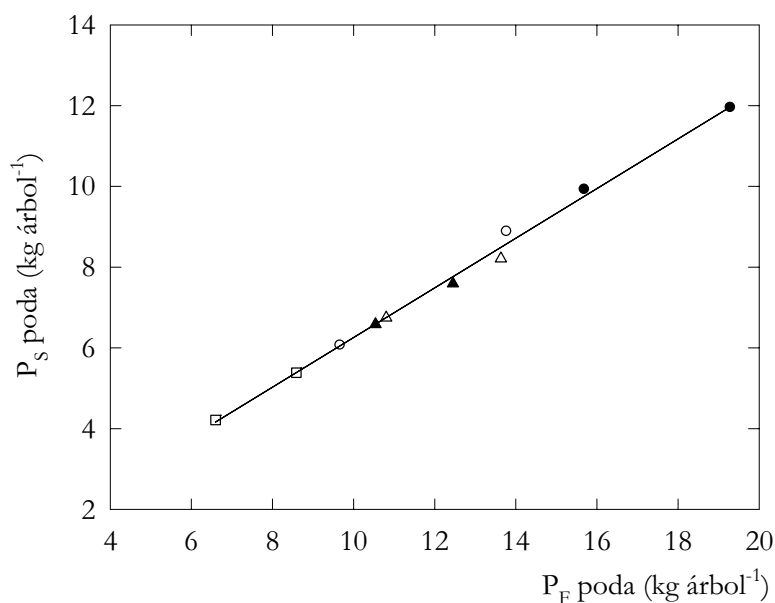


Figura 4.9. Relación peso fresco *vs* peso seco de los restos de poda, para los cinco tratamientos de riego T_{CTL} (●), T_{RD80} (▲), T_{RD60} (△), T_{RDC40} (□) y T_{RDC20} (○) en 2003. ($P_S = 0.61P_F + 0.10$; $R^2 = 0.99$; $P < 0.001$).

Desarrollo del fruto y cosecha

Durante los años 2002, 2003 y 2004 se realizó el seguimiento de la dinámica de crecimiento del fruto desde el cuajado (marzo) hasta el tamaño definitivo del fruto (junio), midiendo semanalmente los diámetros: longitudinal (\varnothing_L), ecuatorial (\varnothing_e) y transversal (\varnothing_T) con un calibre digital

Craftsman, en 25 frutos elegidos al azar en dos árboles por repetición y tratamiento.

De forma paralela a las medidas realizadas *'in situ'*, se escogieron al azar 15 frutos por repetición, que fueron llevados al laboratorio para determinar los diferentes diámetros, peso fresco y seco (estufa ventilada a 65 °C, hasta peso constante), tanto de la pepita como de la cáscara, con balanza (MetLer PJ Delta Range) de 0.001 g de precisión.

La recolección fue controlada de forma individual en 15 árboles por tratamiento (Figura 4.10). Para ello, se pesó la producción total de cada árbol y posteriormente se tomó una muestra de aproximadamente 500 g por árbol, en la que se determinó el número total de almendras, peso medio de la almendra y pepita, rendimiento, porcentaje de semillas dobles, vacías y pelonas.



Figura 4.10. Secado al aire de la cosecha individualmente.

4.3. Resultados y discusión

Estado hídrico del agua en el suelo

Los valores del potencial matricial del agua en el suelo (Ψ_m), en las profundidades de 30, 60 y 90 cm, reflejaron la influencia del régimen de riego aplicado (Figura 4.11 y Tabla 4.2). El tratamiento control (T_{CTL}) mantuvo durante casi todo el año valores medios correspondientes a capacidad de campo (aproximadamente -20 kPa) en todas las profundidades estudiadas (Figura 4.11).

Los tratamientos de riego deficitario (RD), regados al 80 y 60 % de la ETc durante todo el año (T_{RD80} y T_{RD60} , respectivamente), registraron valores medios, en torno a -50 kPa para T_{RD80} y -65 kPa en T_{RD60} , en todo el perfil estudiado, incluso con valores fuera de rango (<-80 kPa) en algún momento

del año. Las precipitaciones ocurridas en otoño unidas a la menor demanda evaporativa (Figura 4.4) fueron insuficientes para recargar el perfil del suelo (Tabla 4.2).

En los tratamientos de RDC (T_{RDC40} y T_{RDC20}), con una aplicación del 100 % de la ET_c durante las fases II y III (Figura 4.5), Ψ_m mostró valores similares al control a 30 cm, e inferiores con el aumento de la profundidad. Esto es acorde con la ausencia de aplicación de la fracción de lavado. Durante la fase IV, período de reducción del riego en los tratamientos de RDC (Figura 4.5), Ψ_m experimentó una rápida y constante disminución, llegando a valores fuera de rango, los que se mantuvieron durante todo el verano (Figura 4.11 y Tabla 4.2), debido a la elevada demanda evaporativa y ausencia de lluvias (Figura 4.4). Posteriormente y tras la restitución del riego al 100 % de la ET_c , mediados de septiembre (Figura 4.5), Ψ_m alcanzó valores similares a T_{CTL} a los 4 días a 30 cm y un mes más tarde a 60 y 90 cm de profundidad.

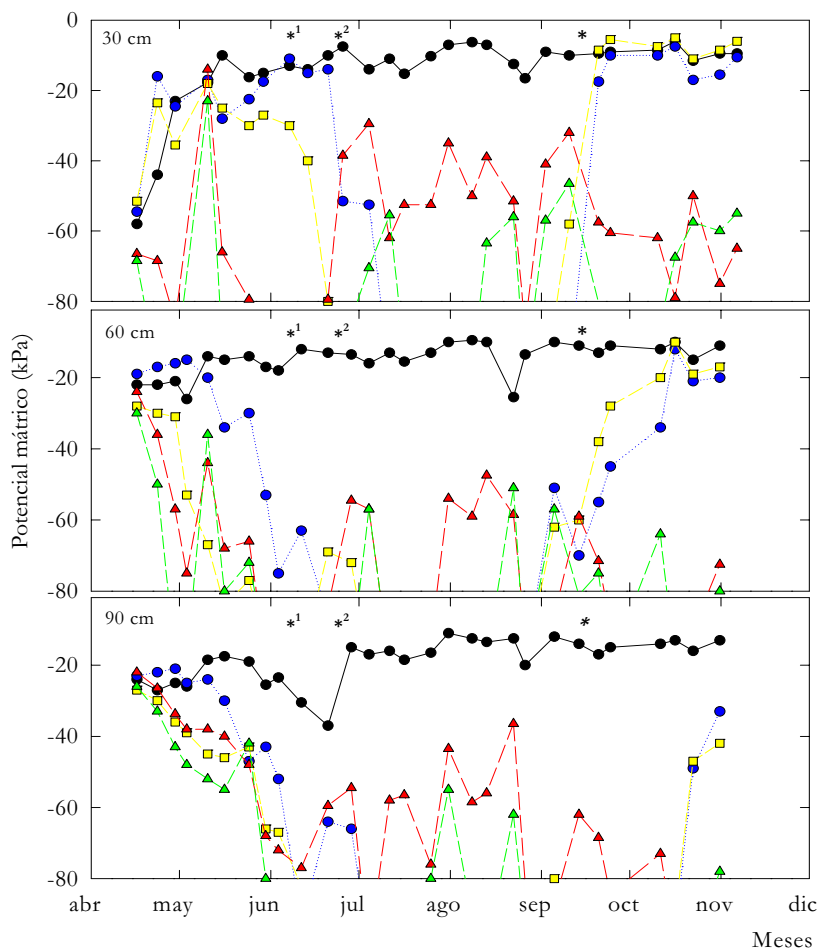


Figura 4.11. Evolución del potencial matricial (Ψ_m) en los 5 tratamientos de riego: T_{CTL} (—●—), T_{RD80} (---▲---), T_{RD60} (---△---), T_{RDC40} (.....○.....) y T_{RDC20} (---■---), durante el 2002, a 30, 60 y 90 cm de profundidad. *¹ y *² indican el cambio de riego en los tratamientos T_{RDC40} y T_{RDC20} al 40 % y 20 % de la ET_c respectivamente; * indica la restitución del riego al 100 %.

Teniendo en cuenta que la porción de suelo humectado por el sistema de riego localizado se encuentra por debajo del 30 %, los valores de Ψ_m registrados durante los períodos de reducción del riego, se pueden considerar muy bajos y capaces de inducir un déficit hídrico significativo en la planta (Ferer *et al.*, 1981b; Du Plessis, 1988).

Tabla 4.2. Valores medios prerriego de Ψ_m en tres momentos característicos de 2002, según la estrategia de riego y para los 5 tratamientos, a 30, 60 y 90 cm de profundidad.

Tratamiento	Profundidad (cm)	Ψ_m prerriego (kPa)		
		Abr – May	Jun - Ago	Sep – Nov
T_{CTL}		-16.4 a	-11.1 a	-9.17 a
T_{RD80}		-68.0 b	-64.1 b	-59.0 b
T_{RD60}	30	-79.6 b	<-80 c	-59.4 b
T_{RDC40}		-26.8 a	<-80 d	-8.3 a
T_{RDC20}		-18.4 a	<-80 d	-12.6 a
T_{CTL}		-18.9 a	-14.0 a	-11.6 a
T_{RD80}		-58.5 bc	-76.9 b	<-80 b
T_{RD60}	60	-70.4 c	<-80 c	<-80 b
T_{RDC40}		-35.5 ab	<-80 c	-22.0 a
T_{RDC20}		-21.6 a	<-80 c	-21.8 a
T_{CTL}		-22.8 a	-18.7 a	-14.3 a
T_{RD80}		-39.3 b	-64.5 b	<-80 b
T_{RD60}	90	-47.4 b	<-80 c	<-80 c
T_{RDC40}		-44.3 b	<-80 d	-44.5 d
T_{RDC20}		-37.9 b	<-80 d	-41.0 d

Los valores medios de cada profundidad y período de estudio, seguidos de letras distintas indican la existencia de diferencias significativas a nivel de columna por cada profundidad y tratamiento, según el test de Tukey_{0.05}.

La evolución de la humedad volumétrica expresada de forma relativa al máximo valor obtenido tras una lluvia de 80 mm, y de acuerdo con los registros obtenidos a partir de sondas capacitivas, presentó durante el mes de julio un mayor agotamiento del agua en el suelo en los tratamientos deficitarios que en el control, 50-60 % frente al 10-15 % del control en los

primeros 30 cm de profundidad (Figura 4.12). La alta demanda evaporativa de este período (Figura 4.4) y la elevada actividad radicular en esta profundidad (Figuras 4.16 y 4.17) acentuaron los cambios de contenido de humedad entre los diferentes regímenes de riego. El registro continuo de la humedad volumétrica del suelo fue fiel reflejo tanto de la ocurrencia de los riegos programados como de la profundidad efectiva del riego (Figura 4.12).

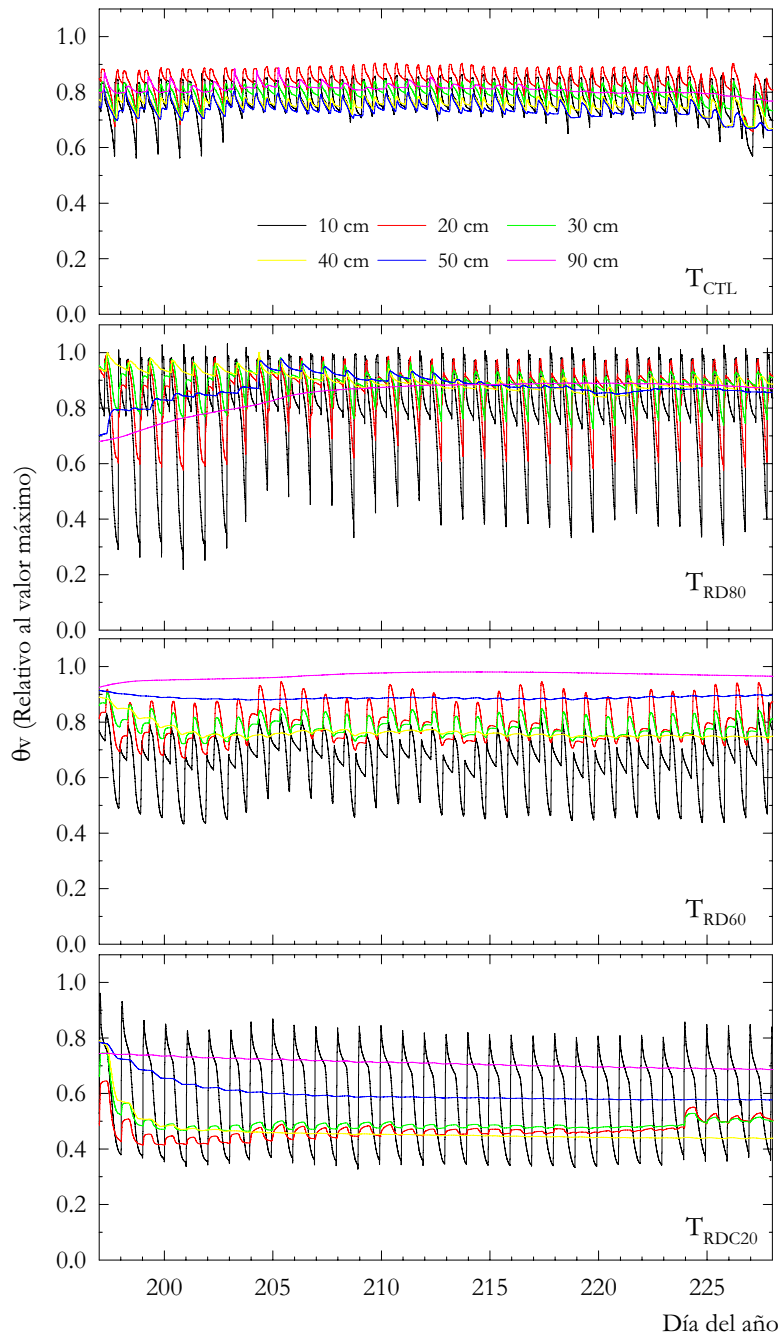


Figura 4.12. Evolución del contenido de humedad volumétrica relativa al valor máximo obtenido tras una lluvia de 80 mm, en 4 tratamientos de riego y para 6 profundidades diferentes. Julio de 2002.

Estado hídrico del agua en la planta

Durante la mayor parte del período experimental el tratamiento control (T_{CTL}) mostró valores medios de potencial hídrico foliar antes del alba (Ψ_a) en torno a -0.41 MPa (Figura 4.13 a y d), lo que indica que estos árboles no presentaron condiciones limitantes en su transpiración (Castel y Fereres, 1982; Torrecillas *et al.*, 1989b; 1989a; Girona *et al.*, 2004; Romero *et al.*, 2004b). En octubre de 2002 se alcanzó un valor mínimo de -0.60 MPa, como consecuencia de la supresión del riego, tras la ocurrencia de lluvias, al objeto de mejorar la eficiencia de uso de las lluvias acaecidas.

Los tratamientos T_{RD80} y T_{RD60} registraron en la primavera de 2002 valores de Ψ_a cercanos a -0.5, no siendo significativamente diferentes entre ellos, pero sí con respecto a T_{CTL} (Figura 4.13 a). La elevada pluviometría en la primavera de este año (193 mm) junto a una menor demanda evaporativa pueden explicar el ligero déficit alcanzado.

Durante la fase IV, período de elevada demanda climática, el tratamiento T_{RD60} alcanzó valores de Ψ_a inferiores a T_{RD80} (Figura 4.13 a y d). En ambos tratamientos, los valores fueron ligeramente más altos en 2002 que en 2003, lo que fue asociado al mayor agotamiento del agua del suelo, al tratarse del tercer año de aplicación de los tratamientos, y a la menor presencia de lluvias durante este último año, tanto previas como durante el período (Figura 4.4). Los tratamientos de déficit hídrico durante los meses de máxima demanda evaporativa (T_{RDC40} y T_{RDC20}) mantuvieron valores de Ψ_a próximos a T_{CTL} durante el periodo de riego al 100 % de la ET_c , mientras que durante la reducción del riego (Fase IV, Figura 4.5) alcanzaron valores mínimos de -0.8 y -1.0 MPa, respectivamente. Estos valores fueron menores a los obtenidos por T_{RD80} y T_{RD60} (Figura 4.13). Niveles de estrés hídrico muy superiores a éstos ($\Psi_a < -2$ MPa) han sido observados en esta fase en almendro adultos sometidos a RDC (Goldhamer, 1996; Romero *et al.*, 2004b). Durante la fase postcosecha y tras la restitución del riego al 100 % de la ET_c en ambos tratamientos, Ψ_a alcanzó niveles similares a los del control, al siguiente día de medida (Figura 4.13 a y d). En ningún caso se alcanzaron durante esta fase valores de Ψ_a inferiores o dentro del rango [-1.0 , -1.5 MPa], los que son considerados perjudiciales para el cultivo (Girona y Marsal, 1995).

El déficit hídrico alcanzado en 2002 no generó situaciones de pérdida de turgencia foliar en ningún tratamiento. El mayor déficit generado por el tratamiento T_{RDC20} disminuyó significativamente sus niveles de potencial de presión (Ψ_p) (Figura 4.13 b), lo que indica que el potencial osmótico actual no disminuyó lo suficiente como para mantener la turgencia foliar en los mismos niveles que el control. Sin embargo, los tratamientos de RDC con valores de

$\Psi_a \leq -0.8$ MPa durante más de dos meses, fueron capaces de desarrollar mecanismos de ajuste osmótico. Las diferencias de potencial osmótico saturado (Ψ_{os}) respecto a T_{CTL} fueron muy similares para ambos tratamientos y del orden de 0.30 MPa (Figura 4.13 c). Este grado de ajuste osmótico parece ser el responsable del mantenimiento de la turgencia celular (Kramer, 1983; 1988) al final de la fase IV en T_{RDC40} y T_{RDC20} (Figura 4.13 c). Albaricoqueros adultos necesitaron valores inferiores a -1.5 MPa de Ψ_a para desarrollar este mecanismo de tolerancia a la sequía (Torrecillas *et al.*, 1999).

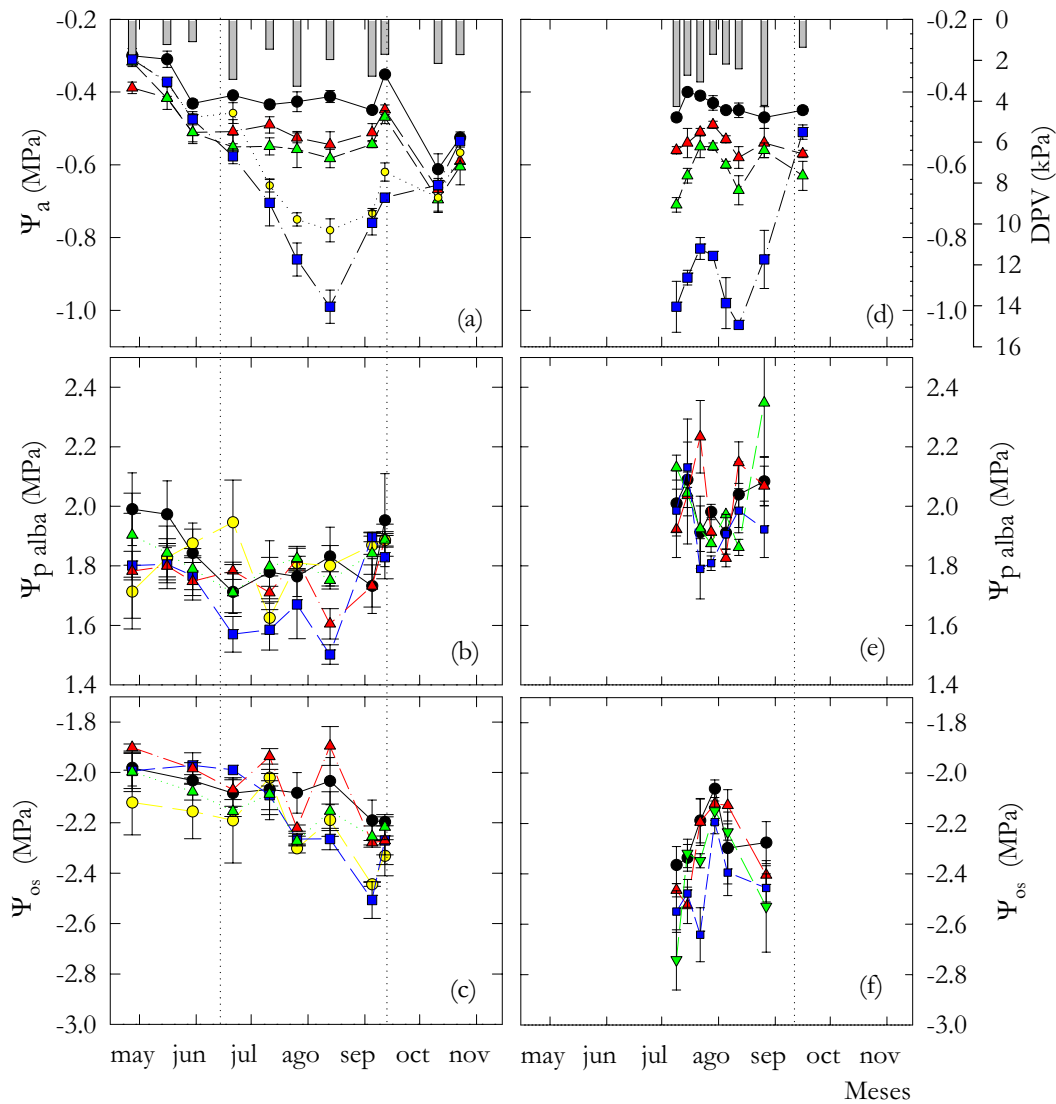


Figura 4.13. Evolución estacional de potencial hídrico al alba (Ψ_a), potencial de presión (Ψ_p) y potencial osmótico saturado (Ψ_{os}) de los tratamientos de riego ensayados: T_{CTL} (—●—), T_{RD80} (---▲---), T_{RD60} (·····▲·····), T_{RDC40} (-·-·-○-·-·-) y T_{RDC20} (- - -■ - - -) durante 2002 y 2003. Cada punto corresponde a la media de 3 repeticiones \pm ES. La línea de puntos delimita el período de aplicación del RDC. Las barras indican los valores del déficit de presión de vapor máximo diario (DPV).

Durante 2003, el mayor estrés hídrico alcanzado en el tratamiento T_{RDC20} promovió un ajuste osmótico a mediados de julio, con una diferencia de 0.40 MPa con respecto al control (Figura 4.13 f). En el resto de tratamientos el déficit hídrico no generó diferencias significativas en las componentes del potencial hídrico foliar antes del alba (Figura 4.13 e y f). Similares valores de ajuste osmótico (≈ -0.3 MPa) se han encontrado en almendro sometido a estrés hídrico (Castel y Fereres, 1982; Romero *et al.*, 2004b).

El estudio del estado hídrico de la planta se completó con dos evoluciones diarias de Ψ_t y g_i : una realizada en septiembre de 2002 y otra en agosto de 2003 (Figura 4.14 a y b).

Ψ_t mostró un ritmo circadiano característico, con valores máximos al alba y mínimos a mediodía. En T_{CTL} el descenso de Ψ_t en las horas centrales del día fue más acusado en la evolución realizada en agosto de 2003 que en la de septiembre de 2002 (Figura 4.14 b), lo que puede estar asociado a una mayor demanda evaporativa (McCutchan y Shackel, 1992; Romero y Botía, 2006). Los tratamientos de riego deficitario constante mostraron valores similares a T_{CTL} en 2002 e inferiores en 2003, excepto los de las primeras horas del día de T_{RD80} que fueron similares a T_{CTL} . Hecho que puede estar ligado a un mayor agotamiento de las reservas de agua del suelo con el avance del ensayo. Los tratamientos de RDC, regados al 40 y 20 % de la ETc presentaron valores de Ψ_t inferiores a T_{CTL} (Figura 4.14 a y b). Las reducciones en T_{RDC20} fueron del orden de 0.4 y 0.6 MPa antes del alba y de 0.8 y 1.5 MPa a mediodía en 2002 y 2003, respectivamente (Figura 4.14 a y b).

En T_{CTL} la conductancia foliar (g_i), durante las horas centrales del día alcanzó valores superiores a $250 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, indicadores de un período de alta demanda hídrica y elevada radiación fotosintéticamente activa (RFA) (Figura 4.14). La conducta del estoma fue la típica de árboles bien regados con valores altos y relativamente constantes en el período de máxima RFA. Similares valores de g_i , en almendros bien regados, fueron obtenidos por otros autores (Marsal *et al.*, 1997; Romero *et al.*, 2004b; Girona *et al.*, 2005).

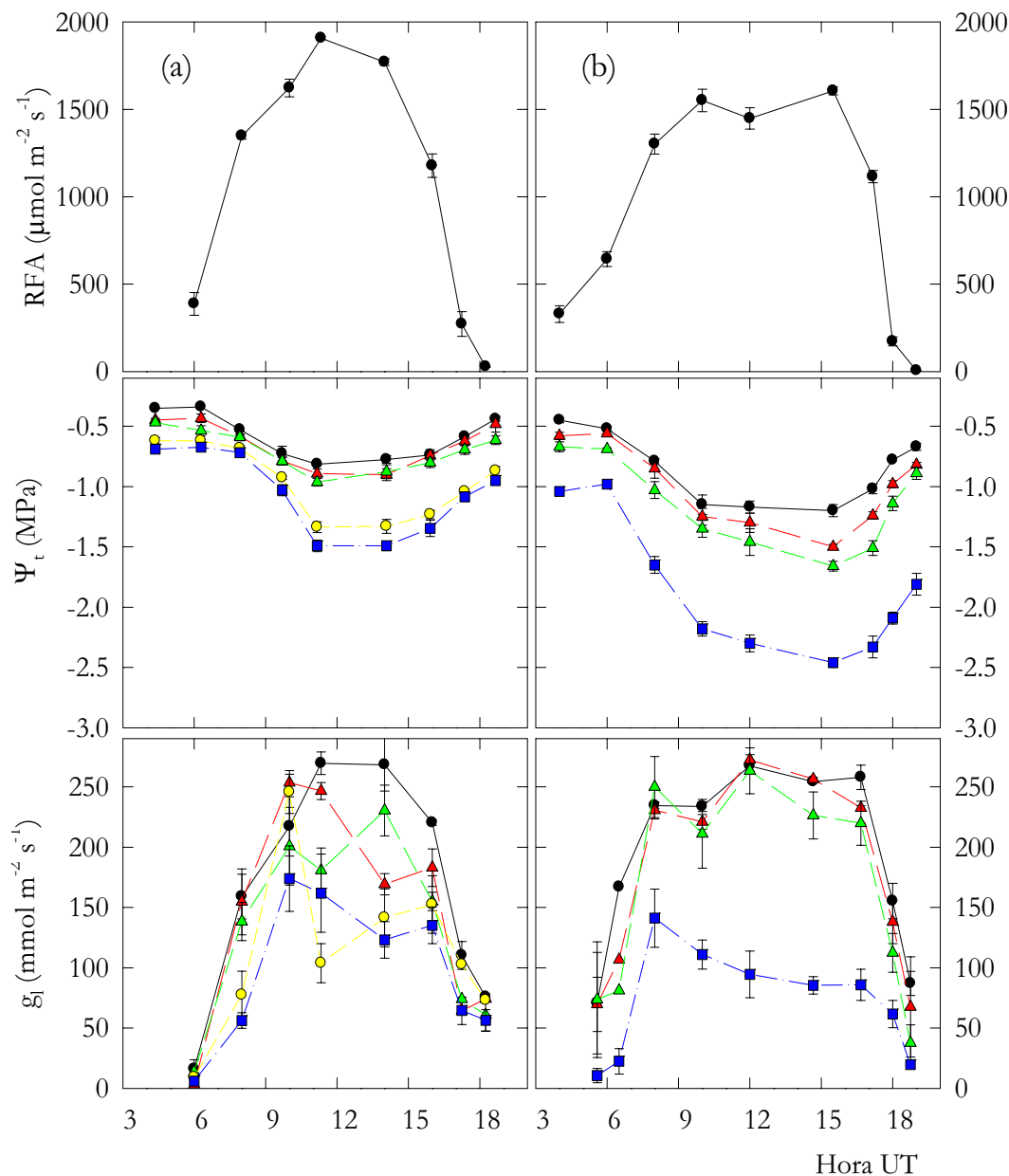


Figura 4.14. Evolución diaria de la radiación fotosintéticamente activa (RFA \bullet), potencial hídrico de tallo (Ψ_t) y conductancia foliar (g_l) en los distintos tratamientos de riego: T_{CTL} (\bullet), T_{RD80} (\blacktriangle), T_{RD60} (\blacktriangle), T_{RDC40} (\circ) y T_{RDC20} (\square). (a) septiembre de 2002 y (b) agosto de 2003. Cada punto corresponde a la media de tres repeticiones \pm ES.

Los tratamientos deficitarios alcanzaron la máxima apertura estomática antes de las 10.00 UT. Ahora bien, el comportamiento de T_{RD80} y T_{RD60} fue muy distinto en septiembre de 2002 que en agosto de 2003. Mientras que en 2002 mostraron una clara regulación estomática a partir de las 10.00 UT, en 2003 tan sólo T_{RD60} redujo ligeramente sus tasas a partir del mediodía solar. El mayor déficit hídrico alcanzado en T_{RDC40} y T_{RDC20} quedó reflejado en su comportamiento estomático. Este hecho ha sido observado por Henson *et al.*

(1982) en peral y Torrecillas *et al.* (1988b) en almendro. La mayor regulación estomática fue observada en T_{RDC20} , que mostró valores muy bajos durante todo el día en los dos años de medida, siendo su valor máximo de aproximadamente $150 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Figura 4.14).

De acuerdo con los resultados obtenidos, el potencial hídrico y la conductancia foliares han mostrado ser indicadores sensibles y consistentes del estado hídrico del almendro, por lo que ambos podrían ser usados como herramienta de ayuda para la programación del riego, tal y como sugieren Hutmacher *et al.* (1994).

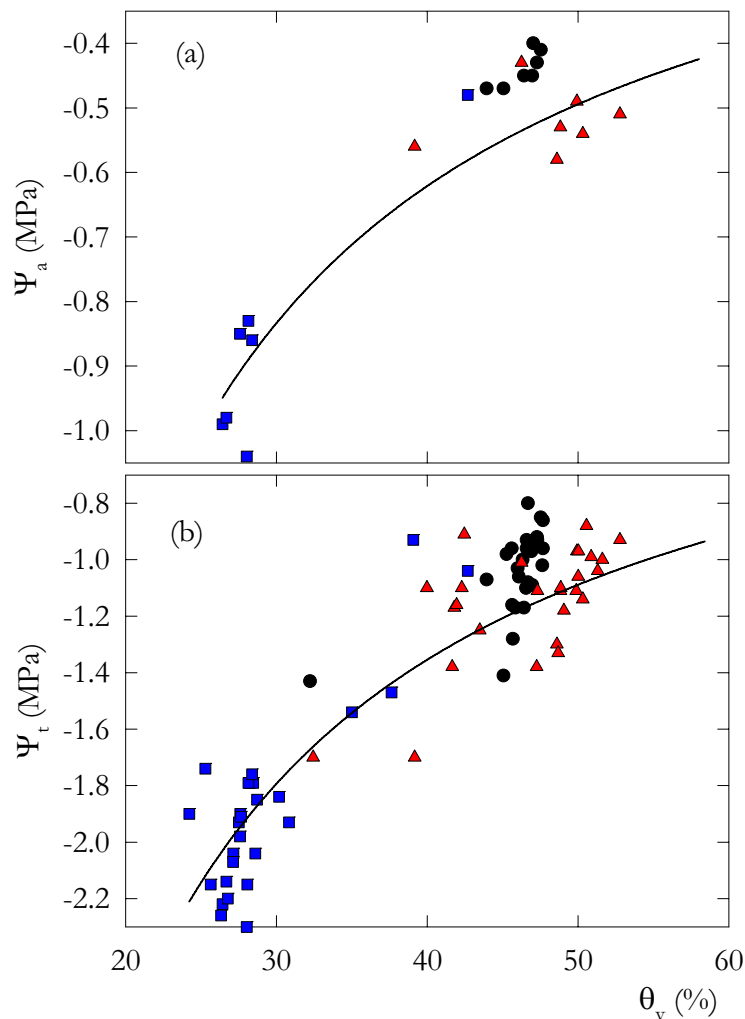


Figura 4.15. a) Relación entre el potencial hídrico foliar antes del alba (Ψ_a) y la humedad volumétrica en el perfil de suelo 0-90 cm (θ_v) ($\Psi_a = -27.01 \theta_v^{-1.022}$; ($R^2 = 0.77$) $P < 0.05$). b) Relación entre el potencial de tallo a mediodía (Ψ_t) y la humedad volumétrica en el perfil de suelo 0-90 cm (θ_v) ($\Psi_t = -49.76 \theta_v^{-0.977}$; ($R^2 = 0.74$) $P < 0.001$). Para los tratamientos de riego, T_{CTL} (●), T_{RD80} (▲) y T_{RDC20} (■).

La relación encontrada entre el contenido volumétrico de agua en el suelo en el perfil de 0 a 90 cm de profundidad y el potencial hídrico foliar antes del alba y de tallo a mediodía (Figura 4.15) fue similar a la encontrada en almendro por Romero *et al.* (2004b), en melocotonero por Goldhamer *et al.* (1999) y en albaricoquero por Pérez-Pastor (2001) bajo RDC, y en la que, a pesar de la dispersión típica de este tipo de relaciones, se sugiere un valor de θ_v de aproximadamente 40 % por debajo del cual Ψ_a y Ψ_t disminuyen en mayor medida en respuesta a las reducciones de θ_v . Este valor correspondería a valores de Ψ_a y Ψ_t de -0.55 y -1.2 MPa, respectivamente, que podrían ser calificados como de óptimos para el cultivo de almendros jóvenes.

Crecimiento vegetativo

Patrón de enraizamiento

En el tratamiento control y en los dos muestreos realizados en 2002, la mayor densidad de longitud radical (DLR) se encontró en los primeros 20 cm de profundidad, en la misma línea portagoteros y en raíces menores de 1 mm de diámetro (Figura 4.16 a). En 2003, el valor más elevado se dio a 30 cm de profundidad (0.70 cm cm^{-3}) y fue del orden de 9 veces superior al obtenido en el año anterior (Figura 4.16 a y b). Este incremento en profundidad en los valores de DLR también se produjo en extensión horizontal. Así, mientras que en 2002 la practica totalidad del sistema radicular se encontraba en una banda de 140 cm de ancho, en 2003 el 15 % se encontraba fuera de dicha banda (Figuras 4.16 a, b, c y d). El peso seco total de raíces también se vio incrementado entre un 80-90 % en 2003 con respecto a 2002, principalmente en la zona humectada (Figuras 4.16 y 4.17). En un sistema de riego localizado, el efecto hidrotrópico predomina sobre el geotrópico modificando el patrón de distribución radicular tal y como ha sido comentado en numerosos estudios en cítricos y frutales (Del Amor *et al.*, 1987; Fernández *et al.*, 1992; Franco y Abrisqueta, 1997; Romero *et al.*, 2004b; Ruiz-Sánchez *et al.*, 2005).

Estos valores de DLR muestran una elevada concentración de raíces de diámetro inferior a 1 mm (aproximadamente un 85 % del total de raíces tanto en 2002 como 2003), lo que confiere al almendro una gran capacidad de absorción de agua (Figura 4.16), y por tanto de uso eficiente del agua y los fertilizantes (Brown y Uriu, 1996). Por otro lado, se observa que el 90 % del total de raíces se encuentra en los primeros 50 cm de profundidad, con mayor densidad en la zona humectada (Figuras 4.16 y 4.17). De ahí que con fines de programación del riego, y cuando se utilicen aguas de baja salinidad sería recomendable ajustar la profundidad de riego a esos 50 cm de suelo. Una distribución radicular muy similar fue encontrada en almendro por Catlin (1996).

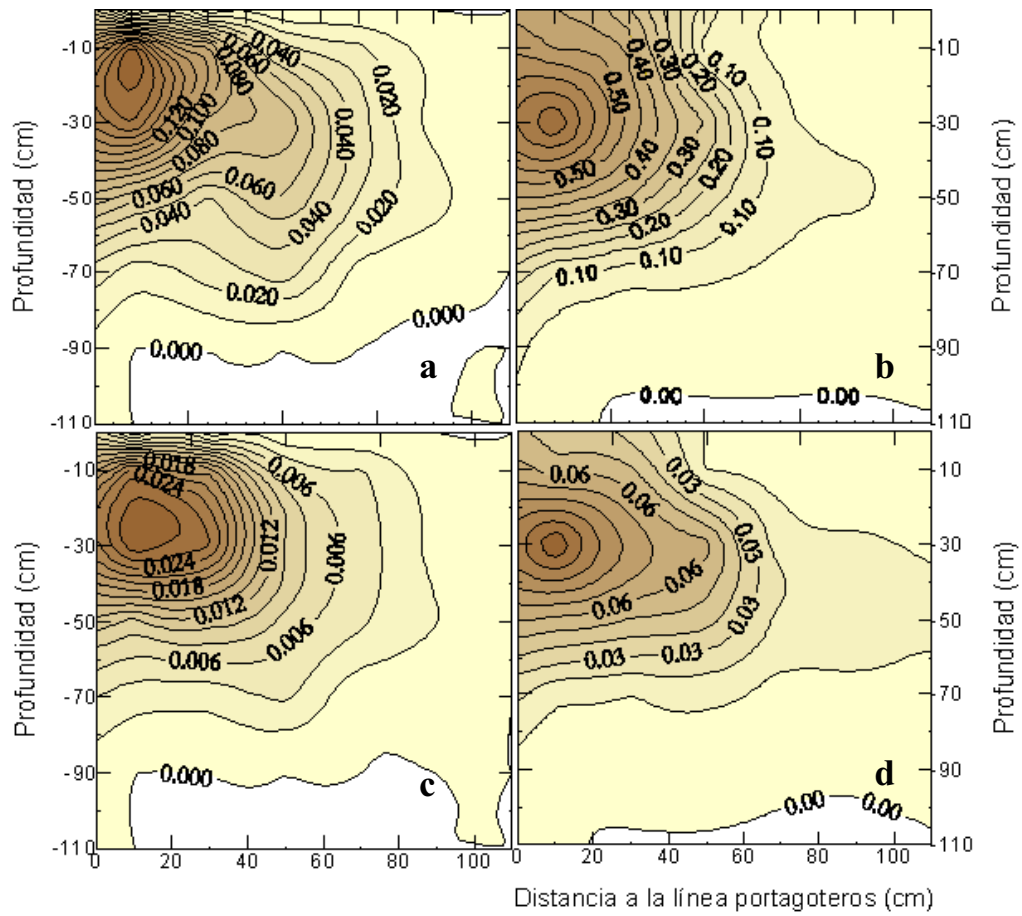


Figura 4.16. Distribución de la densidad de longitud de raíces (DLR, $\text{cm de raíz cm}^{-3}$ de suelo) en el tratamiento control, para la profundidad y distancia perpendicular a la línea portagoteros de 0 a 110 cm. Las figuras a y b corresponden a raíces menores de 1 mm de diámetro y c y d, a mayores de 1 mm, en 2002 y 2003, respectivamente.

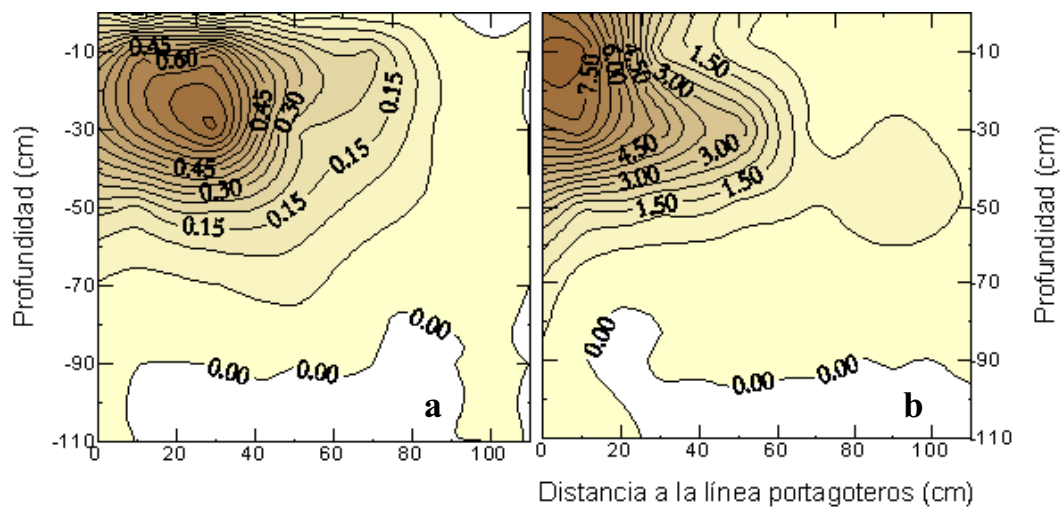


Figura 4.17. Distribución de la densidad de peso seco del total de raíces ($\text{mg de raíz cm}^{-3}$ de suelo) en el tratamiento control, para la profundidad y distancia perpendicular a la línea portagoteros de 0 a 110 cm, en 2002 (a) y 2003 (b).

Brotos

El crecimiento longitudinal de los brotes disminuyó con la edad del árbol y carga productiva. Así mismo, y coincidiendo con el inicio de la fase IV de 2002 y 2003 (primeros de junio) se produjo una clara ralentización del crecimiento (Figura 4.18). Estas observaciones coinciden con otros estudios en los que se señalan los meses de marzo a mayo como los de mayor tasa de crecimiento de brotes en almendros jóvenes (Hutmacher *et al.*, 1994) y en adultos (Romero *et al.*, 2004b). Incluso en éstos últimos se manifiesta que los brotes experimentaron un crecimiento en grosor durante la fase IV.

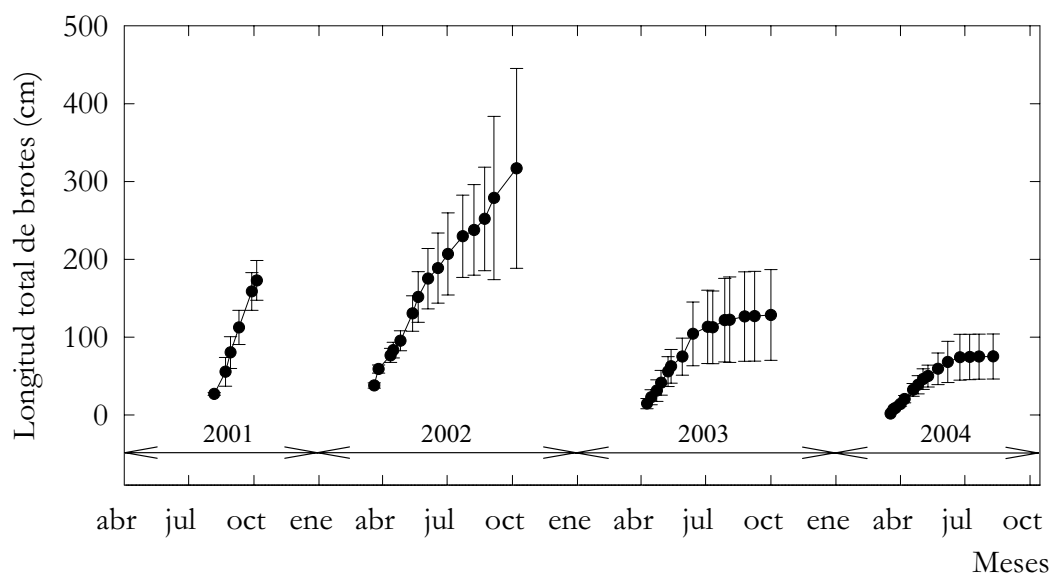


Figura 4.18. Dinámica de crecimiento en longitud de los brotes del tratamiento control. Cada punto corresponde a la media de 3 repeticiones \pm ES.

Aunque en 2002 la dinámica de crecimiento en el tratamiento control fue diferente al resto de los tratamientos, no se detectó efecto del régimen de riego sobre el crecimiento de los brotes. Posiblemente y al igual que en 2003, debido a la alta variabilidad de esta medida y al número de determinaciones realizadas (Figura 4.19).

La reducción del riego en los tratamientos de RD provocó una caída de Ψ_m por debajo de -60 kPa, tanto a 30 como a 60 cm de profundidad, poco después del inicio de la campaña de riegos de 2002 (Figura 4.11 y Tabla 4.2). Este déficit hídrico en suelo (Du Plessis, 1988; Fereres *et al.*, 1981b) se correspondió con valores de Ψ_a de -0.55 MPa, (Figura 4.13 a), 0.1 MPa inferiores al control. Estas diferencias fueron insuficientes para reducir el crecimiento de los ramos de los árboles RD, tanto en 2002 como en 2003. Similar disminución fue observada en los tratamientos de RDC. De modo que éstos redujeron su crecimiento a partir de la aplicación del déficit hídrico en la fase IV (Figura 4.19). En 2003 el efecto del tratamiento sobre el crecimiento

longitudinal de los brotes fue menos notorio (Figura 4.19). Diversos frutales caducifolios han mostrado una elevada sensibilidad al estrés hídrico en el crecimiento de sus brotes (Mitchell y Chalmers, 1982; Dejong *et al.*, 1987; Olien y Flore, 1990; Caspari *et al.*, 1994; Girona y Marsal, 1995). En cambio, en nuestro ensayo, no se detectaron diferencias significativas al no generar un estrés hídrico severo en la planta, durante el principal periodo de crecimiento, hasta finales de mayo (Figuras 4.5, 4.13 y Tabla 4.2). En almendro, Girona *et al.* (1993a) no observaron tampoco diferencias significativas tras dos años de aplicación de RDC, pero Hutmacher *et al.* (1994) sí las detectaron tras cinco años de experimentación.

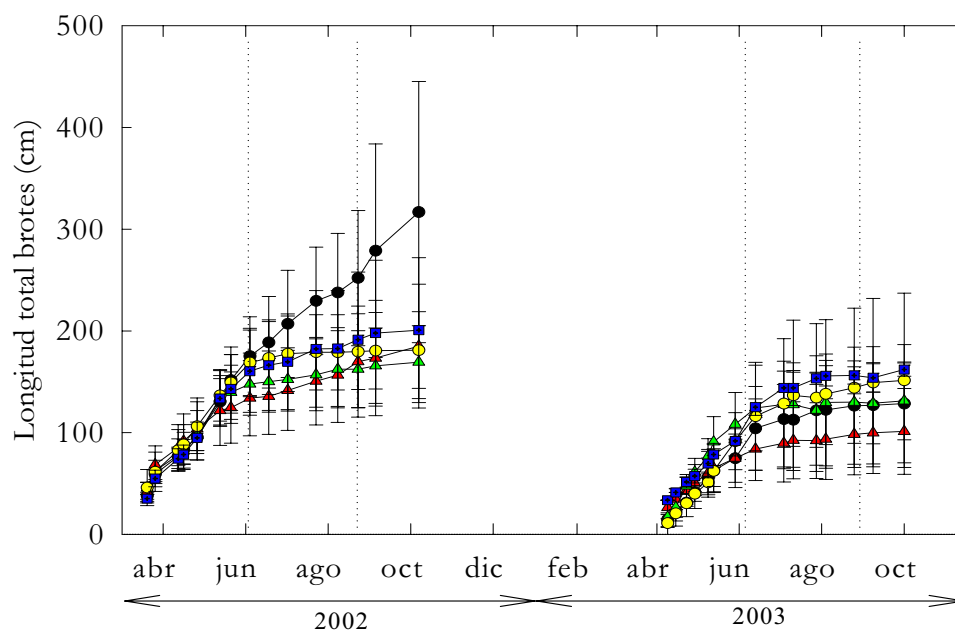


Figura 4.19. Dinámica de crecimiento en longitud de los brotes en los 5 tratamientos de riego: T_{CTL} (—●—), T_{RD80} (—▲—), T_{RD60} (—△—), T_{RDC40} (—○—) y T_{RDC20} (—■—). Cada punto corresponde a la media de 3 repeticiones \pm ES. La línea vertical de puntos indica el período de aplicación del déficit en los tratamientos T_{RDC40} y T_{RDC20} .

Tronco

La evolución continua del diámetro de tronco obtenida a partir de sensores LVDT durante el periodo 2001-2004, reflejó la influencia del régimen de riego sobre el crecimiento del tronco (Figura 4.20 y Tablas 4.1 y 4.3). Así, mientras que en los tratamientos T_{CTL} , T_{RD80} y T_{RD60} el patrón de crecimiento fue sigmoideal en T_{RDC40} y T_{RDC20} fue de doble sigmoide, consecuencia del déficit hídrico aplicado durante la fase IV (Figura 4.20).

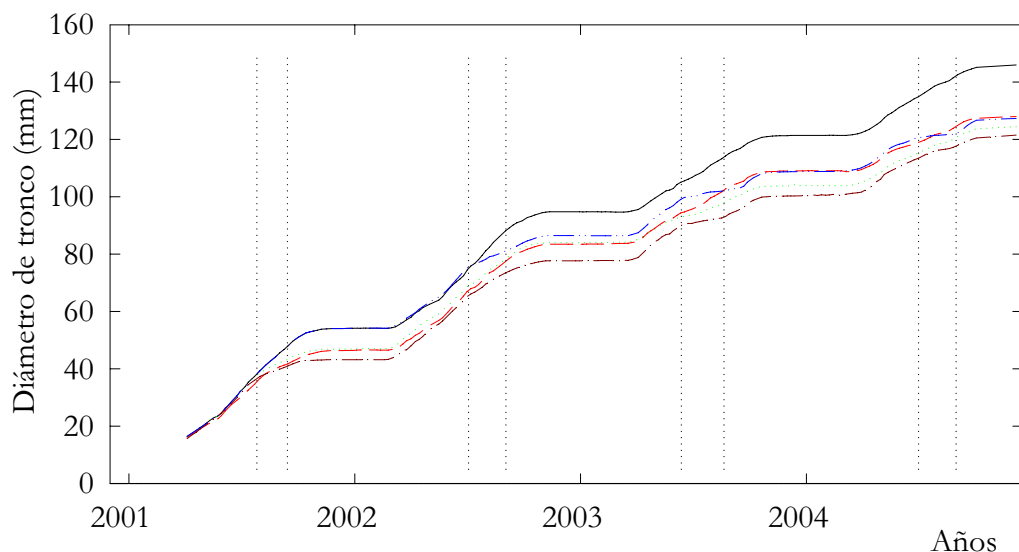


Figura 4.20. Evolución del diámetro de tronco en los 5 tratamientos de riego durante el periodo experimental. T_{CTL} (—), T_{RD80} (- -), T_{RD60} (· · · · ·), T_{RDC40} (- · -) y T_{RDC20} (- · -). Las líneas verticales de puntos indican los períodos de aplicación del déficit en los tratamientos T_{RDC40} y T_{RDC20} .

Desde el primer año de ensayo, los tratamientos deficitarios disminuyeron significativamente el diámetro de tronco con respecto al control (Figura 4.20 y Tabla 4.3). Las reducciones respecto al crecimiento global de T_{CTL} (146 mm), fueron 18, 21, 24 y 17 mm en T_{RD80} , T_{RD60} , T_{RDC40} y T_{RDC20} respectivamente. Sin embargo, las diferencias de diámetro de tronco entre tratamientos deficitarios no fueron significativamente diferentes (Figura 4.20). En T_{RDC20} la demora de un año en el inicio del tratamiento mitigó la reducción global de diámetro de tronco. Estos resultados concuerdan con el hecho de que el crecimiento del tronco sea considerado como un parámetro sensible e integrador de los efectos del déficit hídrico (Hilgeman y Sharp, 1970; Hsiao, 1973; Kramer, 1988). Así, reducciones del crecimiento del tronco por efecto del estrés hídrico han sido recogidas por distintos autores y en diversas especies frutales (Boland *et al.*, 1993; Chalmers *et al.*, 1986; Irving y Drost, 1987; Mitchell *et al.*, 1989; Domingo *et al.*, 2001; Romero, 2002).

El crecimiento total en diámetro de tronco, expresado como incremento de sección transversal (ΔSTT , en cm^2), estuvo altamente correlacionado con el volumen de agua aplicado (R , en $m^3 ha^{-1}$), ($\Delta STT = 0.0077R + 15.7$; $R^2 = 0.73$). Correlaciones similares fueron obtenidas por Hutmacher *et al.* (1994) y Romero *et al.* (2004b) en almendros, e incluso, estos últimos autores fijaron un valor umbral de 450 mm de agua de riego, a partir del cuál el crecimiento del tronco no se vio afectado en almendros de 9-13 años de edad.

Tabla 4.3. Incremento anual de la sección transversal del tronco (ΔST) y pendiente media de crecimiento (m) durante el periodo abril-octubre.

Trat.	2001		2002		2003		2004	
	ΔST (cm ²)	m (mm d ⁻¹)	ΔST (cm ²)	m (mm d ⁻¹)	ΔST (cm ²)	m (mm d ⁻¹)	ΔST (cm ²)	m (mm d ⁻¹)
T _{CTL}	20.91 a	0.205 a	47.49 a	0.200 a	45.17 a	0.128 a	52.19 a	0.126 a
T _{RD80}	14.90 b	0.166 b	37.72 b	0.177 b	38.63 b	0.117 ab	35.22 b	0.093 b
T _{RD60}	15.16 b	0.173 b	38.05 b	0.167 b	29.28 c	0.083 b	38.14 b	0.098 b
T _{RDC40}	12.70 c	0.159 c	32.76 c	0.156 bc	31.67 c	0.082 b	36.96 b	0.095 b
T _{RDC20}	20.91 a	0.200 a	35.69 bc	0.1414 c	34.22 bc	0.079 b	36.71 b	0.073 b

Columnas seguidas de letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según el test de Tukey_{0.05}.

Durante los dos primeros años de estudio el tratamiento control mostró tasas de crecimiento diario prácticamente constantes, con un valor medio de 0.2 mm día⁻¹ en todo el periodo de crecimiento (abril - octubre). En los dos años siguientes y coincidiendo con la entrada en producción, estas tasas disminuyeron, alcanzando valores de 0.125 mm día⁻¹ en 2004 (Tabla 4.3). Este descenso puede ser atribuido a la competencia por los fotoasimilados entre el crecimiento vegetativo y generativo. Hecho constatado en melocotoneros por Dejong *et al.* (1987) y Dejong y Grossman (1994) y en almendros jóvenes por Shackel *et al.* (1998). El tratamiento T_{RDC20} presentó los valores medios de crecimiento del tronco más bajos desde su inicio en 2002, con reducciones significativas con respecto a T_{CTL} del 30, 39 y 42 % en 2002, 2003 y 2004, respectivamente (Tabla 4.3). Romero (2002) encontró una ralentización del crecimiento del tronco de almendros de 9 años de edad en los meses de junio y julio, achacándolo a la mayor actividad radical encontrada en este período (Abrisqueta *et al.*, 1994; Catlin, 1996). En nuestro ensayo y debido a la edad de los árboles no se aprecia esta ralentización (Figura 4.20).

El incremento anual del diámetro de tronco (ΔDT) correlacionó negativamente con la integral de estrés y mostró R² altos, tanto al alba como a mediodía (Figura 4.21). Las pendientes de las rectas indican el alto nivel de sensibilidad del crecimiento del tronco al aumento de la integral de estrés. Realidad acorde con las reducciones del crecimiento de tronco observadas en diversos estudios sobre el déficit hídrico (Uriu *et al.*, 1970; Fereres *et al.*, 1981a; Goldhamer y Smith, 1995; Girona *et al.*, 1997; Domingo *et al.*, 2001; Romero, 2002; Vélez *et al.*, 2007). El mayor coeficiente de correlación obtenido en 2002 que en 2003 puede explicarse a partir de la incorporación de una nueva

variable, producción de almendra, la que afectaría a la relación crecimiento vegetativo vs déficit hídrico soportado (Figura 4.21).

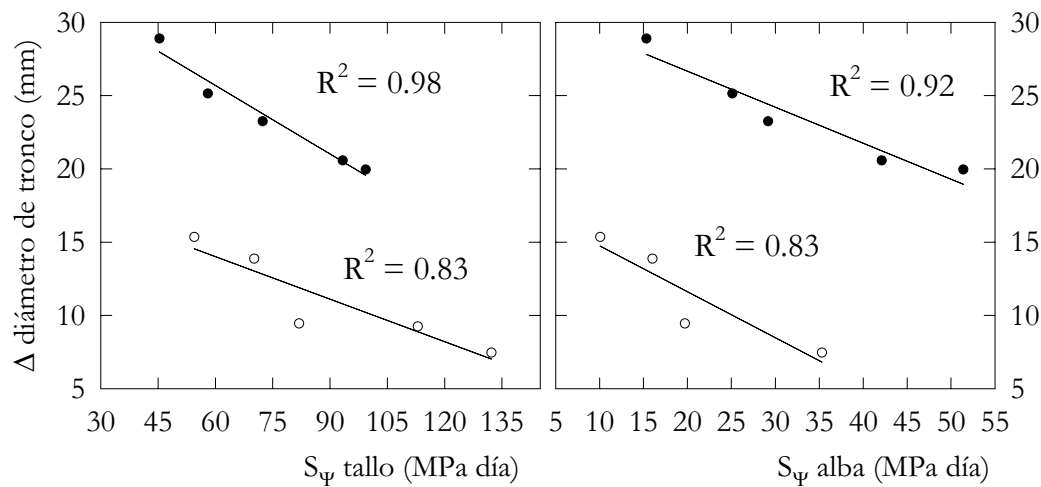


Figura 4.21. Relaciones entre el incremento de diámetro de tronco y la integral de estrés. $\Delta DT = -0.16 S_{\Psi_{\text{tallo}}} + 0.96$, $R^2 = 0.96$, en 2002 (●); $\Delta DT = -0.01 S_{\Psi_{\text{tallo}}} + 19.8$, $R^2 = 0.83$, en 2003 (○) y $\Delta DT = -0.246 S_{\Psi_{\text{alba}}} + 31.57$, $R^2 = 0.92$, en 2002 (●) y $\Delta DT = -0.313 S_{\Psi_{\text{alba}}} + 17.88$, $R^2 = 0.83$, en 2003 (○). $S_{\Psi_{\text{tallo}}}$ corresponde al periodo días 140-270 y $S_{\Psi_{\text{alba}}}$ al periodo 190-270.

Al estar estrechamente relacionada la sección del tronco con el peso de la parte aérea del árbol (Westwood y Roberts, 1970), la disminución de ΔSTT por efecto del estrés hídrico implica una disminución del tamaño total del árbol.

Superficie sombreada

La superficie sombreada (SS) por la cubierta vegetal experimentó un importante incremento anual, al tratarse de árboles en sus primeros años de plantación (Figura 4.22). El efecto de los tratamientos de riego deficitario sobre SS tuvo un marcado carácter acumulativo de disminución relativa, al igual que sucedió con el crecimiento en diámetro del tronco (Figura 4.20). Las diferencias respecto a T_{CTL} fueron significativas a partir del segundo año de ensayo en todos los tratamientos (Figura 4.22). En 2001 la inexistencia de diferencias de crecimiento en SS pudo deberse a que el ensayo se inicio en el mes de junio, momento en el que la mayor parte del crecimiento vegetativo ya había tenido lugar (Figuras 4.25, 4.18 y 4.22). La superficie sombreada al final del periodo experimental alcanzó el 37 % en el tratamiento control, siendo del 26, 24, 23.5 y 25.8 % en T_{RD80} , T_{RD60} , T_{RDC40} y T_{RDC20} , respectivamente (Figura 4.22). Numerosos estudios mencionan que una elevada reducción del tamaño de copa, por efecto del déficit hídrico, en los primeros años de la plantación, puede ser perjudicial para la producción a largo plazo (Torrecillas *et al.*, 1989a;

Goldhamer y Viveros, 2000; Romero, 2002; Girona, 2006; Goldhamer *et al.*, 2006).

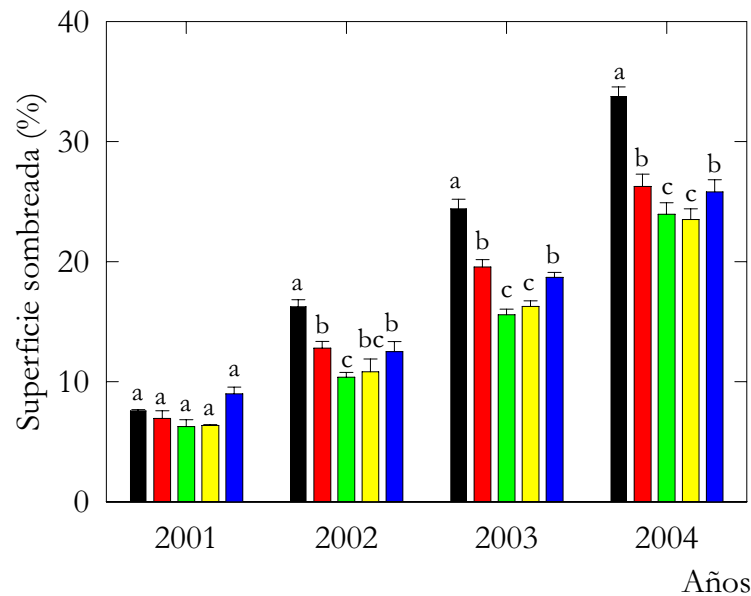


Figura 4.22. Porcentaje de superficie sombreada durante el periodo experimental, en los cinco tratamientos de riego: T_{CTL} (■), T_{RD80} (■), T_{RD60} (■), T_{RDC40} (■) y T_{RDC20} (■). Columnas del mismo año seguidas de letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según el test de Tukey_{0.05}.

Durante el periodo 2001-2003 el área foliar (AF) de los árboles control pasó de 6 a 30 m² (Tabla 4.4). Sus valores respecto a los de los tratamientos deficitarios fueron diferentes en los tres años de medidas. De modo que, en 2003 la reducción de AF debida al tratamiento era de 6 m² en T_{RD80} y de aproximadamente 15 m² en T_{RD60}, T_{RDC40} y T_{RDC20}. En cambio, no se observaron diferencias de tamaño de hoja debidas al tratamiento (datos no mostrados), lo que contrasta con la reducción del crecimiento foliar observada por Romero *et al.* (2004b) en almendros adultos sometidos a RDC durante la fase IV.

El área foliar presentó una alta correlación positiva con el volumen de agua aplicado (Figura 4.23 a). Este hecho es coincidente con las observaciones de Fereres *et al.* (1981a) y Torrecillas *et al.* (1989a) en almendro. La correlación negativa AF *vs* S_{Ψ_{tallo}} a mediodía (Figura 4.23 b), aunque presentó menores R² que la anterior relación, incide igualmente en el efecto negativo de la infradotación hídrica sobre el crecimiento foliar. Por su parte, el incremento de diámetro de tronco frente a S_{Ψ_{tallo}}, mostró un coeficiente de determinación superior (Figura 4.21) denotándose una mayor sensibilidad de éste al déficit hídrico (Figura 4.21).

Tabla 4.4. Evolución del número de hojas y área foliar (AF) del árbol en los cinco tratamientos de riego. Período 2001 – 2003.

Trat.	2001		2002		2003	
	Nº hojas	AF (m ²)	Nº hojas	AF (m ²)	Nº hojas	AF (m ²)
T _{CTL}	4115	6.63	13029	13.62	26497	30.13
T _{RD80}	2307	5.63	14621	13.69	19056	24.70
T _{RD60}	1854	2.64	7213	7.50	15226	15.48
T _{RDC40}	1157	1.53	5421	6.39	14146	16.66
T _{RDC20}			10076	10.03	14345	16.85

La superficie sombreada (SS) por el cultivo, a lo largo del período experimental, estuvo bien correlacionada con el índice de área foliar (IAF) (Figura 4.24). Esto permite estimar IAF a partir de la relación IAF *vs* SS. Este índice adimensional de densidad foliar (Chen y Black, 1992) es muy útil para estimar la radiación y la precipitación interceptada por el cultivo, así como para el intercambio gaseoso entre la cubierta vegetal y la atmósfera (Breda, 2003).

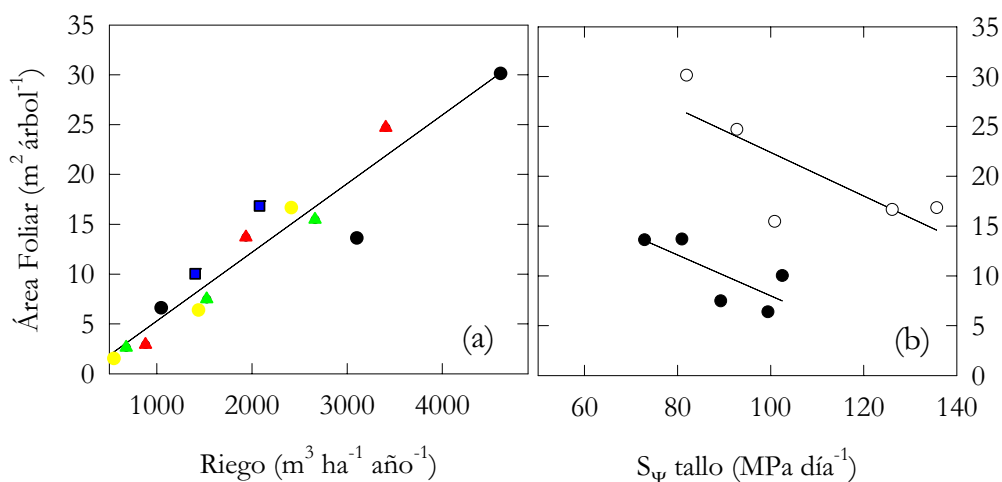


Figura 4.23. (a) Relación entre el área foliar (AF) y la dotación de agua de riego (R) durante el periodo 2001-2003 ($AF = 6.89R - 1.58$; $R^2 = 0.91$; $P < 0.05$). T_{CTL} (●), T_{RD80} (▲), T_{RD60} (▲), T_{RDC40} (●) y T_{RDC20} (■). (b) Área foliar en función de la integral de estrés ($S_{\Psi \text{ tallo}}$) obtenida a partir de los valores de potencial de tallo a mediodía: $AF = 18.24 - 0.11 S_{\Psi \text{ tallo}}$ ($R^2 = 0.54$; $P < 0.05$); $AF = 34.81 - 0.16 S_{\Psi \text{ tallo}}$ ($R^2 = 0.601$; $P < 0.05$), en 2002 (●) y 2003 (○), para el período de días 140-270.

Poda

El peso de la poda, como medida indirecta del crecimiento vegetativo, fue sensible al régimen de riego. El tratamiento con mayor peso de poda fue

T_{CTL} , seguido de T_{RD80} , y a excepción del año 2002, los tres tratamientos restantes generaron cantidades similares de poda (Figura 4.25). La variable peso seco de poda presentó una alta correlación positiva con el volumen de agua de riego (Figura 4.26).

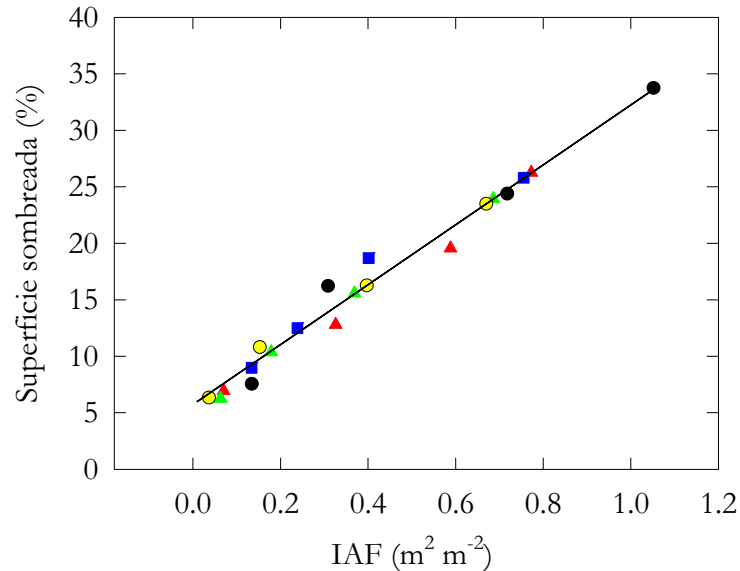


Figura 4.24. Relación entre el porcentaje de área sombreada (SS) y el índice de área foliar (IAF) a partir de los 4 años de ensayo y para los 5 tratamientos de riego. T_{CTL} (●), T_{RD80} (▲), T_{RD60} (▲), T_{RDC40} (●) y T_{RDC20} (■). $SS = 26.5IAF + 5.74$; $R^2 = 0.98$ $P < 0.001$.

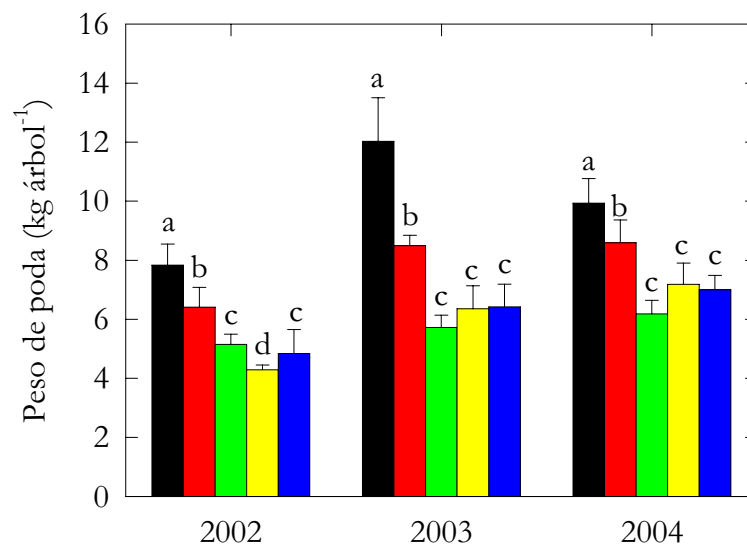


Figura 4.25. Peso seco de poda en los 5 tratamientos de riego: T_{CTL} (■), T_{RD80} (■), T_{RD60} (■), T_{RDC40} (■) y T_{RDC20} (■) durante el periodo experimental. Cada barra corresponde a la media de tres repeticiones \pm ES. Letras diferentes dentro del mismo año indican diferencias significativas entre tratamientos según el test de Tukey_{0.05}.

Al final del período experimental el peso seco de poda acumulado en el tratamiento control fue de 30 kg árbol^{-1} con reducciones del 20 % en T_{RD80} y 40 % en el resto de tratamientos. Reducciones de peso de poda por

aplicación de estrategias de riego deficitario han sido descritas por otros autores en especies como el peral (Mitchell *et al.*, 1989), melocotonero (Boland *et al.*, 1993; Girona *et al.*, 1993b) albaricoquero (Pérez-Pastor, 2001) y almendro (Prichard *et al.*, 1992; Girona *et al.*, 1993a; Romero *et al.*, 2004b).

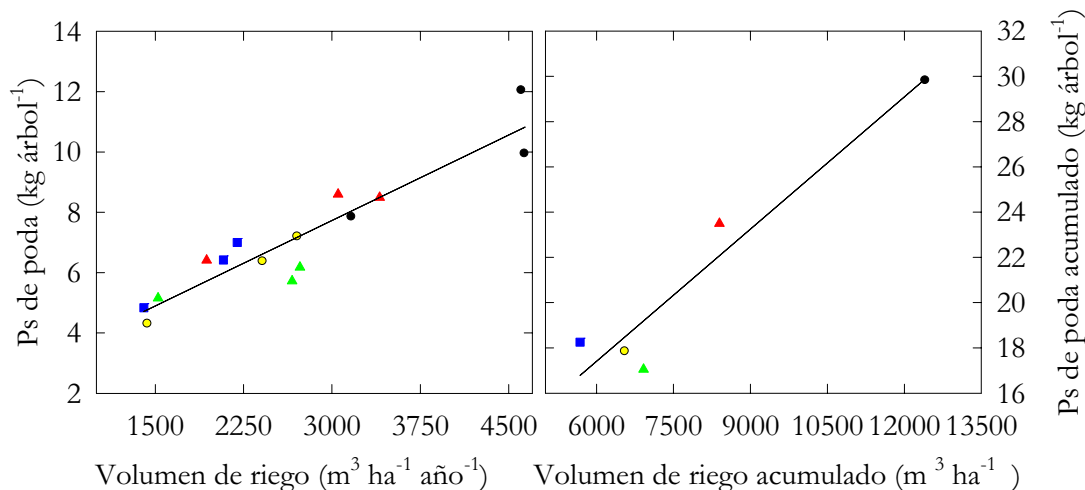


Figura 4.26. Relación entre el peso seco de poda (Ps) frente al volumen de riego anual (R), durante el periodo 2002-2004 ($P_s = 0.002R + 2.07$ $R^2 = 0.87$ $P < 0.05$) y al volumen de riego acumulado ($P_s = 0.002R + 5.73$ $R^2 = 0.92$ $P < 0.05$). Cada punto corresponde a la media de 30 árboles por tratamiento en cada año, T_{CTL} (●), T_{RD80} (▲), T_{RD60} (▲), T_{RD40} (●) y T_{RD20} (■).

Desarrollo reproductivo

Floración y fructificación

La ruptura del reposo de las yemas de flor se adelantó en 2002 con respecto al 2003, estando el 50 % de las yemas en estado B a mediados de enero en 2002 y a principios de febrero en 2003 (Figuras 4.27 y 4.28). El estado F, máxima floración, se alcanzó en el tratamiento control después de unos 30 días del inicio del estado B, de yema hinchada, y tras acumular 4878 y 4667 °C GDH en 2002 y 2003, respectivamente (Tabla 4.5). En melocotonero cv. ‘Alberta’ Richardson *et al.* (1976) y en albaricoquero cv. ‘Búlida’ Pérez-Pastor *et al.* (2004) emplearon igualmente la integral térmica para caracterizar el inicio de la máxima floración.

Según los datos mostrados en la tabla 4.5, la integral térmica parece un buen indicador para predecir la duración del periodo comprendido entre la ruptura de las yemas, máxima floración e inicio de la fase de acumulación rápida de materia seca del grano en almendro (Tabla 4.5). Christen (1969) y Williams (1987) en parral y Pérez-Pastor *et al.* (2004) en albaricoquero, notificaron el interés de este parámetro con idénticos fines de predicción. De esta forma se pueden extrapolar los resultados obtenidos a otras condiciones

de cultivo y a otros años, llegando a poder predecir el inicio de un determinado estado fenológico. En cambio, La maduración del fruto va a depender en gran medida, de las técnicas culturales, de la disponibilidad de agua y de la competencia entre los propios frutos (Morris y Cawthon, 1982; González-Altozano y Castel, 1999; Pérez-Pastor, 2001; Hueso, 2005).

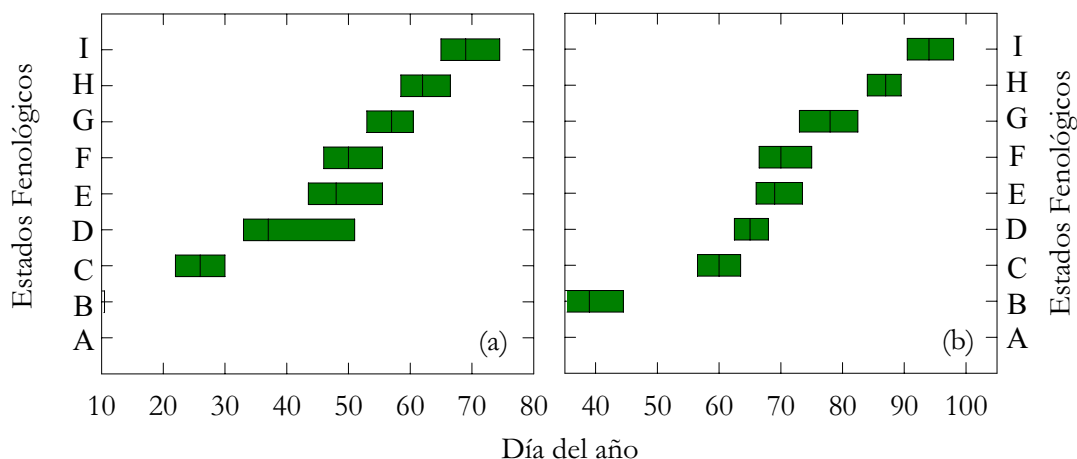


Figura 4.27. Evolución de los estados fenológicos de yemas de flor (A-I), bajo condiciones de adecuado suministro hídrico en 2002 (a) y 2003 (b). Las cajas horizontales indican el inicio y final de cada fase fenológica, y la línea vertical interior de cada caja indica el momento en el que el 50 % de las yemas han alcanzado dicho estado.

Tabla 4.5. Periodos de predominio y °C GDH acumulados en los distintos estados fenológicos del almendro ‘Marta’, bajo condiciones de adecuado suministro hídrico.

Estado de desarrollo	Período		°C GDH	
	2002	2003	2002	2003
50 % de yemas en Estado “B”	13/Ene.	7/Feb.	508	495
50 % de yemas en Estado “D”	4/Feb.	6/Mar.	3115	4010
50 % Floración “F”	19/Feb.	11/Mar.	4878	4667
50 % de frutos en Estado “I”	10/Mar.	4/Abr.	7957	8850
Inicio Fase IV (acumulación de materia seca en el grano)	4/Jun.	9/Jun.	26705	27129

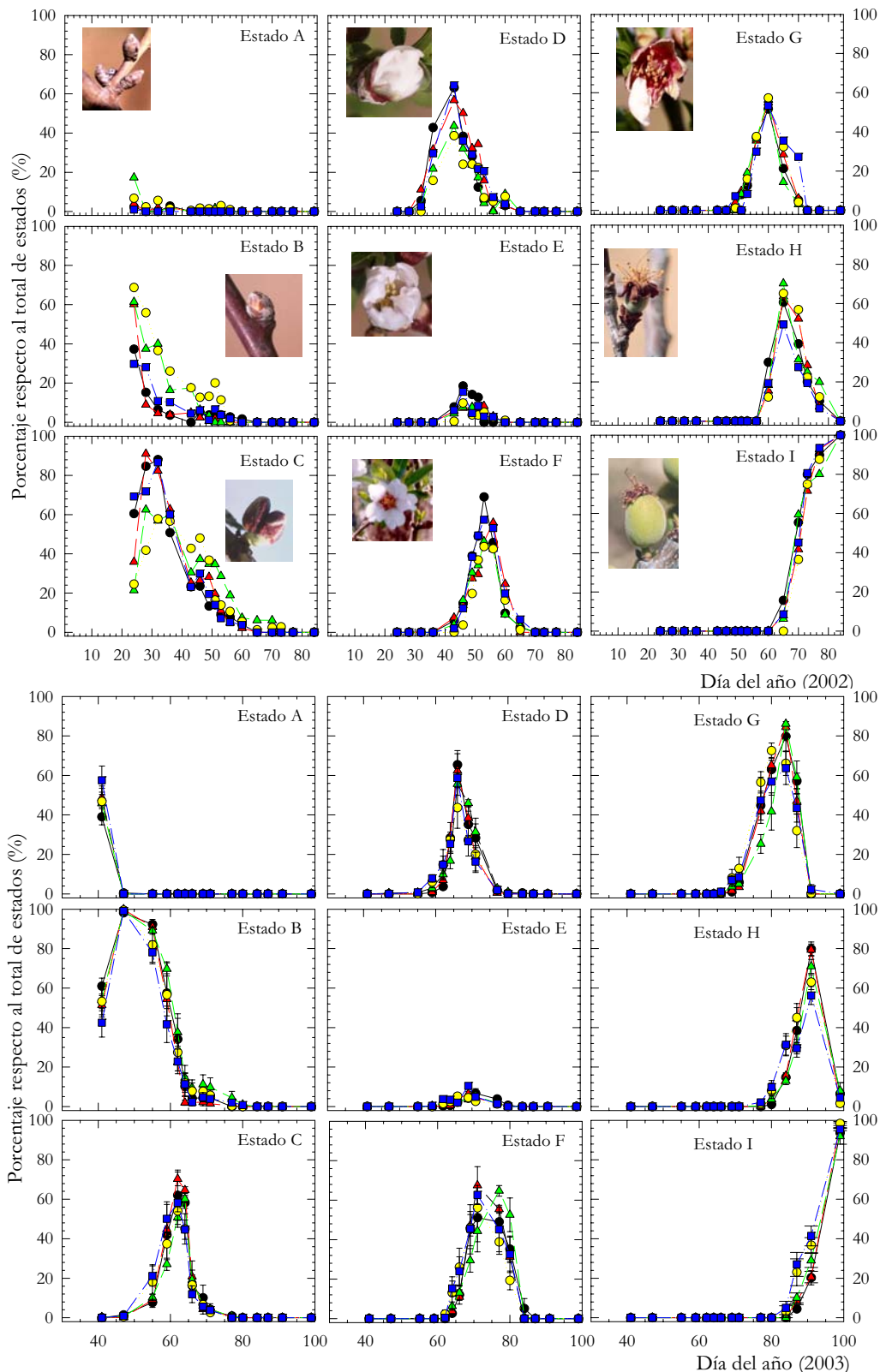


Figura 4.28. Evolución de los estados fenológicos de las yemas de flor en almendro ‘Marta’, durante los años 2002 y 2003, en los tratamientos ensayados: T_{CTL} (—●—), T_{RD80} (—▲—), T_{RD60} (—△—), T_{RDC40} (—○—) y T_{RDC20} (—■—). Cada punto corresponde a la media de tres repeticiones \pm ES.

El ligero déficit hídrico alcanzado en la primavera de los años 2002 y 2003 en los tratamientos de riego deficitario constante (Figura 4.13), en parte debido a las lluvias ocurridas en otoño de 2002 (55.6 mm) y en invierno de 2002 y 2003, 131.4 y 179.8 mm, respectivamente (Figura 4.4), puede explicar la similitud de la evolución de las yemas de flor con el tratamiento control (Figura 4.28). La inexistencia de diferencias entre los tratamientos T_{RDC40} y T_{RDC20} y T_{CTL} era esperable en la medida de que fueron programados con el fin de mantener un adecuado estado hídrico de la planta durante los períodos de floración, cuajado del fruto y postcosecha (Figura 4.28). Estudios realizados en almendros sometidos a un déficit hídrico moderado no presentaron efectos negativos en la densidad floral (Ruiz-Sánchez *et al.*, 1988) ni en la fructificación (Goldhamer y Viveros, 2000; Esparza *et al.*, 2001b; Goldhamer *et al.*, 2006). En cambio, otros estudios realizados en frutales sometidos a un déficit hídrico severo durante la floración (Brun *et al.*, 1985) y durante el período de inducción-diferenciación floral (Torrecillas *et al.*, 2000) señalan una reducción del cuajado, de lo que se desprende el interés de cuantificar la duración e intensidad del déficit en los efectos derivados.

Fruto

El tratamiento control alcanzó el tamaño exterior máximo del fruto a mediados de abril en los tres años de estudio (Figura 4.5 y 4.29). Los frutos de 2002 fueron los de mayor tamaño dada la menor carga productiva de este año, aproximadamente, una décima parte del 2003 y 2004 (Tabla 4.6). Un retraso de 21 días en la floración de 2003 se tradujo en un claro desfase durante la primera mitad de la evolución del pericarpio (Tabla 4.5 y Figura 4.29).

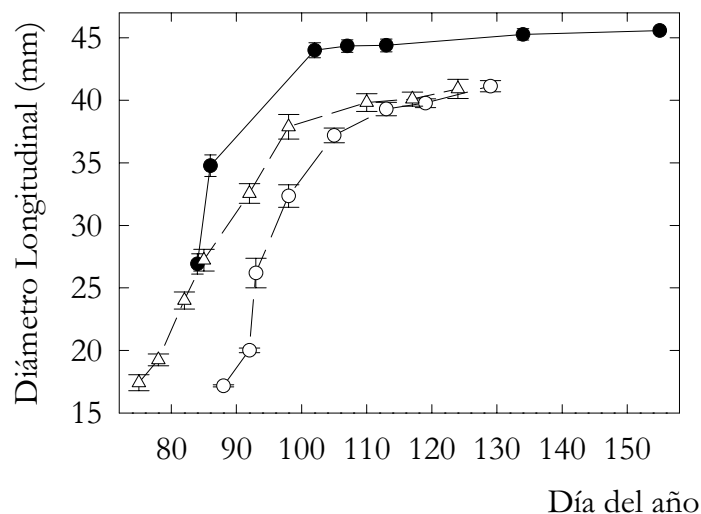


Figura 4.29. Evolución del crecimiento longitudinal del pericarpio durante los años 2002 (—●—), 2003 (—○—) y 2004 (—△—) en el tratamiento control. Cada punto corresponde a la media de 3 repeticiones \pm ES.

Las evoluciones de los parámetros morfológicos: diámetro longitudinal, ecuatorial y trasversal del fruto mostraron un patrón de crecimiento similar en todos los tratamientos de riego (Figura 4.30), no observándose diferencias por efecto de los mismos. Este hecho estaría justificado por la ausencia de déficit hídrico severo en los tratamientos deficitarios durante la fase III del almendro, tal como se reflejó en 2002 (Figura 4.5 y 4.13). Almendros adultos sometidos a RDC en condiciones edafoclimáticas similares tampoco presentaron diferencias en estos parámetros (Romero, 2002).

El peso seco del grano presentó una curva de tipo sigmoideal caracterizada por dos fases: una primera de baja tasa de crecimiento, y que transcurre durante la fase III, período en el que se alcanza el tamaño máximo del fruto y tiene lugar un importante crecimiento vegetativo (Figura 4.5), y una segunda, denominada fase IV, de elevada tasa de acumulación de materia seca (Figura 4.31). La fase IV se inició cuando el 50 y 65 % del crecimiento vegetativo total había tenido lugar en 2002 y 2003, respectivamente (Figura 4.32 a y b), y tras acumularse 21827 y 22462 °C GDH desde la máxima floración en 2002 y 2003, respectivamente (Tabla 4.5). La figura 4.31 muestra la similitud de peso seco del grano en los distintos muestreos realizados durante 2003 en los 5 tratamientos de riego.

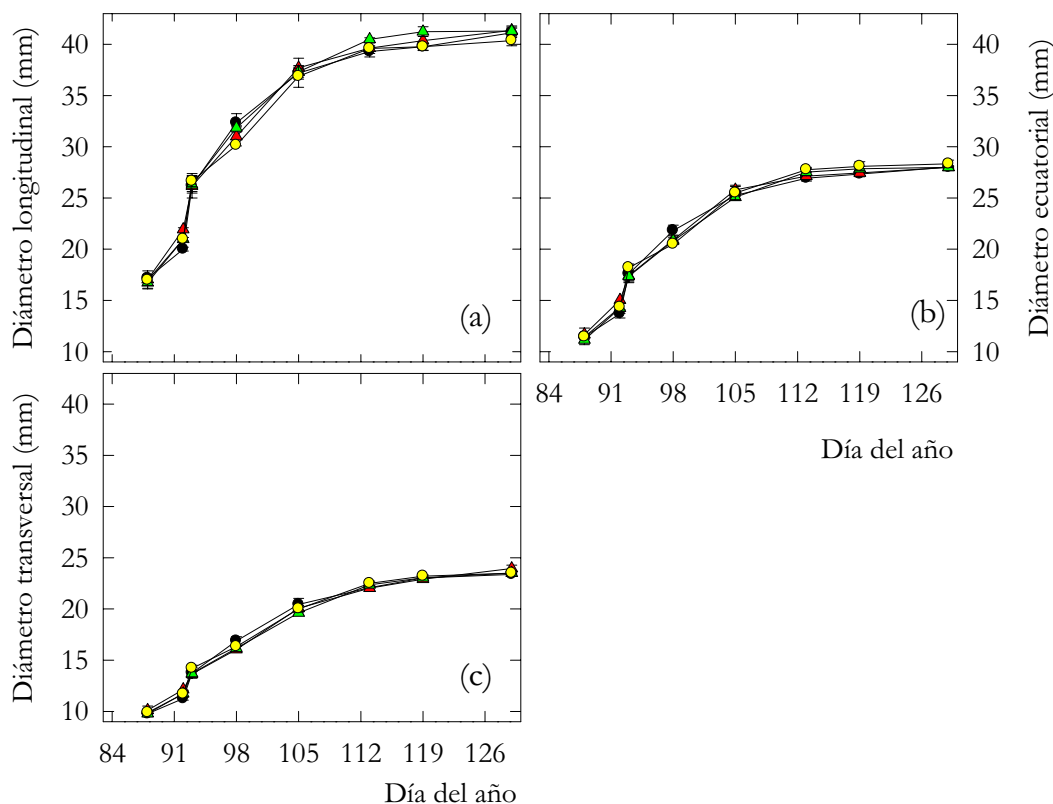


Figura 4.30. Evolución del diámetro longitudinal (a), ecuatorial (b) y trasversal (c) en T_{CTL} (—●—), T_{RD80} (---▲---), T_{RD60} (····▲····) y T_{RDC40} (—●—) durante el 2003. Cada punto corresponde a la media de 3 repeticiones \pm ES.

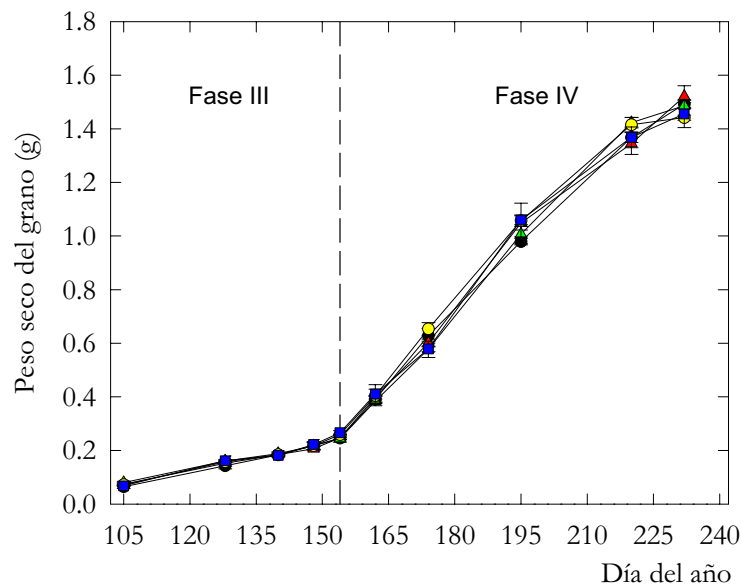


Figura 4.31. Evolución del peso seco del grano durante el 2003 en los cinco tratamientos de riego: T_{CTL} (—●—), T_{RD80} (—▲—), T_{RD60} (—△—), T_{RDC40} (—○—) y T_{RDC20} (—■—). Cada punto corresponde a la media de 3 repeticiones \pm ES.

Producción

Al tratarse de árboles jóvenes la producción de almendra experimentó un aumento notorio y constante en sus tres primeros años de cosecha (2002-2004). Así, y respecto al año anterior la producción se vio incrementada 6 veces en 2003 y 1.5 veces en 2004, siendo ésta una conducta general en el conjunto de los tratamientos (Tabla 4.6). En todos los años de ensayo los tratamientos más deficitarios (T_{RD60} , T_{RDC40} y T_{RDC20}) adelantaron la cosecha al menos 1 semana respecto a los más regados (T_{CTL} y T_{RD80}).

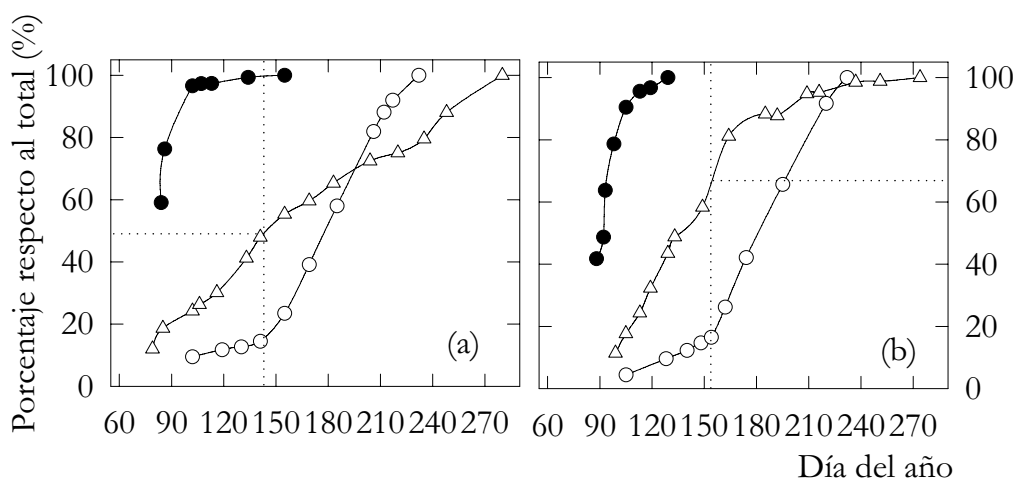


Figura 4.32. Porcentaje respecto al total del crecimiento longitudinal (—●—) y peso seco (—○—) del fruto y longitud de brotes (—△—) en el tratamiento control. (a) 2002 y (b) 2003.

En la cosecha de 2002, primera recolección de la plantación, a pesar de su escasa cuantía, se puso de manifiesto el efecto negativo del déficit hídrico sobre la producción. La importante reducción relativa de producción integraría los efectos del déficit hídrico tanto en el año en consideración como en el año previo, tal y como ha sido señalado en diversos trabajos (Goldhamer y Viveros, 2000; Esparza *et al.*, 2001b; Girona *et al.*, 2005; Goldhamer *et al.*, 2006).

Tabla 4.6. Valores medios de los parámetros productivos para los distintos tratamientos durante el periodo experimental 2002-2004.

Año	Trat	Prod. cáscara (kg ha ⁻¹)	Prod. grano (kg ha ⁻¹)	Nº frutos árbol ⁻¹	Pelonas (%)	Dobles (%)	Vacías (%)	Rto. grano (%)
2002	T _{CTL}	227 a	68 a	178 a	2.51 a	0.27 a	0.01 a	29.92 a
	T _{RD80}	103 b	30 b	78 b	1.80 a	0.00 a	0.02 a	29.20 ab
	T _{RD60}	154 b	44 b	117 b	2.95 a	0.29 a	0.01 a	28.74 ab
	T _{RDC40}	138 b	39 b	101 b	1.03 a	0.07 a	0.02 a	28.75 b
	T _{RDC20}	244 a	72 a	192 a	1.54 a	0.13 a	0.01 a	29.38 ab
2003	T _{CTL}	1363.5 a	405.8 a	1184.7 a	0.83 ab	0.0 a	2.18 a	29.6 a
	T _{RD80}	1128.7 a	327.1 a	940.5 a	1.99 b	0.0 a	2.92 a	29.0 a
	T _{RD60}	1183.4 a	349.6 a	984.4 a	0.07 a	0.0 a	1.60 a	29.3 a
	T _{RDC40}	1282.3 a	386.2 a	1156.2 a	0.0 a	0.09 a	1.60 a	29.9 a
	T _{RDC20}	1321.0 a	401.7 a	1215.8 a	0.19 a	0.0 a	1.80 a	30.0 a
2004	T _{CTL}	2164 a	655 a	1728 a	0.93 a	0.00 a	1.88 a	30.11 ab
	T _{RD80}	2059 ab	601 ab	1655 ab	3.18 a	0.00 a	5.02 a	29.09 ab
	T _{RD60}	1622 b	464 b	1212 b	2.22 a	0.00 a	3.08 a	28.57 a
	T _{RDC40}	1779 ab	532 ab	1415 ab	1.53 a	0.24 a	2.69 a	29.90 ab
	T _{RDC20}	1989 ab	611 ab	1702 a	1.99 a	0.00 a	2.40 a	30.60 b

Columnas seguidas de letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según el test de Tukey_{0.05}.

La producción en grano respecto a T_{CTL} se redujo un 56, 35 y 43 % en T_{RD80}, T_{RD60} y T_{RDC40}, respectivamente, sin que se diesen diferencias productivas entre tratamientos deficitarios (Tabla 4.6). El tratamiento T_{RDC20}

con un ahorro de agua respecto a T_{CTL} del 56 % en 2002 obtuvo una producción similar (Tabla 4.6). Este comportamiento diferencial de T_{RDC20} encuentra su explicación en el desarrollo vegetativo similar durante 2001 a T_{CTL} (Tabla 4.3). Durante este año los aportes hídricos en T_{RDC20} equivalieron al 100% de la ETC, y por tanto, las posiciones fructíferas futuras no se vieron afectadas.

Aunque en 2003 y 2004 la producción fue similar en el conjunto de tratamientos, a excepción de T_{RD60} en 2004, se refleja una tendencia a la disminución de la producción por efecto del déficit. La pérdida del 25 % de producción en T_{RD60} durante 2004 se debió al menor número de frutos cosechados por árbol (Tabla 4.6), ya que el peso medio del grano fue similar al de T_{CTL} (Tabla 4.7).

Dado que el crecimiento vegetativo se ha confirmado como más sensible al estrés hídrico que el transporte de carbohidratos (Hsiao, 1973), la disminución experimentada por el tronco (Figura 4.20 y Tabla 4.3) y la superficie sombreada (Figura 4.22) en los tratamientos más deficitarios con respecto a T_{CTL} , supone un menor espacio para el asentamiento de los frutos en el árbol y, en definitiva, una menor carga productiva, tal y como ha sido presentado en otros estudios en almendros adultos sometidos a RDC (Goldhamer y Viveros, 2000; Esparza *et al.*, 2001b; 2001a; Goldhamer *et al.*, 2006).

Tabla 4.7. Valores medios del peso seco del grano en los cinco tratamientos de riego durante el período 2002-2004. Cada valor representa la media de 12 árboles por tratamiento.

Tratamiento	Peso seco del grano (g)			Media
	2002	2003	2004	
T_{CTL}	1.63 a	1.49 ab	1.64 a	1.59 a
T_{RD80}	1.60 a	1.53 a	1.68 a	1.60 a
T_{RD60}	1.63 a	1.49 ab	1.71 a	1.61 a
T_{RDC40}	1.65 a	1.44 b	1.65 a	1.58 a
T_{RDC20}	1.57 a	1.45 ab	1.60 a	1.54 a

Columnas seguidas de letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según el test de Tukey0.05.

El peso seco del grano no se vio, generalmente, afectado por el tratamiento de riego (Tabla 4.7). Tan sólo en 2003, T_{RDC40} fue estadísticamente diferente a T_{RD80} debido principalmente al menor número de frutos en T_{RD80} (Tabla 4.6). El estrés hídrico moderado al que fue sometido T_{RDC20} , tanto en 2002 como 2003 ($\Psi_a \geq -1$ MPa), no afectó a la acumulación de fotoasimilados

en la semilla, lo que muestra el fuerte efecto sumidero que tiene el fruto durante este periodo de alta demanda evaporativa (junio-agosto).

A la recuperación del peso seco del grano en 2004 (Tabla 4.7), pudieron contribuir las importantes cantidades de lluvia (500 mm) acaecidas en el periodo invierno - primavera de 2003 y 2004 (Figura 4.24), al recargar el perfil hídrico del suelo. Girona *et al.* (2005) justificaron la reducción del peso seco del grano, en el tercer año de aplicación de RDC, al agotamiento progresivo del contenido de agua en el suelo debido a las escasas lluvias ocurridas durante el período invernal. Los mismos autores, a partir de tratamientos con riego al 20-50 % de la ET_c, durante la fase IV, observaron reducciones de producción entre el 5 y 9 % e indicaron que el principal componente afectado fue el peso del grano (Girona y Marsal, 1995). Igualmente, Goldhamer y Smith (1995) Goldhamer y Viveros (2000) encontraron reducciones del peso del grano del orden del 10 % en almendros en los que el déficit hídrico fue previo a la cosecha. Sin embargo, Romero *et al.* (2004a) no encontraron reducciones significativas en el peso seco del grano de almendros sometidos a estrés hídrico severo ($\Psi_a \approx -2.4$ MPa) durante la fase IV, de lo que concluyen que la acumulación de fotoasimilados se mantuvo, a la vez que señalan la fuerte actividad de sumidero del fruto en este período, lo que a su vez es compartido por los anteriores autores.

Según nuestros resultados, la variedad 'Marta' presenta una escasa presencia de almendras pelonas, dobles y vacías, lo que en conjunción con su carácter productivo y autofértil le convierte en una variedad de gran interés. El tratamiento de riego no afectó al número de almendras pelonas, dobles ni vacías. Independientemente, de la estrecha relación encontrada entre el estrés hídrico aplicado en la fase IV del almendro y el porcentaje de pelonas (Goldhamer y Viveros, 2000; Romero *et al.*, 2004a; Goldhamer *et al.*, 2006).

El incremento anual de la sección del tronco da una idea del crecimiento vegetativo ocurrido en ese intervalo de tiempo; de esta forma la relación entre la producción y este incremento serviría para separar los recursos destinados al crecimiento vegetativo y al productivo (Ebel *et al.*, 1995; González-Altozano y Castel, 1999). En 2003 y 2004, años de mayor relevancia productiva (Tabla 4.6), el reparto de recursos fue ligeramente favorable a la productividad, con valores de eficiencia productiva y de la relación $\text{kg } \Delta\text{STT}^{-1}$ similares o incluso superiores a los del tratamiento control (Tabla 4.8).

La eficiencia de uso del agua de riego (EUA) aumentó con la reducción de los aportes hídricos, lo que es coincidente con lo indicado por otros autores (Torrecillas *et al.*, 1989a; Hutmacher *et al.*, 1994; Romero *et al.*, 2004a). Así mismo, se observó un incremento lineal de EUA con la edad del árbol, lo que puede ser achacado al carácter juvenil del árbol.

Tabla 4.8. Índices de eficiencia productiva y de uso del agua de riego (EUA) de almendros 'Marta' durante el período experimental.

Índice	Año	Tratamiento de riego				
		T _{CTL}	T _{RD80}	T _{RD60}	T _{RDC40}	T _{RDC20}
Eficiencia Productiva (Produc./STT), kg/ cm ²	2002	0.047 b	0.037 bc	0.029 c	0.039 bc	0.066 a
	2003	0.558 a	0.525 a	0.633 ab	0.729 b	0.699 b
	2004	0.495 a	0.656 b	0.534 a	0.573 ab	0.581 ab
Ratio kg/ Δ STT (kg/ cm ²)	2002	0.0056 b	0.0047 b	0.0033 b	0.0051 b	0.0082 a
	2003	0.150 a	0.135 a	0.183 ab	0.222 b	0.228 b
	2004	0.141 a	0.240 b	0.155 a	0.181 a	0.154 a
EUA (Produc./riego +Lluvia), kg/ m ³	2002	0.049 b	0.043 b	0.034 b	0.045 b	0.081 a
	2003	0.143 ab	0.134 a	0.150 bc	0.169 bc	0.183 c
	2004	0.213 a	0.261 ab	0.270 b	0.291 b	0.365 c

Filas seguidas de letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según el test de Tukey_{0.05}.

4.4. Conclusiones

Bajo riego por goteo y adecuado suministro hídrico, almendros de 3 y 4 años de edad presentan la práctica totalidad de sus raíces en los 50 cm primeros de profundidad, así como un marcado carácter de crecimiento horizontal. Ambos aspectos son de gran interés con fines de diseño y manejo del riego.

La estrecha relación encontrada entre el índice de área foliar y la superficie sombreada, permite estimar el primero a partir de medidas sencillas de área sombreada.

La fase de llenado del grano (Fase IV), en almendros jóvenes 'Marta', se inicia tras acumular del orden de 27000 °C GDH. Este dato puede ser utilizado para marcar el inicio de la aplicación del déficit hídrico controlado en explotaciones en RDC

Los diferentes indicadores de estrés hídrico medidos tanto en suelo (potencial matricial y contenido de agua) como en planta (potencial hídrico y conductancia foliar) fueron sensibles al régimen de riego. Contenidos volumétricos de humedad del suelo del 40%, medidos a 15 cm del emisor, correspondientes a valores de Ψ_a y Ψ_t de -0.55 y 1.0 MPa, son indicativos de condiciones no limitantes de agua en el suelo bajo las condiciones de ensayo.

A partir de $\Psi_a < -0.7$ MPa el almendro disminuye sus pérdidas de agua a través de una importante regulación estomática. Sin embargo, requiere un déficit hídrico mayor ($\Psi_a < -1.1$ MPa) para desarrollar mecanismos de adaptación a la sequía del tipo ajuste osmótico.

El conjunto de variables controladas relativas al crecimiento y sus relaciones con la dotación hídrica e integral de estrés indican la alta sensibilidad de este proceso al déficit hídrico.

Aunque, tanto la producción como sus componentes se vieron poco o nada afectadas por el tratamiento de riego; es muy presumible que el menor tamaño de los árboles deficitarios, se corresponda con un número menor de posiciones fructíferas, afectando a producciones futuras. De ahí, la conveniencia de una programación óptima del riego en los primeros años de crecimiento y desarrollo de la plantación.

La práctica nula influencia del tratamiento de riego sobre el porcentaje de almendras pelonas, dobles y vacías, así como el carácter de la variedad 'Marta' a presentar bajísimos porcentajes de estas irregularidades productivas, la convierten en una variedad de gran interés para ser cultivada en riego deficitario controlado.

**Relaciones hídricas y producción
de almendros regados con agua
salina**

5.1. Introducción

La escasez de agua en el sudeste español ha propiciado el empleo de tecnologías altamente eficientes de riego, pero también el uso de aguas subterráneas con contenidos medios-altos en sales solubles (Bolarín y Caro, 1995). El principio básico para la sostenibilidad del regadío cuando se emplean aguas salinas es mantener la concentración de sales en el suelo a un nivel relativamente constante y por debajo de un valor umbral específico de cada especie. La satisfacción de este requisito a partir de técnicas de programación de riego precisas es una práctica demostradamente rentable (Rhoades *et al.*, 1992).

Sin embargo, la disponibilidad de agua en estas zonas sigue siendo escasa, de ahí que surja el planteamiento de cultivar con menos agua, y al ser posible, sin que suponga mermas importantes en la producción ni en la calidad de la cosecha. Los estudios realizados que abordan el efecto combinado del riego con agua salina y la reducción de los aportes hídricos sobre las relaciones hídricas, el crecimiento y producción del árbol son escasos. Por ello, se planteó este trabajo con el objetivo principal de determinar la respuesta del almendro al riego deficitario controlado con agua salina, al ser cada vez más frecuente que al problema de la escasez de recursos hídricos, en las regiones semiáridas, vaya unido el de la baja calidad agronómica de sus aguas.

5.2. Materiales y métodos

Material vegetal, condiciones experimentales y tratamientos

El ensayo se realizó durante los años 1999 – 2002 en una finca comercial de almendros (*Prunus dulcis* (Mill.) Webb), situada en Fuente-Álamo, Murcia (37° 46'N, 1° 10'E). La plantación, inicialmente de secano, fue transformada a riego localizado en 1995 cuando los árboles tenían 9 años de edad, y desde entonces se riegan con agua de pozo de elevada salinidad. La variedad base de la finca es Colorada y en un 30 % Peraleja como polinizador, ambas injertadas sobre patrón Franco de Garrigues. Los árboles dispuestos a un marco de plantación de 6 x 6 m, sombreaban al inicio del ensayo entre un 20-25 % la superficie del suelo.

Durante el período experimental, el clima se caracterizó por una demanda evaporativa, ETo (Penman-Monteith), y lluvia media de 1350 y 225 mm respectivamente, con pequeñas desviaciones interanuales. El período de lluvias fue el usual de esta zona, ocurriendo durante los meses de primavera y otoño. El 67 % de la lluvia acaecida en el año 2000 tuvo lugar el día 23 de

octubre (160 mm) como consecuencia de un fenómeno de gota fría (Figura 5.1)

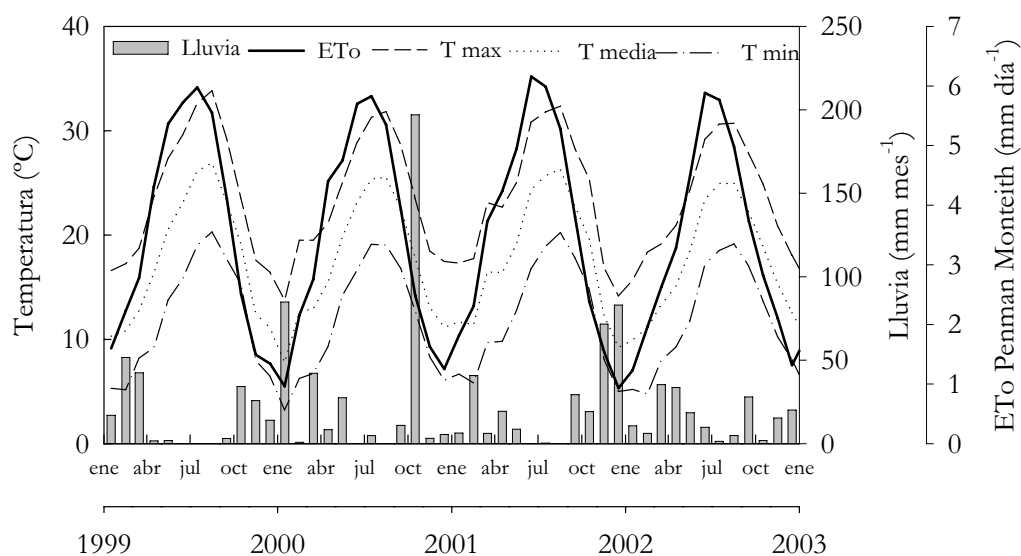


Figura 5.1. Evolución mensual de la temperatura máxima, mínima y media, evapotranspiración de referencia y lluvia durante el periodo experimental, 1999-2003.

El suelo de textura franco-arcillo-limosa presenta una capa petrocálcica a 120-140 cm de profundidad. Su contenido medio de agua útil, en los 90 cm primeros, fue de 170 mm m⁻¹ y la densidad aparente osciló entre 1.35 y 1.55 Mg m⁻³. Los niveles en potasio (55 ppm) y materia orgánica (1.37 %) fueron bajos y alto su contenido en caliza (10.2 %) y sales solubles (CE_e 6.2 dS m⁻¹). El agua de riego presentó valores medios de CE_{25°C} de 4.2 dS m⁻¹ y concentración de cloruros y sodio de 16.2 y 19.0 meq L⁻¹, respectivamente. Las cantidades de elementos fertilizantes aplicados con el agua de riego fueron 75-30-40 kg ha⁻¹ año⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O. Se realizaron las labores de cultivo habituales de la zona, y se mantuvo el suelo libre de malas hierbas mediante pases de cultivador en la dirección de las calles y aplicaciones de herbicidas en la zona húmeda. No se podaron los árboles durante todo el período experimental.

Durante 1999 y 2000 el sistema de riego utilizado fue por microaspersión (3 emisores árbol⁻¹, de 30 L h⁻¹), que se cambió a riego por goteo en enero de 2001. Éste constó de dos laterales por hilera de árboles con 12 emisores árbol⁻¹ de 8 L h⁻¹ al objeto de mantener idéntico porcentaje de suelo mojado y evitar pérdidas de agua por deriva. El porcentaje de suelo humedecido fue muy similar en ambos sistemas de riego y estuvo en torno al 33 %, valor ligeramente superior al área sombreada por el cultivo.

Se ensayaron tres tratamientos de riego: un control, T_{CTL}, regado al 125 % de la ET_c, otro de riego deficitario controlado, T_{RDC}, al 100 % del T_{CTL} hasta alcanzar el tamaño exterior del fruto (mediados de abril), 70 % hasta el

inicio de la fase de acumulación rápida en materia seca del grano (finales de mayo), 30 % hasta recolección (mediados de agosto) y 70 % durante el resto de la estación de riego y un tercer tratamiento de secano, T_{SCO} , sin riego durante todo el año (Figura 5.2). El diseño estadístico fue de bloques al azar con tres repeticiones. Cada replica constó de tres hileras de árboles con seis árboles por hilera, de ellos se seleccionaron los 4 árboles centrales para la toma de medidas, considerándose el resto como árboles guarda (Figura 5.3). Por otro lado, y debido a la inexistencia de agua de buena calidad no se pudo plantear un tratamiento testigo con agua de baja salinidad, el que hubiese permitido un estudio más detallado de los efectos de las sales disueltas en el agua de riego y solución del suelo sobre el crecimiento y producción del almendro.

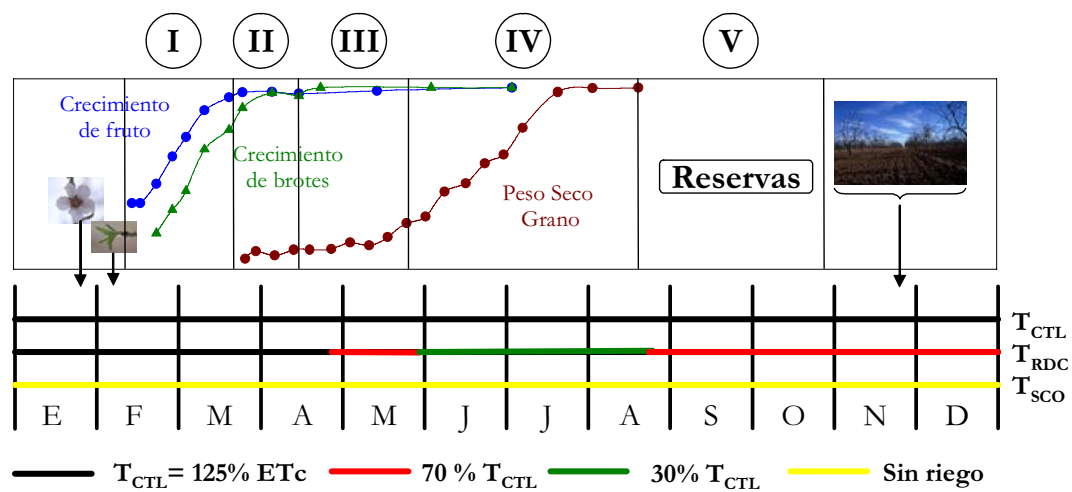


Figura 5.2. Régimen de riego, en los distintos tratamientos, de acuerdo a las fases del ciclo anual de almendros 'Colorada'.

La frecuencia de riego fue semanal en atención a las limitaciones impuestas por el agricultor-colaborador en los repartos del agua disponible y en orden a mantener una humedad adecuada en la profundidad radicular efectiva. Las dosis de riego, para la frecuencia fijada, se determinaron a partir de la evapotranspiración de referencia (ET_o), según la ecuación de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998), proporcionada por el Servicio de Información Agraria de Murcia, SIAM (<http://www.carm.es/cagr/cida/siam.htm>), a partir de los datos registrados en la estación agroclimática vecina 'El Campillo' (CA91); los coeficientes de cultivo (k_c) dados por Doorenbos y Pruitt (1977) y la estima de los requerimientos de lavado. Los volúmenes de riego calculados fueron ajustados en función del tamaño de copa (Fereres *et al.*, 1982). Sin embargo, durante el 2002 y debido a una sequía severa no se pudieron aplicar las cantidades de agua programadas en la segunda mitad de la estación de riegos. La cantidad de agua aplicada se leyó semanalmente en contadores instalados en cada uno de los tratamientos.

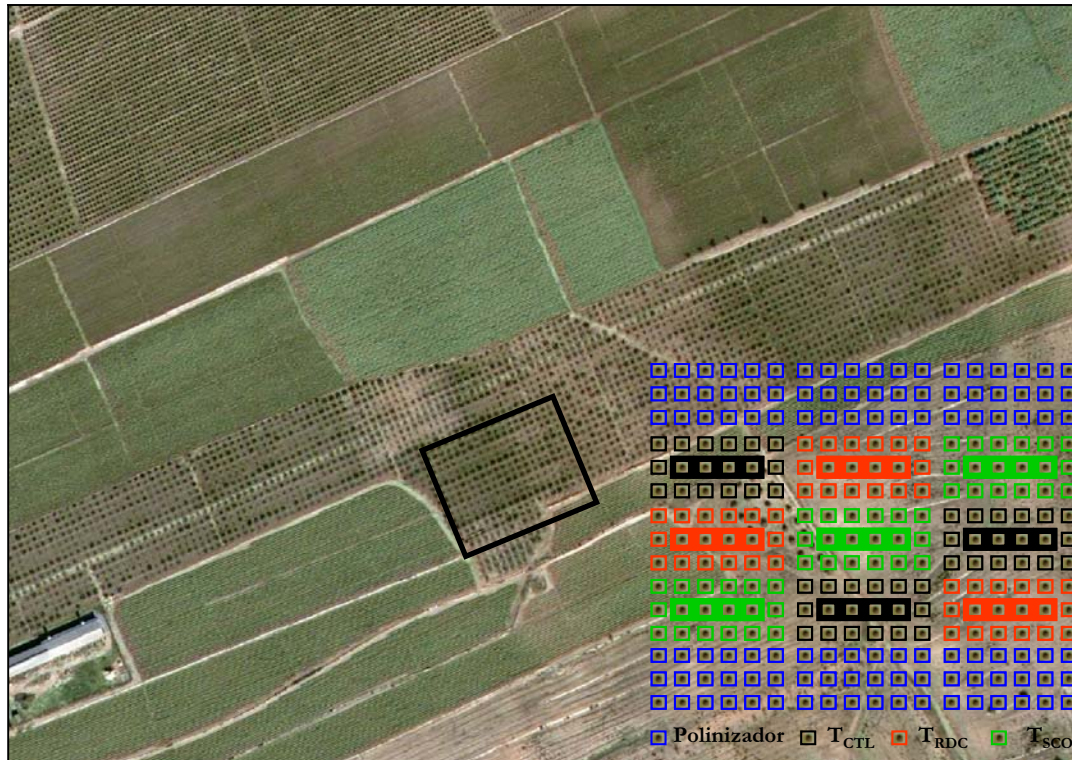


Figura 5.3. Vista aérea de la plantación comercial de almendros ‘La Corverica’. El recuadro en negro señala la parcela experimental en la que se realizó el ensayo, de acuerdo con la distribución de tratamientos indicada.

Medidas

Agua-suelo

El potencial matricial del agua en el suelo (Ψ_m) se midió con tensiómetros y sensores de matriz granular (Watermarks) situados a 70 y 30 cm del emisor (microaspersión y goteo, respectivamente), en dos repeticiones por tratamiento y a las profundidades de 30, 60 y 90 cm. El contenido volumétrico de agua (θ_v) se determinó con TDR (Moisture Point, Mod. MP-917) en dos posiciones del volumen humedecido, próximo al emisor y en el frente húmedo, y en un árbol por repetición para cada tratamiento. En el tratamiento de seco, las sondas TDR se instalaron a idéntica distancia que en los tratamientos regados, pero en este caso respecto al emisor suprimido y en la zona perimetral de la proyección de la copa. La distribución de sales en el perfil de suelo humectado por los emisores se evaluó a partir de medidas de la concentración del ion cloruro, $[Cl]_e$ (Corning Chloride Analyzer, mod. 926) y de la conductividad eléctrica, CE_e , del extracto de saturación (Crison mod. 524). Las muestras se tomaron con idéntico criterio al de las medidas de contenido de humedad, próximas al emisor y en el frente húmedo, en capas de

30 cm hasta la profundidad de 120 cm y en 3 ubicaciones por tratamiento, una por repetición.

Agua-planta

Quincenalmente y en días típicos y soleados se controló el estado hídrico del árbol a partir de medidas de conductancia foliar (g_l) y de potencial hídrico foliar antes del alba (Ψ_a) y a mediodía (Ψ_{md}), en 18 hojas adultas por tratamiento. Para ello, se utilizó un porómetro de estado estacionario (Licor Inc., mod. LI-1600) y una cámara de presión (Soil Moisture Equip. Corp, mod. 3000). En el año 2000 y con el período de déficit avanzado en T_{RDC} , día 19 de julio, se determinó el potencial hídrico foliar (Ψ_l), el de hoja cubierta o potencial de tallo (Ψ_t), g_l y las condiciones ambientales a intervalos de dos horas desde antes del alba hasta la puesta del sol. La evaluación diaria del estado hídrico del árbol fue intensificada en 2001, al objeto de caracterizar el funcionamiento hídrico del árbol al inicio (25 mayo) y mediados (26 julio) del período de déficit severo y tras mes y medio de la reanudación del riego al 70 % T_{CTL} (25 octubre) en el T_{RDC} . En estas tres evaluaciones, se controló, además, el potencial osmótico foliar a saturación (Ψ_{os}), a partir de hojas situadas en los mismos ‘spurs’ que las utilizadas en las medidas de Ψ_a , y el potencial osmótico foliar actual (Ψ_o) en cada momento de medida de Ψ_l con un osmómetro (Roebbling, mod. 13 DR). El potencial de presión fue estimado como diferencia entre Ψ_l y Ψ_o . El déficit de presión de vapor (DPV) se determinó a partir de las lecturas obtenidas a partir de un sicrómetro de bulbo seco y húmedo, y la radiación fotosintéticamente activa (RFA) mediante el sensor de quantum del porómetro. En ambos años, las evoluciones diarias se realizaron el último día del intervalo entre riegos, al objeto de que el árbol reflejase la situación hídrica más desfavorable del período entre riegos.

Contenido mineral en hoja

A mediados de julio de 2000 y 2001, se tomaron muestras foliares de 150 hojas procedentes de los ‘spur’ para su análisis posterior. En el laboratorio se lavaron las hojas en una disolución al 0.3 % de Teepol y enjuagaron con agua destilada, durante un período inferior a treinta segundos. Inmediatamente después, se secaron las muestras en estufa por corriente de aire a 70 °C durante 24 horas, posteriormente se trituraron en un molinillo de aspas, quedando reducido a polvo finamente dividido y a continuación se desecaron a 105°C hasta peso constante (2 horas). Por último la muestra pulverizada se introdujo en frascos con cierre hermético para su conservación y posterior realización de las diferentes determinaciones (Grier, 1996). Así mismo y durante el 2001, se determinó, bimensualmente, el contenido foliar

de cloruros, sodio y potasio en muestras de 150 hojas por repetición procedentes de 'spur'. La concentración de cloruros en hoja se valoró según el método propuesto por Gilliam (1971) utilizando un analizador de Cloruros (Corning, mod. 926), y las de sodio y potasio por espectrofotometría de absorción atómica (Espectrofotómetro Unicam, mod. 969 AA) de acuerdo a los métodos oficiales de análisis de la Unión Europea (1998).

La toma de muestras foliares en los meses en que se realizaron las tres evaluaciones diarias de control del estado hídrico de la planta coincidió con los días de las evoluciones, al objeto de utilizar los contenidos foliares en cloruro, sodio y potasio en el estudio de la contribución relativa de cada uno de estos solutos al potencial osmótico foliar medido a saturación. La contribución osmótica de los solutos analizados individualmente ($\Psi_{os,i}$) se determinó a partir de la ecuación de Van't Hoff:

$$\Psi_{os,i} = -0.002479 \times \text{PSR} \times C$$

donde $\Psi_{os,i}$ indica la contribución individual de los solutos (MPa) al Ψ_{os} medido, PSR el peso seco relativo a saturación (kg m^{-3}), C la concentración molar de los solutos (mol kg^{-1}) y $0.002479 \text{ m}^3 \text{ MPa mol}^{-1}$ el valor RT a 25 °C. Se asumió un comportamiento osmótico ideal de los solutos, es decir, una constante de ionización de uno (Alarcón *et al.*, 1993).

Crecimiento y desarrollo

Para caracterizar la dinámica de crecimiento en longitud de los ramos y dado el escaso crecimiento observado en 1999, en 2000 y 2001 se seleccionaron y marcaron cuatro ramas de aproximadamente 1.5 cm de diámetro en cada una de las cuatro orientaciones, y en dos árboles representativos por parcela elemental. En ellas y con una frecuencia de 1 a 2 veces semana se midió la elongación apical y axilar de todas las brotaciones surgidas. Adicionalmente, y en un único brote del año por rama se midió con calibre digital (Craftsman, precisión 0.01 mm) e idéntica frecuencia su diámetro basal.

El crecimiento de tronco se evaluó a partir de medidas periódicas del perímetro del tronco a una altura de aproximadamente 10 cm sobre la unión injerto-patrón y en 12 árboles por tratamiento. Adicionalmente, se midió, en idénticos árboles, el diámetro de la copa en dos direcciones perpendiculares (en la dirección de las filas y transversal a ella).

El área foliar total de árboles seleccionados se estimó a partir del producto peso seco foliar total por el área específica foliar. Para ello e inmediatamente después de la cosecha, se envolvió el árbol con una malla plástica de paso de luz inferior al tamaño mínimo de hoja. Las hojas caídas y

recogidas en el fondo del envoltorio se retiraron periódicamente, hasta la recogida de la totalidad de las hojas presentes en el árbol, y se determinó su peso seco tras desecación en estufa ventilada a 65°C. Previamente, y mediante un sistema de análisis de imagen DELTA-T se determinó el área foliar de una muestra de 150 hojas por repetición y tratamiento, y a continuación, su peso seco.

Para el estudio del patrón de crecimiento del fruto se midió, semanalmente, con calibre digital (Craftsman, precisión 0.01 mm) la longitud y anchura de 100 frutos elegidos al azar en cuatro árboles por repetición, y, adicionalmente, se recogieron 60 frutos por tratamiento en los que se determinó el peso fresco y seco total y del grano. La cosecha se controló individualmente en cada uno de los cuatro árboles centrales de cada repetición, una vez eliminada la corteza y tras secado al aire durante 4 días. Tras ello y a partir de una muestra de 250 g por árbol se determinó el peso del grano y cáscara, rendimiento y porcentaje de semillas dobles, vacías y pelonas. El número de frutos por árbol se determinó dividiendo la producción total de cada árbol por el peso medio del fruto.

5.3. Resultados y discusión

5.3.1. Relaciones hídricas

Agua - suelo

Durante los años 2000 y 2001 y con una frecuencia semanal, se tomaron las lecturas de potencial hidráulico (Ψ_H), en cada una de las estaciones tensiométricas, momentos antes del inicio del riego. En el tratamiento T_{CTL} y en el T_{RDC} durante los períodos de riego al 100 y 70 % del T_{CTL} las lecturas de Ψ_H se obtuvieron con tensiómetros, mientras que en T_{SCO} y durante el período al 30 % en T_{RDC} se determinaron con sensores de matriz granular (Watermarks), al alcanzarse tensiones de agua en el suelo superiores a 80 kPa.

En la tabla 5.1 se recogen los valores medios de potencial matricial por períodos y profundidades para los tres tratamientos de riego. Estos períodos responden al tiempo de aplicación de los diferentes regímenes hídricos que definen al tratamiento T_{RDC} . Los valores registrados de Ψ_m durante 2000 y 2001 correspondieron, generalmente, al nivel máximo alcanzado de retención del agua por las partículas sólidas del suelo, durante cada uno de los intervalos de riego, y sus valores medios fueron muy similares en los dos años de registros, de ahí que la tabla 5.1 tan sólo refleje los correspondientes al 2000.

A partir de los valores de Ψ_m correspondientes a las profundidades de 30, 60 y 90 cm (Tabla 5.1), perfil del suelo donde se encuentra la práctica totalidad del sistema radicular, se deduce la marcada influencia del régimen de riego en la disponibilidad del agua para el cultivo. Los valores medios prerriego de Ψ_m en el tratamiento control fueron medios-altos, relativamente estables y acordes con la programación realizada. Durante toda la estación de riego Ψ_m fue superior en T_{CTL} que en T_{RDC} , a excepción del período febrero-mediados de mayo en el que se obtuvieron valores de Ψ_m parecidos en ambos tratamientos, como consecuencia de la mayor similitud entre los aportes hídricos y la menor demanda evaporativa de esta época del año. En el período de riego al 30 % del T_{CTL} los valores de Ψ_m en T_{RDC} se mantuvieron por debajo del rango de medida del tensiómetro, niveles que posibilitan riesgos de estrés hídrico en planta (Pogue y Pooly, 1985). Esta situación unida a aplicaciones del 70 % del T_{CTL} durante el período postcosecha no permitió la recuperación de Ψ_m a niveles similares a los del control, si bien, los valores alcanzados se podrían equiparar a condiciones de suministro hídrico adecuado, si se tiene en cuenta que la frecuencia de riego fue media (Taylor y Ashcroft, 1972) y bajo el supuesto de que no se hubiese tratado de un suelo salino ($CE_e \geq 4$ dS/m). El T_{SCO} presentó valores inferiores a -80 kPa en las tres profundidades de medida y durante casi todo el año, los que son indicativos del déficit hídrico severo (Taylor y Ashcroft, 1972; Pogue y Pooly, 1985) en el que tiene lugar el desarrollo de las distintas fases del ciclo anual del almendro bajo las condiciones de secano del Campo de Cartagena. De igual modo que con las lecturas tensiométricas, en la figura 5.4 se muestran los resultados de las medidas de contenido de humedad de 2000. Éstas se obtuvieron a partir de sondas TDR situadas a 50 y 100 cm del microaspersor. El período de medidas englobó dos etapas relevantes de la estrategia de riego seguida: i) acumulación rápida de materia seca del grano (Fase IV - meses de junio - agosto), y ii) período postcosecha (Fase V – desde la cosecha a las primeras caídas de hojas, Figura 5.2).

A pesar de la heterogeneidad del terreno, de la variabilidad tridimensional originada por el propio sistema de riego, los valores obtenidos siguieron una conducta esperable en todos los tratamientos de riego. Así el contenido relativo de humedad de T_{RDC} y T_{SCO} respecto a T_{CTL} , durante todo el período de mayor intensidad de déficit hídrico (fase IV del ciclo anual del almendro), se mantuvo por debajo del control, y como era de esperar éste fue sensiblemente inferior en T_{SCO} que en T_{RDC} , presentando este último contenidos relativos medios en torno al 55 % para el perfil de suelo de 0-120 cm (Figura 4.4). Sin embargo y al final de la estación de riegos, coincidiendo con la lluvia torrencial del 23 octubre (160 mm), se llegaron a igualar, en los tres tratamientos de riego, los contenidos de humedad en los 60 cm primeros

de profundidad del punto de medida a 50 cm del emisor. En los siguientes 60 cm del perfil de suelo, que momentos antes de la lluvia se encontraban en T_{RDC} y T_{SCO} a niveles ligeramente inferiores a los de la mitad superior, el agua infiltrada fue insuficiente para llevar esta capa a idéntico contenido de humedad que en T_{CTL} , observándose tan sólo un ligero incremento de humedad (Figura 5.4).

Tabla 5.1. Agua aplicada, lluvia y valores medios de potencial matricial previos al riego, durante los tres períodos de T_{RDC} en 2000.

Trat.	Riego (mm)	Lluvia	Año	Prof. (cm)	Ψ_m prerriego (kPa)		
					Fb - ½ My	½ My - Ag	Sp - Nv
T_{CTL}	1999	424	190	30	-33	-50	-34
	2000	480	385	2000	60	-25	-40
	2001	465	285	90	-27	-36	-25
	2002	205	180				
T_{RDC}	1999	195	190	30	-39	-92	-52
	2000	280	385	2000	60	-29	-85
	2001	215	285	90	-40	-88	-52
	2002	115	180				
T_{SCO}	1999	95	190	30	-101*	-140*	-114*
	2000	0	385	2000	60	-115*	-153*
	2001	0	285	90	-80*	-94.0*	-83.0*
	2002	0	180				

(*) Medidas realizadas con sensores de resistencia eléctrica (Watermark).

La pauta observada en las medidas realizadas en el frente húmedo del volumen humedecido por los emisores (sondas a 1 m del emisor) fue muy similar al registrado en la zona de elevado contenido de humedad (sondas a 0.5 m del emisor), si bien, se apreciaron algunas diferencias. Así y tras la reanudación del riego a dosis equivalentes al 70 % del T_{CTL} , fase V del almendro, se produjo una inmediata recuperación de los niveles de humedad de T_{RDC} en los primeros 60 cm de profundidad del frente húmedo, mientras que en la zona de mayor contenido de humedad el incremento fue muy gradual, alcanzándose la recuperación tras la lluvia de octubre. En T_{SCO} , y

contrariamente a lo observado en T_{RDC} , el nivel relativo de humedad alcanzado fue, generalmente, menor a 1 que a 0.5 m de distancia de la línea de plantas, lo que puede ser achacado a la variabilidad espacial del terreno y a la diferente distribución del sistema radicular. Aunque los incrementos de humedad en T_{RDC} y T_{SCO} para las capas de 60-90 y 90-120 cm de profundidad fueron más notorios en el punto de muestreo a 0.5 m que a 1 m del emisor, en ambas ubicaciones son indicativos del importante agotamiento del agua del suelo durante los meses de verano, ya que ni la reanudación del riego al 70 % del T_{CTL} ni la lluvia acaecida supusieron una recarga de agua importante para esta profundidad.

Durante el ciclo de cultivo y en la profundidad de máxima densidad radicular, primeros 90 cm, el tratamiento control mantuvo contenidos volumétricos de humedad relativamente altos y próximos a su capacidad de campo ($\theta_{vCC} \approx 30-35 \%$), durante la mayor parte del intervalo entre riegos, valores concordantes con los de Ψ_m registrados (Tabla 5.1). Sin embargo, el contenido volumétrico de T_{SCO} , prácticamente constante durante las fases IV y V, como consecuencia de la escasísima pluviometría ocurrida durante el verano y principios de otoño, se acercó a los correspondientes al punto de marchitez, lo que demuestra el importante nivel de agotamiento del agua en el suelo, capaz de afectar a los procesos de acumulación de materia elaborada en el grano, diferenciación floral y acumulación de reservas para el próximo ciclo (Girona y Marsal, 1995). En T_{RDC} los valores de θ_v , en la generalidad del perfil, estuvieron entre los de T_{CTL} y T_{SCO} , siendo más cercanos a este último.

mm sin escorrentía aparente, fue insuficiente para llevar a capacidad de campo las capas de suelo por debajo de los 60 cm de profundidad (Figura 5.4). Sin embargo, su ocurrencia mejoró las condiciones hídricas del suelo, a través del aumento de las componentes matricial y osmótica del agua en el suelo (Figuras 5.4, 5.5 y 5.6).

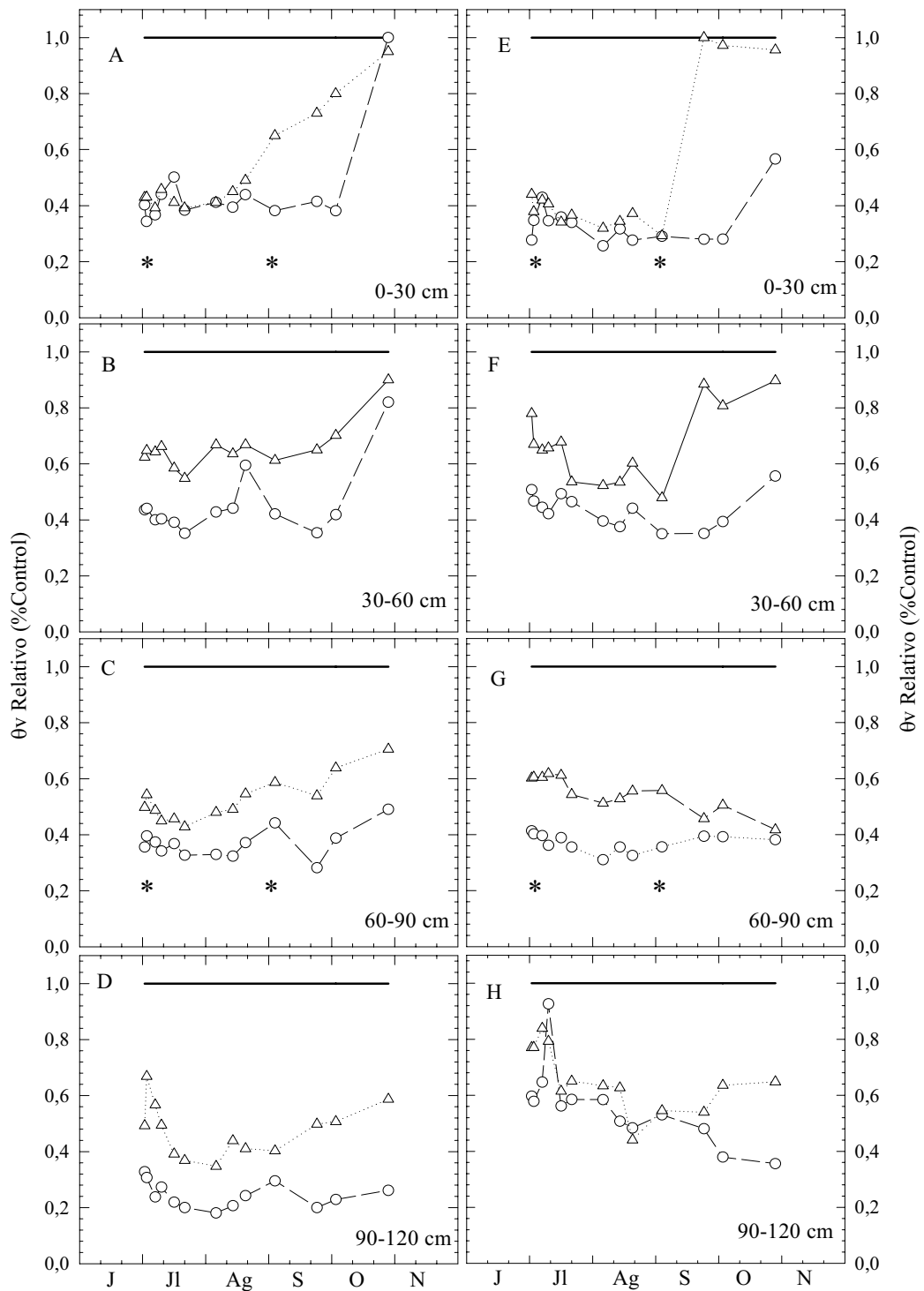


Figura 5.4. Evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo relativo al control ($\theta_{vT}/\theta_{vTctl}$), para las profundidades de 0-30, 30-60, 60-90 y 90-120 cm. Los puntos representan el promedio de tres sondas de TDR situadas a 0.5 m (A, B, C, D) y 1 m (E, F, G, H) del emisor (T_{CTL} (—), T_{RDC} (··Δ··) y T_{SCO} (—○—)). Los asteriscos indican el período de riego al 30 % del T_{CTL} en T_{RDC} . 2000.

El nivel de agotamiento del agua en el suelo en T_{RDC} y T_{SCO} quedó de manifiesto tras la lluvia de octubre de 2000, en el que una altura total de 160

Salinidad

La distribución de sales en el perfil del suelo de 0 a 120 cm de profundidad fue evaluada a partir de medidas de conductividad eléctrica, CE_e , y concentración de cloruros, $[Cl]_e$, en el extracto de saturación, en dos puntos característicos del volumen humedecido: frente húmedo y zona mojada (punto intermedio entre el emisor y el frente húmedo), y cuando T_{RDC} llevaba dos meses regándose al 30 % del T_{CTL} . En T_{SCO} la toma de muestras se realizó en un punto situado en la zona perimetral de proyección de la copa.

En la figura 5.5 se muestran los perfiles salinos de los tres tratamientos de riego correspondientes al año 2000. Y al igual que Ψ_m y $\theta_{vTi}/\theta_{vTcd}$ los niveles de CE_e y $[Cl]_e$, se vieron afectados por el régimen de riego aplicado. Así en el frente húmedo y en la capa de mayor densidad radical, 60 cm primeros, se alcanzaron valores medios de CE_e de 6.5 y 8.0 $dS\ m^{-1}$, en los tratamientos T_{CTL} y T_{RDC} , respectivamente, mientras que en la zona húmeda el contenido salino fue sensiblemente inferior al anterior (4.4 y 5.8 $dS\ m^{-1}$), todos propios de un suelo salino (Personal del Laboratorio de Salinidad de los E.U.A., 1982). La alta concentración salina observada en el T_{SCO} (4.5 $dS\ m^{-1}$) puede ser atribuida a la historia previa del cultivo, ya que en los 5 años previos al inicio de los ensayos los árboles se regaron con aguas procedentes del mismo pozo, y a la baja pluviometría registrada tras la supresión del riego en T_{SCO} , interacción negativa que induce a mermas productivas, al agravar el problema de salinidad. Teniendo en cuenta que el umbral de tolerancia del almendro a la salinidad en la zona radicular se estima en una CE_e de 1.5 $dS\ m^{-1}$ (Maas, 1990) y que investigaciones adicionales cifran la disminución del rendimiento por incremento unitario de salinidad entre el 18 y 21 % (Fulton *et al.*, 1996), serían esperables producciones inferiores al 40 % de la producción potencial de almendros adultos.

La distribución de cloruros mostró una pauta muy similar a la observada para la CE (Figura 5.5). Así, la concentración de este ion aumentó con la distancia al emisor, correspondiéndose con las menores fracciones de lavado típicas del frente húmedo, y con la profundidad en T_{CTL} ; mientras que en T_{RDC} disminuyó a partir de los primeros 30 cm, lo que apunta a un mayor lavado de sales en T_{CTL} , especialmente para la zona de mayor contenido de humedad. En esta zona y para la profundidad de 90 cm, perfil de suelo donde se encuentra la generalidad de raíces finas en almendros en goteo (Catlin, 1996; Franco y Abrisqueta, 1997) la $[Cl]_e$ fue de 14.0 y 17.3 $meq\ L^{-1}$ en T_{CTL} y T_{RDC} , respectivamente, niveles muy altos y considerados de grado de restricción de uso severo, por entrañar un altísimo riesgo de toxicidad iónica

en almendro (Fulton *et al.*, 1996). Ambas concentraciones muestran la importante contribución del ion cloruro a la salinidad total de la solución del suelo.

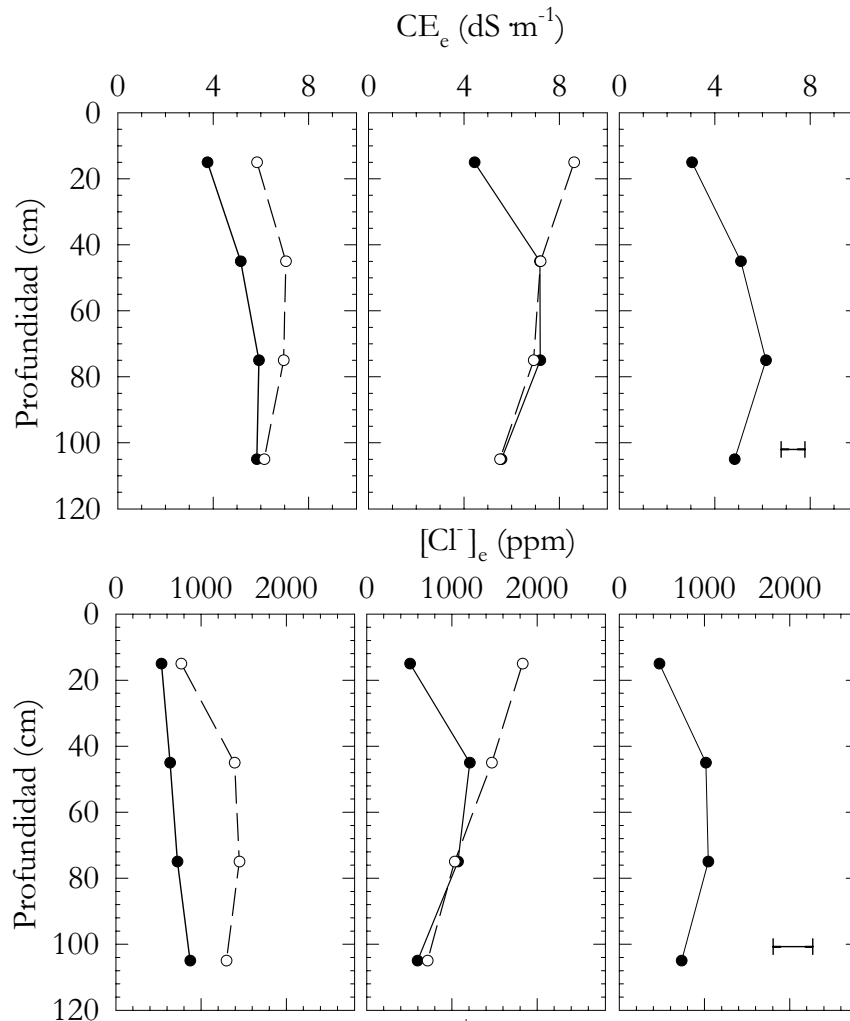


Figura 5.5. Perfiles de salinidad (CE_e) y concentración de cloruros $[Cl]_e$ en el extracto de saturación, a finales de agosto de 2000, en la zona húmeda (—●—) y frente húmedo (—○—) del círculo mojado por el emisor. La línea horizontal representa el ES medio del perfil.

La lluvia de octubre de 2000 redujo prácticamente a la mitad la CE_e en los primeros 50 cm de profundidad y a la tercera parte la $[Cl]_e$, según el muestreo realizado en el frente húmedo de T_{RDC} , inmediatamente después de la lluvia y en comparación con los valores disponibles del mes de agosto (Figuras 5.5 y 5.6). Aunque la lluvia fue cuantiosa no fue suficiente para llevar a capacidad de campo el perfil de suelo por debajo de los 60 cm de profundidad (Figura 5.4), de ahí que parte de las sales presentes en las capas superiores de la zona radicular fuesen desplazadas a capas más profundas dentro de esta zona (Figura 5.6). El hecho de que la lluvia no encontrase el perfil muestreado a contenidos altos de humedad (frente húmedo), especialmente, en las capas más profundas pudo limitar el desplazamiento de

las sales. Lixiviaciones mayores a las muestreadas podrían haber tenido lugar en la zona húmeda de este tratamiento y en T_{CTL} , y menores en T_{SCO} , en consideración a los contenidos de humedad del suelo en el momento en el que se produjo la lluvia (Ayers y Westcot, 1987). Bajo estas condiciones de cultivo y de acuerdo con los resultados obtenidos sería recomendable mantener un elevado contenido de agua en el suelo antes de la llegada de las lluvias, ya que generalmente van a ser insuficientes (Figura 5.1) para completar la lixiviación de las sales presentes.

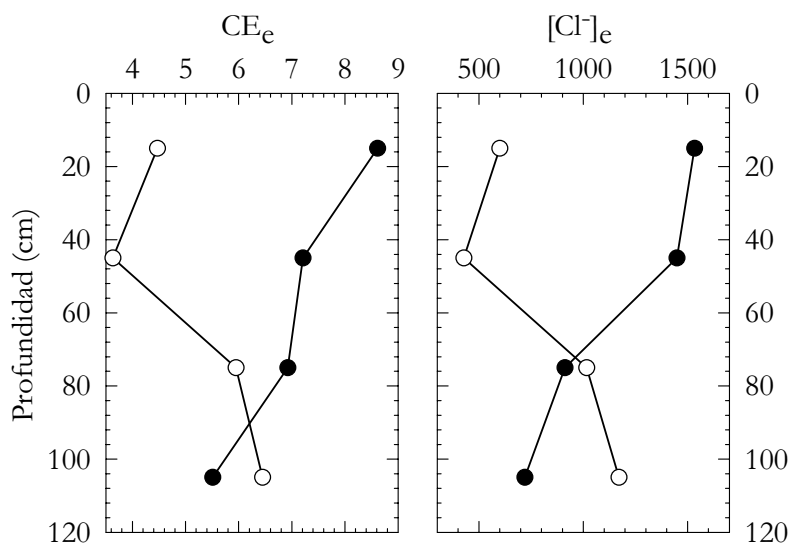


Figura 5.6. Perfiles de salinidad (CE y $[Cl^-]$ en el extracto de saturación del suelo) en la capa de 0 a 1.20 m de profundidad para el tratamiento T_{RDC} antes (\bullet) y después (\circ) de 160 mm de lluvia. Los valores corresponden al frente húmedo del volumen humectado.

Agua-planta

Durante el período experimental los parámetros hídricos foliares resultaron sensibles al déficit hídrico. En el tratamiento control el potencial hídrico foliar antes del alba (Ψ_a) estuvo en torno a -0.65 MPa, valores ligeramente inferiores a los obtenidos por Torrecillas *et al.* (1996); Goldhamer y Viveros (2000); Romero *et al.* (2004a); Girona *et al.* (2005), Nortes *et al.* (2005) en almendros regados con aguas de baja salinidad. Estos menores valores de Ψ_a bajo condiciones de humedad adecuada (Figura 5.7 y Tabla 5.1) pueden ser atribuidos al efecto de la salinidad sobre el estado energético del agua en el suelo, ya que al disminuir la componente osmótica lo hace la disponibilidad del agua para la planta (Katerji *et al.*, 2003). La pronunciada caída de Ψ_a a finales de agosto fue promovida por la supresión del riego durante la semana previa a la recolección; supresión que tuvo por objeto el endurecimiento del árbol de cara a disminuir los daños de descortezado de troncos por vibración mecánica.

A excepción de los períodos de riego al 100 % y precosecha al 70 % del T_{CTL} en T_{RDC} y durante la generalidad de la estación en T_{SCO} , los valores de Ψ_a se mantuvieron por debajo de los del tratamiento control (Figura 5.7). Las diferencias de Ψ_a respecto al control y para el período junio-septiembre fueron relativamente constantes para T_{RDC} , oscilando entre 0.2-0.3 MPa. Sin embargo, para T_{SCO} se produjo un aumento gradual desde primeros de junio hasta finales de julio (0.4-1.1 MPa), para posteriormente mantenerse en torno a 0.75 MPa. Comportamiento que respondió, inicialmente, al aumento de la demanda evaporante (Figura 5.1) y disminución del agua útil del suelo (Tabla 5.1) y posteriormente a la disminución de la demanda climática y a la pérdida de superficie foliar por defoliaciones y necrosis en hojas.

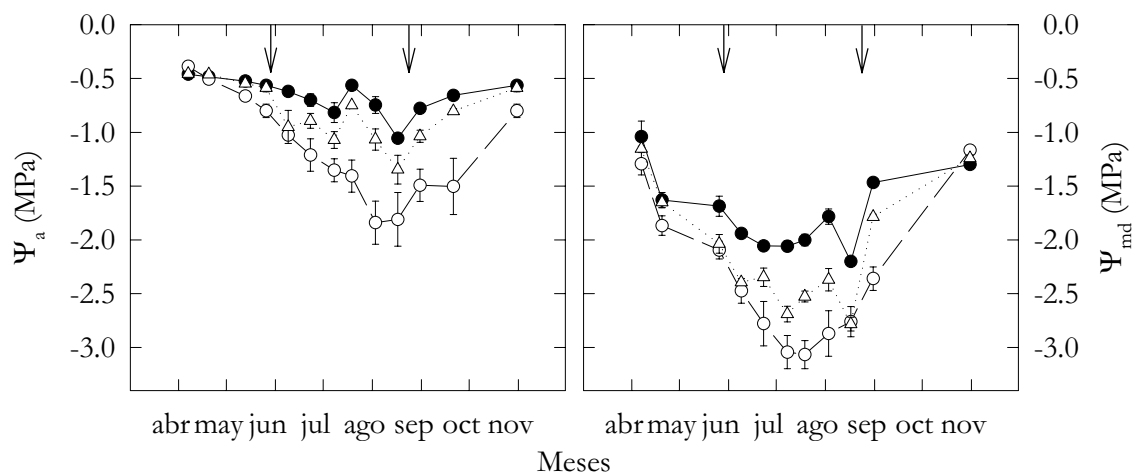


Figura 5.7. Evolución estacional del potencial hídrico foliar al alba (Ψ_a) y a mediodía (Ψ_{md}) en 2000, para los tres tratamientos de riego: T_{CTL} (—●—), T_{RDC} (···▲···) y T_{SCO} (---○---). Cada punto corresponde a la media de 3 repeticiones \pm ES. ↓ indica el cambio de riego en el tratamiento T_{RDC} .

Los valores de potencial hídrico foliar a mediodía (Ψ_{md}) fueron inferiores a Ψ_a y disminuyeron con el avance de la estación, alcanzándose niveles mínimos de -2.0 (T_{CTL}), -2.6 (T_{RDC}) y -3.1 MPa (T_{SCO}) en julio, cuando la demanda evaporante fue mayor ($DPV \approx 3.5$ kPa). Estos valores son similares e inclusive superiores a los encontrados por Hutmacher *et al* (1994) en almendros en riego por goteo, con agua de conductividad eléctrica media 1.54 dS m^{-1} y aportes hídricos equivalentes al 100 y 50 % de la ET_c estimada. Posteriormente y de forma paulatinamente, Ψ_{md} aumentó en los tres tratamientos de riego hasta alcanzar valores máximos de -1.2 MPa tras la lluvia de octubre, lo que indica que el agua infiltrada fue suficiente para que se igualasen los tres tratamientos, dando lugar a la recuperación de los valores de Ψ_{md} en ambos tratamientos deficitarios (Figura 5.7). Esta conducta de Ψ_{md} ,

dependiente de la demanda evaporante ya fue indicada por Torrecillas *et al.* (1989b) en almendros en riego por goteo.

Aunque las diferencias de Ψ_1 en valor absoluto, respecto al control, fueron superiores en las medidas realizadas a mediodía que antes del amanecer (Figura 5.7), las mayores diferencias relativas encontradas al alba (≈ 2.5 veces para el caso de T_{SCO}) hacen que Ψ_a sea considerado mejor indicador del estado hídrico del almendro que Ψ_{md} y un buen estimador del potencial hídrico del suelo, ya que al alba se debiera haber equilibrado, o al menos en gran parte, con el potencial total del agua en el suelo (Jones, 2004; 2007). Ahora bien, y debido a la laboriosidad de las medidas, a la realización de éstas fuera de la jornada laboral habitual y a las dificultades para su automatización, se ha sugerido que podría ser más útil la estimación indirecta de un potencial umbral del agua en el suelo para la zona radicular de mayor actividad, a partir de medidas diurnas de potencial hídrico foliar y conductancia estomática (Jones, 2004). Hay que tener en cuenta que mientras Ψ_a es un buen indicador de la recuperación experimentada por la planta durante la noche y por tanto del grado de estrés con el que la planta inicia el día, Ψ_{md} refleja la situación hídrica del cultivo en plena actividad del día, cuando la tasa de fotosíntesis y la demanda evaporante suelen ser máximas. De ahí la utilidad de ambos indicadores en la caracterización del estado hídrico del almendro y para ajustar los programas de riego previamente establecidos.

La conductancia foliar (g_l) del T_{SCO} presentó mayor variabilidad y fue significativamente inferior a la de los tratamientos regados, e igualmente la de T_{RDC} con relación al control durante el período de déficit al 30 % del T_{CTL} (Figura 5.8). La reanudación del riego al 70 % del T_{CTL} (finales de agosto) produjo la recuperación de g_l en T_{RDC} , registrándose tasas similares a las del control en las medidas realizadas en septiembre. La lluvia caída en octubre, análogamente a Ψ_a y Ψ_{md} , igualó los valores de g_l en los tres tratamientos, si bien, tanto el número de hojas como su tamaño fueron claramente inferiores en T_{SCO} . Independientemente de esta realidad, estos datos corroboran la utilidad de g_l , indicada por Fereres *et al.* (1979), para evaluar la recuperación de las plantas después de un estrés hídrico, y muestran el papel regulador del estoma ante los cambios de humedad impuestos al suelo.

Los valores de g_l en el tratamiento control fueron similares a los informados por Marsal *et al.* (1997) y Nortes *et al.* (2005) y superiores a los de Romero *et al.* (2004a) bajo condiciones climáticas parecidas y claramente inferiores a los obtenidos por Hutmacher *et al.* (1994) en California con aportes hídricos superiores ($\approx 10.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$). En el tratamiento control, los valores máximos de g_l tuvieron lugar durante el periodo de alta ET (julio-septiembre), mientras que en el de secano se obtuvieron valores mínimos del

orden de la tercera parte de los de T_{CTL} (68 y 96 $\text{mmol m}^2 \text{s}^{-1}$). Los niveles de g_i en T_{RDC} se situaron en una zona intermedia entre los del tratamiento control y seco (Figura 5.8). Esta conducta es indicativa de como el estoma es capaz de regular las pérdidas de agua por transpiración en función del grado de su apertura y en respuesta a la disponibilidad hídrica del suelo (Turner *et al.*, 1985; Girona *et al.*, 1993a). En este sentido, algunos investigadores han constatado que condiciones de déficit hídrico ligero-moderado provocan una importante regulación estomática y un descenso en las tasas de intercambio gaseoso en plantas cultivadas en clima mediterráneo y desértico (Tenhunen *et al.*, 1982; Pereira *et al.*, 1986; Schulze, 1986; Sánchez-Blanco *et al.*, 1991). Sin embargo, resulta difícil separar los efectos del déficit hídrico de otros factores que regulan el comportamiento estomático (Lynn y Carlson, 1990).

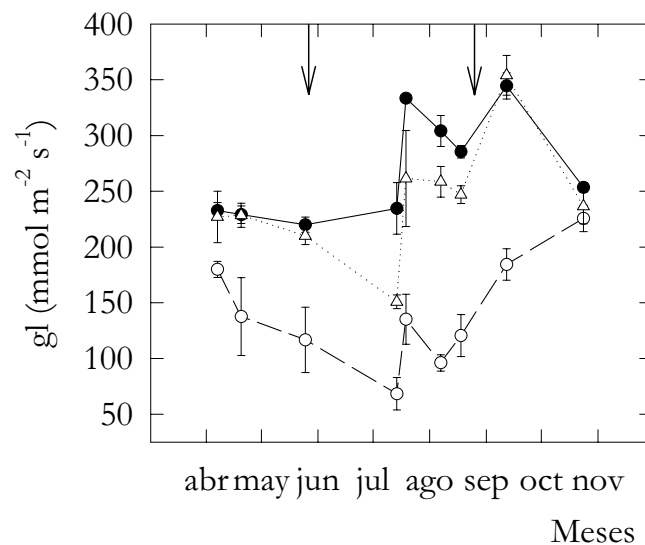


Figura 5.8. Evolución estacional de la conductancia foliar (g_i) en el año 2000, en los 3 tratamientos de riego: T_{CTL} (—●—), T_{RDC} (···△···) y T_{SCO} (—○·). Cada punto corresponde a la media de 3 repeticiones \pm ES. ↓ indica el cambio de riego en el tratamiento T_{RDC} .

El aumento de g_i con el avance de la estación hasta alcanzar valores máximos en los meses de mayor ET y su disminución al final de la misma (Figura 5.8) fue igualmente observado por Torrecillas *et al.* (1988a) en almendro, por (Aslam *et al.*, 1977) en yuca, y por Pérez-Pastor (2001) en albaricoquero. Esta conducta del estoma puede explicar la tendencia a disminuir progresivamente los potenciales hídricos mínimos diarios (Figura 5.7). Por otro lado, la disminución de g_i al final de la estación de riego puede estar asociada a procesos de origen ontogénico y a desequilibrios hormonales que tienen lugar en las hojas (Ruiz-Sánchez *et al.*, 1988). Estos cambios también incluyen aumentos en el espesor de las paredes celulares, como revela el aumento estacional del peso específico foliar observado en T_{CTL} (0.0107 g cm^{-2} en abril y 0.0115 g cm^{-2} a finales de agosto de 2001).

Variaciones diurnas del potencial hídrico y conductancia foliar

Las evoluciones diarias de Ψ_1 y g_l (Figuras 5.9 y 5.10) recogen la situación hídrica de los tres tratamientos de riego en tres momentos característicos de la estrategia seguida en T_{RDC} . Las variaciones diarias de Ψ_1 mostraron un ritmo circadiano característico, con valores máximos al alba, mínimos a mediodía y una marcada recuperación desde el inicio del atardecer, lo que responde a la conducta típica de las plantas cultivadas (Torrecillas *et al.*, 1988b; 1988a). El hecho de que en el mes de mayo se registrasen en T_{CTL} potenciales hídricos foliares inferiores a los de julio, lo contrario a lo esperable en árboles bajo condiciones no limitantes de agua en el suelo, se debió a un fallo en el sistema de riego, lo que provocó un retraso de cuatro días en la aplicación de la dosis de riego. Además, es sobradamente conocida la estrecha dependencia del potencial hídrico foliar del almendro de la demanda evaporante del ambiente (Torrecillas *et al.*, 1989b; Sánchez-Blanco *et al.*, 1991; Romero y Botía, 2006). En este contexto, y a nivel diario, se encontró una buena correlación entre Ψ_1 y el déficit de presión de vapor (DPV). Los coeficientes de correlación Ψ_1 vs DPV en mayo, julio y octubre, bajo las condiciones del tratamiento control, fueron 0.89***; 0.96*** y 0.86***, respectivamente, valores similares a los encontrados en T_{RDC} y T_{SCO} en idénticas fechas. Las pendientes de las líneas de ajuste fueron similares en los tres tratamientos y en las tres fechas de medida. Sin embargo, la ordenada en el origen fue significativamente diferente, evidenciando las distintas condiciones de partida de los diferentes tratamientos de riego (Figura 5.11).

Por otro lado, el retraso en la aplicación del riego originó una disminución sustancial del contenido de agua en el suelo previo a la evolución de mayo, tal como quedó registrado en las lecturas tensiométricas antes del riego en T_{CTL} (-74, -67 y -61 kPa a 30, 60 y 90 cm, respectivamente), y en consecuencia una importante caída de Ψ_1 y g_l , particularmente en g_l a partir de las 9:00h UT. De modo, que tanto los árboles control como los deficitarios mostraron la máxima apertura del estoma a primeras horas de la mañana, cuando la demanda evaporante fue menor, para disminuir a continuación con el aumento de la demanda. Esta pauta del estoma es similar a la observada por Torrecillas *et al.* (1988a) en almendros en riego deficitario y permite al árbol asimilar la máxima cantidad de CO_2 mientras pierde la mínima cantidad de agua, manifestándose, por tanto, como un mecanismo conservador de agua.

La variación diaria del potencial hídrico foliar, en un día típico de julio cuando el T_{RDC} llevaba aproximadamente mes y medio al 30 % del T_{CTL} , fue considerable en los tres tratamientos de riego y contrastó con la de octubre que fue substancialmente inferior, estando los valores de esta última en concordancia con la menor demanda evaporante y conductancia foliar (Figura

5.9). En T_{CTL} , Ψ_1 disminuyó de -0.55 MPa antes del alba a los -2.1 MPa a mediodía, en ambos años de medidas (Figuras 5.9 y 5.10).

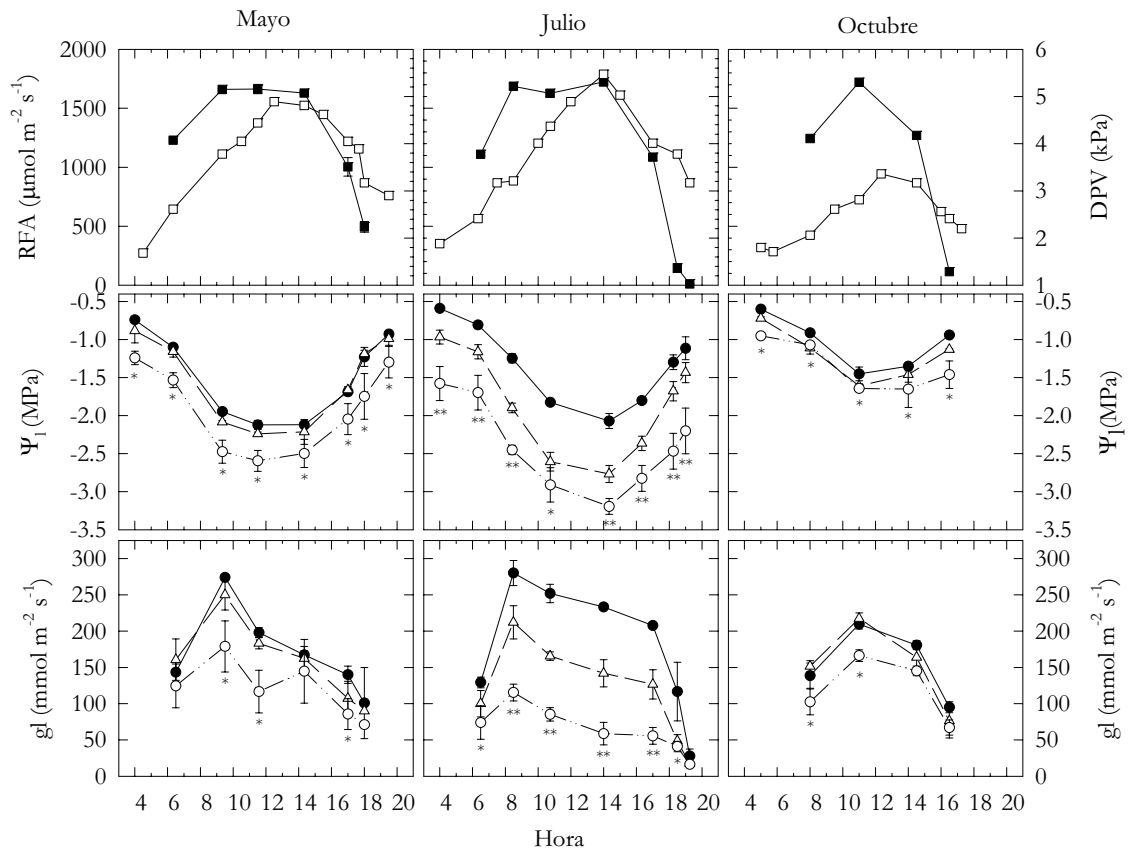


Figura 5.9. Evolución diaria de la radiación fotosintéticamente activa (RFA, \blacksquare), déficit de presión de vapor (DPV, \square), potencial hídrico (Ψ_1) y conductancia foliar (gl) en los tres tratamientos de riego: T_{CTL} (\bullet), T_{RDC} (\triangle) y T_{SCO} (\circ), en 2001. Cada punto representa la media de tres repeticiones \pm ES. * indica la existencia de diferencias significativas entre T_{CTL} y T_{SCO} , y ** entre todas las posibles comparaciones pareadas.

Los valores de Ψ_1 en los tratamientos de riego deficitario y seco fueron inferiores a los del control y cayeron en 2001 de -0.97 y -1.58 MPa de Ψ_a a -2.77 y -3.19 MPa de Ψ_{md} en T_{RDC} y T_{SCO} , respectivamente. Las diferencias máximas absolutas respecto al control se dieron, por tanto, a mediodía con valores de 0.53 MPa en 2000 y 0.67 en 2001 en T_{RDC} , mientras que en el T_{SCO} fueron similares al alba y mediodía (≈ 1.0 MPa), lo que se puede interpretar como una manifestación del déficit hídrico alcanzado en T_{SCO} , el que fue lo suficientemente severo para no permitir un mayor grado de recuperación de la planta durante la noche. La mayor adaptación de estos árboles a las condiciones de secano junto a su menor índice de área foliar explicarían las diferencias tan notables de potencial hídrico foliar al alba (Ψ_a) respecto a los valores obtenidos por Goldhamer *et al.* (2006) en almendros 'Nonpareil' en el período precosecha tras 1, 22 y 42 días de supresión del riego

($\Psi_a = -0.53; -2.51$ y -4.0 MPa, respectivamente). Estos mismos autores, y contrariamente a los resultados recogidos en la figura 5.9, obtuvieron, en idéntico mes, una mayor separación entre tratamientos en las medidas de Ψ_a que Ψ_{md} , si bien, y al igual que en nuestras condiciones de cultivo Ψ_a y Ψ_{md} fueron significativamente diferentes (Figura 5.9).

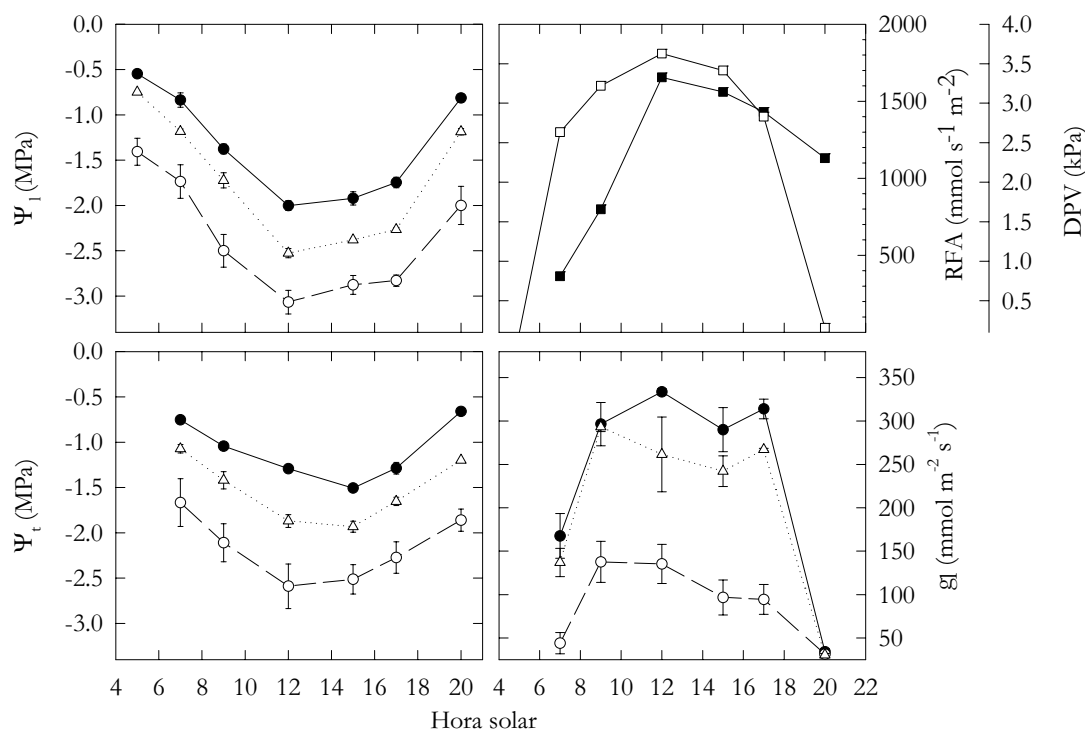


Figura 5.10. Evolución diaria de la radiación fotosintéticamente activa, RFA (\square), déficit de presión de vapor, DPV, (\blacktriangledown) potencial hídrico foliar (Ψ_l), de tallo (Ψ_t) y conductancia foliar (g_l), para los 3 tratamientos: T_{CTL} (\bullet), T_{RDC} (\blacktriangle) y T_{SCO} (\circ), 19 julio 2000. Cada punto corresponde a la media de 3 repeticiones \pm ES.

La evolución de Ψ_t , realizada en julio de 2000, mostró una pauta similar a la de Ψ_l (Figura 5.10), con diferencias respecto al control sensiblemente mayores. Estos resultados corroboran la alta sensibilidad de Ψ_t al régimen hídrico y su utilidad como indicador del estrés hídrico del árbol (Naor *et al.*, 2001). A mediodía, los valores de Ψ_t en T_{CTL} , T_{RDC} y T_{SCO} superaban en 0.71, 0.68 y 0.5 MPa, respectivamente a los de Ψ_{md} (Figura 5.10).

Análogamente a Ψ_l , las máximas diferencias de g_l entre tratamientos tuvieron lugar en la evolución de julio. En las horas centrales del día y en comparación con el control, g_l fue significativamente inferior en T_{RDC} y T_{SCO} , e igualmente en T_{SCO} respecto a T_{RDC} . En 2001, los valores de g_l en T_{CTL} y T_{RDC} fueron 3.3 y 2.1 veces superiores a los registrados en T_{SCO} (Figura 5.9), tendencia similar a la observada en 2000 pero con diferencias más

pronunciadas (Figura 5.10). La conductancia foliar aumentó rápidamente en las primeras horas de la mañana, alcanzando en T_{CTL} un máximo en torno a $300 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ a las 9:00 h UT y permaneciendo relativamente constante hasta las 17:30 en el tratamiento control. Sin embargo, en el resto de tratamientos se produjo un descenso gradual de g_l (Figuras 5.9 y 5.10), similar a lo observado en la evolución de mayo, inclusive en T_{CTL} , tras el fallo en el sistema de riego, y que supone un mecanismo claro de adaptación del árbol a la falta de agua, capaz de mejorar la eficiencia de absorción de CO_2 con relación al agua perdida. A nivel diario, los máximos niveles de g_l coincidieron con los mínimos valores de Ψ_1 en T_{CTL} , especialmente en el 2000, no siendo así en T_{SCO} . Hay que señalar que mientras en el tratamiento control los potenciales matriciales prerriego (Ψ_m) se encontraban en torno a los -40 kPa, en T_{SCO} eran cuatro veces menores, los que corresponden a déficit hídrico severo (Schulbach y Schwankl, 1996).

Los niveles máximos de conductancia foliar en los tratamientos regados disminuyeron en octubre, especialmente en T_{CTL} , quizás como consecuencia de los ya citados procesos de origen ontogénico y desequilibrios hormonales que tienen lugar en las hojas viejas. Sin embargo, los niveles, aunque por debajo de tratamientos regados, aumentaron en T_{SCO} , ya que tanto el área foliar total como la demanda evaporante disminuyeron substancialmente (Figura 5.1).

Dentro de esta misma línea, la figura 5.12 presenta los datos de g_l a mediodía, correspondientes al período de alta ET, en función de Ψ_{md} , para los tres tratamientos de riego, e ilustra su dependencia con la disminución de Ψ_{md} . Esta relación, caracterizada por un alto coeficiente de correlación ($r = 0.91^{***}$), indica que la conductancia disminuyó continuamente cuando lo hizo Ψ_{md} . Respuestas similares encontraron Landsberg *et al.* (1976) en manzano, Rawson (1979) en girasol, Castel y Fereres (1982) en almendro, etc., tanto bajo condiciones ambientales controladas como de campo. El gradual cierre estomático sobre un rango amplio de Ψ_{md} puede contribuir al mantenimiento de un cierto nivel fotosintético durante largos períodos de déficit (Castel y Fereres, 1982).

Aunque bajo las condiciones de déficit hídrico ensayadas se produjo una importante regulación estomática, este déficit no fue lo suficiente alto para promover el cierre estomático, lo que indica que a valores de -3.0 y -2.5 MPa de Ψ_{md} y Ψ_t respectivamente, se mantuviese un cierto grado de turgencia celular. La dispersión en los valores de g_l para un mismo Ψ_{md} (Figura 5.12) es típica de trabajos de campo (Castel y Fereres, 1982), habiéndose atribuido parte de esta dispersión a la respuesta del estoma a otros factores ambientales.

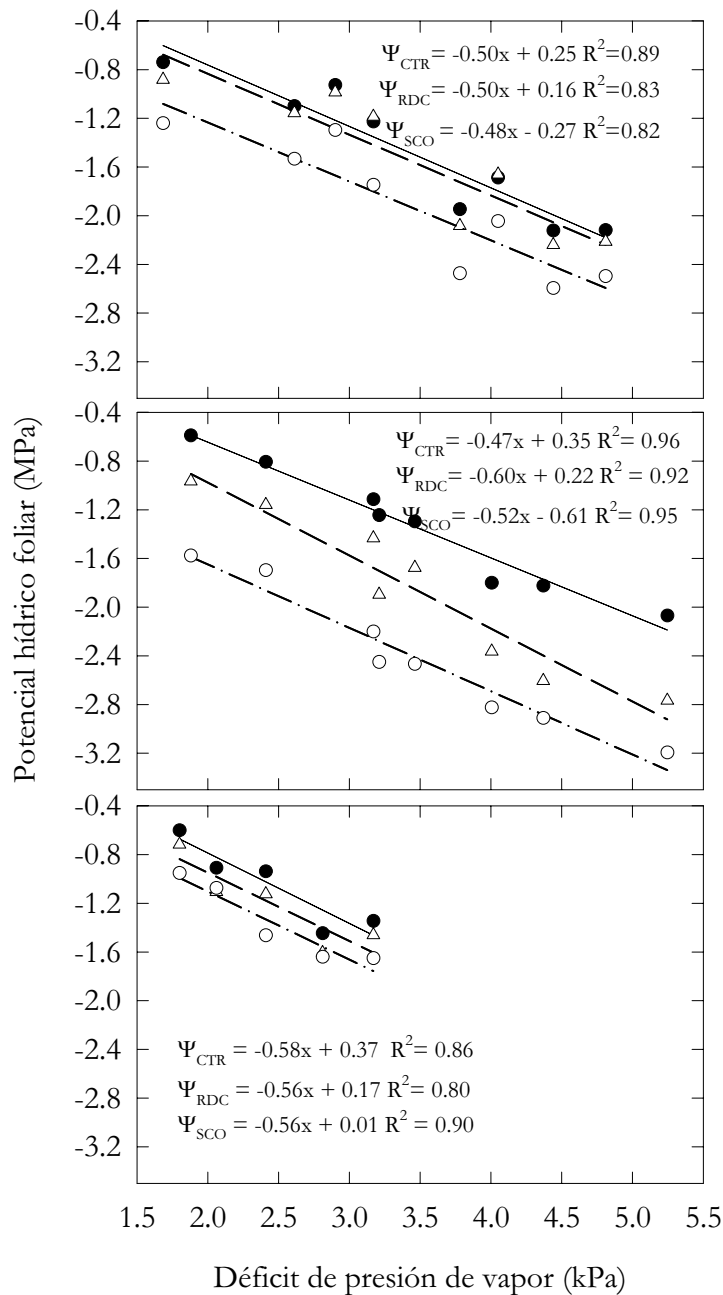


Figura 5.11. Relaciones entre el potencial hídrico foliar y el déficit de presión de vapor obtenidas en las tres evoluciones diarias de 2001, para los 3 tratamientos T_{CTL} (●), T_{RDC} (▲) y T_{SCO} (○).

Las estimas de las variaciones diurnas de la relación entre la conductancia foliar (g_i) y el potencial hídrico foliar (Ψ_l) para cada tratamiento de riego se obtuvieron representando los datos horarios obtenidos en las evoluciones diarias a lo largo de la estación de riegos. Los resultados de estas aproximaciones se recogen en la figura 5.13, y muestran un claro fenómeno de histéresis para todos los tratamientos, lo que hace no unívoca la relación entre

la conductancia foliar y potencial hídrico foliar. En las primeras horas del día g_i fue mayor, en todos los tratamientos, que al atardecer para un mismo Ψ_i . Sin embargo, los bucles de los tratamientos fueron tanto más cortos y aplanados cuanto mayor fue el déficit hídrico soportado, indicando una reducción de la apertura estomática y el aumento del papel jugado por el Ψ_i en el control de la conducta estomática (Sánchez-Blanco *et al.*, 1991).

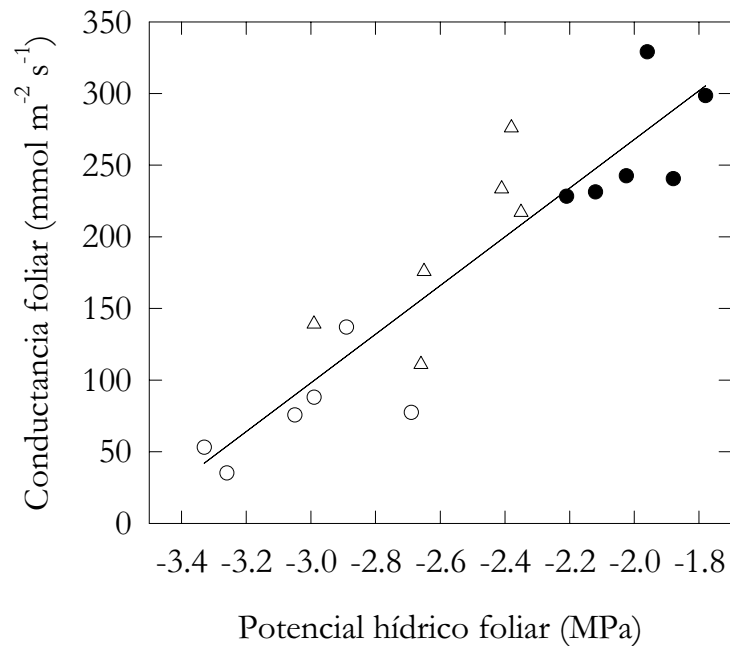


Figura 5.12. Conductancia foliar a mediodía (g_i) en función del potencial hídrico foliar a mediodía (Ψ_{md}), durante julio de 2000 y 2001, en los tratamientos T_{CTL} (●), T_{RDC} (△) y T_{SCO} (○). Cada punto representa la media de 3 medidas. La ecuación de la línea de ajuste viene dado por: g_i (mmol m⁻² s⁻¹) = 607.8 + 169.9 Ψ_{md} (MPa); $R^2 = 0.83^{***}$.

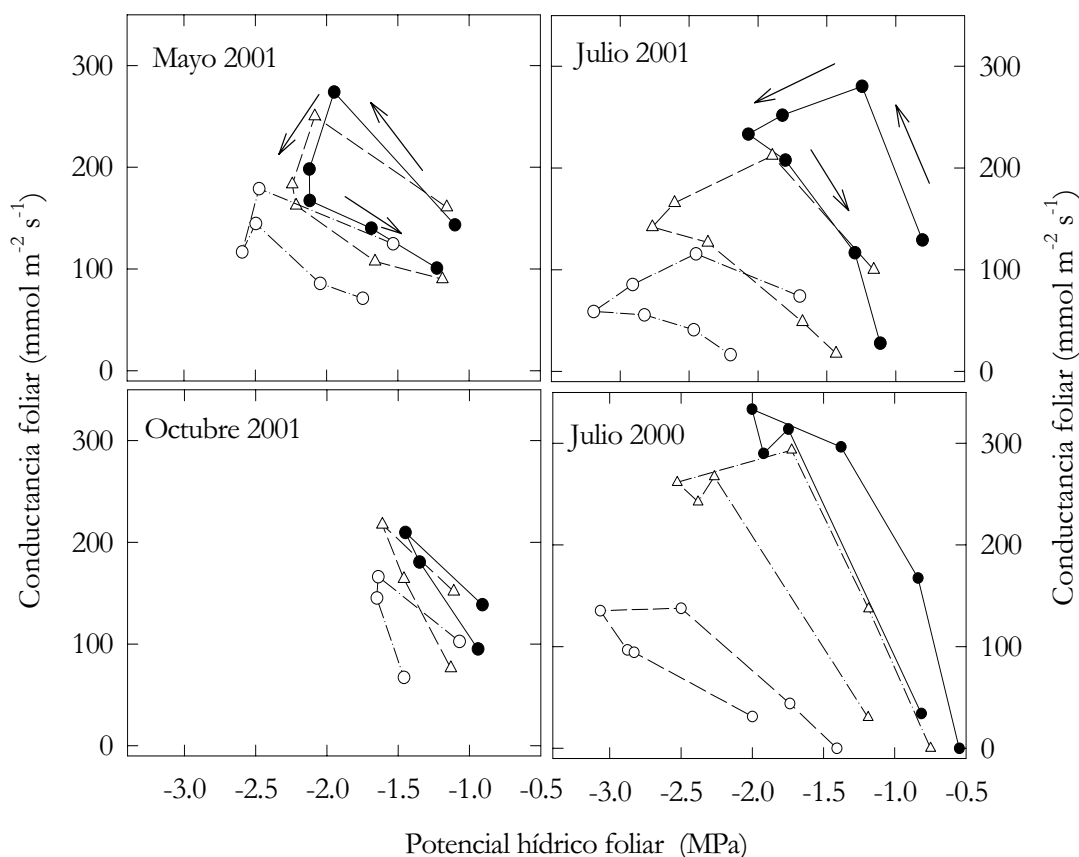


Figura 5.13. Variación diurna de la relación conductancia foliar (g_l) y potencial hídrico foliar (Ψ_l) de almendros ‘Colorada’, en función del tratamientos de riego: T_{CTL} (—●—), T_{RDC} (---△---) y T_{SCO} (···○···). Cada punto es la media de tres medidas por árbol en seis árboles por tratamiento. Las flechas indican el sentido horario de la evolución de los parámetros.

Componentes del potencial hídrico foliar

El estudio de las componentes del potencial hídrico foliar a partir de las muestras tomadas en las evoluciones de 2001 se muestra en la figura 5.14, y en la tabla 5.2 se recogen, junto al potencial osmótico a máxima saturación (Ψ_{os}) los potenciales osmótico y de presión actual a mediodía ($\Psi_{o\ md}$ y $\Psi_{p\ md}$).

En cada una de las evoluciones diarias el valor mínimo de Ψ_o ocurrió inmediatamente después de mediodía (Figura 5.14) como consecuencia de la concentración pasiva de solutos por deshidratación parcial. En la evolución de mayo, cuando los árboles controles estaban ligeramente estresados (Figura 5.9), las diferencias de potencial respecto a T_{CTL} fueron mayores en $\Psi_{o\ md}$ que en $\Psi_{p\ md}$ en ambos tratamientos deficitarios (Figuras 5.9 y 5.14, y Tabla 5.2), lo que explica la existencia de mayores $\Psi_{p\ md}$ que en T_{CTL} , quizás como consecuencia de una mejor adaptación al déficit hídrico y salino de T_{RDC} y T_{SCO} tras dos años del inicio de los ensayos y después de un período de reducción lenta y gradual de la disponibilidad de agua en el suelo en el ciclo de

crecimiento en curso. En julio, con los árboles de T_{CTL} adecuadamente regados y con diferencias de Ψ_{md} y g_l estadísticamente significativas entre todas las comparaciones posibles (Figura 5.9), Ψ_{md} cayó alrededor de 0.79 (T_{RDC}) y 1.09 MPa (T_{SCO}) por debajo de T_{CTL} . Aproximadamente la totalidad de este cambio en T_{RDC} y la mitad en T_{SCO} tiene su explicación en la disminución de $\Psi_{o\ md}$ (Tabla 5.2). El hecho de que no se diese un ajuste osmótico adicional en T_{RDC} e inclusive la pérdida de solutos en T_{SCO} se corresponde con $\Psi_{p\ md}$ similar y significativamente inferior a T_{CTL} en T_{RDC} y T_{SCO} , respectivamente (Tabla 5.2), y a pesar de la reducción significativa de g_l en ambos tratamientos. El aumento de Ψ_1 con la disminución de la demanda evaporante tuvo lugar en los tres tratamientos como queda reflejado en la evolución de octubre (Figura 5.9). Aportes de riego del 70 % de T_{CTL} no originaron diferencias significativas de Ψ_1 respecto al control. Los mayores potenciales hídricos foliares y los menores potenciales osmóticos a mediodía alcanzados en octubre originaron los $\Psi_{p\ md}$ más altos registrados durante todo el ciclo de crecimiento (Tabla 5.2).

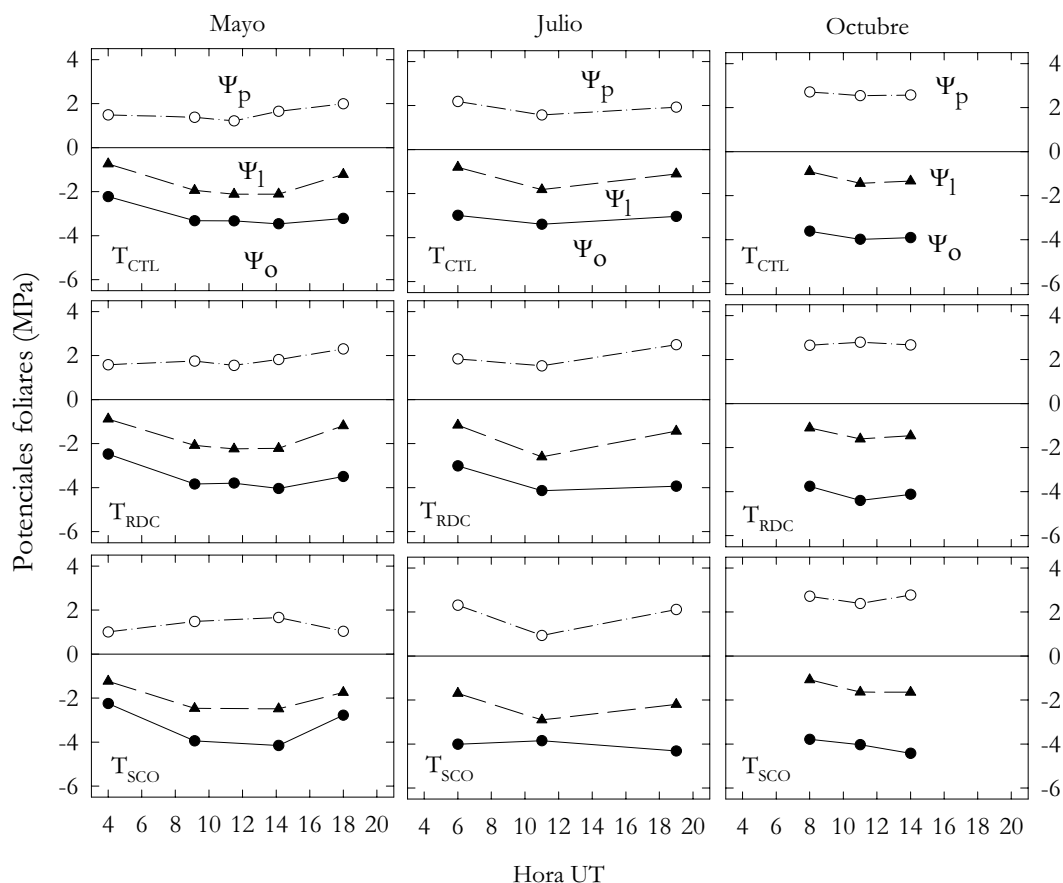


Figura 5.14. Evoluciones diarias del potencial hídrico foliar (\blacktriangle) y de las componentes osmótica (\bullet) y de presión (\circ) en mayo, julio y octubre de 2001, para los tres tratamientos de riego.

Tabla 5.2. Valores de los componentes del potencial hídrico foliar en diferentes fechas y para los tres tratamientos de riego: potencial osmótico a máxima saturación (Ψ_{os}), potenciales osmótico y de presión actual a mediodía ($\Psi_{o,md}$) y ($\Psi_{p,md}$). 2001.

Fecha	Tratamiento	Ψ_{os}	$\Psi_{o,md}$	$\Psi_{p,md}$
		MPa		
25 Mayo	T _{CTL}	-1.6 a	-3.3 a	1.2 a
	T _{RDC}	-1.8 b	-3.8 b	1.6 b
	T _{SCO}	-2.7 c	-4.0 c	1.6 b
26 Julio	T _{CTL}	-2.4 b	-3.4 a	1.6 a
	T _{RDC}	-2.5 b	-4.1 b	1.5 a
	T _{SCO}	-2.1 a	-3.9 b	0.9 b
25 Octubre	T _{CTL}	-2.5 a	-4.0 a	2.5 a
	T _{RDC}	-2.9 a	-4.4 a	2.8 a
	T _{SCO}	-2.5 a	-4.0 a	2.4 a

Los valores de cada fecha y columna seguidos de letras distintas son significativamente diferentes según el test de Tukey_{0,05}

Por otro lado y con relación al potencial osmótico a máxima saturación (Ψ_{os}), a principios de ciclo, mayo, el tratamiento control presentó valores de -1.6 MPa (Tabla 5.2), niveles idénticos a los obtenidos por Torrecillas *et al.* (1996) en almendros ‘Garrigues’ y ‘Ramillete’ regados por goteo, con agua de buena calidad y volúmenes de riego correspondientes a sus máximas necesidades; mientras que los de T_{RDC} ($\Psi_{os} = -1.8$ MPa; Tabla 5.2) coincidieron con los de los árboles a los que se les suprimió el riego durante 28 días, en el ensayo citado. Según estos autores, los 0.2 MPa de reducción de Ψ_{os} por estrés hídrico permanecieron constantes al aumentar la duración e intensidad del déficit hídrico, por lo que al igual que lo señalado por Castel y Fereres (1982) y Ruiz-Sánchez *et al.* (1993), concluyan que el almendro presenta una capacidad muy limitada para realizar ajuste osmótico por estrés hídrico. Esta conducta difiere claramente de la observada en los tratamientos T_{CTL} y T_{RDC} en los que Ψ_{os} disminuyó con el avance de la estación de crecimiento. Así y durante el período mayo – octubre, Ψ_{os} cayó 0.9 y 1.1 MPa en T_{CTL} y T_{RDC}, respectivamente (Tabla 5.2). Y aunque parte de esta caída puede ser atribuida a una acumulación activa de solutos con la edad, característica de árboles caducifolios (Lakso *et al.*, 1984), es difícilmente explicable en su totalidad al efecto de la edad de la hoja en T_{CTL} y al de ésta en combinación con la restricción hídrica en T_{RDC}. Contrariamente a lo

observado en T_{CTL} y T_{RDC} , Ψ_{os} aumentó en T_{SCO} , especialmente de mayo a julio, coincidiendo con valores de g_l extremadamente bajos (Tabla 5.2 y Figuras 5.9 y 5.10). Esto pudo deberse a que ya en mayo el potencial osmótico foliar se encontrase muy próximo al máximo nivel posible de acumulación de solutos y que un aumento en la intensidad de estrés hídrico por sequía osmótica ocasionase pérdidas de solutos invirtiendo el ajuste osmótico (Tyree y Jarvis, 1982).

A partir de lo anterior y de los resultados recogidos en la tabla 5.2, que suponen un importante ajuste osmótico para T_{SCO} y posteriormente en julio para T_{CTL} y T_{RDC} , se considere como causa principal de la acumulación iónica y de los posibles solutos orgánicos la inducción por salinidad, tal como sugieren la alta CE_c en la zona radicular (Figura 5.5) y las altas concentraciones de cloruros y sodio determinadas en hojas (Figura 5.16 y Tabla 5.4). Bañuls y Primo Millo (1992) encontraron Ψ_p en hojas de cítricos cultivados en suelos salinos similares a los obtenidos en suelos no salinos y que tanto el Na^+ como el Cl^- acumulado contribuyen a los procesos de ajuste osmótico.

En general, Ψ_o disminuyó con la edad de las hojas y en respuesta al estrés hídrico y salino, permitiendo que $\Psi_{p\ md}$ en los tratamientos regados permaneciera constante o incluso que aumentará, compensando así las reducciones de Ψ_1 .

5.3.2. Contenido mineral en hoja

Teniendo en cuenta que el análisis químico de una muestra de hojas es el mejor método de diagnóstico del estado nutritivo de una plantación y de su utilidad para detectar toxicidades causadas por elementos como el cloro, sodio y boro; a mediados de julio de 2000, momento incluido dentro del período en el que la generalidad de los elementos permanecen a concentraciones relativamente constantes en almendro (Uriu, 1978), se procedió a la toma de muestras para su posterior envío y análisis. Los resultados de las valoraciones realizadas por el laboratorio comercial para los tres tratamientos figuran en el tabla 5.3.

De los macroelementos determinados en hoja (N, P, K, Ca y Mg), tan sólo el nitrógeno se encuentra por debajo del valor crítico considerado para almendro y aunque los contenidos son ligeramente inferiores en los árboles del tratamiento de secano, estos están dentro del rango de niveles adecuados. En cuanto a los microelementos Fe, Cu, Zn y Mn, solamente el Zn presenta niveles deficientes (Tabla 5.3). Sin embargo, los contenidos en sodio y cloruros son excesivos, lo que es indicativo de una elevada acumulación en hoja de estos iones específicos y por tanto de fitotoxicidad.

Tabla 5.3. Resultados del análisis foliar en los tratamientos: T_{CTL}, T_{RDC} y T_{SCO}.

Parámetros	Tratamiento		
	T _{CTL}	T _{RDC}	T _{SCO}
Nitrógeno total (%)	1.81	1.73	1.68
Fósforo (%)	0.18	0.18	0.16
Potasio (%)	1.38	1.33	1.00
Calcio (%)	2.77	2.54	2.66
Magnesio (%)	0.28	0.27	0.25
Sodio (%)	0.43	0.50	0.81
Cloruros (%)	0.75	0.77	0.81
Hierro (ppm)	75.20	61.90	81.60
Cobre (ppm)	5.23	4.33	3.53
Zinc (ppm)	13.92	13.19	7.93
Manganeso (ppm)	37.07	37.37	39.49
Boro (ppm)	22.77	22.32	19.68

La deficiencia de nitrógeno detectada en hoja puede ser explicada por la interrelación entre la absorción de NO₃⁻ y Cl⁻, que de ordinario se cita como antagónica (Fisarakis *et al.*, 2001; Silveira *et al.*, 2001), lo que aconsejaría un aporte mayor de N al recomendado bajo condiciones no salinas. La deficiencia de Zn, además de poder ser debida a alteraciones nutricionales inducidas por la salinidad, hay que considerar que puede estar condicionada por baja disponibilidad de Zn en la solución del suelo como consecuencia de su pH alcalino (pH=8.2) y bajo contenido en materia orgánica. En estas condiciones parece aconsejable recurrir al aporte de complejos orgánicos o a tratamientos vía foliar.

Los altos valores de Cl⁻ y Na⁺ detectados a partir del análisis foliar se corresponden con la sintomatología observada, necrosis en puntas y bordes de las hojas que aparecen como quemadas (Figura 5.15), y que además están en consonancia con los altos niveles de estos iones en suelo y agua de riego. Los niveles de Cl⁻ y Na⁺ encontrados en hoja son similares e inferiores, respectivamente, a los observados por Demiral (2005) en olivo, bajo nivel salino similar.

A tenor de estos resultados y con el objetivo de realizar una comparación estadística de los niveles medios de Cl^- entre tratamientos, se realizó un muestreo adicional a finales de julio de 2000 en hojas procedentes de 'spurs'. Simultáneamente, se recogió una muestra por repetición de la parte apical de brotes del año. En 2001, y con carácter bimensual, se determinó el contenido foliar en cloruros, sodio y potasio a partir de muestras de 150 hojas por repetición procedentes de 'spurs'. Los resultados de los muestreos de julio de 2000 se muestran en la tabla 5.4 y los de 2001 en la figura 5.16.



Figura 5.15. Detalle de necrosis en puntas de hojas por toxicidad de cloruros y sodio.

El hecho de que se diese una mayor concentración de cloruros en hojas en 2000 que en 2001 pudo deberse al lavado originado por las lluvias de octubre de 2000, de modo que el nuevo ciclo de cultivo se iniciase con un menor contenido salino en el suelo, y a un posible efecto de dilución como resultado del mayor desarrollo vegetativo del árbol en 2001 y por tanto de la masa foliar (Fernández *et al.*, 1990; Jasso *et al.*, 1999). Por otro lado, el que se observase una mayor concentración de cloruros en las hojas y brotes del tratamiento de secano pudo ser debido a la presencia de este ion en la madera (Fulton *et al.*, 1996) como consecuencia de los cinco años previos en riego por goteo, a su mayor presencia en el suelo dada la escasez de las precipitaciones, y por tanto de lavado, lo que origina una mayor concentración de cloruro en el suelo a medida que pierde agua a través del proceso de evapotranspiración. La similitud entre las concentraciones de Cl^- procedentes de la parte tierna de brotes de 2000 (Tabla 5.4) y de hojas de marzo de 2001 (Figura 5.16) sugieren edades parecidas, al ser el cloruro un ion que se acumula preferentemente en hojas viejas (Syvertsen *et al.*, 1988) y especialmente cuando se dan condiciones de contenidos elevados en suelo (Brown y Uriu, 1996).

En 2001, como era esperable, la concentración Cl^- en hoja aumentó con el avance del ciclo de crecimiento (Figura 5.16), alcanzándose en julio niveles

superiores en T_{RDC} y T_{SCO} y en septiembre en el T_{CTL} a los considerados como críticos (Brown y Uriu, 1996).

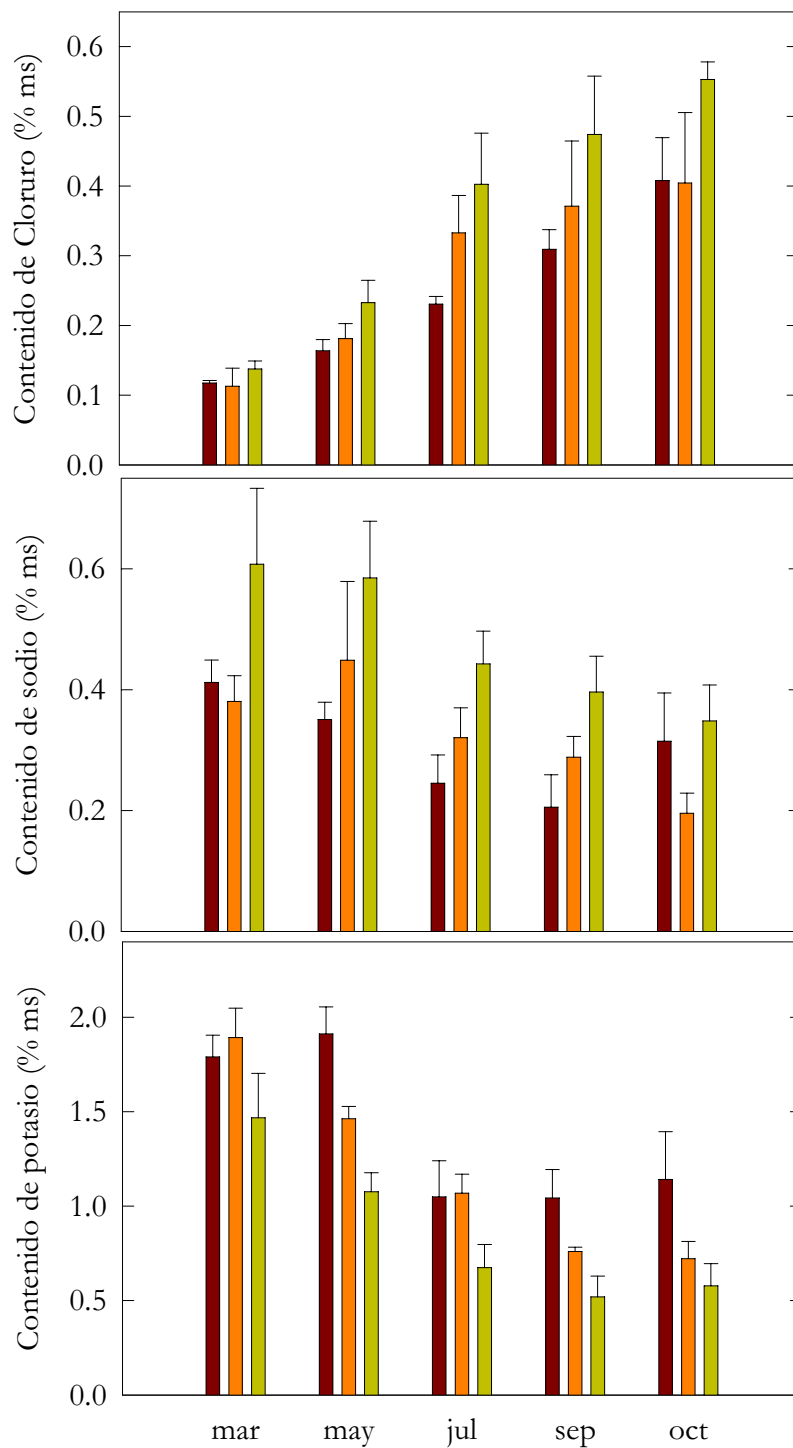


Figura 5.16. Efecto del régimen de riego sobre el contenido y evolución en hoja de cloruros, sodio y potasio a lo largo del ciclo de cultivo de 2001, para los tres tratamientos de riego: T_{CTL} (■), T_{RDC} (■) y T_{SCO} (■). Las barras representan ES.

A finales de verano los síntomas de fitotoxicidad por Cl^- fueron evidentes en los 3 tratamientos, siendo más acentuados en T_{SCO} . Aunque no se dieron diferencias significativas entre los dos tratamientos de riego, excepto en el mes de julio, se observó una tendencia de mayor acumulación de Cl^- en el T_{RDC} . El incremento de la $[\text{Cl}^-]$ en hoja a lo largo de la estación de riego, como ya fue comentado, puede ser atribuible a los altos niveles de este ion en el suelo (Figura 5.5), consecuencia de la utilización continuada de un agua de riego clasificada de restricción de uso severo (Uriu, 1978). Las determinaciones de cloruros en el grano del fruto evidenciaron la práctica ausencia de este ion en la pepita de la almendra, con valores similares en todos los tratamientos ($1-5 \text{ mg Cl}^- \text{ L}^{-1}$), lo que demuestra que no es un órgano de acumulación de cloruros en el árbol.

Tabla 5.4. Concentración de cloruro en hojas y brotes del año en base a materia seca. Julio de 2000.

Tratamiento	Hojas	Brotes
	(% ms)	
T_{CTL}	0.54 ab	0.12 a
T_{RDC}	0.72 b	0.11 a
T_{SCO}	0.75 b	0.19 b

Los valores de cada columna seguidos de letras distintas son significativamente diferentes según el test de Tukey_{0.05}

Contrariamente a lo esperable el contenido foliar en Na^+ disminuyó con el avance de la estación (Figura 5.16). Según Brown y Uriu (1996), bajo altos contenidos de cloruros (Figura 5.5) y sodio en el suelo ($\text{PSI} = 24 \%$), los iones Cl^- y Na^+ tienden a entrar en la planta en cantidades proporcionales a su concentración en el medio radicular. A partir de ahí, se translocan rápidamente vía corriente de transpiración del xilema hacia las hojas, acumulándose en éstas con el tiempo y la edad de las mismas (Tester y Davenport, 2003).

Una vez en las hojas, salvo la existencia de glándulas salinas, la única vía de salida es a través del floema, bien hacia la raíz para su exclusión al medio, o bien hacia otros órganos sumidero. Aunque la movilidad del Na^+ se presupone altamente unidireccional, existen datos que apoyan una relativamente alta movilidad de Na^+ en el floema (Tester y Davenport, 2003). Sin embargo, existe poca información al respecto y hay algunos argumentos en contra, como son la baja concentración de Na^+ en el fruto de tomate donde el transporte es mayoritariamente floemático, pero se supone que este mecanismo de retranslocación puede tener una fuerte influencia en el control de los niveles foliares de Na^+ , minimizando o retrasando así el efecto tóxico,

como se ha sugerido en arroz y tomate (Matsushita y Matoh, 1991; Pérez-Alfocea *et al.*, 2000).

La dinámica del ion potasio fue coincidente con la descrita por otros autores (Brown y Uriu, 1996); valores altos al inicio de la estación, seguidos de una caída constante durante la fase IV y estabilización de los niveles a partir del momento en el que la almendra está prácticamente hecha (Figura 5.16). Así y con independencia del tratamiento de riego aplicado, los cationes K^+ y Na^+ disminuyeron notablemente a partir de mediados de mayo, coincidiendo con el inicio de la fase IV, mientras que el ión Cl^- se acumuló paulatinamente en las hojas analizadas con el avance de la estación de riego. Una posible explicación a este hecho sería la mayor movilidad del K^+ y Na^+ hacia los nuevos sumideros en crecimiento activo, los que tienen una alta demanda de floema procedente de las hojas fotosintéticamente activas. Un argumento a favor de que este mecanismo pueda estar afectando a ambos cationes simultáneamente es el hecho de que dentro de cada muestreo se mantenga una relación inversa entre los contenidos de Na^+ y K^+ cuando se comparan los tres tratamientos. Por lo tanto, sería presumible que ambos cationes fueran movilizados hacia los frutos o semillas en particular, las cuales, en condiciones normales presentan un 0.5-0.7 % de potasio y entre 40-132 mg de sodio por kg de muestra (Saura *et al.*, 1988; Sánchez Bel *et al.*, 2001), estos últimos valores podrían sufrir un incremento en condiciones de riego con aguas salinas. Otro argumento a favor de estas hipótesis es que el Cl^- no sigue esta misma evolución debido a su baja movilidad en el floema en comparación con los otros dos cationes, tal y como se ha observado en tomate (Pérez-Alfocea *et al.*, 2000).

La tabla 5.5 muestra la contribución relativa de los cationes Na^+ y K^+ y del anión Cl^- al Ψ_{os} medido en tres fechas señales de la estrategia de RDC. De forma global, se aprecia una mayor contribución de estos solutos al Ψ_{os} a finales de la fase III del ciclo de cultivo del almendro, que cuando las fases IV y V ya están avanzadas, finales de julio y octubre, respectivamente. Esta merma en la contribución relativa con el avance de la estación fue acompañada de la disminución de Ψ_{os} en T_{CTL} y T_{RDC} (Tabla 5.2). La contribución media de $Na^+ + Cl^-$ al Ψ_{os} osciló entre el 16 %, tratamientos regados, y el 22 % del secano, valores similares a los encontrados en melocotonero bajo condiciones salinas por Massai *et al.* (2004). La contribución porcentual del K^+ a Ψ_{os} fue menor en los tratamientos deficitarios que en el control (65-30 %, 47-16 %, 22-15 %, mayo-octubre, en T_{CTL} , T_{RDC} y T_{SCO} , respectivamente) y en los tres tratamientos disminuyó con el progreso de la estación de riego.

Aunque la acumulación masiva de Na^+ y Cl^- permite el mantenimiento de la turgencia foliar y por tanto de los intercambios gaseosos no se la puede considerar como una estrategia sostenible a largo plazo en almendro por sus efectos dominantes de fitotoxicidad (Figura 5.15). El aumento del contenido de Na^+ y Cl^- en hoja con la edad y la menor presencia de K^+ (dificultad para mantener la selectividad del K^+) son características propias de plantas sensibles a la salinidad (Downton y Millhouse, 1983).

Tabla 5.5. Contribución de los solutos Na^+ , K^+ y Cl^- en MPa al potencial osmótico foliar a saturación (Ψ_{os}), en tres momentos representativos del manejo del riego en RDC. 2001

Tratamientos	Na^+ (MPa)	K^+ (MPa)	Cl^- (MPa)	Σ (MPa)
Mayo				
T_{CTL}	-0.20	-1.07	-0.09	-1.35
T_{RDC}	-0.26	-0.84	-0.10	-1.20
T_{SCO}	-0.33	-0.60	-0.13	-1.06
Julio				
T_{CTL}	-0.15	-0.64	-0.14	-0.94
T_{RDC}	-0.20	-0.66	-0.21	-1.07
T_{SCO}	-0.27	-0.41	-0.25	-0.93
Octubre				
T_{CTL}	-0.20	-0.74	-0.26	-1.20
T_{RDC}	-0.13	-0.46	-0.26	-0.85
T_{SCO}	-0.23	-0.37	-0.36	-0.96

5.3.3. Crecimiento vegetativo

Brotes

Los datos correspondientes al crecimiento de los ramos durante los años 2000 y 2001 se muestran en la figura 5.17. El crecimiento de brotes, dependiendo del año, se inició a mediados-finales de febrero y finalizó a primeros-medios de abril. El patrón de crecimiento en longitud de los brotes, mejor definido en 2001 que en 2000, respondió a una función sigmoïdal, tipo Gompertz ($R^2 = 0.993$).

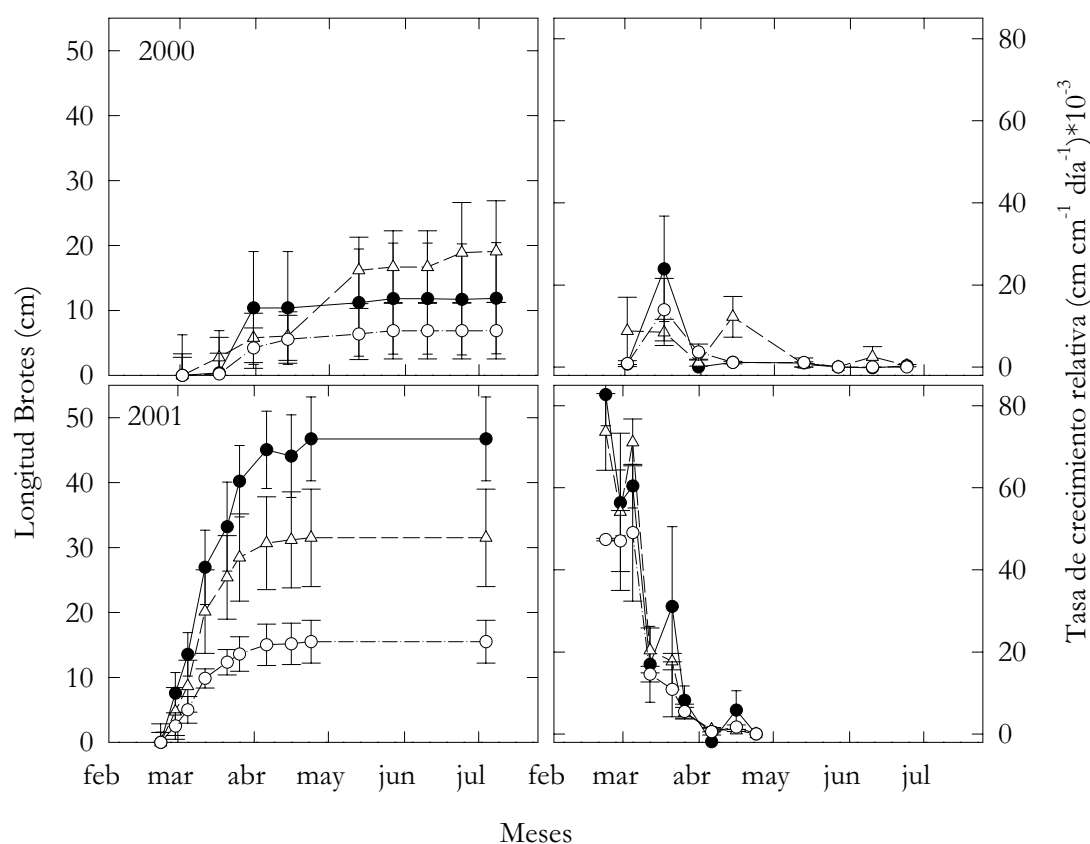


Figura 5.17. Dinámica del crecimiento de brotes en longitud y tasa de crecimiento relativa en 2000 y 2001, para los tres tratamientos T_{CTL} (—●—), T_{RDC} (··△··) y T_{SCO} (—○—). Cada punto corresponde a la media de 3 repeticiones \pm ES.

En 2000, un año altamente productivo, apenas si hubo crecimiento de ramos, de ahí que no se observase relación entre la cantidad de agua aplicada y el crecimiento de ramos. Contrariamente, en 2001, con una producción de aproximadamente la mitad, el crecimiento total, aunque escaso, fue muy superior al de 2000 (Figura 5.17) registrándose diferencias significativas de crecimiento entre T_{CTL} y T_{SCO} , pero no entre ambos tratamientos regados (Figura 5.17). Esta última observación es coincidente con lo informado por

Girona *et al.* (1993a) a partir de la aplicación durante tres años de un tratamiento de riego deficitario en almendro.

Aunque, los valores de velocidad de crecimiento relativo en longitud (Figura 5.17) fueron similares a los obtenidos por Romero *et al.* (2004a) en almendros regados con agua de buena calidad y de edad y condiciones de clima similares, éstos se tradujeron en menor longitud total, ya que el período de crecimiento fue del orden de la tercera parte del observado por estos autores. De igual modo que la longitud total, al analizar la evolución del diámetro de la base del brote del año y velocidad de crecimiento relativo del mismo (Figura 5.18) sus valores fueron inferiores a los señalados por Romero *et al.* (2004a).

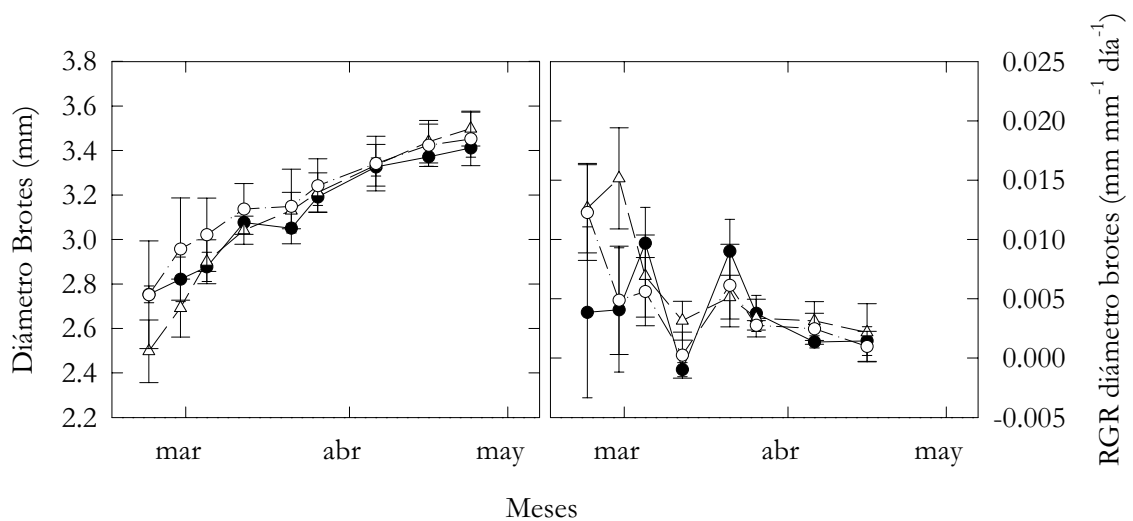


Figura 5.18. Evolución del diámetro de brotes y tasa de crecimiento relativo durante el 2001, para los tres tratamientos T_{CTL} (—●—), T_{RDC} (··△··) y T_{SCO} (—○—). Cada punto corresponde a la media de 3 repeticiones \pm ES.

Tronco

El diámetro de tronco al inicio del ensayo, medido al final de la cosecha de 1999, fue similar en los tres tratamientos de riego. Sin embargo y en idéntica fecha de 2001 las diferencias entre los tratamientos regados y el de secano fueron significativas ($P < 0,05$), indicando el menor crecimiento habido en T_{SCO} (Figura 5.19). La respuesta al riego medida a partir de la tasa de crecimiento en sección transversal de tronco durante el período 1999-2001 fue proporcional al volumen de agua recibido (riego más lluvia), siendo los valores medios de todo el período de 3.92 ; 2.39 y $0.83 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ día}^{-1}$ para T_{CTL} , T_{RDC} y T_{SCO} , respectivamente, valores muy bajos e inferiores a los registrados por Romero *et al.* (2004a) en árboles de edad similar y por Nortes *et al.* (2005) para almendros de diámetro de tronco de partida similar, aunque más jóvenes.

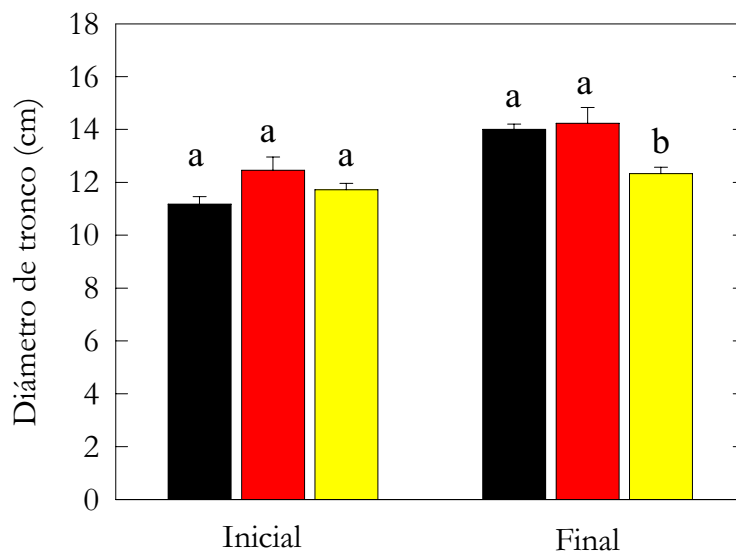


Figura 5.19. Diámetro de tronco al final de las campañas 1999 y 2001, para los tratamientos T_{CTL} (■), T_{RDC} (■) y T_{SCO} (■). Cada punto corresponde a la media de 3 repeticiones \pm ES.

Hojas

A finales de abril las hojas de los ‘spurs’ de los distintos tratamientos alcanzan su tamaño y peso final tal como indican los muestreos mensuales realizados durante el período abril-agosto y el de recogida total en diciembre (Tabla 5.6). El área y peso específico foliar fue similar en los dos tratamientos regados, T_{CTL} y T_{RDC}, independientemente del importante ahorro de agua que supuso T_{RDC} y contrariamente a lo observado por Torrecillas *et al.* (1989a) y Romero *et al.* (2004a). Sin embargo, T_{SCO} redujo significativamente el área foliar sin afectar al peso específico. Aunque el índice de área foliar (IAF) fue muy bajo en los tres tratamientos (IAF: 0.25; 0.17 y 0.055 en T_{CTL}, T_{RDC} y T_{SCO}, respectivamente), se dieron claras diferencias entre ellos (Tabla 5.6).

La menor longitud de brotes y área foliar, unido a la mayor caída de hojas en el T_{SCO} redujeron el IAF a la cuarta parte del T_{CTL}, según determinaciones realizadas tras la cosecha. Estos resultados contrastan con los presentados por Romero *et al.* (2004a) en almendros regados para satisfacer sus máximas necesidades hídricas, los que tuvieron un IAF de 10.2, a pesar de su menor tamaño de hoja. La estrecha correlación lineal observada entre el agua recibida por cada tratamiento (riego+lluvia) y el IAF ($R^2 = 0.99$), distintamente a lo observado para el área foliar unitaria, evidencia la capacidad integradora de este parámetro del conjunto de efectos derivados del déficit hídrico y toxicidad iónica sobre el crecimiento vegetativo del árbol. Los bajos IAF podrían haber contribuido al mantenimiento observado de la turgencia foliar (Tabla 5.2) a lo largo del ciclo y reflejar un mecanismo de tolerancia al estrés; ya que pequeños ratios brotes/raíz suponen una reducción de las

pérdidas de agua vía transpiración y pueden reflejar un tipo de mecanismo de tolerancia de la planta al déficit hídrico (Gardner *et al.*, 1990). Además, hay que señalar que la salinidad del suelo es otra propiedad química importante que influye en el ratio brotes/raíz. Según Shalhevet *et al.* (1995) el efecto depresivo de la salinidad sobre el crecimiento radicular es menos severo que sobre el crecimiento de los ramos.

Tabla 5.6. Valores medios del área foliar unitaria y total del árbol, peso específico e índice de área foliar (IAF) de los 3 tratamientos, de acuerdo al total de hojas presentes en el árbol tras la cosecha de 2000.

Trat.	Área foliar (cm ²)	Peso específico foliar (g/cm ²)	Área foliar total (m ² /árbol)	IAF
T _{CTL}	8.66 a	0.0147 a	8.93 a	0.25 a
T _{RDC}	8.02 a	0.0155 a	6.16 b	0.17 b
T _{SCO}	5.91 b	0.0144 a	1.97 c	0.055 c

Los valores de cada columna seguidos de letras distintas son significativamente diferentes según el test de Tukey_{0.05}

Aunque la generalidad de los parámetros evaluados para caracterizar el crecimiento vegetativo del árbol no se vieron afectados significativamente por el tratamiento de riego deficitario controlado, similarmente a lo observado por Franco *et al.* (2000) en almendros en riego deficitario y con agua de similar calidad, no es menos cierto que éstos mostraron una tendencia a registrar valores menores que en el tratamiento control. Esta tendencia que es acorde con la gran sensibilidad mostrada por este proceso al déficit hídrico (Hsiao, 1973) hace suponer que una mayor duración del período de ensayo podría dar lugar a diferencias entre ambos tratamientos regados. Esta hipótesis estaría en consonancia con la mayor reducción de las tasas de crecimiento de brotes, observada por Hutmacher *et al.* (1994) en almendros bajo riego deficitario, después de cinco años de aplicación de estas estrategias de riego deficitario.

Por otro lado, y si se tiene en cuenta que durante los cuatro años de estudio no se precisaron prácticas de poda, ya que el objeto fue mantener el desarrollo vegetativo generado para garantizar las máximas posiciones fructíferas para las campañas siguientes, así como las notables diferencias de crecimiento entre los árboles del ensayo y los datos informados por Romero *et al.* (2004a) y por Nortes *et al.* (Nortes *et al.*, 2005) para condiciones de cultivo similares, a excepción de la calidad del agua; se hacen presumibles los efectos de la alta salinidad del suelo y agua de riego en el crecimiento y desarrollo de una planta clasificada como sensible a la salinidad (Maas, 1986). Sin embargo, y por tratarse de un proceso de interacción entre dos variables, salinidad y

agua en el suelo, resulta difícil cuantificar la contribución de cada una de ellas a la respuesta observada en el cultivo (Bresler y Hoffman, 1986).

Crecimiento y desarrollo del fruto

En los cuatro años de estudio la máxima floración tuvo lugar en la primera quincena de febrero, con un desfase máximo interanual de quince días, de modo que a primeros-medios de marzo los frutos marcados tenían un diámetro longitudinal y ecuatorial de aproximadamente 13 mm y 9.5 mm, respectivamente (Figura 5.20), y un mes más tarde alcanzaban, prácticamente, el tamaño final del fruto, lo que muestra el carácter temprano de esta variedad (Felipe, 2000). Los brotes, al igual que el fruto concluyeron prácticamente su crecimiento a mediados de abril (Figura 5.15), con lo que el estrés hídrico aplicado en T_{RDC} no coincidió con el período de crecimiento exterior del fruto ni con el de los brotes en longitud. En la figura 5.2 puede observarse que la aplicación de la reducción del riego en un 30 % de T_{CTL} se inició tras completarse ambos crecimientos y que un mes más tarde (finales de mayo) con el comienzo de la acumulación rápida en materia seca del grano se redujo en un 70 %, al ser considerado el período comprendido entre este momento y la recolección poco sensible al déficit hídrico (Goldhamer y Shackel, 1989; Girona y Marsal, 1995).

La dinámica de crecimiento del fruto, evaluada en base a la longitud de su pericarpio, tanto medido de forma longitudinal, como ecuatorial, se ajustó a una curva de tipo sigmoideal, con una fase inicial exponencial muy corta, seguida de otra lineal en la que el diámetro aumentó a una tasa constante, para a continuación ralentizar su crecimiento de forma exponencial hasta alcanzar el tamaño final del fruto (Figura 5.20). El patrón de crecimiento en peso seco del grano fue doble sigmoideal, mostrando claramente el inicio de la fase IV o de llenado rápido del grano, lo que resulta de gran interés en la aplicación de estrategias de RDC (Figura 5.20). En ningún momento del período de crecimiento exterior del fruto se dieron diferencias significativas de diámetro de fruto entre tratamientos, independientemente de que se alcanzase un tamaño final u otro según los años. Sin embargo, al analizar la evolución del peso seco de la semilla se observó cómo en T_{SCO} tenía lugar una temprana disminución de la velocidad de crecimiento en 2001 y un adelanto de la cosecha de aproximadamente de tres semanas en 2000 respecto a los dos tratamientos regados, tal como muestra la clara estabilización de su peso seco (Figura 5.20) y la manifestación del logro de las condiciones adecuadas para proceder a la cosecha. Ambas situaciones resultaron en un menor peso del grano cosechado (Figura 5.20, y Tabla 5.8).

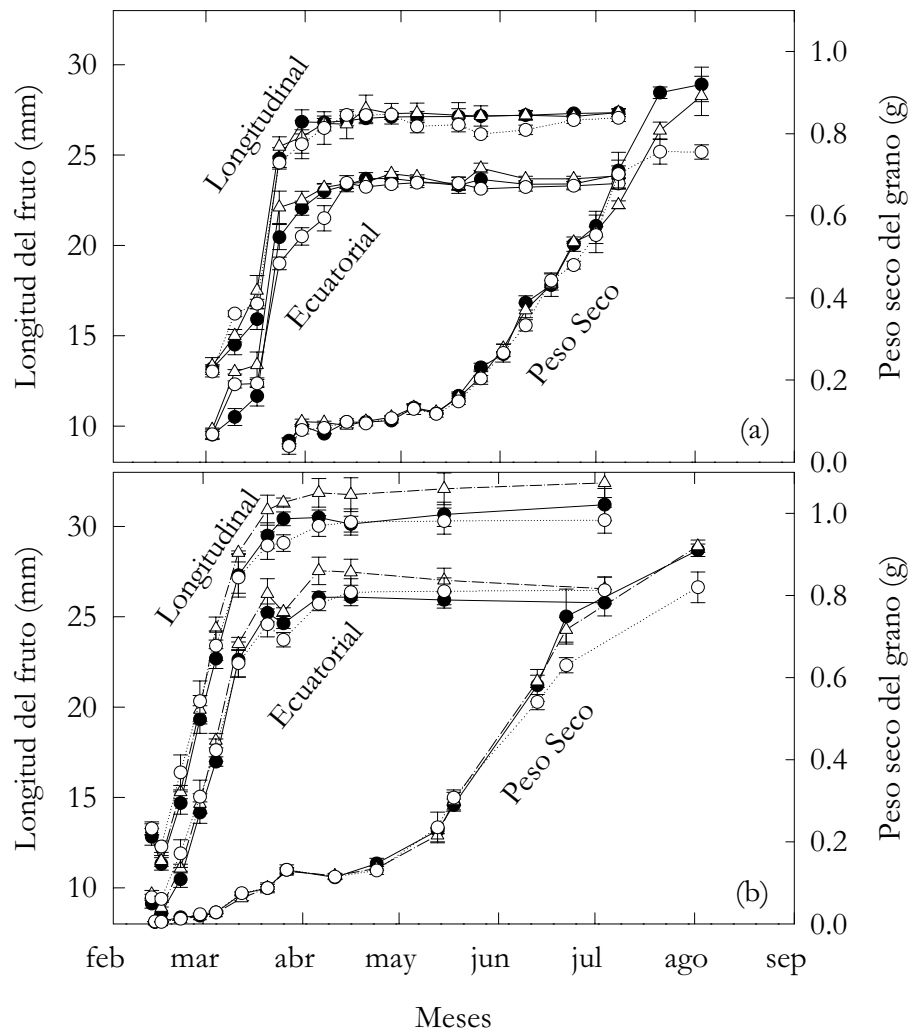


Figura 5.20. Evolución del diámetro longitudinal y ecuatorial de los frutos y en peso seco del grano, para los tres tratamientos T_{CTL} (—●—), T_{RDC} (··△··) y T_{SCO} (---○---), durante los años 2000 (a) y 2001 (b). Cada punto corresponde a la media de 3 repeticiones \pm ES.

T_{RDC} , con diferencias de Ψ_a respecto al control durante todo el período junio-septiembre de 0.2-0.3 MPa, no afectó al peso de la semilla y por tanto al transporte de fotoasimilados al fruto, contrariamente a lo indicado por otros autores tras reducir substancialmente el riego en los dos meses previos a la cosecha (Goldhamer, 1996; Girona *et al.*, 1997). Este hecho diferencial puede derivar de que las comparaciones de medias en este ensayo son con relación a un tratamiento control regado con agua de elevada salinidad y por tanto los efectos derivados de la salinidad podrían haber mitigado los derivados del aporte hídrico diferencial. Sin embargo, disminuciones máximas de Ψ_a de 1.1 MPa respecto al control, generadas por T_{SCO} , causaron reducciones medias en el peso de la semilla entre el 9 y 12 %, reducciones similares a las observadas por (Goldhamer y Shackel, 1989; Goldhamer y Viveros, 2000; Girona *et al.*, 2005) tras suprimir el riego durante los meses de junio y julio. Estos resultados

indican que incluso bajo estrés hídrico muy severo ($\Psi_a < -1.84$ MPa en T_{SCO}) la acumulación de fotoasimilados en la semilla se vio poco alterada, lo que indica la fuerte actividad sumidero que presenta el fruto y la semilla en este período (Romero, 2002). A tenor de los resultados y de acuerdo con Girona y Marsal (1995), se podría decir que no parece recomendable la supresión del riego durante la fase de llenado del grano (Figura 5.9 y Tabla 5.8).

5.3.4. Producción y componentes

En las tablas 5.7 y 5.8 se recoge la producción total, componentes de la misma y eficiencia de uso del agua para cada uno de los cuatro años de estudio. En 1999 no se registraron diferencias significativas entre tratamientos ni en la producción total ni en sus componentes, a excepción del peso seco del grano que se vio negativamente afectado por el tratamiento de secano. La ausencia de diferencias entre los tratamientos regados y el de secano pudo deberse a la historia previa de la plantación, caracterizada por un manejo del riego idéntico en toda la plantación, así como por el hecho de que la aplicación de los tratamientos de riego se iniciase el 1 de mayo, cuando ya se había alcanzado el tamaño definitivo del fruto. La reducción del peso del grano como consecuencia de la supresión del riego en T_{SCO} , durante los meses previos a la cosecha, es consistente con lo indicado por Goldhamer y Shackel (1989) e implica una pérdida de calidad de la almendra.

En las dos cosechas siguientes 2000 y 2001 los efectos de los tratamientos de riego sobre la producción fueron muy estables estadísticamente, independientemente de las producciones alcanzadas. T_{CTL} y T_{RDC} , sin diferencias significativas entre ellos tanto a nivel de producción como de sus componentes, triplicaron la producción del T_{SCO} . El tratamiento de secano disminuyó tanto la producción total como el rendimiento en grano y peso seco de éste al aire, y aumentó el número de almendras vacías y pelonas (Tabla 5.8). Los bajos rendimientos cosechados en 2001 pudieron deberse a una polinización defectuosa como consecuencia de los fuertes vientos y lluvias acaecidas durante la floración.

En 2002, un año anómalo en cuanto a la disponibilidad de agua de riego, no se pudo llevar a cabo la aplicación del riego de acuerdo a las estrategias de riego diseñadas, especialmente a partir de junio, momento en el que el agricultor dio prioridad a los cultivos hortícolas de su explotación por encontrarse con frutos en desarrollo y ante la necesidad de asegurar su producción. Sin embargo y a pesar de la práctica supresión del riego a partir de junio (Tabla 5.1), fue el año más productivo del período de estudio (Tabla 5.7), en parte por las buenas condiciones climáticas durante la polinización, la baja producción de 2001 y posiblemente y no menos importante porque el manejo del riego durante los tres años anteriores contribuyó al mantenimiento

de la capacidad productiva de los árboles. La figura 5.17 muestra el desigual crecimiento de brotes de 2000 y 2001, siendo el de éste último año muy superior al anterior. Es presumible que las buenas producciones relativas de 2002 derivasen del mayor crecimiento de brotes de 2001 al asegurar un buen número de posiciones fructíferas para 2002, además de las condiciones de medio ya indicadas. Estos resultados reafirman el hecho sobradamente conocido de que la producción del almendro es el resultado de un ciclo de desarrollo de 2 años y que los posibles efectos de la reducción o privación de agua en el año en curso pueden no verse reflejados en la cosecha del año y si tener una marcada influencia en la cosecha del año siguiente (Girona y Marsal, 1995).

Tabla 5.7. Producción total y rendimiento en grano y aparente del agua (EUA, kg de almendra cáscara por m³ de agua de riego más lluvia).

Año	Trat.	Producción en grano (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (%)	EUA (kg m ⁻³)
1999	T _{CTL}	522 a	33.8 a	0.25 b
	T _{RDC}	611 a	33.0 a	0.48 a
	T _{SCO}	482 a	34.4 a	0.49 a
2000	T _{CTL}	898 a	37.8 a	0.33 b
	T _{RDC}	928 a	38.1 a	0.47 a
	T _{SCO}	310 b	33.5 b	0.39 ab
2001	T _{CTL}	516 a	33.1 a	0.22 a
	T _{RDC}	420 a	32.3 ab	0.31 a
	T _{SCO}	171 b	30.5 b	0.24 a
2002	T _{CTL}	1163 a	39.0 a	0.77 b
	T _{RDC}	1215 a	37.3 a	1.10 a
	T _{SCO}	533 b	34.3 a	0.86 b

Los valores de cada columna y año seguidos de letras distintas son significativamente diferentes según el test de Tukey_{0,05}

El peso medio de grano de los tratamientos regados se redujo en 12 % con relación al de los años anteriores, siendo éste muy similar al obtenido en idénticos años en T_{SCO}. De igual modo, se observó una reducción del 9 % en T_{SCO} respecto a 2000 y 2001. Ambas reducciones en el peso medio de grano

inducen a pensar en un efecto combinado de la supresión del riego durante los meses previos a la cosecha y a la mayor carga productiva de 2002, igual tendencia fue observada por (Romero, 2002) en los años más productivos. El mayor número de frutos presentes en el árbol, unido a las escasas reservas de asimilados del árbol, pudo originar una importante competencia por los asimilados fotosintetizados por las hojas en el año en curso, fuente principal de la materia seca que se acumula en el grano (Girona y Marsal, 1995), afectando a la calidad del mismo.

En cuanto al análisis de las componentes de la producción es de destacar que el T_{RDC} no afectó a ninguna de las componentes controladas y que tan sólo en uno de los cuatro años de estudio el número de almendras dobles y vacías se vio disminuido y aumentado, respectivamente, por efecto de T_{SCO} . Sin embargo, el número de pelonas mostró una clara tendencia al aumento con la supresión del riego, registrándose diferencias significativas en tres de los cuatro años de estudio (Tabla 5.8), lo que supone una merma de calidad del producto cosechado.

Tabla 5.8. Componentes de la producción durante el período experimental 1999-2002.

Año	Trat.	Peso seco del grano (g)	Dobles Vacías Pelonas (%)		
1999	T_{CTL}	0.97 a	17.3 a	0.90 a	1.33 a
	T_{RDC}	0.98 a	17.8 a	3.91 a	2.26 a
	T_{SCO}	0.90 b	16.2 a	2.18 a	4.26 a
2000	T_{CTL}	0.99 a	21.3 a	1.97 a	1.39 a
	T_{RDC}	0.98 a	17.9 a	1.82 a	2.13 a
	T_{SCO}	0.83 b	10.5 b	4.81 b	5.71 b
2001	T_{CTL}	1.00 a	8.15 a	1.27 a	0.86 a
	T_{RDC}	1.07 a	7.97 a	2.26 a	3.95 a
	T_{SCO}	0.85 b	11.6 a	3.77 a	15.4 b
2002	T_{CTL}	0.87 a	9.69 a	1.39 a	2.52 a
	T_{RDC}	0.88 a	11.16 a	2.83 a	5.59a
	T_{SCO}	0.78 a	15.1 a	2.23 a	28.11 b

Los valores de cada columna y año seguidos de letras distintas son significativamente diferentes según el test de Tukey_{0.05}

La producción media obtenida en T_{RDC} fue del orden del 56 % a la lograda por Girona *et al.* (2005) con ‘Ferragnes’ bajo riego deficitario controlado, agua de buena calidad y aportes hídricos (riego+lluvia) 1.5 superiores a los de T_{RDC} . Bajo condiciones climáticas similares, distancia entre fincas aproximadamente 15 km, y para almendros ‘Cartagenera’ con idéntico diámetro de tronco a los del ensayo, Romero (2002) obtuvo un 30 % más de producción a partir de un tratamiento de RDC regado con agua de $CE_{25^{\circ}C} = 1.3 \text{ dS m}^{-1}$ y que recibió volúmenes de riego equivalentes 2.2 veces a los de T_{RDC} . Contrariamente, y para dotaciones hídricas, calidad del agua y condiciones de clima y desarrollo del árbol similares a las de T_{RDC} , Franco *et al.* (2000) obtuvieron rendimientos del orden del 25 % inferiores a los T_{RDC} en los cultivares ‘Cartagenera’ y ‘Ramillete’ y similares en ‘Atocha’. Estos resultados coincidentes, en cierta medida, con los informados por Franco *et al.* (2000), corroboran el efecto negativo de la salinidad del agua de riego sobre la producción potencial del almendro. Sin embargo, los rendimientos obtenidos, en ambos tratamientos regados, fueron superiores a los esperados para la salinidad presente en el agua y suelo. Cabría pensar en la buena adaptación relativa de esta variedad autóctona al estrés hídrico (déficit hídrico más estrés osmótico), lo que le permitiría utilizar más eficazmente el agua disponible.

En la generalidad del período de estudio el tratamiento de riego deficitario controlado mejoró substancialmente la eficiencia de uso del agua (Tabla 5.7), sin que se diesen mermas de producción ni de calidad de la almendra cosechada (Tablas 5.7 y 5.8). Bajo el supuesto que T_{RDC} presentase idénticos caracteres de estabilidad y sostenibilidad que T_{CTL} , su validación hubiese requerido una mayor duración de los ensayos, su mayor eficiencia le convertiría en una estrategia de riego de gran interés bajo las condiciones de cultivo de la zona.

5.4. Conclusiones

Bajo las condiciones de ensayo se ha puesto de manifiesto la efectividad de las lluvias en el lavado de las sales del suelo; así como la importante cantidad de lluvia necesaria para reducir el contenido salino del mismo en la profundidad radicular. Por ello, sería recomendable mantener un elevado contenido de agua en el suelo en épocas de baja demanda evaporante y de alta probabilidad de lluvias, ya que éstas generalmente van a ser insuficientes para completar la lixiviación de las sales presentes.

Durante el período experimental los valores de potencial matricial, contenido de agua en el suelo, potencial hídrico foliar y de tallo y conductancia foliar fueron indicativos de diferencias consistentes en el estado hídrico del suelo y la planta en los distintos tratamientos.

En el período menos crítico, fase de llenado del grano (junio-agosto), y por lo tanto más aconsejable para el ahorro de agua, diferencias en el estado hídrico de los árboles respecto al control entre 0.2-0.3 MPa en Ψ_a y 0.5-0.6 MPa en Ψ_{md} , equivalentes a un ahorro de agua del 50 %, no afectaron a la producción ni a sus componentes. Sin embargo, se observó una tendencia general de reducción del crecimiento vegetativo en los árboles RDC respecto a los del tratamiento control.

En condiciones de secano árido, las evoluciones de las diferencias en Ψ_a y Ψ_{md} respecto al control son muy similares. Valores de 0.5 MPa desde primeros de junio y su aumentó gradualmente hasta finales de julio (1.1 MPa), para posteriormente mantenerse en torno a 0.75 MPa, disminuyen el crecimiento y producción total. Ésta última, como consecuencia del menor número de frutos, disminución del rendimiento y peso seco del grano y aumento del número de pelonas; características que conllevan la depreciación del valor comercial de la almendra. El estrés hídrico generado con T_{SCO} puede catalogarse de severo.

Independientemente de que las mayores diferencias de Ψ_l , en valor absoluto y entre tratamientos, se registrasen en las medidas realizadas a mediodía; Ψ_a se considera mejor indicador del estado hídrico del almendro que Ψ_{md} debido a que las mayores diferencias relativas tienen lugar en las medidas realizadas antes del alba. De igual modo, Ψ_t a mediodía se ha revelado como un indicador más útil que Ψ_{md} con fines de diagnóstico del estado hídrico del almendro. A mediodía y en días típicos de verano, los valores de Ψ_t superaban en 0.5-0.7 MPa a los de Ψ_{md} , dependiendo del tratamiento de riego.

La disminución del Ψ_o en respuesta a la mayor edad de las hojas e incremento del estrés hídrico y salino, permitió que Ψ_p en los tratamientos regados permaneciera constante o incluso que aumentará, compensando así las reducciones de Ψ_l . Así mismo, el aumento del contenido en cloruros en hojas con el avance de la estación de riegos presentó una alta correlación con la disminución del Ψ_o en los tratamientos regados. De modo que, tanto el Na^+ como Cl^- acumulado en hojas contribuyen a los procesos de ajuste osmótico de almendros cultivados en suelos salinos.

La débil correlación existente entre Ψ_o y $[Cl]$ en hojas de los árboles de secano pudo deberse a que ya en mayo el potencial osmótico foliar se encontrase muy próximo al máximo nivel posible de acumulación de solutos y que un aumento en la intensidad de estrés hídrico por sequía osmótica ocasionase pérdidas de solutos invirtiendo el ajuste osmótico.

Los resultados del ensayo demuestran, claramente, el efecto negativo del riego con agua salina sobre el desarrollo y producción del almendro. Sin embargo, los rendimientos obtenidos, en ambos tratamientos regados, fueron superiores a los esperados para la salinidad presente en el agua y suelo. Cabría pensar en la buena adaptación de esta variedad autóctona al estrés hídrico y salino, lo que le permitiría utilizar más eficazmente el agua disponible. Con reducciones de agua de riego del 50 % de las teóricamente necesarias se consiguieron producciones similares al control. Sin embargo, un mayor período experimental hubiese sido deseado para evaluar los efectos que distintos niveles salinos en planta pueden generar a más largo plazo.

A modo de resumen se puede concluir que las relaciones hídricas del almendro se ven negativamente afectadas por la sequía y la salinidad. Y que los mecanismos desarrollados por el almendro para afrontar los periodos de sequía en condiciones de alta salinidad se basan en: (i) la disminución del potencial hídrico foliar, al objeto de generar un mayor gradiente de potencial hídrico entre el suelo y la hoja, y de este modo favorecer la absorción de agua, (ii) una temprana regulación estomática, desde las primeras horas del día, permitiéndole una mayor eficiencia en la absorción de CO₂ respecto a las pérdidas de agua, (iii) el desarrollo de ajuste osmótico durante la mayor parte de la estación de crecimiento, lo que permite mantener la turgencia celular y compensar las disminuciones de Ψ_1 y (iv) la disminución del LAI, lo que supone una contribución adicional al mantenimiento de la turgencia, ya que al disminuir el ratio brotes/raíz se reduce la tasa transpirativa para idéntica demanda evaporante.

**Estudio de la sensibilidad de
indicadores biológicos en la
caracterización del estado
hídrico del árbol**

6.1. Introducción

El conocimiento del estado hídrico del cultivo y su respuesta fisiológica, tanto a distintas dotaciones hídricas como a los cambios rápidos de disponibilidad de agua en el suelo, es clave para una programación eficiente del riego, especialmente cuando se aplican estrategias de riego deficitario controlado.

A nivel de explotación comercial, los métodos más utilizados de programación del riego son los basados en balances hídricos simulados y en el estado energético del agua en el suelo. Los métodos basados en medidas directas o indirectas del estado hídrico de la planta y de su respuesta fisiológica al régimen hídrico contrastan claramente con los anteriores (Jones, 2004; 2007), al integrar ésta las condiciones del entorno, clima y suelo a la vez.

Aunque son muchos los trabajos de investigación que demuestran la utilidad de los indicadores del estado hídrico de la planta: potencial hídrico foliar al alba (Ψ_a) y potencial de hoja cubierta a mediodía, que estima el potencial hídrico de tallo (Ψ_t), para determinar el estado hídrico del árbol y con fines de programación de riegos (McCutchan y Shackel, 1992; Shackel *et al.*, 1997; Naor *et al.*, 2001), la realidad es que han tenido una escasa aplicación a nivel de finca comercial. En parte debido al inconveniente de tener que realizar las medidas de Ψ_a antes del amanecer o por la necesidad de cubrir las hojas 2 o 3 horas antes de las medidas de Ψ_t , requiriendo ambos de varios viajes a las fincas y de mano de obra capacitada.

Los avances tecnológicos recientes permiten utilizar indicadores alternativos a Ψ_a y Ψ_t para evaluar el estado hídrico del árbol, tales como los derivados del registro automático de las variaciones continuas de diámetro de tronco. La máxima contracción diaria (MCD) y la tasa de crecimiento diaria de tronco (TCD), ésta última principalmente en árboles jóvenes, son los dos parámetros que mayor interés están suscitado con fines de programación de riegos debido a su respuesta a los cambios de humedad en el suelo (Goldhamer *et al.*, 2000; Cohen *et al.*, 2001; Moriana y Fereres, 2002; Remorini y Massai, 2003; Ortuño *et al.*, 2004; Nortes *et al.*, 2005) y por su relación con los parámetros discretos anteriormente citados (Goldhamer *et al.*, 2000; Naor y Cohen, 2003; Intrigliolo y Castel, 2004). Sin embargo, antes de ser utilizados en la programación del riego es conveniente estudiar su sensibilidad y variabilidad a los cambios de contenido de humedad bajo las condiciones de cultivo que se pretenden.

Actualmente varios grupos de investigación trabajan con este tipo de biosensores en agricultura, y los esfuerzos están dirigidos al control y

optimización del riego. La idea fundamental consiste en utilizar a la planta como sensor de sus propias necesidades. Sin embargo, la aplicación práctica de dichos sensores no es sencilla y su puesta a punto requiere de la utilización de sensores de clima, suelo y planta que proporcionen la información necesaria para el establecimiento de valores umbrales o consigna (Baille, 1992). Además, los protocolos de riego propuestos (Intrigliolo y Castel, 2006; Moreno *et al.*, 2006; Ortuño *et al.*, 2006b; García-Orellana *et al.*, 2007; Vélez *et al.*, 2007) son muy específicos de la especie, edad y estado fenológico.

Por todo ello, se plantearon dos ensayos: uno con almendros jóvenes no productivos y otro al inicio de su entrada en producción. El propósito principal de ambos ensayos fue determinar y comparar la sensibilidad de distintos indicadores de estrés hídrico en planta a los cambios de disponibilidad de agua en el suelo.

6.2. Materiales y métodos

Material vegetal y condiciones experimentales

Los ensayos se realizaron durante el periodo 2002-2004 en la parcela experimental de almendros ‘Marta’ descrita en el Capítulo IV y cuya secuencia de crecimiento y desarrollo aparente se recoge en la (Figura 6.1).

Las evoluciones de valores de las variables climáticas: temperatura, pluviometría y evapotranspiración de referencia reinantes durante el periodo de estudio aparecen representadas en la figura 6.2.

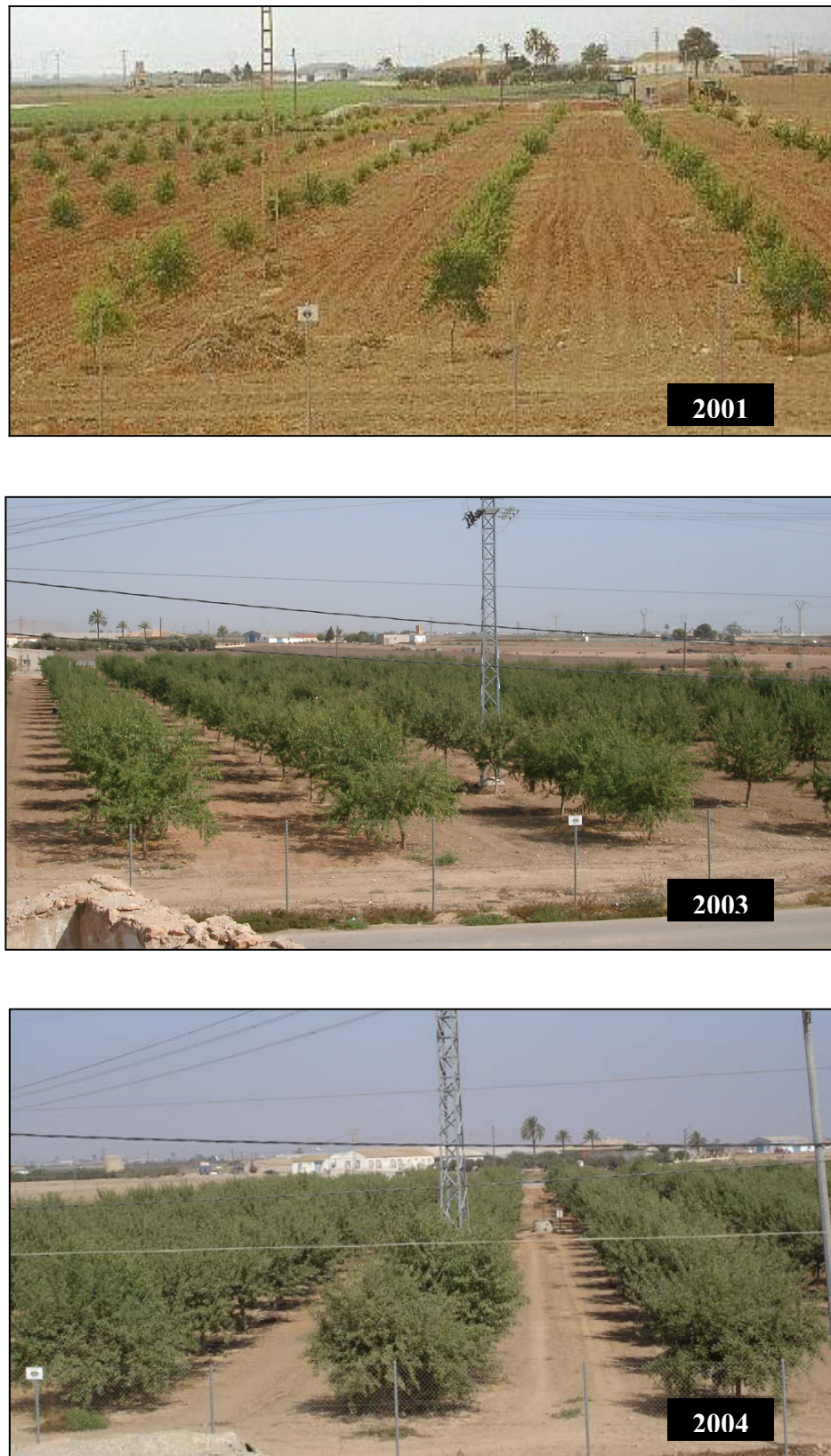


Figura 6.1. Vista general y evolución de la parcela experimental de almendros (ETSIA-UPCT) durante el periodo de estudio.

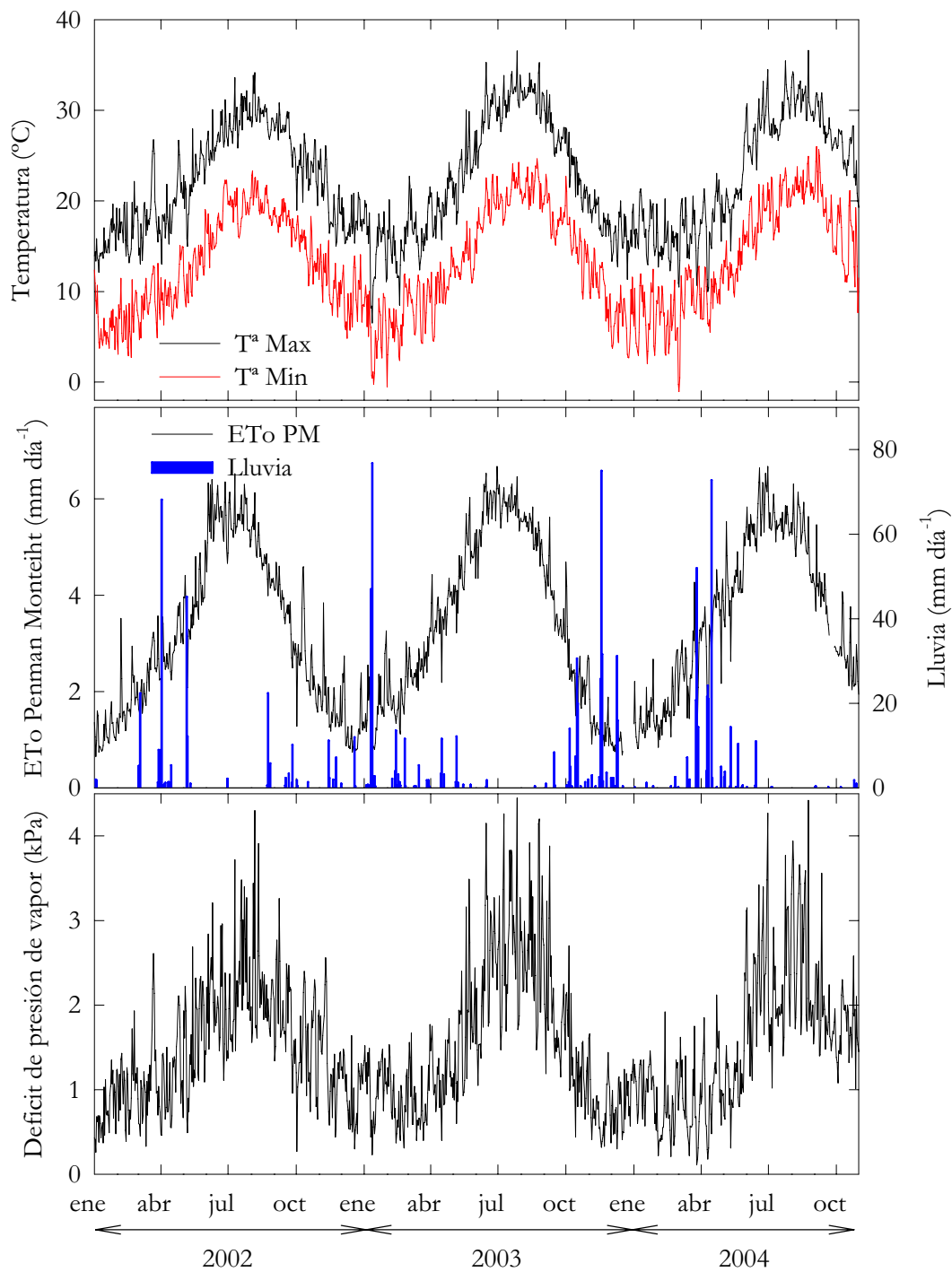


Figura 6.2. Valores diarios de temperatura máxima y mínima, pluviometría, evapotranspiración de referencia de Penman Monteith, déficit de presión de vapor máximo en la parcela experimental durante 2002-2004.

Medidas

Agua-Planta

Se evaluó, con cámara de presión (Soil Moisture Equip. Corp, model 3000), el potencial hídrico foliar al alba (Ψ_a) y mediodía (Ψ_{md}) y potencial de tallo a mediodía (Ψ_t), y con porómetro (LICOR modelo LI 1600) la conductancia foliar (g), en 12 hojas adultas por tratamiento. Para la medida del potencial de tallo, se envolvieron las hojas con plástico negro y papel aluminio 2 horas antes de cada medida (capítulo III).

Las fluctuaciones de diámetro de tronco se midieron con dendrómetros LVDT “*Linear Variable Differential Transformer*” (Solartron modelo DF \pm 2.5; UK) de forma continua, con una precisión de \pm 1 μ m y un recorrido máximo de 5 mm. Para su colocación en el tronco del árbol se utilizaron portasensores formados por dos piezas de aluminio unidas por dos varillas de material invar (aleación de hierro y níquel con un coeficiente de dilatación por temperatura de $1.7 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$). Los sensores fueron colocados a 40 cm del suelo, en la cara Norte del tronco (6 sensores por tratamiento), las medidas se realizaban cada 10 minutos y fueron registradas con equipos MicroIsis con comunicación GSM RS-485, colocados en la misma parcela experimental (capítulo III). Al inicio del ensayo el diámetro medio de tronco fue de unos 6 cm.

6.3. Almendros jóvenes no productivos

6.3.1. Tratamientos de riego

Durante el 2002, con árboles en su segundo año de plantación, se ensayaron 3 tratamientos de riego T_{CTL} , T_{RD60} y T_{RDC40} descritos en el capítulo IV. Los volúmenes de agua aplicados a cada uno de los tratamientos fueron de 3167, 1524 y 1437 $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

6.3.2. Resultados y discusión

Los valores del potencial mátrico del agua en el suelo (Ψ_m) fueron similares en los tres tratamientos de riego hasta mediados de abril. A partir de ese momento se produjo un cambio de pauta, caracterizado en: i) T_{RD60} por una pronunciada disminución de Ψ_m hasta mediados de mayo y por su mantenimiento prácticamente constante durante el resto de la estación de riego, y ii) T_{RDC40} por valores ligeramente inferiores a los de T_{CTL} hasta primeros de junio y por lecturas fuera de rango, en las tres profundidades, durante el periodo de riego al 40 %. T_{CTL} mantuvo valores medios de -12, -18 y -23 kPa a 30, 60 y 90 cm de profundidad respectivamente. Tras la restitución

del riego al 100 % en T_{RDC40} se alcanzaron valores similares a T_{CTL} con una demora de 10, 21 y 45 días para las profundidades de 30, 60 y 90 cm, respectivamente.

En la figura 6.3 se muestra la evolución a lo largo de la estación de riego de los valores medios de Ψ_a , Ψ_{md} y Ψ_t . Los valores de Ψ_a en T_{CTL} durante todo el periodo rondaron los -0.4 MPa, niveles similares a los obtenidos por Torrecillas *et al.* (1996) y Marsal *et al.* (1997) en almendros bien regados. A partir de mediados de junio en T_{RD60} y de julio en T_{RDC40} , Ψ_a fue significativamente diferente al control, manteniéndose las diferencias prácticamente constantes hasta finales de septiembre (≈ 0.13 y 0.29 MPa respecto al control para T_{RD60} y T_{RDC40} , respectivamente). De igual modo, claras diferencias en Ψ_a fueron registradas entre ambos tratamientos deficitarios durante el periodo de mediados de julio a finales de septiembre. La conducta de Ψ_t fue similar a la descrita para Ψ_a , aunque con una ligera disminución de los valores relativos al control (Figura 6.3 a). Esta similitud, entre ambos parámetros muestra el interés de Ψ_t a mediodía como indicador del déficit hídrico en almendros jóvenes y, concuerda con la alta sensibilidad de Ψ_t al déficit hídrico observada por Naor *et al.* (2001) en árboles frutales.

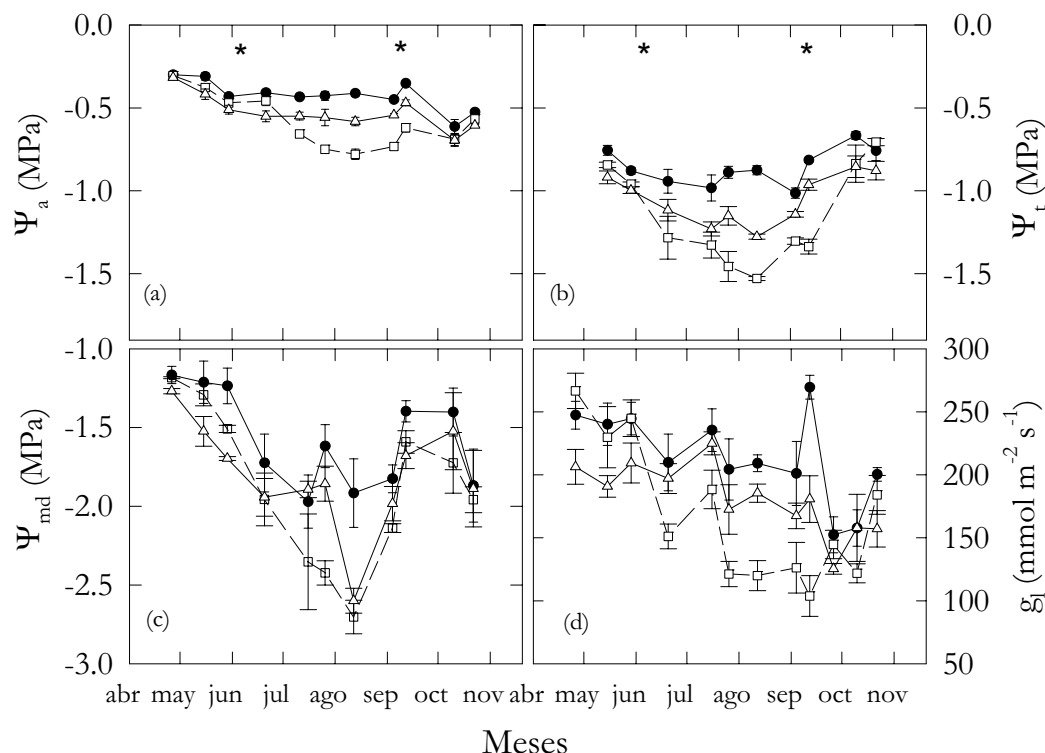


Figura 6.3. Evolución del potencial hídrico foliar al alba (Ψ_a), mediodía (Ψ_{md}), tallo (Ψ_t) y conductancia foliar (g_l) en los tres tratamientos de riego, T_{CTL} (\bullet —), T_{RDC60} (\triangle —) y T_{RDC40} (\square —). Los puntos corresponden a la media de tres repeticiones \pm ES. Los asteriscos indican el comienzo y final del periodo al 40 % de la ETc en T_{RDC40} .

Los valores de Ψ_t en el tratamiento T_{CTL} variaron de -0.66 a -1.01 MPa, niveles similares a los obtenidos por Fereres y Goldhamer (2003) en almendros en condiciones no limitantes de agua en el suelo. Tras la reducción del riego al 40 % en T_{RDC40} , Ψ_t fue más precoz que Ψ_a en detectar diferencias significativas respecto al control (Figuras 6.3 a y b). Por otro lado, las mayores oscilaciones de Ψ_{md} encontradas entre tratamientos y dentro del mismo tratamiento no dieron lugar a diferencias significativas claras, excepto durante el mes de agosto. En este mes los valores de Ψ_{md} descendieron a -1.92, -2.6 y -2.7 MPa en T_{CTL} , T_{RD60} y T_{RDC40} , respectivamente (Figura 6.3 c). No se dieron diferencias significativas de Ψ_{md} entre ambos tratamientos deficitarios.

La conductancia foliar (g_l) presentó valores medios de 215 y 180 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para T_{CTL} y T_{RD60} a lo largo de la campaña de riego y de 136 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para T_{RDC40} durante el periodo de déficit (Figura 6.3 d). Aunque los valores relativos al control fueron muy similares a los de Ψ_a y Ψ_t (Figura 6.3 a y b) tan solo se dieron diferencias significativas entre T_{CTL} y T_{RDC40} durante el periodo finales de julio-mediados de septiembre, como consecuencia de la mayor variabilidad de las medidas.

Para ilustrar los datos obtenidos a partir de los sensores LVDT se muestra la media de las fluctuaciones del diámetro de tronco por tratamiento y mes, caracterizado este último por un período de 6 días (Figura 6.4). Se observa como la actividad del cambium comienza a finales de febrero, coincidiendo con la máxima floración y la emergencia de nuevos brotes y hojas. La expansión cambial continúa hasta finales de octubre, con un crecimiento relativamente constante hasta últimos de agosto, reducción gradual en septiembre y mínimo crecimiento en octubre, coincidiendo con los primeros síntomas de senescencia de las hojas (Figura 6.4).

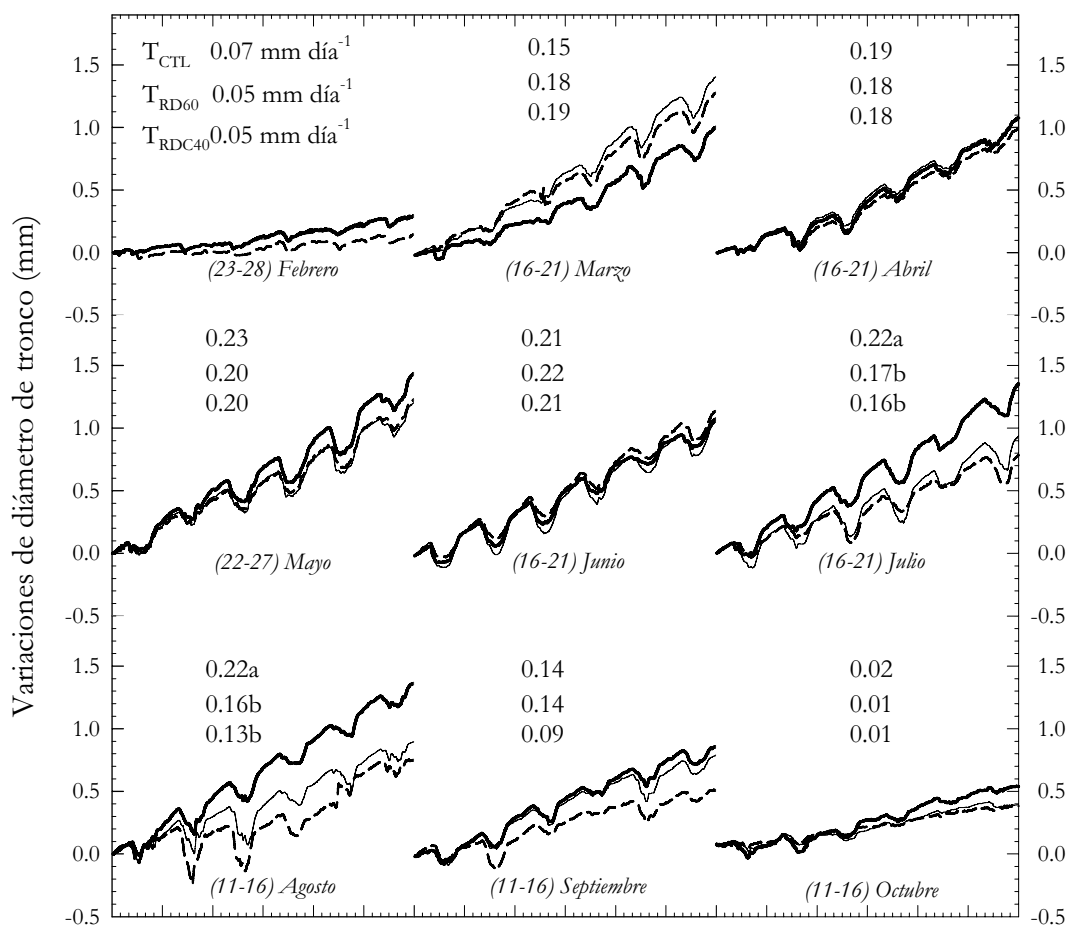


Figura 6.4. Fluctuaciones medias del diámetro de tronco durante la estación de crecimiento para los tres tratamientos de riego: T_{CTL} (—), T_{RD60} (---) y T_{RDC40} (- · -). Cada mes está caracterizado por un periodo de seis días. Las columnas numéricas representan la media mensual de crecimiento diario para los diferentes tratamientos. Los valores seguidos de letras distintas son estadísticamente diferentes según el test de Tukey_{0.05}.

El crecimiento diario (TCD) de los distintos tratamientos de riego fue prácticamente idéntico durante el periodo marzo-junio, con valores medios mensuales en torno a 0.2 mm día^{-1} (Figura 6.4). Una clara reducción de los valores de TCD como consecuencia del régimen de riego fue observada en julio y agosto en T_{RD60} , extendiéndose hasta septiembre en T_{RDC40} . Durante este periodo de alta demanda evaporativa, los valores de TCD relativos al control fueron muy similares a los de Ψ_a y Ψ_t (Figura 6.5), con diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos control y deficitarios para la generalidad de los días. Sin embargo, no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos deficitarios, a excepción de determinados días del mes de septiembre, cuando el T_{RD60} mantuvo un crecimiento similar al T_{CTL} .

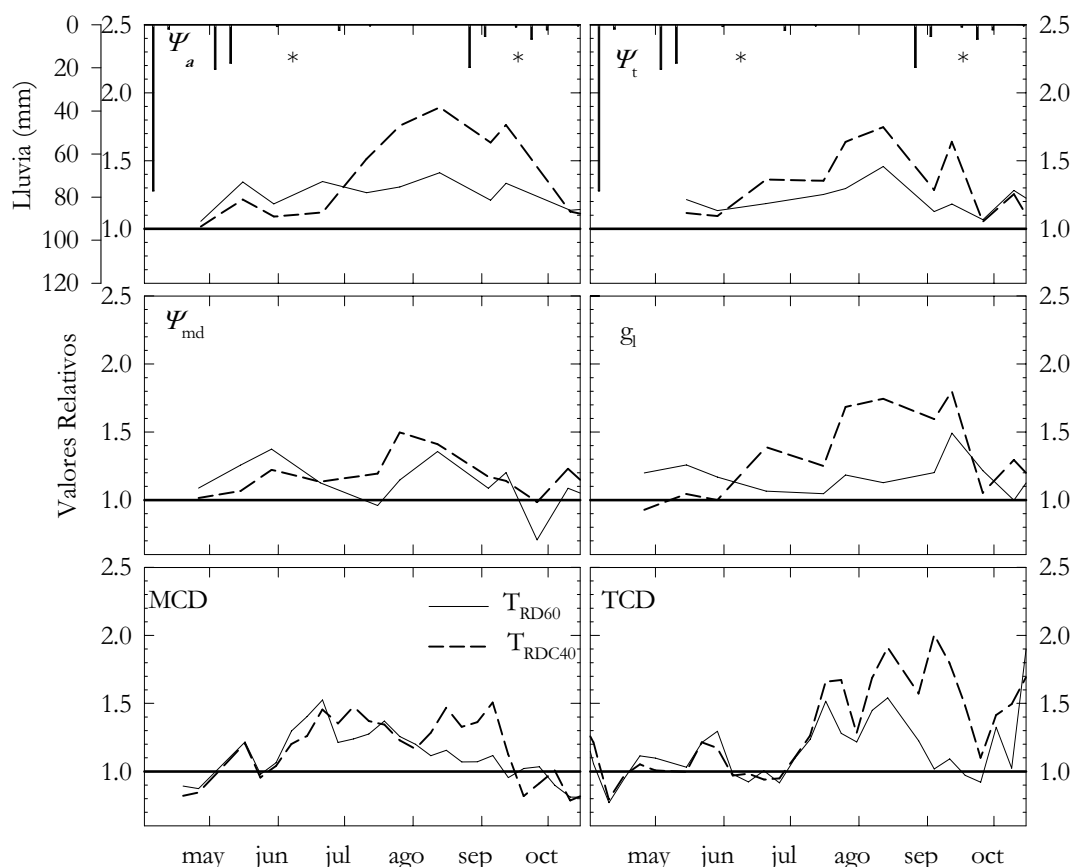


Figura 6.5. Evolución relativa de los parámetros: Potencial hídrico foliar al alba, mediodía y tallo a mediodía, Ψ_a y Ψ_{md} , Ψ_t (T_n/T_{CTL}), conductancia foliar, g_l (T_{CTL}/T_n), máxima contracción diaria, MCD (T_n/T_{CTL}) y crecimiento diario a partir de los máximos diámetros, TCD (T_{CTL}/T_n). Los asteriscos indican el inicio y final del periodo al 40 % de la ETC en T_{RDC40} .

El crecimiento total del tronco fue mayor en el tratamiento control que en los deficitarios. Los valores medios del incremento anual del diámetro de tronco en base a los sensores LVDT fueron de 41.6; 37.0 y 33.2 mm para T_{CTL} , T_{RD60} y T_{RDC40} respectivamente, lo que supuso una reducción de diámetro del 11 y 20 % para T_{RD60} y T_{RDC40} , respectivamente (Figura 6.6).

La evolución de la MCD mostró un aumento progresivo de sus valores desde principios de marzo hasta mediados de junio, una relativa estabilización durante los meses de verano y disminución de los mismos a partir de septiembre (Figura 6.7). El aumento progresivo de la MCD fue coincidente con el crecimiento en longitud de los brotes (aumento del área foliar) e incremento de la temperatura y de la transpiración en esta época del año. Ginestar y Castel (1996) en mandarinos jóvenes y Huguet *et al.* (1992) en manzanos encontraron un efecto similar. Además, tanto MCD como Ψ_t estuvieron bien correlacionada con la ETC, para el tratamiento control, con

coeficientes de correlación de 0.69^{***} y 0.91^{***} , respectivamente, alcanzando los valores más altos con la mayor demanda climática (Figura 6.7 y 6.8).

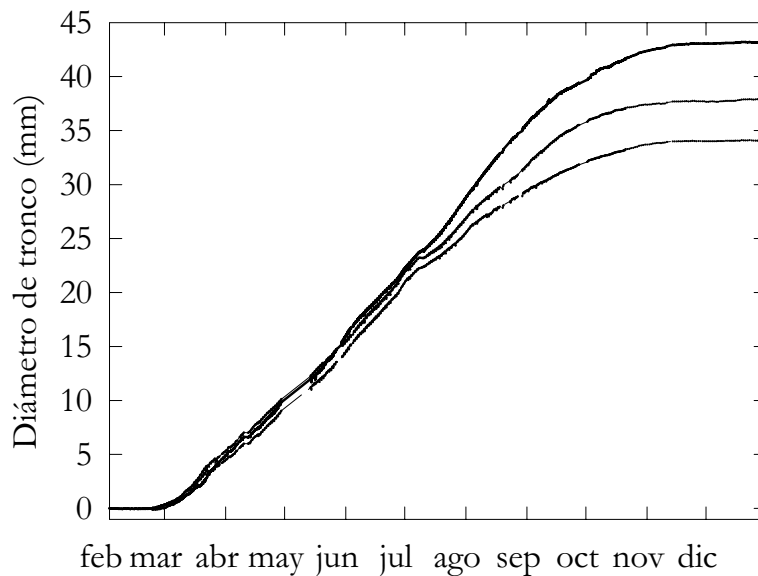


Figura 6.6. Evolución anual del diámetro de tronco en los distintos tratamientos de riego, T_{CTL} (—), T_{RD60} (— —) y T_{RDC40} (— · —).

Durante el periodo junio-agosto, la conducta observada en los dos tratamientos deficitarios fue la de presentar valores superiores de MCD que el control (Figura 6.7), aunque las diferencias no fueron significativas en la generalidad de los días. La alta variabilidad de las determinaciones pudo ser la causa de ello, así y durante el periodo de crecimiento los coeficientes de variación oscilaron entre 10 y 35 % para los tres tratamientos, valores similares a los encontrados por Ginestar y Castel (1996).

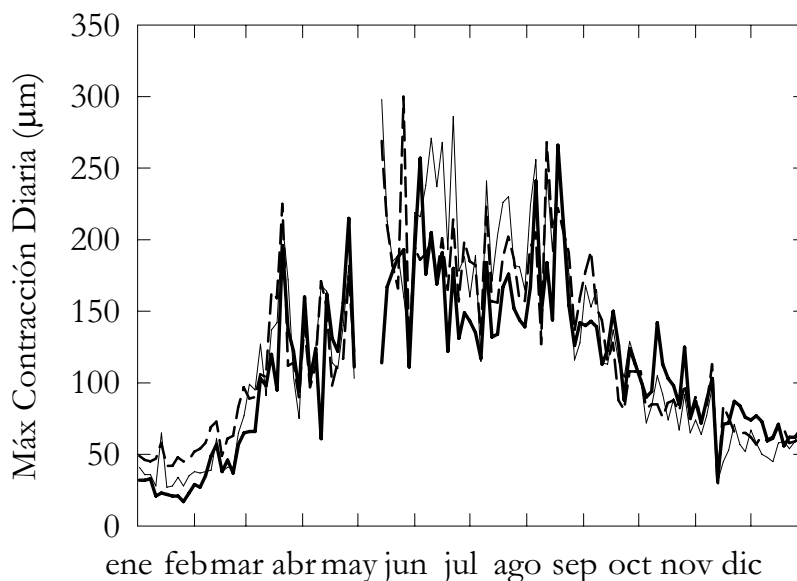


Figura 6.7.- Evolución de la máxima contracción diaria para los diferentes tratamientos de riego, T_{CTL} (—), T_{RD60} (— —) y T_{RDC40} (— · —).

El análisis de las evoluciones de TCD y MCD mostró una pauta más claramente relacionada con el desarrollo del estrés hídrico para TCD que para MCD. El cambio de tendencia al aumento de la relación (T_{CTL}/T_n) de TCD en los tratamientos deficitarios coincidió con valores de Ψ_a y Ψ_t en torno a -0.55 y -1.2 MPa respectivamente (Figura 6.3 y 6.5). Estos valores de potencial hídrico fueron significativamente diferentes a los del control (\approx -0.4 y -0.93 MPa Ψ_a y Ψ_t ; Figura 6.3).

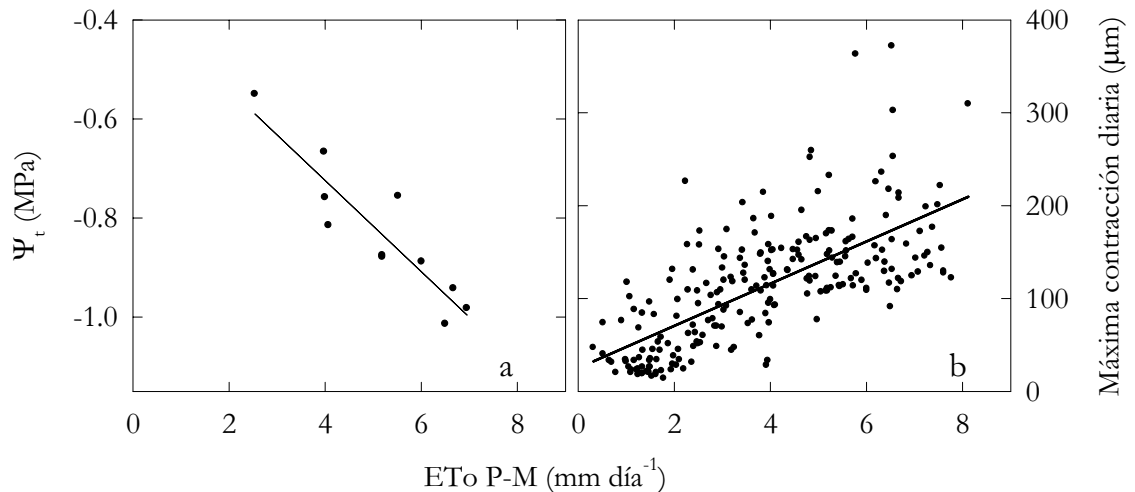


Figura 6.8.- Relaciones del potencial de tallo a mediodía (Ψ_t) y máxima contracción diaria (MCD) y la evapotranspiración de referencia Penman Monteith (ET_0) para el tratamiento control. $\Psi_t = -0.091 ET_0 - 0.35$ ($R^2 = 0.827$, $P < 0.05$); $MCD_{CTL} = 25.2 + 22.7 ET_0$ ($R^2 = 0.479$, $P < 0.05$).

6.3.3. Conclusiones

Tanto el potencial hídrico foliar al alba, como el potencial hídrico de tallo a mediodía respondieron claramente a la disminución del potencial matricial del suelo, demostrando su alta sensibilidad al régimen de riego. Por tanto, ambos parámetros pueden ser utilizados como herramientas fiables para cuantificar el déficit hídrico y como ayuda a la toma de decisiones en el manejo del riego.

La alta correlación existente entre el potencial hídrico de tallo a mediodía y la demanda evaporante exige que ésta sea tomada en cuenta en el establecimiento de los valores umbrales de riego Ψ_t .

El potencial hídrico foliar a mediodía, conductancia foliar y máxima contracción diaria, fueron los parámetros que mayor variabilidad presentaron en sus medidas. Este hecho fue, posiblemente, la causa de la inexistencia de diferencias nítidas entre tratamientos.

La máxima contracción diaria fue función de la demanda evaporante y del estrés hídrico, pero la posible influencia por otros factores relativos al

crecimiento hace de ella un indicador menos potente de cara a diferenciar niveles moderados de estrés entre tratamientos.

El crecimiento diario de tronco, determinado a partir de los máximos diámetros, fue más indicativo del nivel de estrés que la máxima contracción diaria. Al disminuir el estado energético del agua del suelo y de la planta ($\Psi_a \leq -0.55$ MPa y $\Psi_t \leq -1.2$ MPa), por efecto del déficit hídrico, las tasas de crecimiento de los tratamientos deficitarios fueron sensiblemente inferiores a las del control. Por ello, debe de ser considerado como un índice de estrés útil para la programación del riego en almendros jóvenes, especialmente, durante los periodos de altas tasas de crecimiento del tronco.

6.4. Almendros jóvenes al inicio de su entrada en producción

6.4.1. Tratamientos de riego

Durante el 2003, se aplicaron cuatro tratamientos de riego: T_{CTL} , T_{RD80} , T_{RD60} y T_{RDC20} , los que han sido descritos en el capítulo IV. Durante la época de máxima demanda evaporante y coincidiendo con el periodo de déficit hídrico ya avanzado en T_{RDC20} , los tres tratamientos deficitarios se sometieron a un ciclo de recuperación durante una semana (días 190-196), en el que recibieron idéntica dotación hídrica que el T_{CTL} . Los volúmenes de agua aplicados durante toda la estación de riego fueron: 4610, 3405, 2662 y 2079 $m^3 ha^{-1} año^{-1}$ para T_{CTL} , T_{RD80} , T_{RD60} y T_{RDC20} , respectivamente.

6.4.2. Resultados y discusión

Potencial hídrico de tallo y conductancia foliar

El potencial de tallo fue sensible al déficit hídrico, detectando diferencias entre tratamientos desde el inicio de la aplicación de los mismos (Figura 6.9). Durante toda la campaña de riegos, los valores de Ψ_t en T_{CTL} fueron muy estables, si se exceptúan los días 188 y 190 en los que debido a una avería en el cabezal de riego Ψ_t disminuyó a valores de -1.4 MPa (Figura 6.9). Estos valores con ligeras fluctuaciones en torno a -1.0 MPa, son típicos de condiciones no limitantes de agua en el suelo (Shackel *et al.*, 1997; Goldhamer y Fereres, 2004). En T_{RD80} , Ψ_t osciló entre valores iguales e inferiores a los del control lo que demuestra el carácter ligero del déficit hídrico aplicado. Sin embargo en T_{RD60} , con riego al 60 % de la ETC, los valores de Ψ_t fueron inferiores a los de T_{CTL} y T_{RD80} prácticamente durante todo el periodo de riego. T_{RD60} alcanzó valores inferiores a -1.25 MPa durante los meses de junio, julio y agosto, con un mínimo de -1.5 MPa, a mediados de agosto. Estos niveles pueden ser calificados de estrés moderado (Shackel *et al.*, 1997). El tratamiento T_{RDC20} presentó valores similares al T_{CTL} en el periodo

de riego al 100 % ETC, mientras que durante el período de riego al 20 % ETC el rango de diferencias respecto al control fue de 0.6 – 1.2 MPa. Estas diferencias fueron significativas desde la primera medida realizada tras la reducción del riego (día 176) e indicadoras del estrés severo aplicado (Figura 6.9). T_{RDC20} mantuvo, durante todo el periodo de déficit, valores de Ψ_t inferiores al resto de tratamientos. En T_{RD60} y T_{RDC20} las máximas diferencias de Ψ_t respecto al control fueron 1.5 y 4 veces superiores a las de T_{RD80} , respectivamente, lo que demuestra el gradiente de estrés para los distintos tratamientos de riego ensayados.

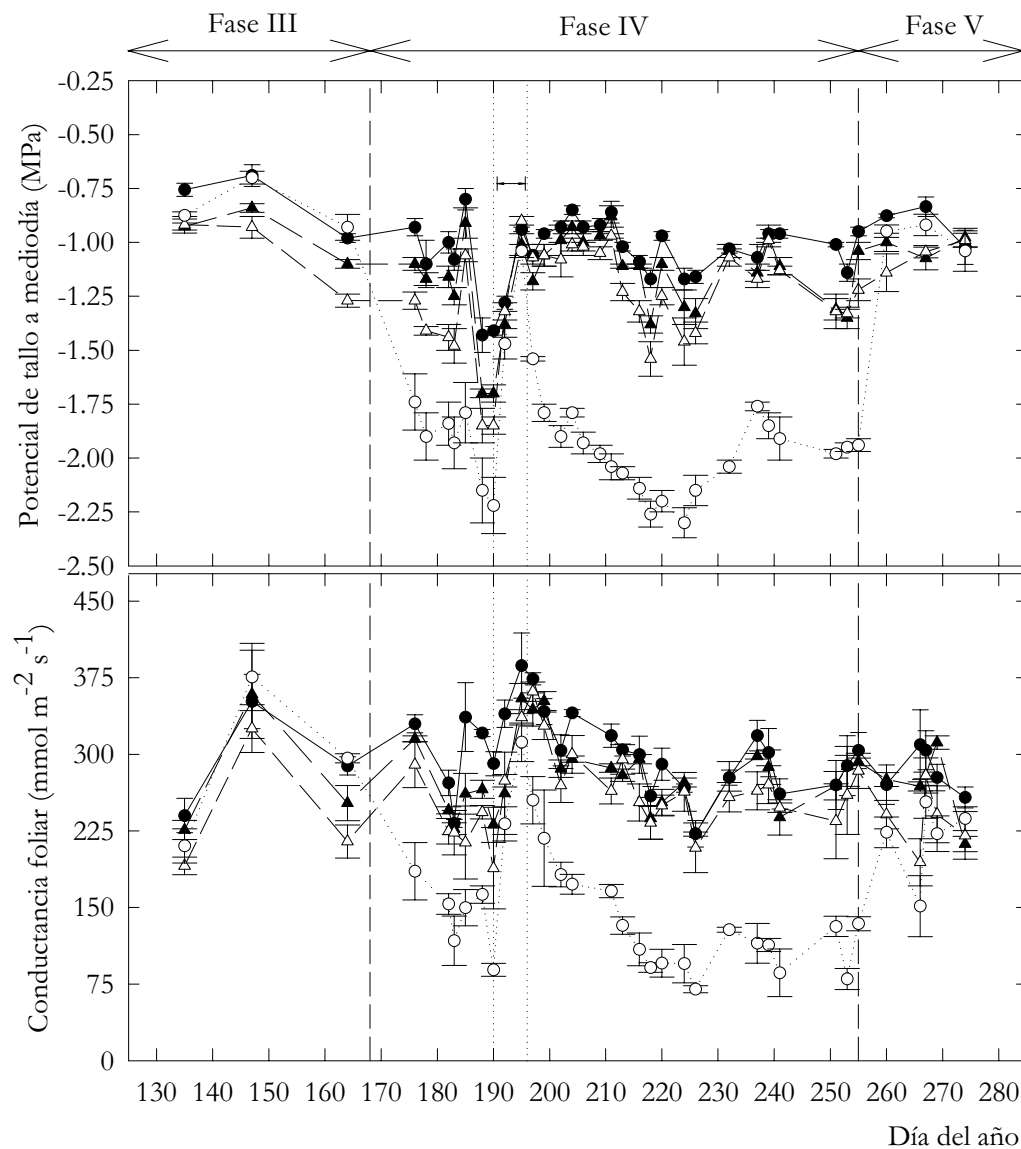


Figura 6.9. Evolución estacional del potencial de tallo (Ψ_t) y conductancia foliar a mediodía (g_s), en los cuatro tratamientos de riego T_{CTL} (●), T_{RD80} (▲), T_{RD60} (△) y T_{RDC20} (○). Cada punto corresponde a la media de 3 repeticiones \pm ES. Las líneas de trazo discontinuo indican el inicio y fin del periodo de riego al 20 % ETC en T_{RDC20} , y las de puntos la semana de recuperación al 120 % de la ETC en todos los tratamientos.

Tras la reparación de la avería del cabezal de riego (día 189), todos los tratamientos se regaron al 120 % de la ETc durante una semana (días 190-196). Y aunque, Ψ_t también disminuyó en T_{CTL} durante los dos días sin riego, siempre mantuvo valores claramente superiores al resto de los tratamientos. Los tratamientos de riego deficitario constante, T_{RD80} y T_{RD60} , alcanzaron valores similares a T_{CTL} tras dos días de riego al 120 % ETc, mientras que T_{RDC20} necesitó cuatro días para igualar sus valores a T_{CTL} (Figura 6.9). Este comportamiento fue análogo al observado tras la reanudación del riego al 100 % de la ETc (día 255) una vez finalizado el período al 20 % (Figura 6.9). Resultados similares fueron observados en almendro por Goldhamer y Fereres (2001), en melocotonero por Goldhamer, *et al.* (1999), y en peral por Naor y Cohen (2003). Por lo tanto, Ψ_t fue más rápido en la detección de condiciones de disminución del estado hídrico del árbol que de recuperación del mismo, tanto cuando se parte de condiciones no limitantes de agua en el suelo o de déficit hídrico moderado-severo (día 197, déficit, y día 190, recuperación Figura 6.9).

La conductancia foliar tuvo un comportamiento similar al potencial de tallo, con valores medios estacionales entre 225 y 300 mmol m⁻² s⁻¹ y, generalmente, sin diferencias significativas entre T_{CTL} , T_{RD80} y T_{RD60} . En T_{RDC20} los niveles de g_l fueron similares a los del control, excepto en el periodo de reducción del riego al 20 %, disminuyendo a valores medios de 100 mmol m⁻² s⁻¹ (Figura 6.9). Las únicas diferencias significativas observadas en T_{RD60} con respecto al control tuvieron lugar en días aislados. Este hecho junto a lo observado en T_{RDC20} demuestra, que son necesarios altos déficit hídricos para conseguir una clara regulación estomática en esta especie (Romero *et al.*, 2004b).

Al objeto de completar el estudio de la influencia de los tratamientos de riego en los distintos parámetros estudiados, el día 224, cuando el tratamiento T_{RDC20} se venía regando al 20 % de la ETc durante 2 meses, se realizó un seguimiento diario con medidas cada 2 horas del potencial de tallo y la conductancia foliar.

La evolución diaria del potencial de tallo mostró, en todos los tratamientos, valores máximos antes del alba y mínimos ligeramente después del mediodía, sobre las 15:00 horas UT coincidiendo con el mínimo diámetro de tronco registrado con sensores LVDT (Figura 6.10). El nivel de recuperación de Ψ_t a última hora de la tarde fue evidente en los tratamientos más regados, mientras que en T_{RDC20} , las diferencias de Ψ_t respecto a primeras horas de la mañana triplicaban a las de T_{CTL} , T_{RD80} y T_{RD60} (0.77 MPa frente a 0.22 MPa). Esta ausencia de recuperación a lo largo del atardecer y durante la noche se tradujo en diferencias respecto al control de 0.59 y 1.13 MPa, al alba y mediodía, respectivamente, las que son acordes con el nivel de déficit

aplicado. La caída de Ψ_t en los tratamientos de déficit hídrico fue proporcional a la reducción de riego aplicada. Las máximas diferencias absolutas respecto al control tuvieron lugar a las 15:00 horas y fueron de 0.3, 0.49 y 1.31 MPa para T_{RD80} , T_{RD60} y T_{RDC20} , respectivamente.

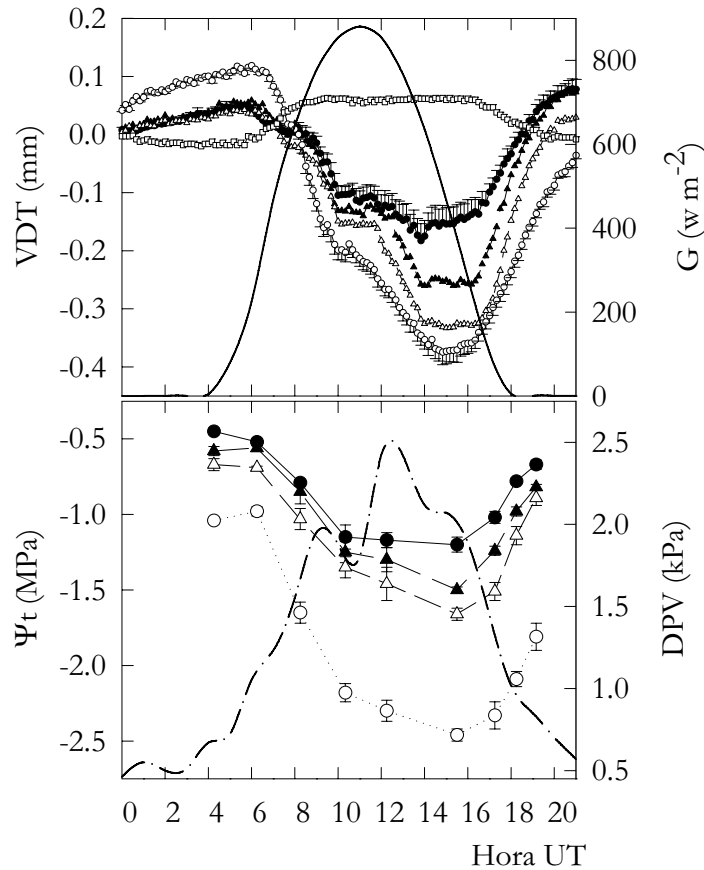


Figura 6.10. Evolución de las variaciones de diámetro de tronco (VDT), radiación global (G), déficit de presión de vapor (DPV) y potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_t) en los cuatro tratamientos de riego T_{CTL} (\bullet), T_{RD80} (\blacktriangle), T_{RD60} (\triangle) y T_{RDC20} (\circ) y en un tronco muerto (\square), durante el día 224.

Los máximos niveles de conductancia foliar (g_l) fueron alcanzados en torno a las 8:00 horas en todos los tratamientos, permaneciendo prácticamente constantes hasta las 17:00 en T_{CTL} , T_{RD80} y T_{RD60} , mientras que en T_{RDC20} se produjo un descenso gradual de g_l en las horas centrales del día, coincidiendo con la mayor demanda evaporativa (datos no mostrados).

La Figura 6.11 relaciona el diámetro de tronco con el potencial hídrico de tallo y muestra el grado de histéresis existente entre ambas variables en un día de alta demanda evaporante y para un determinado diámetro. Así, para un mismo potencial de tallo le corresponden dos diámetros según se considere que se ha llegado a ese diámetro a través de un proceso de pérdida de agua (mañana-primera hora de la tarde) o de ganancia de agua durante la tarde-

noche. Para un mismo Ψ_t el diámetro de tronco fue menor por la tarde que por la mañana, acentuándose el nivel de histéresis con el aumento del déficit hídrico soportado por los distintos tratamientos. Así mismo, el desfase entre ambos parámetros aumentó con la intensidad del estrés hídrico, indicando la mayor duración de un flujo de agua positivo desde el reservorio del tronco hacia el xilema. Este fenómeno es considerado como un mecanismo de adaptación a situaciones limitantes de agua en el suelo (Molz y Klepper, 1973; Brough *et al.*, 1986; Gènard *et al.*, 2001; Doltra *et al.*, 2007), ya que permite el mantenimiento de los procesos transpirativos durante un periodo de tiempo mayor. Los bucles correspondientes a los tratamientos T_{CTL} y T_{RD60} muestran como el crecimiento en diámetro de tronco tiene lugar durante las últimas horas del día y la noche.

Variaciones de diámetro de tronco

Las variaciones del diámetro de tronco registradas a partir de los sensores LVDT reflejaron el régimen hídrico de cada uno de los tratamientos ensayados. El crecimiento acumulado (CA) en diámetro de tronco, evaluado a partir de los máximos diámetros (MXTD), fue de 27, 25, 21 y 22.5 mm en T_{CTL} , T_{RD80} , T_{RD60} y T_{RDC20} , respectivamente (Figura 6.12). Las tasas medias diarias de crecimiento de tronco (TCD) en T_{CTL} , T_{RD80} y T_{RD60} , fueron prácticamente constantes (0.13, 0.12 y 0.09 mm día⁻¹) durante todo el ciclo de crecimiento, tal como era de esperar en árboles jóvenes (4º año de injerto). Sin embargo, en T_{RDC20} con valores iniciales similares a T_{CTL} se produjo una drástica disminución con la reducción del riego al 20 % (0.03 mm día⁻¹), lo que demuestra la sensibilidad de este parámetro al déficit hídrico (Moriana y Fereres, 2002; Naor *et al.*, 2006; Ortuño *et al.*, 2006a; Ortuño *et al.*, 2006b; García-Orellana *et al.*, 2007). En esta misma línea, y tras la restitución del riego al 100 % (día 255), T_{RDC20} experimentó TCD superiores a las de T_{CTL} , situando su dinámica de crecimiento por encima de T_{RD60} (Figura 6.12). Esta pronta respuesta de TCD al aumento de los aportes hídricos fue igualmente observada por Moriana y Fereres (2002), en olivos jóvenes.

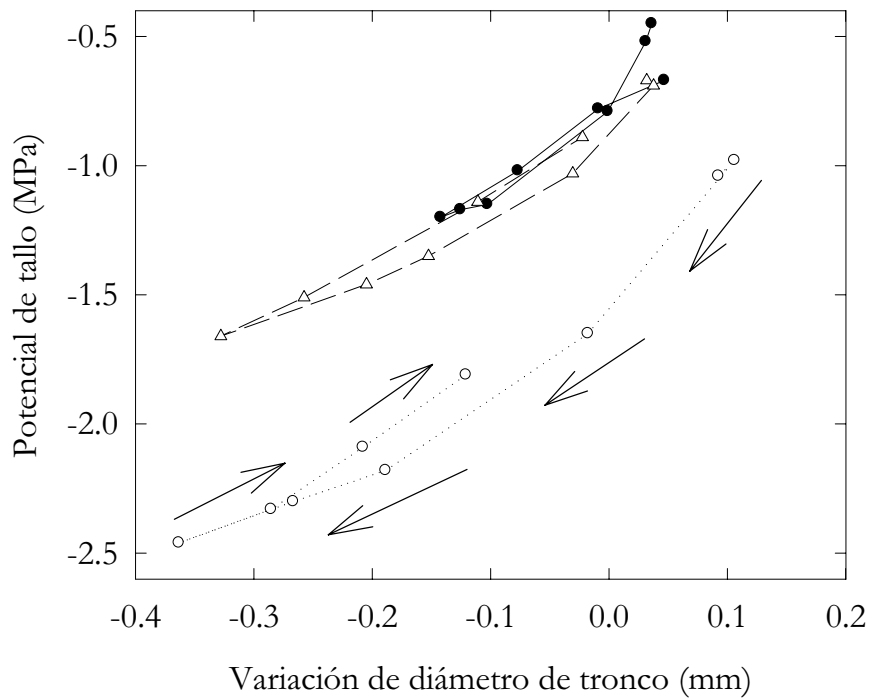


Figura 6.11. Relación a lo largo de una jornada (día 224) entre el potencial hídrico de tallo y las variaciones de diámetro de tronco, para los tratamientos de riego T_{CTL} (—●—), T_{RD60} (—△—) y T_{RDC20} (---○---). Las flechas indican el sentido horario de la relación entre ambos parámetros.

La máxima contracción diaria de diámetro de tronco (MCD) aumentó progresivamente, desde mediados de marzo (plena floración) hasta mediados-finales de julio, coincidiendo con el aumento de la demanda evaporante y el crecimiento de los brotes (Figura 6.3 y 6.13). A partir de julio, mes en el que se alcanzaron los máximos valores de MCD, se invierte la tendencia hasta experimentar mínimos valores a mediados de octubre. MCD se vio afectada por el tratamiento de riego. Así y a partir de primeros de mayo T_{RD80} y T_{RD60} , con MCD similares, presentaron valores superiores a T_{CTL} . Durante el periodo de riego al 20 % ETc, la MCD de T_{RDC20} fue mayor que la de T_{CTL} , T_{RD80} y T_{RD60} , con valores medios de 465 μm frente a las 222, 300, 309 μm del T_{CTL} , T_{RD80} y T_{RD60} , respectivamente. Estas MCD son muy similares a las observadas por Goldhamer y Fereres (2001) y Fereres y Goldhamer (Fereres y Goldhamer, 2003) en almendros de 4 y 6 años, respectivamente. El incremento de la MCD en los árboles control, en el transcurso de un año (2002-2003) y para el período junio-agosto fue del 39 %, de acuerdo con los datos recogidos en Nortes *et al.* (2005). Durante 2004 no se observó incremento alguno de la MCD en los estos mismos árboles, a pesar del notable crecimiento vegetativo observado.

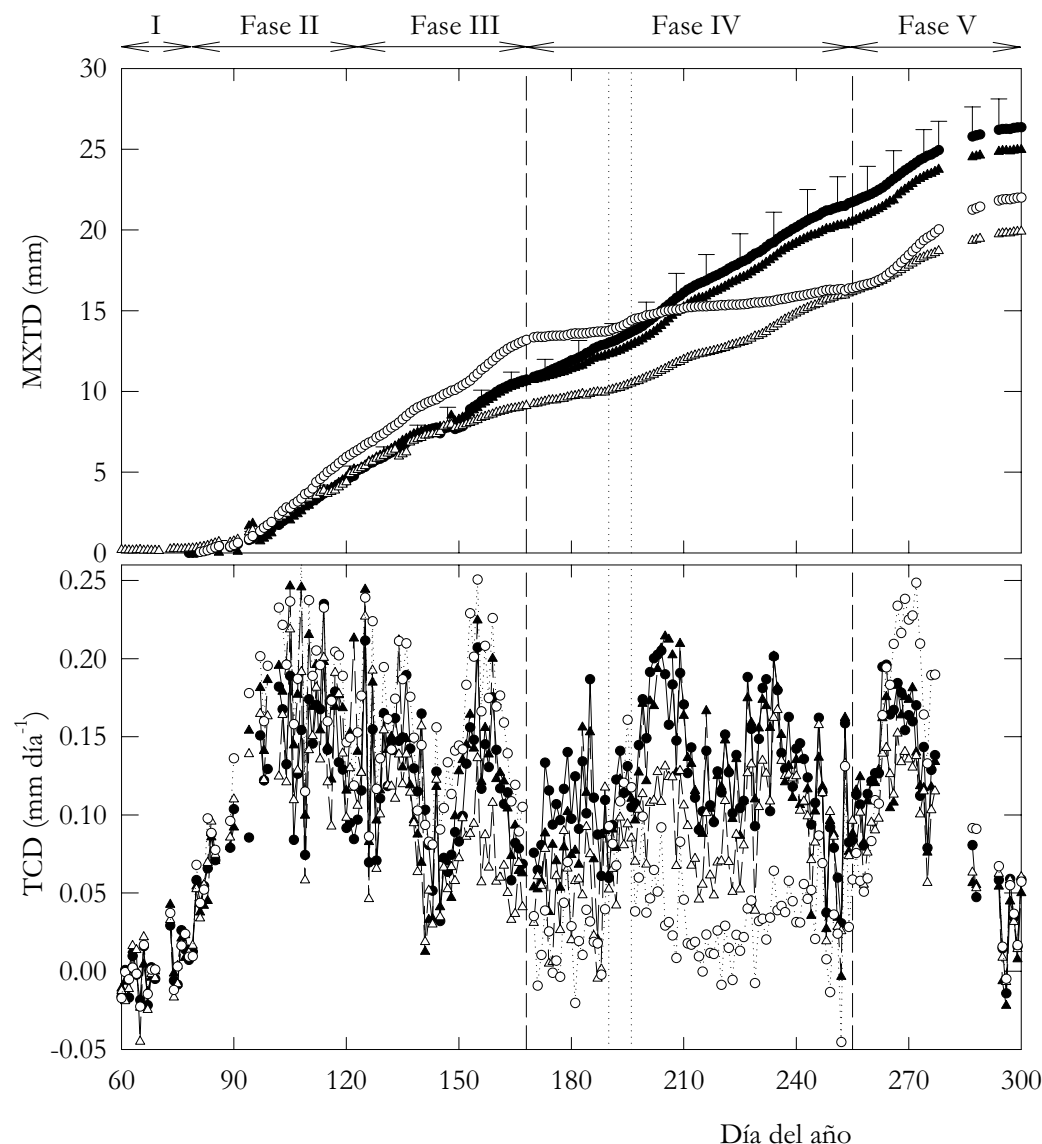


Figura 6.12. Evolución estacional del diámetro máximo (MXTD) y de la tasa de crecimiento diaria de tronco (TCD), en los tratamientos T_{CTL} (\bullet), T_{RD80} (\blacktriangle), T_{RD60} (\triangle) y T_{RDC20} (\circ). Cada punto corresponde a la media de 6 sensores LVDT \pm ES. La línea de trazo discontinuo indica el inicio y fin del periodo al 20 % ETc en T_{RDC20} , y la de puntos la semana de riego al 120 % de la ETc en todos los tratamientos.

Durante el período de recuperación, días 190-196, los tratamientos deficitarios igualaron la TCD y MCD, en el mismo día de cambio de riego a las del control. Análogo comportamiento fue observado en T_{RDC20} tras la reanudación del riego al 100 % de la ETc, día 255 (Figuras 6.12 y 6.13) (tiempos de riego para el periodo 190-196 de 12:00 a 14:40 y de 23:00 a 1:40 y para el día 255 de 23:00 a 1:50), evidenciando una recuperación más rápida que Ψ_t . En este último tratamiento, el mayor tiempo requerido por Ψ_t para su recuperación es consecuente con el déficit hídrico severo alcanzado (Ψ_t se mantuvo entre -2.0 y -2.2 MPa, Figura 6.9). Esta demora para igualar sus niveles a los T_{CTL} fue acompañada de una importante regulación estomáca

(Figura 6.9), la que permaneció un tiempo después de que se hubiese igualado Ψ_t .

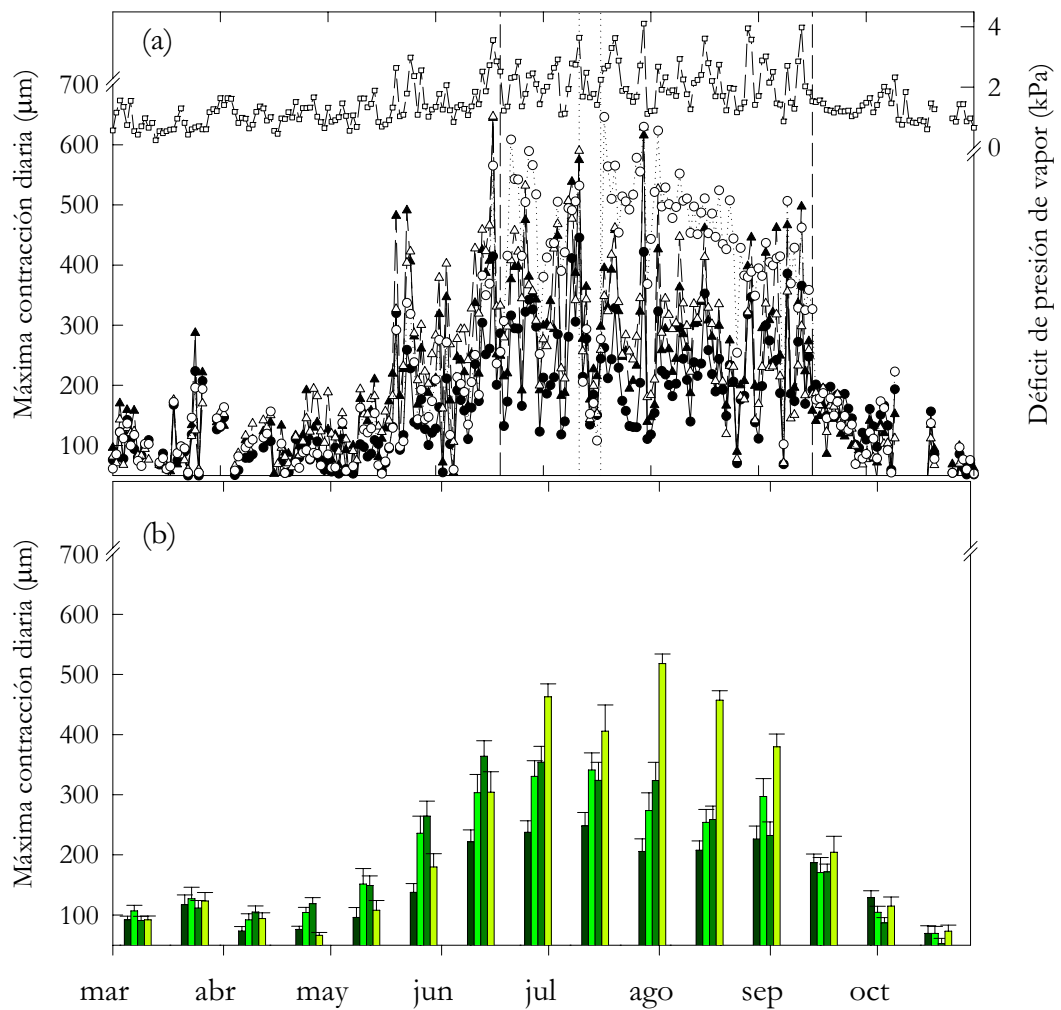


Figura 6.13. Evolución estacional de la máxima contracción diaria (MCD) y déficit de presión de vapor máximo diario (DPV) (a) y máxima contracción diaria quincenal, en T_{CTL} (\bullet ; \blacksquare), T_{RD80} (\blacktriangle ; \blacksquare), T_{RD60} (\triangle ; \blacksquare) y T_{RDC20} (\circ ; \blacksquare) (b). Cada punto corresponde a la media de 6 sensores LVDT \pm ES. La línea de trazo discontinuo indica el inicio y fin del periodo al 20 % ETC en T_{RDC20} , y la de puntos la semana de riego al 120 % de la ETC.

Este desfase entre Ψ_t y g_l ha sido observado en otras especies leñosas: en naranjo (Ferrer *et al.*, 1979) y en limonero (Domingo, 1994), bajo estrés hídrico severo. Este retraso relativo en la recuperación de g_l puede ser atribuido a la acción del ácido abscísico producido en las raíces durante el período de déficit (Davies y Zhang, 1991). En cualquier caso este hecho puede considerarse como un mecanismo de seguridad que permite al árbol alcanzar la recuperación de la turgencia celular más rápidamente (Mansfield y Davies, 1981).

El estudio comparativo del grado de sensibilidad al déficit hídrico de los distintos indicadores controlados se realizó de acuerdo a Goldhamer y Fereres (2001). Para ello, se determinó el ratio “intensidad de señal/ruido”; donde la intensidad de señal viene dada por el valor de la variable relativo al de árboles bajo condiciones no limitantes de agua en el suelo, y el ruido, por el coeficiente de variación de la variable medida. En la tabla 6.1 se recogen los valores medios de señal y ruido, durante la fase de rápida acumulación de materia seca del grano (junio-agosto), para los distintos tratamientos de riego ensayados. Los mayores valores de señal correspondieron a TCD, seguidos de los de MCD y a continuación Ψ_t y g_i . Sin embargo, los coeficientes de variación medios aumentaron en la secuencia Ψ_t , g_i , MCD y TCD; con valores del 7, 20, 21 y 40 % respectivamente. El comportamiento fue similar al indicado por Intrigliolo y Castel (2004), en ciruelo; Nortes *et al.* (2005) y Goldhamer y Fereres (2001), en almendro. De modo, que el orden de mayor a menor sensibilidad fue: $\Psi_t > MCD > g_i > TCD$, orden que concuerda con el observado por Intrigliolo y Castel (2004) en ciruelo y que difiere del encontrado por Goldhamer y Fereres (2001), en almendro; probablemente debido a que el sistema de riego empleado por éstos últimos autores fue diferente y el porcentaje de suelo mojado superior al 25 % de nuestro ensayo.

Tabla 6.1. Valores medios del ratio ‘Señal/Ruido’ para los diferentes índices de estrés evaluados. Junio – mediados de septiembre de 2003.

		g_i	Ψ_t	MCD	TCD
T_{RD80}	Señal (S)	0.92	1.11	1.31	1.05
	Ruido (R)	0.15	0.08	0.2	0.23
	Ratio (S/R)	6.13	13.88	6.55	4.57
T_{RD60}	Señal (S)	0.87	1.2	1.46	1.63
	Ruido (R)	0.18	0.08	0.27	0.48
	Ratio (S/R)	4.83	15.00	5.41	3.40
T_{RDC20}	Señal (S)	0.5	1.83	1.95	3.39
	Ruido (R)	0.27	0.07	0.18	0.45
	Ratio (S/R)	1.85	26.14	10.83	7.53

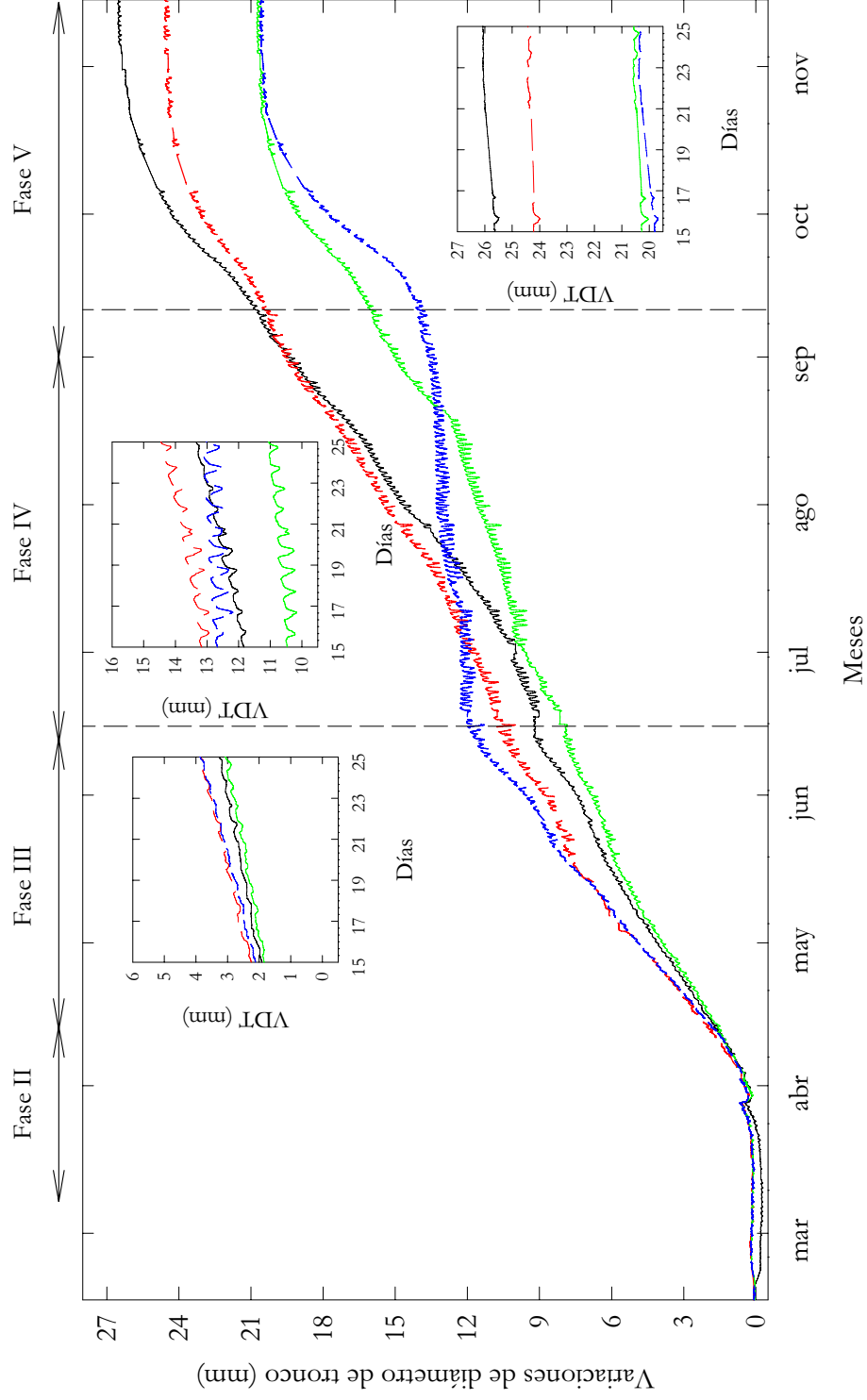


Figura 6.14. Evolución anual de las variaciones de diámetro de tronco (VDT), en los cuatro tratamientos de riego. Cada curva corresponde a un sensor LVDT representativo de cada tratamiento, T_{CTL} (—), T_{RD80} (—), T_{RD60} (—) y T_{RD20} (—). La línea discontinua muestra el inicio y final del periodo de reducción del riego en T_{RD20} .

Relaciones entre los diferentes indicadores de estrés hídrico

A fin de determinar la utilidad de TCD y MCD para ser empleados como indicadores para la programación del riego, se obtuvieron diferentes relaciones con otros parámetros clásicos, del estado energético del agua en la planta, potencial al alba (Ψ_a), potencial de tallo a mediodía (Ψ_t) y potencial de presión de hojas cubierta (Ψ_{pt}) y sin cubrir (Ψ_p).

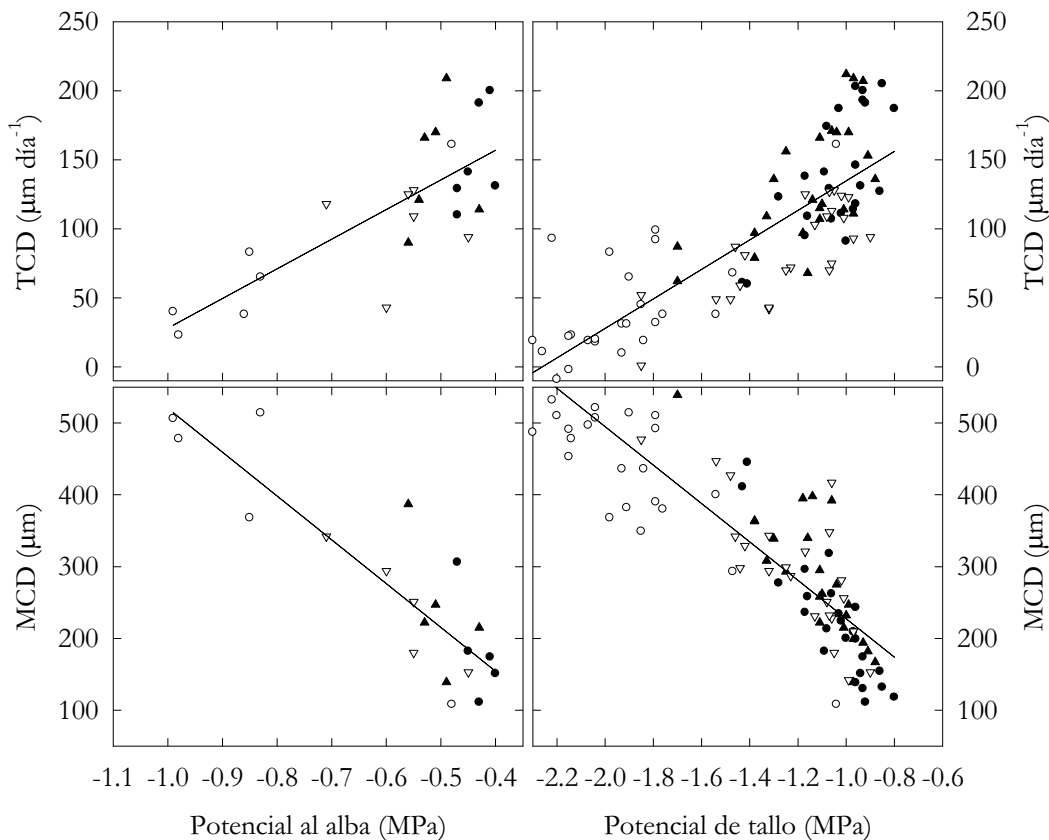


Figura 6.15. Relaciones entre TCD y MCD y el potencial hídrico foliar al alba (Ψ_a) y el de tallo a mediodía (Ψ_t), durante el periodo experimental., para los 4 tratamientos de riego: T_{CTL} (●), T_{RD80} (▲), T_{RD60} (▽) y T_{RDC20} (○).

El crecimiento diario (TCD), determinado a partir de los máximos diámetros, y la máxima contracción diaria (MCD) mostraron correlaciones altamente significativas tanto con el potencial al alba como con el de tallo a mediodía (Figura 6.15 y Tabla 6.2). Sin embargo, los valores de MCD fueron mejor explicados por Ψ_a y Ψ_t que los de TCD. Esta misma pauta fue observada en las relaciones con el potencial de presión a mediodía, tanto en hojas sin cubrir como en hojas cubiertas (Figura 6.16 y Tabla 6.2).

Tabla 6.2 Valores de los parámetros de las relaciones máxima contracción diaria (MCD, μm) y crecimiento diario de tronco (TCD, $\mu\text{m día}^{-1}$) versus potencial hídrico foliar al alba (Ψ_a), de tallo a mediodía (Ψ_t) y de presión en hojas expuestas y cubiertas (Ψ_p , Ψ_{pt}), en MPa.

Relación ($y = y_0 + m x$)	m	y_0	R^2
MCD vs Ψ_a	-610	-90	0.78***
TCD vs Ψ_a	214	242	0.57**
MCD vs Ψ_t	-270	-41	0.75***
TCD vs Ψ_t	106	241	0.63**
MCD vs Ψ_{pt}	-423	923	0.65**
MCD vs Ψ_p	417	818	0.72***

Puesto que ambos parámetros (MCD y TCD) mostraron relaciones muy similares, a nivel estacional, frente al estado energético del agua en la planta; adicionalmente, se obtuvo la relación de MCD y TCD frente a la demanda climática (Figura 6.17), a fin de determinar el parámetro de mayor utilidad como herramienta para la programación del riego. La relación MCD vs ETo-PM, de tipo potencial, fue altamente significativa para todos los tratamientos de riego ensayados. Distinto comportamiento fue observado en TCD (datos no mostrados), presentando coeficientes de determinación no significativos para todos los tratamientos. Este comportamiento diferente pudo ser debido a la disminución de las tasas de crecimiento, consecuencia de la aplicación del déficit hídrico y por la competencia entre órganos por los fotoasimilados y nutrición hídrica. Todo ello hace que, en árboles en producción, MCD sea más adecuada con fines de programación del riego que TCD. Resultados similares para MCD y TCD fueron obtenidos en almendro por Goldhamer y Fereres (2004) y en ciruelo Japonés por Intrigliolo y Castel (2004; 2005b).

Además, y con el objeto de validar la idoneidad del empleo de MCD como indicador de estrés hídrico, se realizó el análisis de regresión entre MCD y Ψ_t durante toda la estación de riego (Figura 6.18 y Tabla 6.3), ya que Ψ_t es considerado por muchos autores como un indicador de referencia del estado hídrico de la planta (McCutchan y Shackel, 1992; Naor *et al.*, 1995; 2001; 2003; 2004; 2006; Shackel *et al.*, 1997). La relación entre estos parámetros fue significativa, con coeficientes de determinación altos en los tratamientos T_{CTL} y T_{RD80} ($R^2 = 0.7^{***}$ y 0.68^{***}), y sensiblemente inferiores en los tratamientos más deficitarios T_{RD60} y T_{RDC20} ($R^2 = 0.59^{**}$ y 0.3^{**}). Estos valores indican la

bondad de MCD como herramienta de evaluación de los primeros síntomas de déficit hídrico y mientras éstos permanezcan dentro del intervalo déficit ligero-moderado.

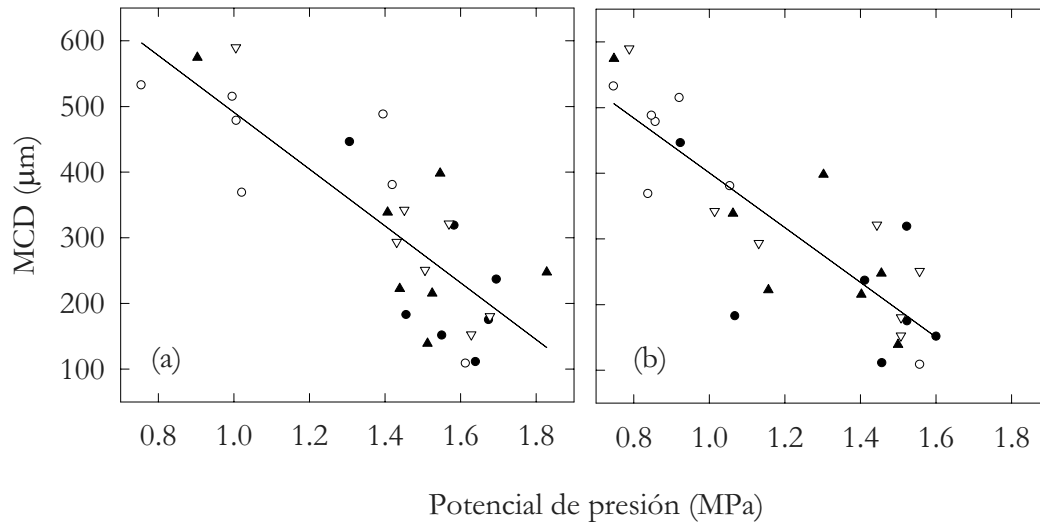


Figura 6.16. Relaciones entre MCD y el potencial de presión a mediodía: (a) hojas cubiertas (Ψ_{pi}) y (b) sin cubrir (Ψ_p), durante el periodo experimental y para los 4 tratamientos de riego T_{CTL} (●), T_{RD80} (▲), T_{RD60} (▽) y T_{RDC20} (○).

A conclusiones similares llegaron Fereres y Goldhamer (2003) en trabajos con almendros adultos, Intrigliolo y Castel (2004) en ciruelo, Moreno *et al* (2006) en olivo y Ortuño *et al* (2006b) y García-Orellana *et al.* (2007) en limonero. La baja relación observada en T_{RDC20} , tratamiento de déficit hídrico severo, pudo ser debida a un importante agotamiento de las reservas del árbol. Este agotamiento limitaría la capacidad de contracción de los tejidos elásticos del tronco (Gènard *et al.*, 2001), afectando a la relación MCD *vs* Ψ_t . De ahí, que a partir de un valor de -1.8 MPa de Ψ_t las disminuciones de Ψ_t no se traduzcan en aumentos proporcionales de MCD.

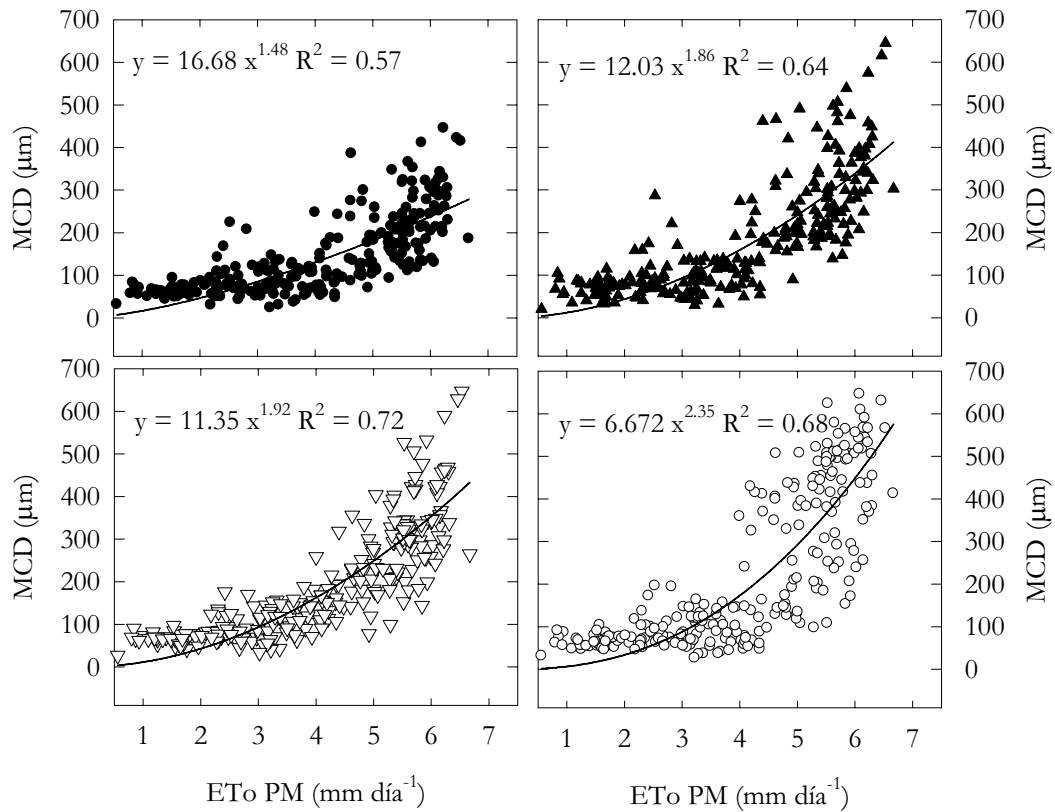


Figura 6.17. Relación entre la evapotranspiración de referencia Penman Monteith ($ET_o PM$) y la máxima contracción diaria de tronco (MCD) durante el periodo experimental, para los 4 tratamientos de riego, T_{CTL} (●), T_{RD80} (▲), T_{RD60} (▽) y T_{RDC20} (○).

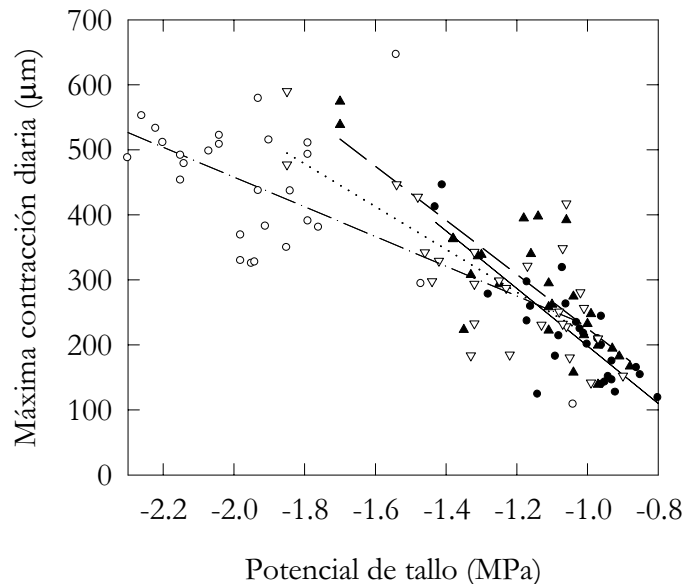


Figura 6.18. Relación entre la máxima contracción diaria de tronco (MCD) y el potencial de tallo a mediodía (Ψ) durante el periodo experimental, para los 4 tratamientos de riego, T_{CTL} (●), T_{RD80} (▲), T_{RD60} (▽) y T_{RDC20} (○).

La Figura 6.19, muestra el análisis estacional de las regresiones de Ψ_t y MCD sobre DPV para los distintos tratamientos ensayados. MCD *vs* DPV mostró en todos los tratamientos coeficientes de determinación altos y superiores a los de Ψ_t (Tabla 6.4), lo que indica que MCD tiene una mayor dependencia de DPV que Ψ_t . Al ser ambos parámetros, MCD y DPV, fácilmente automatizables, es factible establecer protocolos de manejo de riego, en función del periodo fenológico, a partir de las relaciones MCD *vs* DPV.

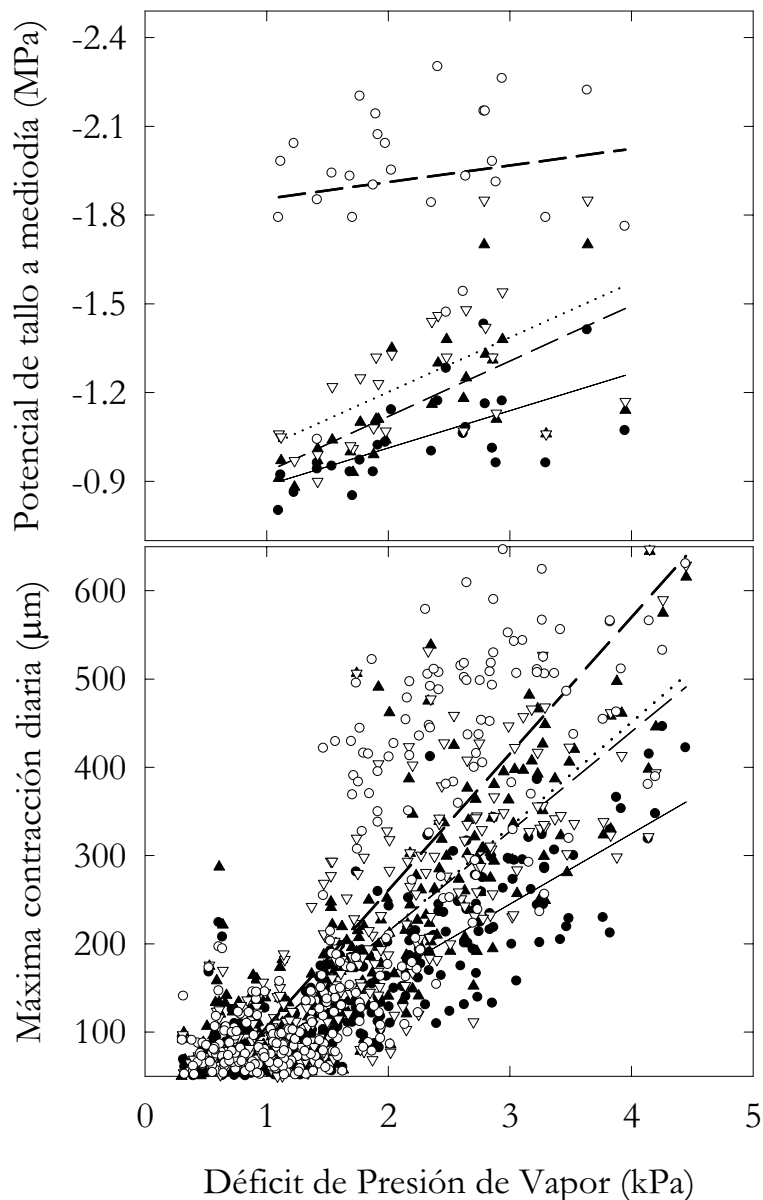


Figura 6.19. Relaciones entre el déficit de presión de vapor máximo diario (DPV) y el potencial de tallo a mediodía (Ψ_t) (a) y la máxima contracción diaria (MCD) (b) para los distintos tratamientos de riego, T_{CTL} (●), T_{RD80} (▲), T_{RD60} (▼) y T_{RDC20} (○).

Tabla 6.3. Relaciones estacionales entre la máxima contracción diaria (MCD, μm) y el potencial tallo (Ψ_t , MPa), para los cuatro tratamientos de riego.

Tratamiento ($y = y_0 + m x$)	m	y_0	R^2
$\text{MCD}_{\text{TCTL}} \text{ vs } \Psi_t$	-441	-243	0.696***
$\text{MCD}_{\text{TRD80}} \text{ vs } \Psi_t$	-416	-191	0.687***
$\text{MCD}_{\text{TRD60}} \text{ vs } \Psi_t$	-328	-113	0.586**
$\text{MCD}_{\text{TRDC20}} \text{ vs } \Psi_t$	-228	0.6	0.307**

La Figura 6.20 recoge el análisis de regresión lineal MCD *vs* DPV a nivel mensual, para los tratamientos T_{CTL} y T_{RD80} , a fin de reducir los posibles errores debidos a los cambios que experimenta MCD a lo largo de la estación y que suelen depender principalmente del periodo fenológico y de la competencia existente entre distintos órganos. Fereres y Goldhamer (2003) e Intrigliolo y Castel (2004), en almendro y ciruelo respectivamente, mejoraron substancialmente la relación MCD *vs* DPV al delimitar la componente estacional.

Tabla 6.4. Relaciones entre el potencial de tallo (Ψ_t , MPa) y la máxima contracción diaria (MCD, μm) frente al déficit de presión de vapor máximo a mediodía (DPV, kPa), para los cuatro tratamientos de riego.

Relación ($y = y_0 + m x$)	m	y_0	R^2
$\Psi_t \text{ vs DPV } (T_{\text{CTL}})$	-0.12	-0.76	0.38***
$\Psi_t \text{ vs DPV } (T_{\text{RD80}})$	-0.19	-0.74	0.44***
$\Psi_t \text{ vs DPV } (T_{\text{RD60}})$	-0.18	-0.83	0.32**
$\Psi_t \text{ vs DPV } (T_{\text{RDC20}})$	-0.05	-1.79	0.02 ^{n.s}
$\text{MCD vs DPV } (T_{\text{CTL}})$	79	5	0.73***
$\text{MCD vs DPV } (T_{\text{RD80}})$	113	-12	0.71***
$\text{MCD vs DPV } (T_{\text{RD60}})$	118	-24	0.71***
$\text{MCD vs DPV } (T_{\text{RDC20}})$	154	-49	0.69***

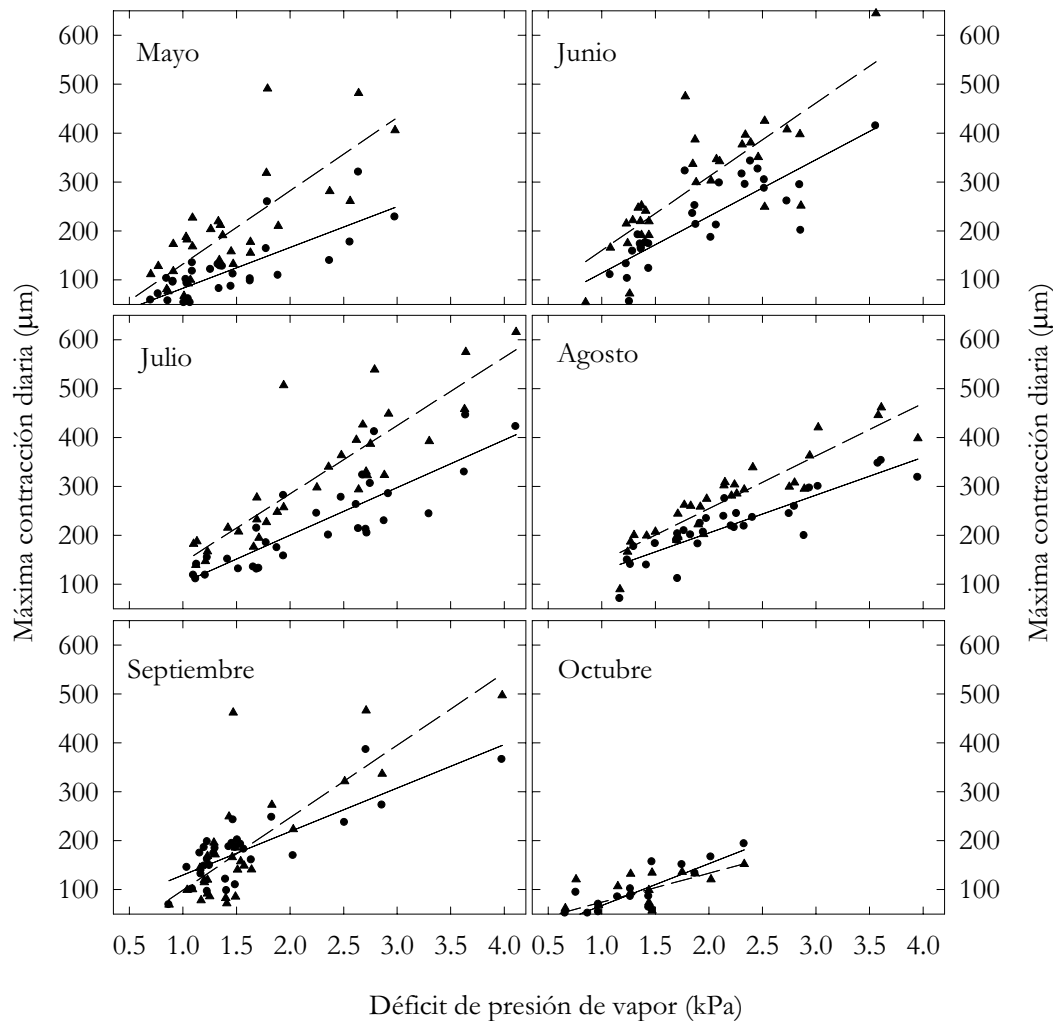


Figura 6.20. Relaciones mensuales entre la máxima contracción diaria de tronco (MCD) y el déficit de vapor máximo diario (DPV) para los tratamientos de riego T_{CTL} (●) y T_{RD80} (▲).

El manejo del riego vendría dado en función de la máxima contracción diaria de referencia (MCD_{ref}), que sería la obtenida a partir de la relación en cada uno de los periodos seleccionados entre MCD y DPV durante el 2003 para los tratamientos T_{CTL} y T_{RD80} (Figura 6.20 y Tabla 6.5), delimitando como límite superior el valor correspondiente a T_{RD80} y límite inferior el de T_{CTL} , a fin de evitar exceso de aportes hídricos, como altos déficit hídricos. De este modo y a partir de esta información, se regará a fin de mantener en función del DPV actual, el valor de MCD comprendido entre las correlaciones anteriores, aumentando o disminuyendo un porcentaje determinado del volumen de riego programado.

Tabla 6.5. Relaciones mensuales entre la máxima contracción diaria de tronco (MCD) y el déficit de vapor máximo diario (DPV) para los tratamientos de riego T_{CTL} (●) y T_{RD80} (▲)

$y = mx + b$	MCD_{ref}	m	y_0	R^2
Mayo	T_{CTL}	83 ^{***}	-0.3 ^{***}	0.63
	T_{RD80}	149	-17	0.64
Junio	T_{CTL}	116 ^{**}	-19 ^{**a}	0.71
	T_{RD80}	150	9.1	0.65
Julio	T_{CTL}	97 ^{**}	5	0.73
	T_{RD80}	139	5	0.76
Agosto	T_{CTL}	77 ^{**}	49	0.77
	T_{RD80}	107 ^a	38	0.84
Septiembre	T_{CTL}	88 ^{***}	41 ^{***}	0.66
	T_{RD80}	148	-49	0.63
Octubre	T_{CTL}	85	-17 ^{**}	0.72
	T_{RD80}	59	15	0.51

6.4.3. Conclusiones

El potencial hídrico de tallo a mediodía, la máxima contracción y la tasa de crecimiento diaria de tronco fueron sensibles a los cambios de contenido de humedad del suelo como consecuencia del régimen hídrico, por lo que pueden ser considerados como herramientas útiles para el manejo del riego de almendros en crecimiento.

En respuesta a los distintos niveles de déficit hídrico ensayados, los árboles desarrollaron mecanismos de evitación basados en la regulación estomática que resultó favorecida por los aumentos de la resistencia al flujo de agua a través de la planta, y por posibles emisiones de señales químicas desde las raíces.

Tras el estrés, la persistente regulación estomática favoreció la rápida rehidratación de los tejidos foliares, por lo que los parámetros derivados de las fluctuaciones de diámetro de tronco, máxima contracción y tasa de crecimiento diaria detectaron más rápidamente condiciones de suministro

hídrico adecuado que el potencial hídrico de tallo. Mientras que fueron igualmente válidos para la detección de agotamientos de agua en suelo como consecuencia de la reducción de las dosis de riego.

El orden de mayor a menor sensibilidad para los tres indicadores estudiados fue $\Psi_t > \text{MDC} > \text{TCD}$, como consecuencia de la menor variabilidad de las medidas de potencial hídrico de tallo a mediodía. Sin embargo, la rápida detección de los cambios de humedad por MCD y TCD en conjunción con su seguimiento en tiempo real les convierte en útiles herramientas para el manejo y automatización del riego.

La estrecha relación observada a nivel estacional y mensual entre la máxima contracción diaria (MCD) y el déficit de presión de vapor (DPV), podría ser utilizada como herramienta de programación automática del riego.

Bibliografía

- Abrisqueta, J.M., Hernansáez, A. y Franco, J.A. 1994. Root dynamics of young almond trees under different drip-irrigation rates. *Journal of Horticultural Science* (69):237-242.
- Alarcón, J.J., Sánchez Blanco, M.J., Bolarín, M.C. y Torrecillas, A. 1993. Water relations and osmotic adjustment in *lycopersicon-esculentum* and *l-pennellii* during short-term salt exposure and recovery. *Physiologia Plantarum* (89):441-447.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., y Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO, Rome: FAO - irrigation and drainage paper 56.
- Allen, R.G. y Fisher, D.K. 1990. Low-cost electronic weighing lysimeters. *Transactions of the Asae* (33):1823-1833.
- Ameglio, T., Archer, P., Cohen, M., Valancogne, C., Daudet, F.A., Dayau, S. y Cruziat, P. 1998. Significance and limits in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. *Plant and Soil* (207):155-167.
- Aslam, M., Lowe, S.B. y Hunt, L.A. 1977. Effect of leaf age on photosynthesis and transpiration of cassava (*manihot-esculenta*). *Canadian Journal of Botany-Revue Canadienne de Botanique* (55):2288-2295.
- Assaf, R., Levin, I. y Bravdo, B.A. 1989. Optimization of water for fruit-trees by a computerized irrigation system. *Agronomie* (9):451-456.
- Aussenac, G. y Valette, J.C. 1982. Summer water status of *cedrus-atlantica manetti*, *quercus-ilex* and *quercus-pubescens* willd and of some pinetrees on the Mont-Ventoux. *Annales des Sciences Forestieres* (39):41-62.
- Ayers, R.S. y Westcot, D.W. 1987. La calidad del agua en la agricultura. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Baille, A. 1992. Water status monitoring in greenhouse crops. *Acta Horticulturae* (304):15-27.
- Banuls, J. y Primomillo, E. 1992. Effects of chloride and sodium on gas-exchange parameters and water relations of citrus plants. *Physiologia Plantarum* (86):115-123.

- Besset, J., Gènard M., Girard T., Serra, V. y Bussi, C. 2001. Effect of water stress applied during the final stage of rapid growth on peach trees (cv. Big-Top). *Scientia Horticulturae* (91):289-303.
- Boland, A.M., Mitchell, P.D., Jerie, P.H. y Goodwin, I. 1993. The effect of regulated deficit irrigation on tree water-use and growth of peach. *Journal of Horticultural Science* (68):261-274.
- Bolarín, M.C. y Caro, M. 1995. Aguas de riego. En: Álvarez-Cobelas, M y Cabrera, F. (ed.) *La calidad de las aguas continentales españolas: estado actual e investigación*. Logroño: Geoforma Ediciones.
- Breda, N.J.J. 2003. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany* (54):2403-2417.
- Bresler, E. y Hoffman, G.J. 1986. Irrigation management for soil-salinity control - theories and tests. *Soil Science Society of America Journal* (50):1552-1559.
- Brough, D.W., Jones, H.G. y Grace, J. 1986. Diurnal changes in water-content of the stems of apple-trees, as influenced by irrigation. *Plant Cell and Environment* (9):1-7.
- Brown, D.S. 1953. The effects of irrigation on flower bud development and fruiting in the apricot. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science* (61):119-124.
- Brown, P.H. y Uriu, K. 1996. Nutrition deficiencies and toxicities: diagnosis and correcting imbalances. En: Micke WC. (ed.). *Almond production manual*. University of California: Division of Agriculture and Natural Resources. p 179-188.
- Brun, C.A., Raese, J.T. y Stahly, E.A. 1985. Seasonal response of anjou pear trees to different irrigation regimes .2. Mineral-composition of fruit and leaves, fruit disorders, and fruit-set. *Journal of the American Society for Horticultural Science* (110):835-840.
- Campbell, C.S., Campbell, G.S., Cobos, D.R. y Teare, B. 2006. Performance of a new, low-cost soil moisture, temperature, and electrical conductivity sensor. *HortScience* (41):1024.
- Campbell, G.S. 1988. Soil water potential measurement - An overview. *Irrigation Science* (9):265-273.

- Campbell, G.S. y Gardner, W.H. 1971. Psychrometric measurement of soil water potential - temperature and bulk density effects. *Soil Science Society of America Proceedings* (35):8-&.
- Caspari, H.W., Behboudian, M.H. y Chalmers, D.J. 1994. Water-use, growth, and fruit yield of Hosui Asian pears under deficit irrigation. *Journal of the American Society for Horticultural Science* (119):383-388.
- Castel, J.R. y Fereres, E. 1982. Responses of young almond trees to two drought periods in the field. *Journal of Horticultural Science* (57):175-187.
- Catlin, P.B. 1996. Root systems and root physiology. En: Micke, W.C. (ed.). *Almond production manual*. University of California: Division of Agricultural and Natural Resources. p 107-112.
- Chalmers, D.J., Burge, G., Jerie, P.H. y Mitchell, P.D. 1986. The mechanism of regulation of Bartlett pear fruit and vegetative growth by irrigation withholding and regulated deficit irrigation. *Journal of the American Society for Horticultural Science* (111):904-907.
- Chalmers, D.J., Mitchell, P.D. y Van Heek, L.A.G. 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.
- Chanzy, A., Bertuzzi, P., Bruckler, L., y Gaudu, J.C. 1997. Mesure de la teneur en eau et du potentiel hydrique dans le sol. En: *L'eau dans l'espace rural: production végétale et qualité de l'eau*. Riou, C., Bonhomme, R., Chassin, P., Neveu, A. y Papy, F. (ed.). Paris: INRA editions. p 143-152.
- Chen, J.M. y Black, T.A. 1992. Defining leaf-area index for non-flat leaves. *Plant Cell and Environment* (15):421-429.
- Chone, X., van Leeuwen, C., Dubourdieu, D. y Gaudillere, J.P. 2001. Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status. *Annals of Botany* (87):477-483.
- Christen, P. 1969. Seasonal changes and distribution of nutritional elements in Thompson Seedless grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture* (20):176-&.
- Cochard, H. 1992. Vulnerability of several conifers to air-embolism. *Tree Physiology* (11):73-83.

- Cochard, H. 2006. Cavitation in trees. *Comptes Rendus Physique* (7):1018-1026.
- Cohen, M., Goldhamer, D.A., Fereres, E., Girona, J. y Mata, M. 2001. Assessment of peach tree responses to irrigation water deficits by continuous monitoring of trunk diameter changes. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* (76):55-60.
- Cruziat, P., Cochard, H. y Améglio, T. 2002. Hydraulic architecture of trees: main concepts and results. *Annals of Forest Sciences* (59):723-752.
- Daudet, F.A. y Vachaud, G. 1977. Neutronic measure of water stock in soil - applications to determination of water-balance. *Annales Agronomiques* (28):503-519.
- Davies, W.J. y Zhang, J. 1991. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Annual Review of Plant Physiology* (42):55-76.
- 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.
- Dejong, T.M. y Grossman, Y.L. 1994. A supply and demand approach to modeling annual reproductive and vegetative growth of deciduous fruit trees. *HortScience* (29):1435-1442.
- Del Amor, F., Torrecillas, A., Ruiz-Sánchez, M.C. y Gómez, J. 1987. Respuesta del almendro al riego de alta frecuencia. *Fruticultura Profesional* (11):77-87.
- Demiral, M.A. 2005. Comparative response of two olive (*Olea europaeae* L.) cultivars to salinity. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* (29):267-274.
- Dodd, I.C. 2005. Root-to-shoot signalling: Assessing the roles of 'up' in the up and down world of long-distance signalling in planta. *Plant and Soil* (274):251-270.
- Doltra, J., Oncins, J.A., Bonany, J. y Cohen, M. 2007. Evaluation of plant-based water status indicators in mature apple trees under field conditions. *Irrigation Science* (25):351-359.

- Domingo, R. 1994. Respuesta del limonero Fino al riego deficitario controlado. Aspectos fisiológicos. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia. 237 p.
- Domingo, R., Nortes, P.A., Egea, G., Torres, R. y Pérez-Pastor, A. 2005. Utilización de sensores en planta para la programación del riego y uso eficiente del agua en la agricultura. *Vida Rural* (217):42-46.
- Domingo, R., Ruiz-Sánchez, M.C., Nortes, P.A., Torrecillas, A. y 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. y Torrecillas, A. 1996. Water relations, growth and yield of Fino lemon trees under regulated deficit irrigation. *Irrigation Science* (16):115-123.
- Doorenbos, J. y Pruitt, W.O. 1977. *Crop water requirements*. Roma: FAO.
- Doorenbos, J y Pruitt, W.O. 1986. *Las necesidades de agua de los cultivos*. Roma.
- Downton, W.J.S. y Millhouse, J. 1983. Turgor maintenance during salt stress prevents loss of variable fluorescence in grapevine leaves. *Plant Science Letters* (31):1-7.
- Dry, P.R. y Loveys, B.R. 1999. Grapevine shoot growth and stomatal conductance are reduced when part of the root system is dried. *Vitis* (38):151-156.
- Dry, P.R., Loveys, B.R. y Düring, H. 2000. Partial drying of the rootzone of grape. I. Transient changes in shoot growth and gas exchange. *Vitis* (39):3-7.
- Dry, P. R., Loveys, B. R., Düring, H. y Botting, D. G. 1996. Effects of partial rootzone drying on grapevine vigour, yield compositions of fruit and use of water. En: Stockley, C. S., Sas, A. N., Johnstone, R. S. y Lee, T. H. *Proc. 9th Aust. Wine Ind. Techn. Conf. Adelaide, Australia*; 128-131
- Du Plessis, H.M. 1988. Irrigation scheduling of citrus. En: Goren, R. y Mendel, K., (ed.). *Proceedings of the Sixth International Citrus Congress*. Tel Aviv. Israel: p 731-739.

- Ebel, R.C., Proebsting, E.L. y Evans, R.G. 1995. Deficit irrigation to control vegetative growth in apple and monitoring fruit-growth to schedule irrigation. *HortScience* (30):1229-1232.
- El-Sharkawi, H.M. y El-Monayeri, M. 1976. Response of olive and almond orchards to partial irrigation under dry-farming practices in semi-arid regions. 3. Plant-soil water relations in almond during growing season. *Plant and Soil* (44):113-128.
- Eldredge, E.P., Shock, C.C. y Stieber, T.D. 1993. Calibration of granular matrix sensors for irrigation management. *Agronomy Journal* (85):1228-1232.
- Elfving, D.C., Hall, A.E. y Kaufmann, M.R. 1972. Interpreting leaf water potential measurements with a model of soil-plant-atmosphere continuum. *Physiologia Plantarum* (27):161-&.
- Esparza, G., Dejong, T.M. y Weinbaum, S.A. 2001a. Effects of irrigation deprivation during the harvest period on nonstructural carbohydrate and nitrogen contents of dormant, mature almond trees. *Tree Physiology* (21):1081-1086.
- Esparza, G., Dejong, T.M., Weinbaum, S.A. y Klein, I. 2001b. Effects of irrigation deprivation during the harvest period on yield determinants in mature almond trees. *Tree Physiology* (21):1073-1079.
- Evett, S.R. y Steiner, J.L. 1995. Precision of neutron scattering and capacitance type soil water content gauges from field calibration. *Soil Science Society of America Journal* (59):961-968.
- Evreinoff, V.A. 1952. Quelques observations biologiques sur l'amandier. *International Botanic Applied* (359):442-459.
- Farquhar, G.D. y Sharkey, T.D. 1982. Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* (33):317-345.
- Felipe, A.J. 1999. El cultivo del almendro. SECH Boletín Informativo, XII, N° 1.
- Felipe, A.J. 2000. El almendro. I. El material vegetal. Editorial Mira.
- Fereres, E., Aldrich, T.M., Schulbach, H. y Martinich, D.A. 1981a. Responses of young almond trees to late season drought. *California Agriculture* (35):11-12.

- Fereres, E., Cruz-Romero, G., Hoffman, G.J. y Rawlins, S.L. 1979. Recovery of orange trees following severe water stress. *Journal of Applied Ecology* (16):833-842.
- Fereres, E. y Goldhamer, D.A. 1990. Deciduous fruit and nut trees. En: Sewart, BA y Nielsen, DR, (ed.). *Irrigation of agricultural crops*. Madison, WI: American Society of Agronomy. p 987-1017.
- Fereres, E. y Goldhamer, D.A. 2000. Avances recientes en la programación de los riegos. *Ingeniería del Agua* (7):47-54.
- Fereres, E. y Goldhamer, D.A. 2003. Suitability of stem diameter variations and water potential as indicators for irrigation scheduling of almond trees. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* (78):139-144.
- Fereres, E., Martinich, D.A., Aldrich, T.M., Castel, J.R., Holzapfel, E. y Schulbach, H. 1982. Drip irrigation saves money in young almond orchard. *California Agriculture* (36):12-13.
- Fereres, E., Pruitt, W.O., Beutel, J.A., Henderson, D.W., Holzapfel, E., Sculbach, H., y Uriu, K. 1981b. Evapotranspiration and drip irrigation scheduling. En: Fereres E, (ed.). *Drip irrigation management*. Davis, CA: Univ. of CA. Div. of Agric. Sci. p 8.
- Fernández, I.J., Lawrence, G.B. y Richards, K.J. 1990. Characteristics of foliar chemistry in a commercial spruce-fir stand of northern New-England, USA. *Plant and Soil* (125):288-292.
- Fernández, J.E., Moreno, F., Martín-Aranda, J. y Fereres, E. 1992. Olive-tree root dynamics under different soil water regimes. *Agricultura Mediterránea* (122):225-235.
- Fernández, J.E., Palomo, M.J., Díaz-Espejo, A., Clothier, B.E., Green, S.R., Girón, I.F. y Moreno, F. 2001. Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnostics of water stress. *Agricultural Water Management* (51):99-123.
- Fisarakis, I., Chartzoulakis, K. y Stavrakas, D. 2001. Response of Sultana vines (*V-vinifera* L.) on six rootstocks to NaCl salinity exposure and recovery. *Agricultural Water Management* (51):13-27.
- Fleckinger, J. 1945. Notations phénologiques et représentation graphiques du développement des bourgeons de poiriers. En: CR. Congrès de Paris de l'Association française pour l'avancement des Sciences. Bibliographical

- reference in "Fruticultura de Coutanceau". 1971. Barcelona: Oikos-tau: p 118.
- Franco, J.A. y Abrisqueta, J.M. 1997. A comparison between minirhizotron and soil coring methods of estimating root distribution in young almond trees under trickle irrigation. *Journal of Horticultural Science* (72):797-805.
- Franco, J.A., Abrisqueta, J.M., Hernansáez, A. y Moreno, F. 2000. Water balance in a young almond orchard under drip irrigation with water of low quality. *Agricultural Water Management* (43):75-98.
- Fulton, A., Buchner, R., Olson, B., Schwankl, L.J., Gilles, C., Bertagna, N., Walton, J. y Shackel, K.A. 2001. Rapid equilibration of leaf and stem water potential under field conditions in almonds, walnuts and prunes. *HortTechnology* (11):609-615.
- Fulton, A.E., Oster, J.D., y Hanson, B.R. 1996. Salinity management. En: Micke WC, (ed.). *Almond production manual*. University of California: Division of Agricultural and Natural Resources. p 29-40.
- García-Orellana, Y., Ruiz-Sánchez, M.C., Alarcón, J., Conejero, W., Ortuño, M.F., Nicolás, E. y 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.
- Gardner, C.M.K., Dean, T.J. y Cooper, J.D. 1998. Soil water content measurement with a high-frequency capacitance sensor. *Journal of Agricultural Engineering Research* (71):395-403.
- Gardner, FP., Pearce, RB. y Mitchell, RL. 1990. *Physiology of crops plants*.
- Gardner, W.H. 1986. Water content. En: Klute A, (ed.). *Methods of soil analysis, Part 1*. Madison, USA: ASA-SSSA. p 493-544.
- Garnier, E. y Berger, A. 1985. Testing water potential in apple trees as an indicator of water stress. *Journal of Horticultural Science* (60):47-56.
- Gaudu, J.C., Mathieu, J.M., Fumanal, J.C., Bruckler, L., Chanzy, A., Bertuzzi, P., Stengel, P. y Guennelon, R. 1993. Mesure de l'humidité des sols par une méthode capacitive: analyse des facteurs influençant de la mesure. *Agronomie* (13):57-73.

- Gebre, G.M. y Kuhns, M.R. 1993. Effects of water-stress preconditioning on gas-exchange and water relations of *Populus-Deltoides* clones. Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne de Recherche Forestiere (23):1291-1297.
- Gènard, M., Fishman, S., Vercambre, G., Huguet, J.G., Bussi, C., Besset, J. y Habib, R. 2001. A biophysical analysis of stem and root diameter variations in woody plants. Plant Physiology (126):188-202.
- Germana, C. 1997. Experiences on the response of almond plants (*Amygdalus communis* L.) to water stress. Acta Horticulturae (449):497-503.
- Gilliam, J.W. 1971. Rapid measurement of chlorine in plant materials. Soil Science Society of America Proceedings (35):512-&.
- Ginestar, C. y Castel, J.R. 1996. Utilización de dendrómetros como indicador de estrés hídrico en mandarinos jóvenes regados por goteo. Riegos y Drenajes XXI (89):40-46.
- Giorio, P. y Giorio, G. 2003. Sap flow of several olive trees estimated with the heat-pulse technique by continuous monitoring of a single gauge. Environmental and Experimental Botany (49):9-20.
- Girona, J. 1992. Estrategias de riego deficitario en el cultivo del almendro. Fruticultura Profesional (47):38-45.
- Girona, J. 2006. La respuesta del cultivo del almendro al riego. Vida Rural (234):12-16.
- Girona, J., Marsal, J., Cohen, M., Mata, M. y Miravete, C. 1993a. Physiological, growth and yield responses of almonds (*Prunus dulcis* L.) to different irrigation regimes. Acta Horticulturae (335):389-398.
- Girona, J., Marsal, J., Mata, M., Arbonés, A. y Dejong, T.M. 2004. A comparison of the combined effect of water stress and crop load on fruit growth during different phenological stages in young peach trees. Journal of Horticultural Science & Biotechnology (79):308-315.
- Girona, J., Marsal, J., Mata, M., Arbonés, A. y Miravete, C. 1997. Evaluation of almond (*Prunus amygdalus* L.) seasonal sensitivity to water stress. Physiological and yield responses. Acta Horticulturae (449):489-496.
- Girona, J., Mata, M., del Campo, J., Arbonés, A., Bartra, E. y Marsal, J. 2006. The use of midday leaf water potential for scheduling deficit irrigation in vineyards. Irrigation Science (24):115-127.

- Girona, J., Mata, M., Goldhamer, D.A., Johnson, R.S. y Dejong, T.M. 1993b. Patterns of soil and tree water status and leaf functioning during regulated deficit irrigation scheduling in peach. *Journal of the American Society for Horticultural Science* (118):580-586.
- Girona, J. y Marsal, J. 1995. Estrategias de RDC en almendro. En: *Riego Deficitario Controlado*. Zapata M. y Segura P., (ed.). España: Mundi Prensa. p 97-118.
- Girona, J., Mata, M. y Marsal, J. 2005. Regulated deficit irrigation during the kernel-filling period and optimal irrigation rates in almond. *Agricultural Water Management* (75):152-167.
- Goldhamer, D.A. 1996. Irrigation Scheduling. En: *Almond production manual*. Micke WC, (ed.). University of California. Division of agriculture and natural resources. p 171-178.
- Goldhamer, D.A. y Fereres, E. 2001. Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. *Irrigation Science* (20):115-125.
- Goldhamer, D.A. y Fereres, E. 2004. Irrigation scheduling of almond trees with trunk diameter sensors. *Irrigation Science* (23):11-19.
- Goldhamer, D.A., Fereres, E., Cohen, M., Girona, J. y Mata, M. 2000. Comparison of continuous and discrete plant-based monitoring for detecting tree water deficits and barriers to grower adoption for irrigation management. *Acta Horticulturae* (537):431-445.
- Goldhamer, D.A., Fereres, E., Mata, M., Girona, J. y Cohen, M. 1999. Sensitivity of continuous and discrete plant and soil water stress monitoring in peach trees subjected to deficit irrigation. *Journal of the American Society for Horticultural Science* (124):437-444.
- Goldhamer, D.A., Salinas, M., Crisosto, C., Day, K.R., Soler, M. y Moriana, A. 2002. Effects of regulated deficit irrigation and partial root zone drying on late harvest peach tree performance. *Acta Horticulturae* (592):343-350.
- Goldhamer, D. A. and Shackel, K. A. 1989. Irrigation cutoff and drought irrigation strategy effects on almond. En: *17th Annual Almond Research Conference*. Modesto,: 35-37

- Goldhamer, D.A. y Smith, T.E. 1995. Single-season drought irrigation strategies influence almond production. *California Agriculture* (49):19-22.
- Goldhamer, D.A. y Viveros, M. 2000. Effects of preharvest irrigation cutoff durations and postharvest water deprivation on almond tree performance. *Irrigation Science* (19):125-131.
- Goldhamer, D.A., Viveros, M. y Salinas, M. 2006. Regulated deficit irrigation in almonds: effects of variations in applied water and stress timing on yield and yield components. *Irrigation Science* (24):101-114.
- González-Altozano, P. y Castel, J.R. 1999. Regulated deficit irrigation in 'Clementina de Nules' citrus trees. I. Yield and fruit quality effects. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* (74):706-713.
- Goode, J.E. y Higgs, K.H. 1973. Water, osmotic and pressure potential relationships in apple leaves. *Journal of Horticultural Science* (48):203-215.
- Gowing, D.J.G., Davies, W.J. y Jones, H.G. 1990. A positive root-sourced signal as an indicator of soil drying in apple, *Malus × Domestica-Borkb.* *Journal of Experimental Botany* (41):1535-1540.
- Granier, A. 1985. Une nouvelle methode pour la mesure des flux de seve dans le tronc des arbres. *Annales des Sciences Forestieres* (42):193-200.
- Grasselly, C. y Crossa-Raynaud, P. 1984. El almendro. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Green, S.R. y Clothier, B.E. 1988. Water-use of kiwifruit, vines and apple-trees by the heat-pulse technique. *Journal of Experimental Botany* (39):115-123.
- Hatfield, J.L. 1990. Methods of estimating evapotranspiration. En: *Irrigation of agricultural crops*. Steward, BA. y Nielsen, DR., (ed.). Madison, USA: ASA-CSSA-SSSA. p 435-474.
- Henson, I.E., Alagarwamy, G., Bidinger, F.R. y Mahalakshmi, V. 1982. Stomatal responses of pearl-millet (*Pennisetum-Americanum* L Leeke) to leaf water status and environmental-factors in the field. *Plant Cell and Environment* (5):65-74.

- Hilgeman, R.H. y Sharp, F.O. 1970. Response of valencia orange trees to 4 soil water schedules during 20 years. *Journal of the American Society for Horticultural Science* (95):739-&.
- Hilhorst, M.A. y Dirksen, C. 1994. Dielectric water content sensors: time domain versus frequency domain. En: *Proceedings of the Symposium on TDR in Environmental Infrastructure and Mining Applications*. Evanston, Illinois, USA: p 23-33.
- Hillel, D. 1990. Role of irrigation in agricultural systems. En: *Irrigation of agricultural crops*. Stewart, BA. y Nielsen, DR., (ed.). Agronomy. Wisconsin, USA: p 5-31.
- Hsiao, T.C. 1973. Plant responses to water stress. *Annual Review of Plant Physiology* (24):519-570.
- Hsiao, T.C. 1990. Measurements of plant water status. En: *Irrigation of Agricultural Crops*. Stewart, BA. y Nielsen, DR., (ed.). Madison, Wis.: American Society of Agronomy. p 243-279.
- Huber, B. 1932. Beobachtung und Messung pflanzlicher Saftströme. *Berichte der Deutschen botanischen Gesellschaft* (50):89-109.
- Hueso, J.J. 2005. Riego deficitario controlado en níspero japonés. Tesis Doctoral. Universidad de Almería.
- Huguet, J.G., Li, S.H., Lorendeau, J.Y. y Pelloux, G. 1992. Specific micromorphometric reactions of fruit-trees to water-stress and irrigation scheduling automation. *Journal of Horticultural Science* (67):631-640.
- Hutmacher, R.B., Nightingale, H.I., Rolston, D.E., Biggar, J.W., Dale, F., Vail, S.S. y Peters, D. 1994. Growth and yield responses of almond (*Prunus Amygdalus*) to trickle irrigation. *Irrigation Science* (14):117-126.
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Reginato, R.J. y Hatfield, J.L. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology* (24):45-55.
- Intrigliolo, D.S. y Castel, J.R. 2004. Continuous measurement of plant and soil water status for irrigation scheduling in plum. *Irrigation Science* (23):93-102.

- Intrigliolo, D.S. y Castel, J.R. 2005a. Effects of regulated deficit irrigation on growth and yield of young Japanese plum trees. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* (80):177-182.
- Intrigliolo, D.S. y Castel, J.R. 2005b. Usefulness of diurnal trunk shrinkage as a water indicator in plum trees. *Tree Physiology* (26):303-311.
- Intrigliolo, D.S. y Castel, J.R. 2006. Performance of various water stress indicators for prediction of fruit size response to deficit irrigation in plum. *Agricultural Water Management* (83):173-180.
- Intrigliolo, D.S., Pérez, D. y Castel, J.R. 2005. Water relations of field grown drip irrigated "Tempranillo" grapevines in Requena, Spain. *Acta Horticulturae* (689):317-323.
- Irvine, J. y Grace, J. 1997. Continuous measurement of water tensions in the xylem of trees based on the elastic properties of wood. *Planta* (202):455-461.
- Irving, D.E. y Drost, J.H. 1987. Effects of water deficit on vegetative growth, fruit-growth and fruit-quality in Cox orange pippin apple. *Journal of Horticultural Science* (62):427-432.
- Itier, B. 1996. Applicability and limitations of irrigation scheduling methods and techniques. En: *Irrigation Scheduling: from theory to practice*. Rome, Italy: FAO.
- Jackson, R.D. 1982. Canopy temperature and crop water stress. *Advances in Irrigation* (1):43-85.
- Jasso, C., Vera, J. y Núñez, R. 1999. Dinámica de nutrientes en hojas de melocotonero cultivado en condiciones de salinidad y riego localizado. *Fruticultura Profesional* (101):43-57.
- Jones, H. 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany* (55):2427-2436.
- Jones, H. 2007. Monitoring plant and soil water status: established and novel revisited and their relevance to studies of drought tolerance. *Journal of Experimental Botany* (58):119-130.
- Jones, H.G. 1983. Estimation of an effective soil-water potential at the root surface of transpiring plants. *Plant Cell and Environment* (6):671-674.

- Jones, H.G. 1990. Physiological aspects of the control of water status in horticultural crops. *HortScience* (25):19-26.
- Jones, H.G. y Sutherland, R.A. 1991. Stomatal control of xylem embolism. *Plant Cell and Environment* (14):607-612.
- Katerji, N., Schoch, P.G., Rimgoto, P. y Lhotel, J.C. 1990. Diagnosis via stem microvariations of water-stress periods in greenhouse-grown eggplants. *Agronomie* (10):541-549.
- Katerji, N., van Hoorn, J.W., Hamdy, A. y Mastrorilli, M. 2003. Salinity effect on crop development and yield, analysis of salt tolerance according to several classification methods. *Agricultural Water Management* (62):37-66.
- Kilili, A.W., Behboudian, M.H. y Mills, T.M. 1996. Water relations, photosynthesis, growth, and yield of 'Braeburn' apples under reduced irrigation applied at different stages of the growing season. *Gartenbauwissenschaft* (61):267-273.
- Klein, I., Esparza, G., Weinbaum, S.A. y Dejong, T.M. 2001. Effects of irrigation deprivation during the harvest period on leaf persistence and function in mature almond trees. *Tree Physiology* (21):1063-1072.
- Klepper, B., Browing, U.D. y Taylor, H.M. 1971. Stem diameter in relation to plant water status. *Plant Physiology* (48):683-685.
- Knipling, E.B. 1967. Effect of leaf aging on water deficit-water potential relationships of dogwood leaves growing in 2 environments. *Physiologia Plantarum* (20):65-&.
- Kozlowski, T.T. 1966. Expansion and contraction as indices of water stress in tree seedlings. *Plant Physiology*. 5-&.
- Kozlowski, T.T. 1967. Diurnal variations in stem diameters of small trees. *Botanical Gazette* (128):60-&.
- Kozlowski, T.T. 1968. Diurnal changes in diameters of fruits and tree stems of montmorency cherry. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* (43):1-&.
- Kozlowsky, T.T. y Winget, C.H. 1964. Diurnal and seasonal variation in radii of tree stems. *Ecology* (45):149-155.

- Kramer, P.J. 1983. Problems in water relations of plants and cells. *International Review of Cytology-A Survey of Cell Biology* (85):253-286.
- Kramer, P.J. 1988. Changing concepts regarding plant water relations. *Plant Cell and Environment* (11):565-568.
- Lakso, A.N., Geyer, A.S. y Carpenter, S.G. 1984. Seasonal osmotic relations in apple leaves of different ages. *Journal of the American Society for Horticultural Science* (109):544-547.
- Lampinen, B., Shackel, K.A., Southwick, S., Olson, B., Yeager, J. y Goldhamer, D.A. 1995. Sensitivity of yield and fruit quality of French prune to water deprivation at different fruit growth stages. *Journal of the American Society for Horticultural Science* (120):139-147.
- Lampinen, B., Shackel, K.A., Southwick, S. y Olson, W. 2001. Deficit irrigation strategies using midday stem water potential in prune. *Irrigation Science* (20):47-54.
- Landsberg, J.J., Blanchard, T.W. y Warritt, B. 1976. Studies on movement of water through apple-trees. *Journal of Experimental Botany* (27):579-596.
- León, A., DelAmor, F., Torrecillas, A. y Ruiz-Sánchez, M.C. 1985. Drip irrigation in young almond trees. *Fruits* (40):659-663.
- Leverenz, J., Deans, J.D., Ford, E.D., Jarvis, P.G., Milne, R. y Whitehead, D. 1982. Systematic spatial variation of stomatal conductance in a sitka spruce plantation. *Journal of Applied Ecology* (19):835-851.
- Li, S.H., Bussi, C., Hugard, J. y Clanet, H. 1989a. Critical period of flower bud induction in peach-trees Associated with shoot length and bud position. *Gartenbauwissenschaft* (54):49-53.
- Li, S.H., Huguet, J.G., Schoch, P.G. y 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* (64):541-552.
- López-Ritas, J. 1972. *El almendro y su cultivo*. Ministerio de Agricultura. 313 pp.

- Lösch, R. 1979. Stomatal responses to changes in air humidity. En: Structure, function and ecology of stomata. Sen, DN., Chawan, DD., y Bansal, RP., (ed.). p 189-216.
- Loveys, B., Stoll, M., y Davies, F.S. 2004. Physiological approaches to enhance water use efficiency in agriculture: exploiting plant signalling in novel irrigation practice. En: Water Use Efficiency in Plant Biology. Bacon, MA., (ed.). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd. p 113-138.
- Lynn, B.H. y Carlson, T.N. 1990. A stomatal-resistance model illustrating plant vs external control of transpiration. *Agricultural and Forest Meteorology* (52):5-43.
- MAPA. Anuario de estadística agroalimentaria 2004 www.mapa.es
- Maas, E.V. 1986. Salt tolerance of plants. *International Journal of Applied Agricultural Research* (1):12-26.
- Maas, E.V. 1990. Crop salt tolerance. En: Agricultural salinity assessment and management. Tangi, KK., (ed.). New York: American society of civil engineers. p 287-290.
- Mansfield, T.A. y Davies, W.J. 1981. Stomata and stomatal mechanisms. En: The physiology and biochemistry of drought resistance in plants. Paleg, LG. y Aspinall, D., (ed.). New York: p 315-346.
- Marsal, J., Girona, J. y Mata, M. 1997. Leaf water relation parameters in almond compared to hazelnut trees during a deficit irrigation period. *Journal of the American Society for Horticultural Science* (122):582-587.
- Martín de Santa Olalla, M. y De Juan Valero, J. 1993. *Agronomía del riego*.
- Martin, G.C. y Kester, D. 1978. Almond growth and development. En: Almond orchard management. Micke, W. y Kester, D., (ed.). California: División of Agricultural Science. University of California. p 46-51.
- Massai, R., Remorini, D. y Tattini, M. 2004. Gas exchange, water relations and osmotic adjustment in two scion/rootstock combinations of *Prunus* under various salinity concentrations. *Plant and Soil* (259):153-162.
- Mastrorilli, M., Katerji, N., Rana, G. y Ben Nouna, B. 1998. Daily actual evapotranspiration measured with TDR technique in Mediterranean conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* (90):81-89.

- Matsushita, N. y Matoh, T. 1991. Characterization of Na⁺ exclusion mechanisms of salt-tolerant reed plants in comparison with salt-sensitive rice plants. *Physiologia Plantarum* (83):170-176.
- McCutchan, H. y Shackel, K.A. 1992. Stem water potential as a sensitive indicator of water stress in prune trees. *Journal of the American Society for Horticultural Science* (117):607-611.
- Métodos oficiales de análisis de la Unión Europea. 1998. Diario oficial de la C.E. Madrid.
- Mitchell, P.D. y Chalmers, D.J. 1982. The effect of reduced water supply on peach tree growth and yields. *Journal of the American Society for Horticultural Science* (107):853-856.
- Mitchell, P.D., Vandenende, B., Jerie, P.H. y Chalmers, D.J. 1989. Responses of Bartlett pear to withholding irrigation, regulated deficit irrigation, and tree spacing. *Journal of the American Society for Horticultural Science* (114):15-19.
- Molz, F.J. y Klepper, B. 1973. Mechanism of water-stress-induced stem deformation. *Agronomy Journal* (65):304-306.
- Molz, F.J., Klepper, B. y Browning, V.D. 1973. Radial diffusion of free-energy in stem phloem - experimental study. *Agronomy Journal* (65):219-222.
- Monteith, J.L. 1965. Evaporation and the environment. En: *Proceedings of the 19th Symposium, Society of Experimental Biology*. London: Cambridge University Press. p 205-234.
- Monteith, J.L. 1973. Principles of environmental physics. En: *Contemporary Biology*. Arnold, E. (ed.). 241 p.
- Moran, M.S., Clarke, T.R., Inoue, Y. y Vidal, A. 1994. Estimating crop water-deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment* (49):246-263.
- Moreno, F., Conejero, W., Martín-Palomo, M.J., Girón, I.F. y Torrecillas, A. 2006. Maximum daily trunk shrinkage reference values for irrigation scheduling in olive trees. *Agricultural Water Management* (84):290-294.
- Moriana, A. y Fereres, E. 2002. Plant indicators for scheduling irrigation of young olive trees. *Irrigation Science* (21):83-90.

- Morris, J.R. y Cawthon, D.L. 1982. Effect of irrigation, fruit load, and potassium fertilization on yield, quality, and petiole analysis of concord (*Vitis-Labrusca* L) grapes. *American Journal of Enology and Viticulture* (33):145-148.
- Mpelasoka, B.S., Behboudian, M.H. y Mills, T.M. 2001. Water relations, photosynthesis, growth, yield and fruit size of 'Braeburn' apple: Responses to deficit irrigation and to crop load. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* (76):150-156.
- Myers, B.J. 1988. Water stress integral-a link between short-term stress and long-term growth. *Tree Physiology* (4):315-323.
- Nanos, G.D., Kazantzis, L., Kefalas, P., Petrakis, C. y Stavroulakis, G.G. 2002. Irrigation and harvest time affect almond kernel quality and composition. *Scientia Horticulturae* (96):249-256.
- Naor, A. 2004. The interactions of soil- and stem-water potentials with crop level, fruit size and stomatal conductance of field-grown 'Black Amber' Japanese plum. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* (79):273-280.
- Naor, A. y Cohen, S. 2003. Sensitivity and variability of maximum trunk shrinkage, midday stem water potential, and transpiration rate in response to withholding irrigation from field-grown apple trees. *HortScience* (38):547-551.
- Naor, A., Gal, Y. y Peres, M. 2006. The inherent variability of water stress indicators in apple, nectarine and pear orchards, and the validity of a leaf-selection procedure for water potential measurements. *Irrigation Science* (24):129-135.
- Naor, A., Hupert, H., Greenblat, Y., Peres, M., Kaufman, A. y Klein, I. 2001. The response of nectarine fruit size and midday stem water potential to irrigation level in stage III and crop load. *Journal of the American Society for Horticultural Science* (126):140-143.
- Naor, A., Klein, I. y Doron, I. 1995. Stem water potential and apple fruit size. *Journal of the American Society for Horticultural Science* (120):577-582.
- Naor, A., Klein, I., Doron, I., Gal, Y., Ben-David, Z. y Bravdo, B. 1997. The effect of irrigation and crop load on stem water potential and apple fruit size. *Journal of Horticultural Science* (72):765-771.

- Nicolás, E., Torrecillas, A., Dell'Amico, J. y Alarcón, J. 2005. The effect of short-term flooding on the sap flow, gas exchange and hydraulic conductivity of young apricot trees. *Trees-Structure and Function* (19):51-57.
- Nortes, P.A., Pérez-Pastor, A., Egea, G., Conejero, W. y Domingo, R. 2005. Comparison of changes in stem diameter and water potential values for detecting water stress in young almond trees. *Agricultural Water Management* (77):296-307.
- Nortes, P.A., Pérez-Pastor, A., Méndez, J. y Domingo, R. 2002. Respuesta del almendro al riego deficitario con agua salina. XXI Congreso Nacional de Riegos.
- Olien, M.E. y Flore, J.A. 1990. Effect of a rapid water-stress and a slow water-stress on the growth of redhaven peach-trees. *Fruit Varieties Journal* (44):4-11.
- Ortuño, M.F., Alarcón, J.J., Nicolás, E. y Torrecillas, A. 2004. Interpreting trunk diameter changes in young lemon trees under deficit irrigation. *Plant Science* (167):275-280.
- Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Conejero, W., Ruiz-Sánchez, M.C., Alarcón, J.J. y Torrecillas, A. 2006a. Stem and leaf water potentials, gas exchange, sap flow, and trunk diameter fluctuations for detecting water stress in lemon trees. *Trees-Structure and Function* (20):1-8.
- Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Conejero, W., Ruiz-Sánchez, M.C., Mounzer, O., Alarcón, J.J. y Torrecillas, A. 2006b. Relationships between climatic variables and sap flow, stem water potential and maximum daily trunk shrinkage in lemon trees. *Plant and Soil* (279):229-242.
- Parchomchuck, P., Tan, C.S. y Berard, R.G. 1997. Practical use of time domain reflectometry for monitoring soil water content in microirrigated orchards. *HortTechnology* (7):17-22.
- Passioura, J.B. 1988. Water transport in and to roots. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* (39):245-265.
- Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A* (193):120-148.
- Pereira, J.S., Tenhunen, J.D., Lange, O.L., Beyschlag, W., Meyer, A. y David, M.M. 1986. Seasonal and diurnal patterns in leaf gas-exchange of

- Eucalyptus-Globulus* trees growing in Portugal. Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne de Recherche Forestiere (16):177-184.
- Peretz, J., Evans, R.G. y Proebsting, E.L. 1984. Leaf water potentials for management of high-frequency irrigation on apples. Transactions of the Asae (27):437-442.
- Pérez-Alfocea, F., Balibrea, M.E., Alarcón, J.J. y Bolarín, M.C. 2000. Composition of xylem and phloem exudates in relation to the salt-tolerance of domestic and wild tomato species. Journal of Plant Physiology (156):367-374.
- Pérez-Pastor, A. 2001. Estudio agronómico y fisiológico del albaricoquero en condiciones de infradotación hídrica. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena. 225 p.
- Pérez-Pastor, A., Ruiz-Sánchez, M.C., Domingo, R. y Torrecillas, A. 2004. Growth and phenological stages of 'Builida' apricot trees in south-east Spain. Agronomie (24):93-100.
- Phene, C.J., Hoffman, G.J. y Rawlins, S.L. 1971. Measuring soil Matric potential in situ by sensing heat dissipation within a porous body .1. Theory and sensor construction. Soil Science Society of America Proceedings (35):27-&.
- Pittinelli, E., Sorge, M., Lena, B. y Trabucco, A. 1998. On the use of time domain reflectometry (TDR) method for soil water content evaluation. Irrigazione e Drenaggio (45):35-41.
- Pogue, W.R. y Pooly, S.G. 1985. Tensiometric management of soil water. En: Proc.Third Int.Drip and Trickle Irrig.Cong, (ed.). Drip trickle irrigation in action. Michigan, USA: American Society of Agricultural Engineers. p 761-766.
- Pospisilova, J. y Santrucek, J. 1994. Stomatal patchiness. Biologia Plantarum (36):481-510.
- Prichard, T. L., Asai, W., Verdegaal, P., Micke, W, and Fuson, K. 1992. Effects of water supply and irrigation strategies on almonds. En: Proc. 20th Annual Almond Research Conference. Sacramento,; 60-63
- Rawson, H.M. 1979. Vertical wilting and photosynthesis, transpiration, and water-use efficiency of sunflower leaves. Australian Journal of Plant Physiology (6):109-120.

- Rebour, H. 1971. *Frutales mediterráneos*. Madrid.
- Remorini, D. y Massai, R. 2003. Comparison of water status indicators for young peach trees. *Irrigation Science* (22):39-46.
- Rhoades, J.D., Kandiah A. y Mashali, AM. 1992. *The use of saline waters for crops production*. Roma.
- Richardson, E.A., Seeley, S.D., Walker, D.R., Anderson, J.L. y Ashcroft, G.L. 1976. Pheno-climatography model for deciduous plants. *Bulletin of the American Meteorological Society* (57):1409.
- Romero, P. 2002. *Respuesta del almendro (cv. Cartagenera) al riego deficitario controlado en condiciones de riego subterráneo*. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia. 288 p.
- Romero, P. y Botía, P. 2006. Daily and seasonal patterns of leaf water relations and gas exchange of regulated deficit-irrigated almond trees under semiarid conditions. *Environmental and Experimental Botany* (56):158-173.
- Romero, P., Botía, P. y García, F. 2004a. Effects of regulated deficit irrigation under subsurface drip irrigation conditions on vegetative development and yield of mature almond trees. *Plant and Soil* (260):169-181.
- Romero, P., Botía P. y García, F. 2004b. Effects of regulated deficit irrigation under subsurface drip irrigation conditions on water relations of mature almond trees. *Plant and Soil* (260):155-168.
- Ruiz-Sánchez, M.C., Domingo, R., Savé, R., Biel, C. y Torrecillas, A. 1997. Effects of water stress and rewatering on leaf water relations of lemon plants. *Biologia Plantarum* (39):623-631.
- Ruiz-Sánchez, M.C., Egea, J., Galego, R. y Torrecillas, A. 1999. Floral biology of 'Bulida' apricot trees subjected to postharvest drought stress. *Annals of Applied Biology* (135):523-528.
- Ruiz-Sánchez, M.C., Plana, V., Ortuño, M.F., Tapia, L.M. y Abrisqueta, J.M. 2005. Spatial root distribution of apricot trees in different soil tillage practices. *Plant and Soil* (272):211-221.
- Ruiz-Sánchez, M.C., Sánchez-Blanco, M.J., Planes, J., Alarcón, J. y Torrecillas, A. 1993. Seasonal changes in leaf water potential components in two almond cultivars. *Journal of Horticultural Science* (120):347-351.

- Ruiz-Sánchez, M.C., Torrecillas, A., DelAmor, F., León, A. y Abrisqueta, J.M. 1988. Leaf water potential and leaf conductance during the growing-season in almond trees under different irrigation regimes. *Biologia Plantarum* (30):327-332.
- Sánchez Bel, P., Madrid, R., Sánchez, A., Valverde, M. y Romojaro, F. 2001. La calidad de la almendra española. I. Cuadernos de fitopatología (67):15-21.
- Sánchez-Blanco, M.J., Ruiz-Sánchez, M.C., Planes, J. y Torrecillas, A. 1991. Water relations of two almond cultivars under anomalous rainfall in non-irrigated culture. *Journal of Horticultural Science* (66):403-408.
- Saura, F., Cañellas, J. y Soler, L. 1988. La almendra. Composición, variedades, desarrollo y maduración. Ed INIA, Madrid.
- Scholander, P.F., Hammel, H.T., Bradstreet, E.D. y Hemingsen, E.A. 1965. Sap pressure in vascular plants. *Science* (148):339-346.
- Schulbach, H. y Schwankl, L.J. 1996. Measuring soil moisture. En: Almond production manual. University of California: Division of Agricultural and Natural Resources. p 167-170.
- Schulze, E.D. 1986. Carbon-dioxide and water-vapor exchange in response to drought in the atmosphere and in the soil. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* (37):247-274.
- Schulze, E.D. y Hall, A.E. 1982. Stomatal responses, water loss and CO₂ assimilation rates of plants in contrasting environments . En: Lange, O.L., Nobel, P.S., Osmond, C.B. y Ziegler, H., (ed.). *Encyclopedia plant physiology*. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York: p 181-230.
- Shackel, K.A., Ahmadi, H., Biasi, W., Buchner, R., Goldhamer, D.A., Gurusinghe, S.H., Hasey, J., Kester, D., Krueger, B., Lampinen, B., McGourty, G., Micke, W., Mitcham, E., Olson, B., Pelletrau, K., Philips, H., Ramos, D., Schwankl, L.J., Sibbet, S., Snyder, R., Southwick, S., Stevenson, M., Thorpe, M., Weinbaum, S. y Yeager, J. 1997. Plant water status as an index of irrigation need in deciduous fruit trees. *HortTechnology* (7):23-29.
- Shackel, K.A., Gurusinghe, S.H., Kester, D. y Micke, W. 1998. Water stress responses of almond [*Prunus dulcis* (Mill.) Webb.] trees under field conditions . *Acta Horticulturae* (470):390-316.

- Shackel, K.A., Lampinen, B., Sibbet, S. y 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.
- Shalhevet, J., Huck, M.G. y Schroeder, B.P. 1995. Root and shoot growth-responses to salinity in maize and soybean. *Agronomy Journal* (87):512-516.
- Shinn, J.D., Timian, D.A., Morey, R.M., Mitchell, G., Antle, C.L. y Hull, R. 1998. Development of a CPT deployed probe for in situ measurement of volumetric soil moisture content and electrical resistivity. *Field Analytical Chemistry and Technology* (2):103-109.
- Silveira, J.A.G., Melo, A.R.B., Viegas, R.A. y Oliveira, J.T.A. 2001. Salinity-induced effects on nitrogen assimilation related to growth in cowpea plants. *Environmental and Experimental Botany* (46):171-179.
- Simonneau, T., Habib, R., Goutouly, J.P. y Huguet, J.G. 1993. Diurnal changes in stem diameter depend upon variations in water content: direct evidence in peach trees. *Journal of Experimental Botany* (44):615-621.
- Slatyer, RO. 1967. *Plant water relationships*. London and New York: Academic Press.
- Snyder, R.L. y Spano, D. 1994. Using surface renewal measurements to estimate crop evapotranspiration. *Proceedings of the Third Congress of the European Society for Agronomy* 410-411.
- Syvertsen, J.P., Lloyd, J. y Kriedemann, P.E. 1988. Salinity and drought stress effects on foliar ion concentration, water relations, and photosynthetic characteristics of orchard citrus. *Australian Journal of Agricultural Research* (39):619-627.
- Tabuenca, M.C. y Herrero, J. 1966. Influencia de la temperatura en la época de floración de los frutales. *An Aula Dei* (8):115-153.
- Tardieu, F. y Simonneau, T. 1998. Variability among species of stomatal control under fluctuating soil water status and evaporative demand: modelling isohydric and anisohydric behaviours. *Journal of Experimental Botany* (49):419-432.
- Taylor, S.A. y Ashcroft, G.L. 1972. *Physical edaphology*. En: *The physics of irrigated and nonirrigated soils*. Freeman, WH. y Company, (ed.). San Francisco: p 431-441.

- Tenhunen, J.D., Lange, O.L. y Jahner, D. 1982. The control by atmospheric factors and water-stress of midday stomatal closure in *arbutus-unedo* growing in a natural macchia. *Oecologia* (55):165-169.
- Tester, M. y Davenport, R. 2003. Na⁺ tolerance and Na⁺ transport in higher plants. *Annals of Botany* (91):503-527.
- Thompson, R.B., Gallardo, M., Aguera, T., Valdez, L.C. y Fernández, M.D. 2006. Evaluation of the Watermark sensor for use with drip irrigated vegetable crops. *Irrigation Science* (24):185-202.
- Torrecillas, A., Domingo, R., Galego, R. y Ruiz-Sánchez, M.C. 2000. Apricot tree response to withholding irrigation at different phenological periods. *Scientia Horticulturae* (85):201-215.
- Torrecillas, A., Alarcón, J.J., Domingo, R., Planes, J. y Sánchez Blanco, M.J. 1996. Strategies for drought resistance in leaves of two almond cultivars. *Plant Science* (118):135-143.
- Torrecillas, A., Galego, R., Pérez-Pastor, A. y Ruiz-Sánchez, M.C. 1999. Gas exchange and water relations of young apricot plants under drought conditions. *Journal of Agricultural Science* (132):445-452.
- Torrecillas, A., Ruiz-Sánchez, M.C., Del Amor, F. y León, A. 1988a. Seasonal variations on water relations of *amygdalus-communis* under drip irrigated and non irrigated conditions. *Plant and Soil* (106):215-220.
- Torrecillas, A., Ruiz-Sánchez, M.C., León, A. y Del Amor, F. 1989a. The response of young almond trees to different drip-irrigated conditions - development and yield. *Journal of Horticultural Science* (64):1-7.
- Torrecillas, A., Ruiz-Sánchez, M.C., León, A. y García, A.L. 1988b. Stomatal response to leaf water potential in almond trees under drip irrigated and non irrigated conditions. *Plant and Soil* (112):151-153.
- Torrecillas, A., Ruiz-Sánchez, M.C. y Hernansáez, A. 1989b. Response of leaf water potential to estimated transpiration in almond trees. *Journal of Horticultural Science* (64):667-671.
- Turner, N.C. 1981. Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. *Plant and Soil* (58):339-366.
- Turner, N.C., Schulze, E.D. y Gollan, T. 1984. The responses of stomata and leaf gas exchange to vapour pressure deficits and soil water content. I.

- Species comparisons at high soil water contents. *Oecologia* (63):338-342.
- Turner, N.C., Schulze, E.D. y Gollan, T. 1985. The responses of stomata and leaf gas exchange to vapour pressure deficits and soil water content. II. In the mesophytic herbaceous *Helianthus annuus*. *Oecologia* (65):348-355.
- Tyree, M.T. y Jarvis, P.G. 1982. Water in tissues and cells. En: *Physiological Plant Ecology II*. Lange, O.L., Nobel, P.S., Osmond, C.B., y Ziegler, H., (ed.). Berlin-Heidelberg. New York: p 35-77.
- Tyree, M.T. y Sperry, J.S. 1989. Vulnerability of Xylem to Cavitation and Embolism. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* (40):19-38.
- Uriu, K. 1978. Soil and plant analysis and symptomology for diagnosis of mineral deficiencies and toxicities. En: *Almond orchard management*. Micke, W.C. y Kester, D., (ed.). University of California: Division of Agricultural Sciences. p 89-96.
- Uriu, K., Martin, P.E. y Hagan, R.M. 1970. Radial trunk growth of almonds as affected by soil water and crop density. *Journal of the American Society for Horticultural Science* (95):166-169.
- Valancogne, C. y Nasr, Z. 1989. Measuring sap flow in the stem of small trees by a heat balance method. *HortScience* (24):383-385.
- Vargas, F.J. 1990. Nuts in Spain: almond, hazelnut, walnut and pistachio. FAO "Expert consultation on the promotion of production in Europe and Near East Region". En: *Nut Production and Industry in Europe, Near East and North Africa*. Turquía: p 255-280.
- Vavilov, N.I. 1930. Wild progenitors of the fruit tree of Turkestan and the Caucasus and the problems of the origin of fruit trees. Horticultural Congress, London.
- Vélez, J.E., Intrigliolo, D.S. y Castel, J.R. 2007. Scheduling deficit irrigation of citrus trees with maximum daily trunk shrinkage. *Agricultural Water Management* (90):197-204.
- Villalobos, F.J. 1997. Correction of eddy covariance water vapour flux using additional measurements of temperature. *Agricultural and Forest Meteorology* (88):77-83.

- Westwood, N.M. y Roberts, A.N. 1970. The relationship between trunk cross-sectional area and weight of apples trees. *Journal of the American Society for Horticultural Science* (95):28-30.
- Williams, L.E. 1987. The effect of cyanamide on budbreak and vine development of Thompson Seedless grapevines in the San-Joaquin Valley of California. *Vitis* (26):107-113.
- Williams, M., Rastetter, E.B., Fernandes, D.N., Goulden, M.L., Wofsy S.C., Shaver G.R., Melillo J.M., Munger J.W., Fan S.M. y Nadelhoffer K.J. 1996. Modelling the soil-plant-atmosphere continuum in a *Quercus-Acer* stand at Harvard forest: The regulation of stomatal conductance by light, nitrogen and soil/plant hydraulic properties. *Plant Cell and Environment* (19):911-927.
- Winkel, T. y Rambal, S. 1993. Influence of water-stress on grapevines growing in the field - from leaf to whole-plant response. *Australian Journal of Plant Physiology* (20):143-157.
- Wong S.C., Cowan, I.R. y Farquhar, G.D. 1985. Leaf Conductance in Relation to Rate of CO₂ Assimilation. 3. Influences of Water-Stress and Photoinhibition. *Plant Physiology* (78):830-834.