Tesis Doctoral

Manejo del agua en plantaciones de almendro: demanda hídrica y respuesta al volumen de suelo mojado en plantaciones jóvenes

Autora

Mónica Espadafor Fernández-Amigo

Directores

Elias Fereres Castiel

Ignacio Lorite Torres

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

TITULO: *Manejo del agua en plantaciones de almendro: demanda hídrica y respuesta al volúmen de suelo mojado en plantaciones jóvenes.*

AUTOR: *Mónica Espadafor Fernández Amigo*

© Edita: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba. 2015
Campus de Rabanales
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A
14071 Córdoba

www.uco.es/publicaciones
publicaciones@uco.es

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE AGRONOMÍA

Programa de Doctorado

Biociencias y ciencias agroalimentarias

TESIS DOCTORAL

Manejo del agua en plantaciones de almendro: demanda hídrica y respuesta al volumen de suelo mojado en plantaciones jóvenes.

Autora

Mónica Espadafor Fernández-Amigo

Dirigida por

Dr. Elías Fereres Castiel

Dr. Ignacio Lorite Torres

Tesis financiada por el programa de ayuda a la Formación de Personal Investigador del Ministerio de Economía y Competitividad

Realizada en Instituto de Agricultura Sostenible – CSIC

Julio 2015

TÍTULO DE LA TESIS: Manejo del agua en plantaciones de almendro: demanda hídrica y respuesta al volumen de suelo mojado en plantaciones jóvenes.

DOCTORANDO/A: Mónica Espadafor Fernández-Amigo

INFORME RAZONADO DEL/DE LOS DIRECTOR/ES DE LA TESIS

(se hará mención a la evolución y desarrollo de la tesis, así como a trabajos y publicaciones derivados de la misma).

El Dr. **Elías Fereres Castiel**, Catedrático de la Universidad de Córdoba, adscrito al Instituto de Agricultura Sostenible del CSIC, e **Ignacio Lorite Torres**, Investigador del IFAPA de la Junta de Andalucía, como directores de la Tesis Doctoral titulada ***"MANEJO DEL AGUA EN PLANTACIONES DE ALMENDRO: DEMANDA HÍDRICA Y RESPUESTA AL VOLUMEN DE SUELO MOJADO EN PLANTACIONES JÓVENES***" realizada por **Mónica Espadafor Fernández-Amigo**,

INFORMAN QUE:

La doctoranda ha realizado investigación original, de forma independiente, demostrando una alta capacidad para resolver los problemas planteados y para analizar los resultados obtenidos en forma innovadora y a la vez, útil para los destinatarios de los resultados de la investigación. Durante los cuatro años de su periodo de tesis ha mostrado una gran capacidad de trabajo en condiciones difíciles, debido a las dificultades de manejo de la plantación comercial donde se ejecutaron sus investigaciones. Su trabajo principal ha sido la obtención, por primera vez, de medidas del consumo de agua del almendro usando un lisímetro de pesada de alta precisión. Con este costoso equipamiento se han obtenido resultados muy valiosos durante cuatro años, el periodo requerido para documentar el consumo de una plantación a medida que crecen los árboles. Esta información es

clave para determinar las necesidades de riego de las nuevas plantaciones que se están desarrollando actualmente en España y otros países, en respuesta a la alta demanda de este producto. Los resultados obtenidos se han publicado este año en la revista (ISI) más prestigiosa de su campo y previamente en una revista de alta difusión en su campo (Acta Horticulturae), si bien no del ISI. El resto de sus investigaciones se han centrado en las respuestas del almendro al déficit hídrico y bien se han enviado a su publicación o están en preparación para publicarse. Más abajo se presentan los trabajos a congresos internacionales y publicaciones derivados de la tesis.

En resumen, los directores consideran que la tesis constituye una aportación original en su campo y demuestra la capacidad para realizar investigación de la doctoranda.

Publicaciones en revistas ISI elaboradas durante el periodo de tesis doctoral y directamente relacionadas con el contenido de la tesis:

Espadafor M, Orgaz, F, Testi L, Lorite IJ, Villalobos FJ (2015) Transpiration of Young almond trees in relation to intercepted radiation. Irrigation Science, 33:265-275

Espadafor M, Orgaz F, Testi L, Lorite IJ, García O, Villalobos FJ, Fereres E. Almond tree response to a change in wetted soil volumen under drip irrigation. Irrigation Science. *En revisión.*

Aportaciones a congresos internacionales:

Cruz-Blanco M, Santos C, Lorite IJ, Allen RG, Zhao W, Espadafor M, Testi L, Ramírez-Cuesta JM, de Bruin HAR (2013) First measurements provided by a Large Aperture Scintillometer over a small almond orchard in Southern Spain Tübingen Atmospheric Physics Symposium “Scintillometers and Applications” Tübingen (Alemania)

Espadafor M, Lorite IJ, Orgaz F, Testi L, Fereres E (2013) Assessing almond orchard water use: evaluation of methods. VI International Symposium on Almond and Pistachios (ISHS) Murcia (España) Acta Horticulturae. (ISHS) 1028:341-345

Espadafor M, Orgaz F, García O, Testi L, Lorite IJ, Fereres E (2014) Transpiration and water relations of young almond trees. XIII ESA Congress. Debrecen (Hungría)

Espadafor M, González-Dugo, Orgaz F, Testi L, López-López M, Fereres E (2015) Transpiration and water relations of almond trees (cv. Guara) under moderate water deficits VIII International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops (ISHS). Lleida (España)

González-Dugo, Espadafor M, López-López M, Lorite IJ, Testi L, Fereres E (2015) Use of crop water stress index for monitoring water status in young almond orchards. VIII International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops (ISHS). Lleida (España)

López-López M, Espadafor M, Lorite IJ, Orgaz F, Testi L, Fereres E (2015) Measurement of almond evapotranspiration by lysimetry in a semiarid environment. VIII International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops (ISHS). Lleida (España)

Por todo ello, se autoriza la presentación de la Tesis Doctoral.

Córdoba, 24 de junio de 2015

Firma de los directores

Fdo.: Elías Fereres Castiel

Fdo.: Ignacio Lorite Torres

Agradecimientos

Quiero agradecer con todo mi corazón a todas las personas que me han acompañado durante estos años de trabajo (compañeros, directores y familia). Gracias a vosotros he sido capaz de seguir adelante y de conseguir mi meta. Cada desaliento ha sido borrado con una risa o un buen consejo. De vosotros he aprendido a relativizar problemas y a disfrutar con un esfuerzo compartido al que poco a poco fuimos viendo forma.

De forma especial quiero agradecer a Elías el haberme dado la oportunidad de aprender de él tanto en el campo como en la vida y por haberse preocupado por mí como lo haría un padre.

Esta tesis no es mía, sino de todo el equipo de personas que hemos aprendido juntas.

Gracias de corazón.

A mi padre

Índice de contenidos

Índice de contenidos 6
Índice de figuras. 9
Índice de tablas. 13
Lista de símbolos 14
Lista de abreviaturas 15
Resumen 16
Summary 18

Capítulo 1. Introducción general 19
1.1. Escasez de agua y agricultura 20
1.2. Necesidades de riego 21
1.3. Diseño de riego 23
1.4. Riego deficitario 24
1.5. Almendro 26
1.6. Objetivos. 31
Referencias 32

Capítulo 2. Transpiración de almendros jóvenes en relación a la radiación interceptada 38
Resumen 39
Summary 40
2.1. Introducción 41
2.2. Materiales y métodos 44
2.2.1. Medidas con sensores de flujo de savia 46
2.2.2. Caracterización de la copa del árbol. 47
2.2.3. Relación entre transpiración y radiación interceptada. Modelo de conductancia de cubierta 49
2.3. Resultados 50
2.3.1. Evolución de tamaño del árbol 50

2.3.2. Evolución de la transpiración 53
2.3.3. Relaciones entre K_T y porcentaje de radiación PAR interceptada 55
2.3.4. Conductancia de cubierta, radiación interceptada y déficit de presión de vapor 58
2.4. Discusión 59
Referencias 66

Capítulo 3. Respuesta del almendro a un cambio en el volumen de suelo humedecido bajo riego por goteo 71
Resumen 72
Summary 73
3.1. Introducción 74
3.2. Materiales y métodos 78
3.3. Resultados 81
3.3.1. Contenido de agua en el suelo. 81
3.3.2. Evolución de la transpiración 85
3.3.3. Estado hídrico de los árboles. 87
3.3.4. Cálculo de la resistencia hidráulica de los árboles. 90
3.3.5. Crecimiento y conductancia de cubierta 93
3.3.6. Respuesta durante un periodo de sequía. 97
3.4. Discusión 100
Referencias 105

Capítulo 4. Transpiración del almendro (cv. Guara) en respuesta a déficits hídricos moderados. 110
Resumen 111
Summary 112
4.1. Introducción 113
4.2. Materiales y métodos 115
4.3. Resultados. 118

4.4. Discusión 132
Referencias 137
Capítulo 5. Discusión general y conclusiones 140
ANEXO 1. PRODUCCIÓN CIENTÍFICA. 146

Índice de figuras.

Fig 1.1. Relación general entre agua aplicada por riego o ET y rendimiento en grano. I_W marca el punto a partir del cual la productividad del riego disminuye y I_M el punto a partir del cual más agua no produce aumento en el rendimiento. Fuente: Fereres y Soriano (2007). 25

Fig. 1.2. Evolución de precio de almendra común en los últimos años. Fuente: Lonja de Reus. 27

Fig. 1.3. Ciclo de vida de una plantación de almendro. (1) Fase improductiva, (2) Fase de desarrollo, (3) Fase de máxima producción, (4) Fase de envejecimiento. . 28

Fig. 2.1. Sondas para medida del flujo de savia en el tronco de uno de los árboles experimentales. 47

Fig. 2.2. Método para estimar volumen de copa y densidad de área foliar mediante análisis de fotografías. 49

Fig. 2.3. Evolución del volumen de copa y del porcentaje de cobertura del suelo durante los años 2010-2013. Los círculos indican los días de medida. Los periodos sin medidas en 2010 y 2011 fueron dibujados siguiendo patrones de crecimiento similares a los de 2012 y 2013. Para el resto, se usó una interpolación lineal entre medidas 51

Fig. 2.4. Comparación entre valores de área foliar directamente medidos y los estimados mediante el método basado en fotografías digitales. 52

Fig. 2.5. Evolución de la densidad de área foliar durante 2012 y 2013, estimada a partir del área foliar obtenida con el método de las fotografías digitales y el volumen de copa. Los círculos representan los días de medida. La línea discontinua fue dibujada por observación en campo. 52

Fig. 2.6. Evolución estacional de la transpiración medida en el lisímetro (T) y mediante la técnica de flujo de savia (T_{sf}) durante los cuatro años de estudio. La evapotranspiración de referencia se muestra para una mejor interpretación de los datos. 53

Fig. 2.7. Evolución estacional del coeficiente de transpiración (K_T) medido con el lisímetro (círculos negros) y con sensores de flujo de savia (círculos huecos) en a) 2012 y b) 2013 55

Fig. 2.8. Evolución de los parámetros del árbol: porcentaje de cobertura de suelo (CC), fracción de radiación PAR interceptada (fIR_d) y densidad de área foliar (DAF) a lo largo de las campañas 2012 y 2013. 56

Fig. 2.9. Evolución de la relación entre K_T diario y porcentaje diario de radiación PAR interceptada durante 2012 (triángulos) y 2013 (círculos). Los valores de K_T obtenidos del lisímetro están representados en negro y los obtenidos por medidas de flujo de savia están representados en blanco. 57

Fig. 2.10. Evolución de la relación entre K_T diario y porcentaje de cobertura de suelo durante 2012 (triángulos) y 2013 (círculos). Los valores de K_T obtenidos del lisímetro están representados en negro y los obtenidos por medidas de flujo de savia están representados en blanco..... 58

Fig. 2.11. Cociente entre radiación PAR interceptada diaria y conductancia de cubierta diaria frente a valor diario del déficit de presión de vapor durante el día. 59

Fig. 2.12. Respuesta del cociente K_T/fIR_d a la variación de la ET_o. Se escogieron pares de días consecutivos en los que se observó una alta variabilidad en el cociente K_T/fIR_d. Su valor relativo se obtuvo dividiendo cada dato diario de K_T/fIR_d y ET_o entre el valor medio de K_T/fIR_d y ET_o del correspondiente par de datos..... 62

Fig. 3.1. Esquema de localización de los tubos de acceso para sonda de neutrones en los árboles centrales de cada tratamiento. 79

Fig. 3.2. Detalle de los efectos de la microaspersión realizada al inicio del experimento en las parcelas del tratamiento T1..... 80

Fig. 3.3 Evolución del contenido de agua en el suelo (CAS) para los árboles de los tratamientos T1 y T2 con set completo de tubos de acceso para sondas de neutrones durante el periodo experimental. Cada punto represente la humedad de suelo media medida hasta la profundidad de 150 cm en ocho puntos del suelo alrededor de cada árbol. Las líneas verticales representan el momento de inicio de la MA y el final del experimento el 9 de agosto 82

Fig. 3.4. Distribución espacial del contenido del agua en el suelo ($cm^3\ cm^{-3}$) hasta una profundidad de 150 cm, en distintas fechas durante el experimento. Los gráficos de la columna de la izquierda corresponden al árbol central de T1.1 y los de la columna de la izquierda al de T2.1. 84

Fig. 3.5. Evolución del coeficiente de transpiración (K_T). Cada punto representa el valor diario medio de los dos árboles de T1 y los tres árboles en T2 monitorizados con sensores de flujo de savia. El valor diario de la evapotranspiración de referencia ET_o también se muestra. 85

Fig. 3.6. Evolución de la transpiración instantánea desde el comienzo de la microaspersión (MA) en T1. La línea negra representa la media de los dos árboles de T1 monitorizados con sap-flow y la línea gris representa la media de los tres árboles de T2. La línea de puntos muestra la aplicación del riego por MA como riego acumulado (mm). El día 17 de julio, ambos tratamientos volvieron a regarse igual que antes de la MA. 86

Fig. 3.7. Evolución temporal de potencial hídrico de xilema al mediodía en T1 y en T2. Cada punto es la media de tres o cuatro hojas por árbol medidas en tres árboles del T1 y en cuatro árboles del T2. La ET_o diaria también se muestra en la figura. Las barras verticales muestran el error estándar. 87

Fig. 3.8. a, b. Evolución diurna del potencial hídrico de xilema en dos fechas: a) 11 de julio, un día antes del inicio de la microaspersión en T1; b) 20 de julio tres días después de final del la MA. Las barras verticales muestran el error estándar. 89

Fig. 3.9. a, b Evolución diurna de la Resistencia hidráulica en dos fechas: a) 11 de julio, un día antes del inicio de la microaspersión en T1; b) 20 de julio tres días después de final del la MA. Las barras verticales muestran el error estándar.....91

Fig. 3.10. Gradiente de potencial hídrico entre el suelo y el xilema frente a la transpiración instantánea de los árboles centrales de T1 y T2. Las medidas se hicieron en varias fechas después de la MA: 20 de julio, 27 de julio, 1 de agosto y 8 de agosto.....92

Fig. 3.11. Evolución temporal de la Resistencia hidráulica de T1 y T2. La evapotranspiración de referencia (ET_o) también se muestra. Las barras verticales indican el error estándar. 93

Fig. 3.12. Evolución diurna de la conductancia de cubierta (gc) de T1 y T2 el día 20 de julio. Cada punto representa el valor medio de los dos árboles de T1 y los tres árboles en T2 monitorizados con sensores de flujo de savia.....94

Fig. 3.13. Potencial hídrico de xilema al mediodía frente a conductancia de cubierta a la misma hora del día en varias fechas, desde antes de la MA hasta después del periodo sin riego previo a la cosecha. Cada punto corresponde a la media de seis medidas de Ψ_x en T1 y de nueve medidas en el tratamiento T2.....95

Fig. 3.14. Evolución temporal de la fotosíntesis al mediodía a nivel de hoja. Cada punto representa la media de tres hojas por árbol medidas en dos árboles del T1 y en tres árboles del T2. Las barras verticales indican el error estándar. 96

Fig. 3.15. Evolución temporal de la conductancia estomática al mediodía (gs mmol/m^2s). Cada punto representa la media de tres hojas por árbol medidas en dos árboles del T1 y en tres árboles del T2. Las barras verticales indican el error estándar.....96

Fig. 3.16. Crecimiento del perímetro de tronco medido a 30 cm de altura del suelo. Cada punto representa la media de tres árboles de T1 y de tres árboles de T2. Las barras verticales indican el error estándar. Cada punto de crecimiento está situado en la fecha media entre las dos fechas de medida consecutivas correspondientes..97

Fig. 3.17. Evolución del potencial hídrico de xilema al mediodía durante el periodo sin riego (09/08-24/08) antes de la cosecha. 98

Fig. 3.18. Potencial hídrico de xilema al mediodía frente a conductancia de cubierta a la misma hora del día durante el periodo de sequía antes de la cosecha. Cada punto corresponde a la media de seis medidas de Ψx en T1 y de nueve medidas en el tratamiento T2 98

Fig. 3.19. Evolución del perfil de humedad en el suelo en T1 entre las fechas 9 agosto y 14 agosto. Cada gráfico representa el perfil a: a) 15 cm, b) 60 cm, c) 140 cm, d) 270 cm de distancia de la línea de goteros. Cada punto es la media de los dos tubos situados a cada una de esas distancias.....99

Fig. 3.20. Evolución del perfil de humedad en el suelo en T2 entre las fechas 9 agosto y 14 agosto. Cada gráfico representa el perfil a: a) 15 cm, b) 60 cm, c) 140 cm, d) 270 cm de distancia de la línea de goteros. Cada punto es la media de los dos tubos situados a cada una de esas distancias.....100

Fig 4.1. Esquema de localización de tubos de sonda: a) en árboles centrales de los tratamientos T1, T2 y T3; y b) entre los cuatro árboles centrales de secano. 117

Fig 4.2 Riego acumulado para cada uno de los tratamientos, evapotranspiración de referencia acumulada (ET_o) y precipitación durante el periodo experimenta..... 118

Fig 4.3. Evolución estacional de a) potencial hídrico antes del amanecer y b) potencial hídrico de xilema al mediodía para cada tratamiento. Cada punto representa la media de 2-3 medidas. Las barras verticales representan el error estándar de la media..... 120

Fig 4.4. Evolución estacional de la transpiración diaria medida mediante el sistema de flujo de savia instalado en un árbol por tratamiento de riego y en dos árboles de los del grupo bajo condiciones de secano (S1 y S2). 122

Fig. 4.5. Relación entre cobertura de suelo y coeficiente de transpiración para los árboles equipados con equipos de sap-flow. 122

Fig 4.6. Evolución estacional del coeficiente de transpiración relativo a la media calculada para el periodo inicial 11/06-20/06 cuando el estado hídrico de los árboles era bueno y similar en todos los tratamientos. 123

Fig 4.7. Relación entre potencial hídrico de xilema al mediodía y el K_T relativo. Cada punto representa, para cada media de todos los valores de potencial cada intervalo de 1 MPa, la correspondiente media de K_T para todos los tratamientos.124

Fig 4.8. a) Relación entre la eficiencia en la transpiración y el DPV diarios para todos los tratamientos, b) relación entre la asimilación de CO_2 y la concentración interna de CO_2 a nivel de hoja, c) relación entre la asimilación de CO_2 y la conductancia estomática a nivel de hoja. 125

Fig 4.9. Evolución diurna del potencial hídrico de xilema y de la eficiencia en la transpiración el día 11 de junio de 2013 (antes del comienzo de los tratamientos). Se presenta la evolución del DPV para mejor interpretación de los datos de TE. 127

Fig 4.10. Evolución diurna del potencial hídrico de xilema y de la eficiencia en la transpiración el día 7 de agosto de 2013. Se presenta la evolución del DPV para mejor interpretación de los datos de TE. 128

Fig 4.11. Evolución diurna del potencial hídrico de xilema y de la eficiencia en la transpiración el día 12 de septiembre de 2013. Se presenta la evolución del DPV para mejor interpretación de los datos de TE..... 129

Fig 4.12. Evolución estacional del índice gc_{max}/gc para cada uno de los tratamientos con medidas de transpiración. 130

Fig. 4.13. Evolución de la transpiración a lo largo de dos fechas, el 11 de junio, antes de comenzar los tratamientos, y el 7 de agosto, época de máximo estrés hídrico. 130

Fig. 4.15. Relación entre conductancia de cubierta derivada de la transpiración de los árboles centrales de T1, T3 y del S2 y DPV para tres fechas durante el periodo experimental. 131

Índice de tablas.

Tabla 2.1. Características del suelo (densidad y textura) en el campo experimental "Alameda del Obispo".....45

Tabla 2.2. Coeficientes de correlación de Pearson entre las principales variables climáticas y el cociente K_T/fIR_d 63

Tabla 2.3. Modelos resultantes de la regresión paso a paso entre K_T/fIR_d y las principales variables climáticas para los meses de julio y agosto de 2012 y 2013. 65

Lista de símbolos

A	Asimilación de CO_2 a nivel de hoja
E	Transpiración a nivel de hoja
Es	Evaporación desde el suelo
ET_c	Evapotranspiración de cultivo
ET_o	Evapotranspiración de referencia
ψ_x	Potencial hídrico de xilema
ψ_l	Potencial hídrico de hoja
ψ_{pd}	Potencial hídrico antes de amanecer
fIR_d	fracción de la radiación PAR interceptada diariamente por la cubierta
gc	Conductancia de cubierta
gs	Conductancia estomática
K_c	Coeficiente de cultivo
K_T	Coeficiente de transpiración
P_a	Presión atmosférica
R_h	Resistencia hidráulica
t	Temperatura
T	Transpiración
T_{sf}	Transpiración medida con sistema de flujo de savia
τ	Transmisividad
V_v	Velocidad del viento

Lista de abreviaturas

CAG	Gradiente Medio Calibrado.
CAS	Contenido de agua en el suelo
CC	Cobertura de suelo
CHP	Compensación de Pulsos de Calor
DAF	Densidad de área foliar
DPV	Déficit de presión de vapor
FI	Riego a máxima demanda
MA	Microaspersión
PAR	Radiación fotosintéticamente activa
PLA	Área foliar del árbol
PRD	Secado parcial de raíces
RD	Riego deficitario
RDC	Riego deficitario controlado
TE	Eficiencia en la transpiración

Resumen

El cultivo del almendro está teniendo una gran expansión en Andalucía debido a las buenas perspectivas de mercado y a las óptimas condiciones que esta zona reúne para dicho cultivo. Las nuevas plantaciones nada tienen que ver con las tradicionales. Hoy en día están ocupando zonas con buenos suelos y están siendo diseñadas en regadío, con marcos de plantación intensivos y nuevas variedades. El objetivo general de esta tesis ha sido estudiar aspectos importantes sobre manejo del riego en un huerto de almendros desde su plantación hasta su madurez que ayuden a conseguir la máxima producción o en caso de limitación del agua (situación habitual en nuestra zona) la máxima productividad del agua. Como principales resultados de la tesis se ha determinado, por primera vez mediante lisimetría, el consumo máximo de agua del almendro, es decir, la transpiración (T) máxima, y se ha encontrado una relación de la T con la radiación interceptada por la copa que servirá en el futuro para estimar las dosis de riego en plantaciones de almendros en cualquier estado de desarrollo. Se ha comprobado que estas necesidades máximas son superiores a las que hasta ahora se proponían en base a estudios anteriores. Además, el hecho de que la relación obtenida esté basada en transpiración en lugar de en evapotranspiración, la hace extrapolable a cualquier huerto de almendros sin importar las diferencias en sistema de poda, variedad, desarrollo o sistema de riego. En segundo lugar, se llevó a cabo un estudio en el que se demostró por primera vez que la transpiración puede verse limitada por el volumen de suelo humedecido en riego localizado. De hecho, cuando el bulbo humedecido por el riego es pequeño, la transpiración puede estar limitada a pesar de que las cantidades de agua aportadas no sean limitantes, y el estado hídrico del árbol mejora cuando se humedece mayor volumen de suelo. Esto tiene una gran implicación práctica en el diseño del sistema de riego siendo recomendables el uso de microaspersión o doble línea de goteros. Estos resultados pueden ayudar al diseño de un sistema de riego que se adapte a las necesidades crecientes de agua a medida que la plantación va desarrollándose. Por último, se ha estudiado la

sensibilidad al estrés hídrico moderado de la variedad Guara, comúnmente utilizada en nuestra región. Estudios previos relacionaban el estado hídrico del árbol con medidas fisiológicas a nivel de hoja. Sin embargo, debido a la gran variabilidad de hojas dentro de una misma copa, resulta problemático extrapolar las conclusiones a nivel de árbol y a nivel de parcela. En esta tesis, por primera vez se ha relacionado el estado hídrico del almendro con medidas continuas de transpiración del árbol. Se ha observado que la transpiración de esta variedad empieza a decrecer pronto al iniciarse el estrés hídrico, a pesar de que a nivel de hoja las diferencias entre tratamientos eran todavía pequeñas. Dentro de este análisis del comportamiento fisiológico del almendro ante situaciones de escasez de agua, se ha observado que la eficiencia instantánea en la transpiración no cambia dependiendo del estado hídrico, y sólo varía en función del déficit de presión de vapor (DPV) de acuerdo a una única relación común para todos los tratamientos. Por tanto el éxito de una estrategia de riego deficitario en esta especie recaerá en el hecho de aprovechar las épocas de la estación donde el DPV es menor para realizar la mayor parte del intercambio gaseoso necesario para generar crecimiento vegetativo y producción, limitándolo en las épocas con altos DPV.

Los resultados de esta tesis sientan la base para futuros estudios de riego deficitario en almendro, que serán clave para el manejo de este cultivo en el actual contexto de escasez de recursos hídricos.

Summary

Almond is greatly expanding in Andalusia due to promising market prospects and also due to the optimal climatic conditions in this region for almond production. New plantations are totally different from the traditional ones that exist in the Iberian Peninsula. New intensive plantations take place on good soils, under irrigated conditions and with new varieties. The main objective of this thesis is to study important aspects of almond orchard irrigation management, to assist in reaching maximum production or, in the case of water scarcity (usual in our region), maximum water productivity. Improvement of irrigation management requires knowledge of crop water requirements. Thus the first goal was to determine maximum almond water consumption (transpiration) by lysimetry and to establish a relationship with daily canopy intercepted radiation. Such relationship should allow the calculation of almond water requirements at any stage of development. Besides, as the relationship obtained is based on transpiration instead of on evapotranspiration, it can be extrapolated to other orchards differing in pruning systems, variety, tree spacing or irrigation system design. Secondly, we conducted a study aimed at answering the question of whether a limited wetted soil volume might reduce transpiration and thus production under localized irrigation. The results proved, under field conditions, that transpiration is limited when the volume of soil wetted by irrigation is small, even though the amount of water applied is not a limitation. This has a great practical implication in the irrigation design, indicating that microsprinklers or a double drip line per tree should be recommended in this species. These results will help to plan an irrigation system that will adapt to growing demands of water as the crop develops with time.

Finally, the sensitivity of the almond cv. Guara, commonly used in our region, to water stress was investigated. Previous studies related tree water status to physiological measurements at the leaf level. However, due to the high variability of leaves within a tree crown, there was the problem of scaling up from the leaves to canopy. In this thesis, for the first time, the water status of almond trees was

related to continuous tree transpiration measurements. As a result, it was observed that transpiration starts to decrease very early once water stress develops, even though small differences in water status were found at the leaf level. Within this analysis of the physiological behavior of almond under water deficits, it was observed that the instantaneous transpiration efficiency does not vary with the water status, and that it was only a function of the vapor pressure deficit (VPD). Then the success of a deficit irrigation strategy rely on the fact of profiting from the low VPD periods is to achieve a large part of gas exchange during those periods, thus leading to high water productivity.

Capítulo 1. Introducción general

Capítulo 1

Introducción general

1.1. Escasez de agua y agricultura

El aporte de agua a través del riego es lo que permite incrementar la producción de aquellos cultivos que necesitan más agua de la que les aporta la precipitación y la reserva del suelo. El rendimiento de estos cultivos, especialmente en zonas áridas o semiáridas como la nuestra, está íntimamente ligado a la gestión del riego realizada. Sin embargo, existe incertidumbre en cuanto al suministro futuro de agua a la agricultura.

En primer lugar, el aumento de la temperatura global en décadas recientes ha llevado a predecir, vía modelos de simulación del clima futuro, un probable aumento en la frecuencia y duración de las sequías en las regiones mediterráneas (Stocker et al. 2013). Un análisis de los datos climáticos disponibles para Andalucía desde la década de 1960 hasta la actualidad confirmó una tendencia hacia mayores temperaturas y radiación y hacia una menor humedad relativa, que tiene un efecto directo sobre la agricultura haciendo aumentar las necesidades hídricas de los cultivos (Espadafor et al. 2011, incluido en anexo 1).

En segundo lugar, esta mayor demanda de recursos hídricos por parte de la agricultura ocurre simultáneamente a una mayor demanda por parte de una población creciente y con un elevado desarrollo económico. Esto establece una competencia entre sectores por el uso del agua como recurso escaso. En este contexto, al ser la agricultura en las zonas áridas y semi-áridas del planeta la principal consumidora del agua derivada de los recursos superficiales y subterráneos, se le exige un uso eficiente de este recurso.

Por tanto, en la situación descrita, las reservas de agua en un futuro no están aseguradas y las dotaciones de riego a los agricultores serán muchas veces insuficientes para cubrir la demanda total de sus cultivos, por lo que deberán optar obligatoriamente bien por no plantar cultivos de regadío o por una estrategia de

riego deficitario, intentando obtener del agua su máxima productividad para alcanzar la máxima rentabilidad posible.

Todos estos problemas a los cuales hace frente la agricultura en la actualidad encuentran una solución común bajo el enfoque de la mejora de la productividad del agua de riego. Esta productividad, entendida como rendimiento por unidad de agua de riego utilizada, puede incrementarse a través de varias vías que afectan bien al numerador o al denominador del cociente definido previamente. Entre las vías están: a) aumento de la eficiencia del riego, es decir, disminución de pérdidas por percolación, drenaje y evaporación; b) aumento de la eficiencia en el uso del agua a nivel de hoja, es decir, más CO_2 asimilado por agua consumida; y c) mejora varietal hacía cultivares con mayores índices de cosecha. Esta última vía requiere de esfuerzos de mejora genética que vienen haciéndose desde hace décadas y que deberían basarse en la interacción entre fisiólogos y mejoradores. En cuanto a los dos primeros puntos, queda justificado el esfuerzo en aprender todo lo necesario para ser capaces de diseñar sistemas de riegos eficientes. En este sentido los objetivos deben estar alrededor de: a) cuantificación de necesidades de riego, b) diseño de sistemas de riego eficientes, y c) respuesta de los cultivos a situaciones de riego deficitario.

1.2. Necesidades de riego

Las necesidades de agua de los cultivos vienen determinadas por la demanda evaporativa de la atmósfera que depende a su vez de las principales variables climáticas: temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento. Hoy en día estos parámetros climáticos están disponibles desde las estaciones agroclimáticas, que forman una red de información esencial en la toma de decisiones del agricultor. La forma habitual de cuantificar esta demanda evaporativa de la atmósfera es a través de una ecuación de combinación como la de Penman-Monteith (Monteith, 1965; Allen et al. 1998), con la que se calcula el consumo de agua de una hipotética pradera de referencia bajo unas determinadas

condiciones climáticas. Ese consumo, denominado evapotranspiración de referencia (ET_o), se puede usar como base para calcular las necesidades de agua de los cultivos (ET_c). Ello se hace a través de la fórmula:

$$ET_c = K_c \cdot ET_o$$

donde K_c es un coeficiente de cultivo que se obtiene de forma experimental y que se supone que es constante. Normalmente, los K_c se han obtenido mediante la determinación del agua que necesita un cultivo determinado, midiendo mediante balance de agua en el suelo la cantidad consumida cuando este cultivo se mantiene en condiciones no limitantes de agua. Un lisímetro de pesada permite realizar este balance con exactitud por diferencia de peso a lo largo del tiempo. Es el método más preciso ya que si todas las entradas y salidas de agua están perfectamente controladas, el error será solamente el derivado de la medición del peso.

Los valores más generalizados de K_c para los distintos cultivos fueron propuestos en 1977 por Doorenbos y Pruitt, y más tarde revisados y recogidos en el número 56 de los manuales FAO de Riego y Drenaje (I&D56, Allen et al. 1998). Sin embargo, a lo largo del tiempo se han ido proponiendo nuevos valores de K_c, casi siempre mayores a los originales, ya que la intensificación de los cultivos se ha incrementado (mayor densidad de plantación, mayor frecuencia de riego, mejor fertilización, nuevas variedades, etc.). Por tanto, se necesitan estudios que permitan conocer con seguridad la cantidad máxima de agua que puede consumir un cultivo, para de este modo sentar un límite máximo de referencia que permita el posterior estudio de escenarios de riego donde las cantidades de agua podrían ser limitantes. En este sentido, y volviendo al tema de la productividad del agua de riego, donde minimizar las pérdidas por evaporación es uno de los objetivos, sería deseable un enfoque que permitiese el cálculo por separado de la componente de evaporación desde el suelo de la cantidad de agua transpirada por el cultivo. En una aplicación práctica posterior, habría que tratar el tema de reducir la evaporación desde el suelo mediante el diseño correcto del sistema de riego, el control de la frecuencia de

aplicación y en base a las condiciones concretas de cada plantación (especie, variedad, clima, estado de desarrollo del cultivo, suelo, etc.).

1.3. Diseño de riego

Los sistemas de riego a lo largo de las últimas décadas han ido modificándose para atender la necesidad de obtener una mayor eficiencia en el uso del agua. Como principal cambio destaca el paso de sistemas de riego por superficie a sistemas localizados a presión, como el riego por goteo o la microaspersión (MA). El riego localizado es especialmente apropiado en huertos de árboles frutales en los que no hay necesidad de mojar el 100% de la superficie del suelo, más aún cuando los árboles son jóvenes e interceptan una baja proporción de la radicación incidente. En cultivos bajo riego localizado, además de aplicar una cantidad suficiente de agua, la correcta distribución de la misma tanto en el tiempo como en el espacio es importante para alcanzar los rendimientos máximos. En este sentido, el cambio de sistemas de riego por superficie u otros riegos de cobertura total a sistemas localizados, llevó al desarrollo de estudios de diseño, donde la velocidad de descarga de los emisores, la distancia entre ellos, la frecuencia de riego y el porcentaje de suelo a mojar eran los principales parámetros analizados (Bresler 1978). Uno de los principales objetivos es encontrar un equilibrio entre un volumen de suelo humedecido lo suficientemente grande para abastecer a las raíces y lo suficientemente reducido para minimizar pérdidas por evaporación, ya que se ha comprobado en distintas especies frutales como naranjo (Moreshet et al. 1986) u olivo (Porras et al. 1988; Pastor et al. 1997) que un número reducido de goteros puede limitar la transpiración y por tanto la producción. Respecto a este tema, aún existe debate sobre si esta limitación se debe a un cierre estomático debido a una restricción de tipo hidráulica (Kramer 1988; Kramer y Boyer 1995) o a señales químicas enviadas a las hojas desde las raíces en contacto con suelo seco (Davies y Zhang 1991.) Aunque las últimas hipótesis apuntan a una combinación de ambos efectos (Comstock 2002).

1.4. Riego deficitario

Una vez conocidas las necesidades máximas del cultivo y la forma de aplicación óptima, estaríamos en condiciones de realizar un buen diseño y calendario de riego para almendro. Sin embargo, la escasez de agua a la que solemos enfrentarnos en la zona mediterránea, hace que el riego se tenga que basar en estrategias de riego deficitario (RD) cuyo principal objetivo es aumentar la productividad por unidad de agua en lugar de por unidad de superficie (Fereres y Soriano 2007). Así este riego por debajo de las necesidades totales del cultivo sería también una herramienta para aumentar la productividad del agua. La producción total de un cultivo está fuertemente ligada a la cantidad de agua transpirada por su cubierta de hojas (Tanner y Sinclair 1983). Por tanto una reducción en la dotación de riego puede fácilmente traducirse en una reducción de rendimiento si las reservas del suelo no son suficientes para compensar ese menor aporte de agua por riego. Sin embargo, la relación entre producción y agua consumida por el cultivo es lineal sólo hasta una cierta cantidad de agua aplicada a partir de la cual el aumento en rendimiento por cada aporte extra de agua es cada vez menor, la relación se vuelve curvilínea y finalmente llega a un rendimiento máximo que no puede superarse a base de seguir aumentando las dosis de riego (Fig 1.1). Es más, en árboles frutales la relación puede no ser lineal desde pequeñas dosis de riego (Moriana et al. 2003). Las estrategias de RD se basan en este hecho y buscan reducir la cantidad de riego con el menor efecto posible sobre el rendimiento del cultivo. La clave del éxito de una estrategia de RD es que la eficiencia en el uso del agua es mayor que comparado con árboles bien regados. Esto puede deberse a varias causas. En primer lugar es muy probable que en un riego deficitario la eficiencia del riego aumente, debido a que las pérdidas de agua se reducen, con lo que hay más agua disponible para su consumo en transpiración por unidad de agua aplicada. De este modo podemos reducir las cantidades de agua de riego manteniendo la producción. En segundo lugar, puede producirse un aumento en la productividad de agua, si se da un incremento de la eficiencia en la transpiración

(TE) instantánea a nivel de hoja, lo cual se ha demostrado en otras especies como olivo (Villalobos et al. 2012), o en viña (De Souza et al. 2005). También se ha demostrado en algunas especies un aumento de la integral diaria en la TE a pesar de que a nivel instantáneo tanto árboles estresado como bien regados presentaban los mismos valores (Roccuzzo et al. 2014). Esto es posible cuando la mayor parte del intercambio gaseoso se realiza en los momentos del día cuando la TE es más alta, debido a un DPV más bajo, cerrando después los estomas como respuesta al aumento del DPV al aumentar la demanda evaporativa (Villalobos et al. 2012). Este efecto podría experimentarse a escala estacional, con mayor intercambio gaseoso en primavera y otoño y menor en verano, aprovechando los periodos en los que la ganancia de CO_2 tiene un menor coste en términos de agua transpirada.

Los estudios de riego deficitario comparan el comportamiento, en términos fisiológicos y de producción, de un cultivo que recibe el total de agua que necesita con el de un cultivo que recibe una cantidad menor de agua.

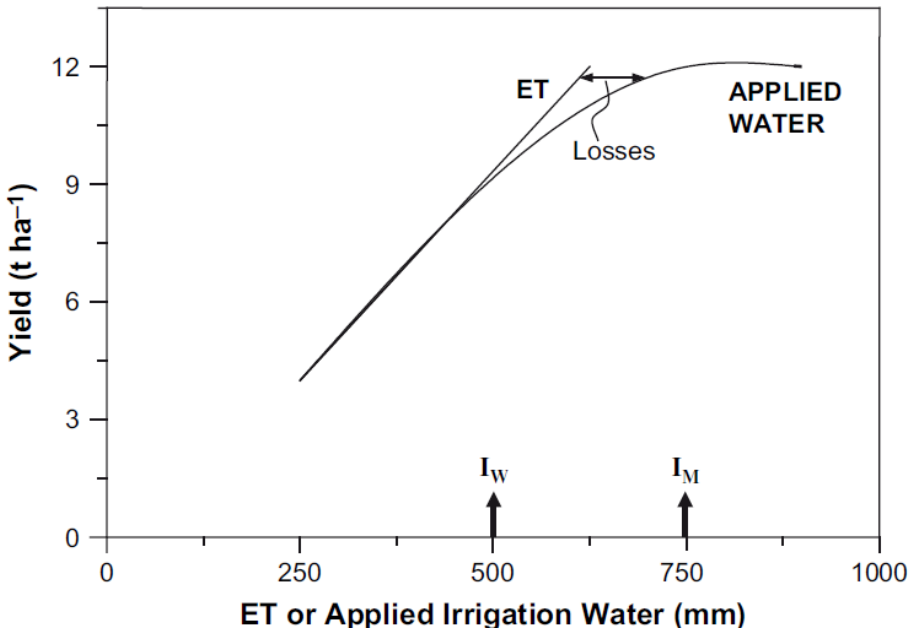


Fig 1.1. Relación general entre agua aplicada por riego o ET y rendimiento en grano. I_W marca el punto a partir del cual la productividad del riego disminuye y I_M el punto a partir del cual más agua no produce aumento en el rendimiento. Fuente: Fereres y Soriano (2007).

Para poder comparar estudios realizados en zonas que difieren en clima, suelo, y/o manejo, se suele complementar la información de la cantidad de agua de riego aplicada como indicador del nivel de satisfacción de los requerimientos por el cultivo, con medidas del estado hídrico de la planta o del suelo. Esta medida del estado hídrico de se estima normalmente con una cámara de presión del tipo Scholander (Scholander et al. 1965) y puede realizarse directamente en hoja expuesta (Ψ_l) o a nivel de xilema utilizando una hoja que ha sido tapada durante el tiempo suficiente para minimizar su transpiración, lo cual permite acercarse a un equilibrio con el xilema en el punto de inserción (Ψ_x). Si medimos Ψ_l antes del amanecer cuando los estomas están cerrados y las hojas no transpiran, obtendremos una medida de potencial relacionada únicamente con el contenido de agua en el suelo, si ha habido suficiente tiempo desde el anochecer para que se equilibren con el mismo. Debido a que el Ψ_x es menos variable que el Ψ_l (la hoja expuesta puede tener una conductancia estomática variable) y a que se han encontrado mejores relaciones entre parámetros fisiológicos (transpiración, conductancia estomática, asimilación…) con el Ψ_x que con el Ψ_l se suele recomendar el uso de este parámetro de estado hídrico de la planta como indicador de estrés (Hsiao 1990; Shackel et al. 1997).

1.5. Almendro

El almendro (*Prunus dulcis* (Mill.) D. A. Webb) es una especie ampliamente cultivada en España (527.058 Ha) y concentrada principalmente en la zona mediterránea: Aragón (12.6%), Cataluña (7.5%), Comunidad Valenciana (20.9%), Murcia (13,5%), Andalucía (28.2%) y Castilla la Mancha (10.8%). Sin embargo, al ser un cultivo que se considera tolerante a la sequía se ha cultivado tradicionalmente en secano, y a día de hoy menos del 8% de la superficie de almendro está bajo regadío (MAAMA, 2013). Como consecuencia los rendimientos en España son muy bajos, en torno a 120 kg de pepita por hectárea

(MAAMA, 2013), cuando una producción bajo regadío puede superar los 2500 kg/ha. Este importante incremento de producción unido a la creciente demanda mundial de almendra y al incremento de precios (Fig. 1.2) ha hecho que este cultivo se esté implantando en condiciones de regadío en todas las nuevas plantaciones en España.

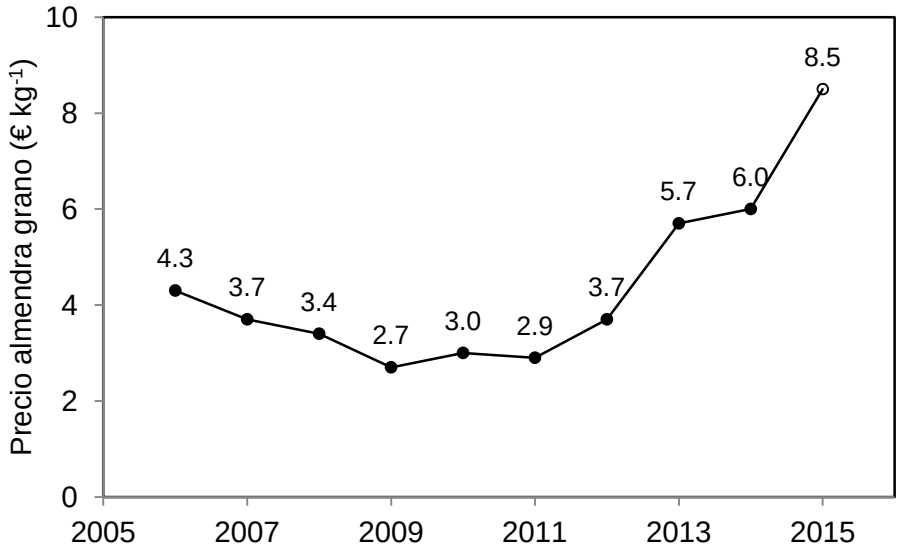


Fig. 1.2. Evolución de precio de almendra común en los últimos años. Fuente: Lonja de Reus.

Además de permitir alcanzar una producción máxima mucho mayor, aportando suficiente agua de riego durante los primeros años desde la plantación se consigue un rápido crecimiento del árbol, y está demostrado que la entrada en fructificación está directamente relacionada con el volumen y el tamaño alcanzados por el árbol, al igual que cuanto antes se alcance el tamaño máximo del árbol, antes se llega a la fase de máxima producción.

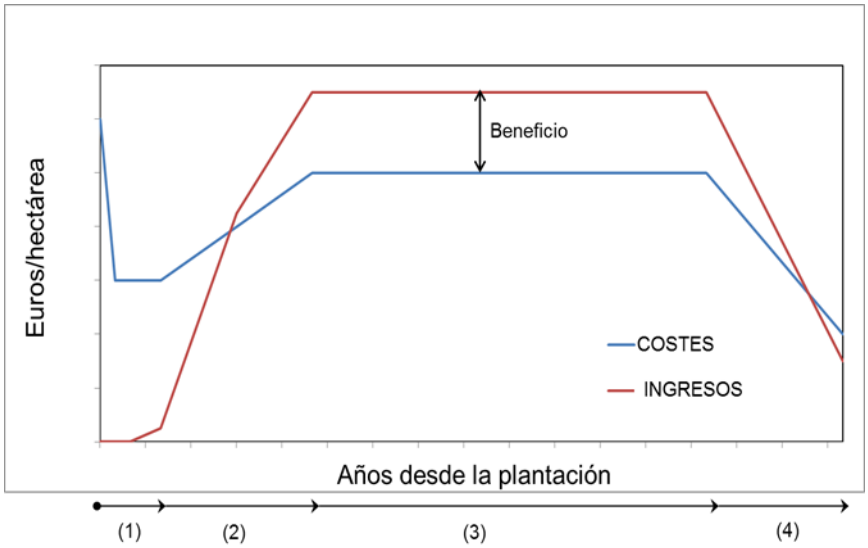


Fig. 1.3. Ciclo de vida de una plantación de almendro. (1) Fase improductiva, (2) Fase de desarrollo, (3) Fase de máxima producción, (4) Fase de envejecimiento.

Por todo lo dicho anteriormente, no hay discusión en cuanto a la ventaja de la puesta en riego de una plantación de almendro frente a su cultivo en secano. Sin embargo, las necesidades máximas de agua de un huerto de almendros no están aún claras ya que los K_c propuestos por Doorenbos y Pruitt (1977) y después por Allen et al. (1998), con un K_c máximo en verano de 0.95, han sido superados en posteriores estudios, posiblemente debido a un mejor manejo en cuanto a fertilización, densidad de plantación así como al uso de mejores variedades y patrones que aportan un mayor vigor tanto al sistema aéreo como al radical. Los últimos estudios realizados se han basado en medidas de la ET_c mediante la técnica de covarianza de torbellinos (Eddy-Covariance), que mide la ET_c a nivel de parcela, y que han mostrado valores de K_c de hasta 1.17 (Stevens et al. 2012) cifra bastante superior a los anteriores. Por otro lado, el ajuste de este coeficiente para tener en cuenta el tamaño del árbol a medida que se desarrolla la plantación, tampoco ha sido totalmente resuelto. Suele usarse con éxito el coeficiente reductor propuesto por Fereres et al. (2012) basado en medidas de cobertura de suelo. El problema que encontramos es que para un mismo grado de cobertura, factores

como densidad de área foliar, altura del árbol, poda, o incluso variedad pueden hacer variar el consumo de agua para un mismo grado de cobertura. Un parámetro relacionado más directamente con la transpiración es la radiación interceptada por la vegetación (Ayars et al. 2003). Una ventaja de relacionar ambos parámetros es que, al estar basada en procesos fundamentales que están íntimamente asociados, debe ser posible extrapolar las relaciones encontradas a huertos con diferentes características de densidad de plantación, poda, suelo, y sistema de riego.

Al igual que en otras especies frutales, el almendro parece reducir su transpiración cuando el volumen de suelo humedecido es pequeño, a pesar de aportar suficiente agua de riego. Schwankl et al. (1999) compararon distintos sistemas de riego y observaron mayores rendimientos con microaspersión que con goteo. Sin embargo, en estos estudios no suele quedar claro si la disminución en la transpiración es sólo debida a una limitación por volumen de suelo humedecido o también a la cantidad de agua recibida en cada tratamiento, que suele ser distinta y probablemente esta diferencia es la responsable de las diferencias entre tratamientos. Por tanto, son necesarios nuevos esfuerzos en resolver esta cuestión, con experimentos en los que el aporte suficiente de agua quede garantizado, para poder alcanzar conclusiones que dependan sólo del volumen de suelo humedecido.

En cuanto al riego deficitario en almendro, algunos trabajos han demostrado previamente el buen desarrollo de este cultivo bajo cantidades de riego por debajo de las máximas necesidades (Girona et al. 2005; Goldhamer et al. 2006; Egea et al. 2013). Aunque depende de las condiciones climáticas diarias y probablemente de la variedad, los valores habituales de Ψ_x considerados para árboles no estresados están entre -0.6 y -1.0 MPa, mientras que de -1.0 a -1.5 MPa se considera un estrés moderado y por debajo de ese valor, se considera un estrés severo. Uno de los primeros efectos del estrés hídrico en plantas tolerantes a la sequía es el cierre estomático, que ocurre como mecanismo para evitar la desecación de las hojas (Hsiao 1973). Varios trabajos realizados con diferentes variedades de almendro han encontrado una reacción de los estomas cuando el potencial decrecía durante un periodo sin riego (Castel y Fereres 1982; Torrecillas et al. 1988, 1996; Romero et

al. 2004, 2006). En algunas especies se ha observado un valor umbral de Ψ_l por encima del cual la conductancia estomática (gs) permanece constante y que una vez superado al avanzar el periodo de estrés provoca una rápida disminución de gs (Hsiao 1973). Sin embargo, en estos estudios la respuesta estomática comenzó pronto después del inicio del estrés hídrico y el descenso en gs fue gradual a medida que disminuía Ψ_l. El amplio rango de valores de gs para un mismo valor de Ψ_l muestra la importancia de la regulación estomática ante contenidos de agua en el suelo cada vez menores (Torrecillas et al. 1988). Todos estos estudios coincidieron en la estrecha relación entre gs y la asimilación de CO_2 (A), indicando que el cierre estomático es la principal limitación de la fotosíntesis, al menos bajo los rangos de estrés alcanzados en esos experimentos. El hecho de mantener cierto grado de apertura estomática en situaciones de escasez de agua a lo largo de una estación de riego supone una ventaja al permitir que la planta continúe asimilando CO_2 y es una característica propia de especies adaptadas a zonas áridas (Fereres y Castel, 1982).

Los estudios de riego deficitario (RD) en almendro (Girona et al. 2005; Goldhamer et al. 2006; Egea et al. 2013) demuestran que, bajo estrés, la productividad de agua aumenta en los tratamientos deficitarios frente a los bien regados. Sin embargo, no está claro hasta qué punto ese aumento en la productividad del agua se debe a una disminución de las pérdidas, a un aumento en la TE instantánea o diaria a nivel de hoja o a un aumento de la productividad a escala estacional. Phogat et al. (2013) encontró mayor productividad del agua, calculada como rendimiento entre agua aplicada, en almendros bajo RD que en almendros bajo riego a demanda total (FI, de sus siglas en inglés para full irrigation). Sin embargo, esta diferencia fue mucho menor cuando el denominador del cociente fue agua evapotranspirada y no hubo diferencias cuando el denominador fue agua transpirada.

Otro hecho importante es que cada variedad tiene un comportamiento particular por lo que los resultados no pueden extenderse a toda la especie (Torrecillas et al 1996; Yadollahi et al. 2011; Karimi et al. 2015), por lo que se

hacen necesarios estudios en las principales variedades que actualmente se están utilizando en las nuevas plantaciones.

Recogiendo todo lo dicho anteriormente, podemos decir que ante los efectos posibles del cambio climático que seguramente derivarán en una creciente escasez de agua de riego, se hace necesario estudiar el comportamiento de cultivos de alto valor económico como el almendro. El objetivo común de esta tesis es por tanto, el estudio de los principales temas relacionados con el manejo del agua de riego en una plantación joven de almendro para conseguir máximas producciones, sentando la base para futuras líneas de investigación en riego deficitario del almendro.

1.6. Objetivos.

En el contexto de todo lo visto anteriormente, los objetivos específicos de esta tesis son:

Objetivo 1. Estimar con precisión el consumo máximo de un huerto de almendros y obtener un método para la estimación de las necesidades de riego extrapolable a cualquier plantación de almendros.

Espadafor M, Orgaz, F, Testi L, Lorite IJ, Villalobos FJ (2015) Transpiration of Young almond trees in relation to intercepted radiation. Irrigation Science, 33:265-275

Objetivo 2. Determinar si el volumen de suelo humedecido puede reducir la transpiración de almendros que están rediciendo cantidades adecuadas de agua y explorar en condiciones de campo la naturaleza de la respuesta de la transpiración a un cambio en el volumen de suelo humedecido.

Espadafor M, Orgaz F, Testi L, Lorite IJ, García O, Villalobos FJ, Fereres E. Almond tree response to a change in wetted soil volumen under drip irrigation. Irrigation Science. En revisión.

Objetivo 3. Investigar las respuestas de la transpiración y de la eficiencia en la transpiración del almendro (cv. Guara) ante déficits hídricos moderados. En preparación.

Referencias

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage. Paper No. 56. FAO, Rome.

Ayars JE, Johnson RS, Phene CJ, Trout TJ, Clark DA, Mead RM (2003) Water use by drip-irrigated late-season peaches. Irrig Sci 22:187-194

Bresler, E., 1978: Analysis of trickle irrigation with application to design problems. Irrig Sci 1: 3-17.

Comstock, J.P., 2002: Hydraulic and chemical signalling in the control of stomatal conductance and transpiration. J Exp Bot 53:195-200.

Castel JR, Fereres E (1982) Responses of young almond trees to two drought periods in the field. J Hortic Sci 57:175-187

De Souza CR, Maroco JP, dos Santos TP, Rodrigues ML, Lopes CM, Pereira JS, Chaves M (2005) Impact of déficit irrigation on wáter use efficiency and carbón isotope composition (δ13C) of field-grown gravepines under Mediterranean climate. J Exp Bot 56: 2163-2172.

Davies W.J. Zhang J (1991): Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. Annu Rev Plant Phys 42:55-76.

Doorenbos J, Pruitt WO (1977) Crop water requirements. Irrigation and Drainage. Paper No. 24. FAO, Rome.

Egea G, Nortes PA, Domingo R, Baille A, Pérez-Pastor A, González-Real MM (2013) Almond agronomic response to long-term déficit irrigation applied since orchard establishement. Irrig Sci 31:445-454

Espadafor M, Lorite IJ, Gavilán P, Berengena J (2011) An analysis of the tendency of reference evapotranspiration estimates and other climate variables during the last 45 years in Southern Spain. Agr Water Manage 98:1045-1061

Fereres E, Soriano MA (2007) Deficit irrigation for reducing agricultural water use. J Exp Bot 58:147-159

Fereres E, Goldhamer DA, Sadras V (2012) Yield response to water of fruit trees and vines: guidelines. In: Steduto P, Hsiao TC, Fereres E, Raes D (Eds.) Cropyield Response to Water. Irrigation and Drainage. Paper No. 66. FAO, Rome.

Girona J, Mata M, and Marsal J (2005) Regulated deficit irrigation during the kernel-filling period and optimal irrigation rates in almond. Agr Water Manage 75:152-167.

Goldhamer DA, Viveros M, Salinas M (2006) Regulated deficit irrigation in almonds: effects of variations in applied water stress timing on yield and yield components. Irrig Sci 24:101-114

Hsiao TC (1973) Plant responses to water stress. Ann Rev Plant Physiol 24:519-570

Hsiao TC (1990) Measurements of plant water status. In: Irrigation of agricultural crops (Stewart BA, Nielsen DR, Eds) American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA Monograph No. 30, 243-279.

Karimi S, Yadollahi A, Arzani K, Imani A, Aghaalikhani M (2015) Gas-exchange response of almond genotypes to water stress. Photosynthetica 53:29-34

Kramer PJ (1988) Changing concepts regarding plant water relations. Plant Cell Environ 11:565-568.

Kramer PJ, Boyer JS (1995) Water relations of plants and soils. San Diego California: Academic Press.

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2013) Estadísticas de superficies y producciones de cultivos. http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/superficies-producciones-anuales-cultivos/

Monteith JL, (1965). Evaporation and the environment. The state and movement of water in living organisms. In: Proc. 19th Symp. Soc. Exp. Biol., Cambridge University Press, Swansea, UK.

Moreshet S, Cohen Y, Fuchs M (1983) Response of mature 'Shamouti' orange trees to irrigation of different soil volumes at similar levels of available water. Irrig Sci 3:223-236.

Moriana A, Orgaz F, Pastor M, Fereres E (2003) Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. J Amer Soc Hort Sci 123:425-431

Pastor M, Orgaz F, Vega V, Hidalgo J, Castro J (1997) Programación del riego en olivares de la provincia de Jaén. Riegos y Drenajes XXI 10: 43-53.

Phogat V, Skewes MA, Mahadevan M, JW Cox (2013) Evaluation of soil plant system response to pulsed drip irrigation of an almond tree under sustained stress conditions. Agr Water Manage 118:1-11

Porras A, Arnal J, Muñoz F (1988) Influencia de la superficie de suelo regada sobre el consumo del agua y producción de plantones de olivo. Un sistema electrónico de automatización y control del riego. Fruticultura Profesional 17:51-62.

Roccuzzo G, Villalobos FJ, Testi L, Fereres E (2014) Effects of water deficits on whole tree water use efficiency of orange. Agr Water Manage 140:61-68

Romero P, Navarro JM, García F, Botia P (2004) Effects of regulated deficit irrigation during pre-harvest period on gas exchange, leaf development and crop yield of mature almond trees. Tree Physiol 24:303-312

Romero P, Botía P (2006) Daily and seasonal patterns of leaf water relations and gas exchange of regulated deficit-irrigated almond trees under semiarid conditions. Environ Exp Bot 56:158-173

Scholander PF, Bradstreet ED, Hemmingsen EA, Hammel HT (1965) Sap pressure in vascular plants. Science 148:339-346

Schwankl LJ, Edstrom JP, Hopmans JW, Andreu L, Koumanov KS (1999) Microsprinklers wet larger soil volume; boost almond yield, tree growth. Calif Agr 53:39-43

Shackel KA (2007) Water relations of woody perennial plant species. J Int Sci Vigne Vin 41:121-129

Shackel KA, Ahmadi H, Biasi W, Buchner R, Goldhamer D, Gurusinghe S, Hasey J, Kester D, Krueger B, Lampinen B, McGourty G, Micke W, Mitcham E,

Olson B, Pelletrau K, Philips H, Ramos D, Schwankl L, Sibbett S, Snyder R, Southwick S, Stevenson M, Thorpe M, Weinbaum S, Yeager J (1997) Plant water status as an index of irrigation need in deciduous fruit trees. Hort Technology 7:23-29

Stevens RM, Ewenz CM, Grigon G, Conner SM (2012) Water use by an irrigated almond orchard. Irrig Sci 30:189-200

Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Alexander LV, Allen SK, Bindoff NL, Bréon FM, Church JA, Cubasch U, Emori S, Forster P, Friedlingstein P, Gillett N, Gregory JM, Hartmann DL, Jansen E, Kirtman B, Knutti R, Krishna Kumar K, Lemke P, Marotzke J, Masson-Delmotte V, Meehl GA, Mokhov II, Piao S, Ramaswamy V, Randall D, Rhein M, Rojas M, Sabine C, Shindell D, Talley LD, Vaughan DG, Xie SP (2013) Technical Summary. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 33–115.

Tanner and Sinclair (1983) Efficient water use in crop production: research or re-search In: Taylor HM, Jordan WR, Sinclair TR, eds. Limitations to efficient water use in crop production. Madison, WI: ASA, CSSA, SSSA, 1–27.

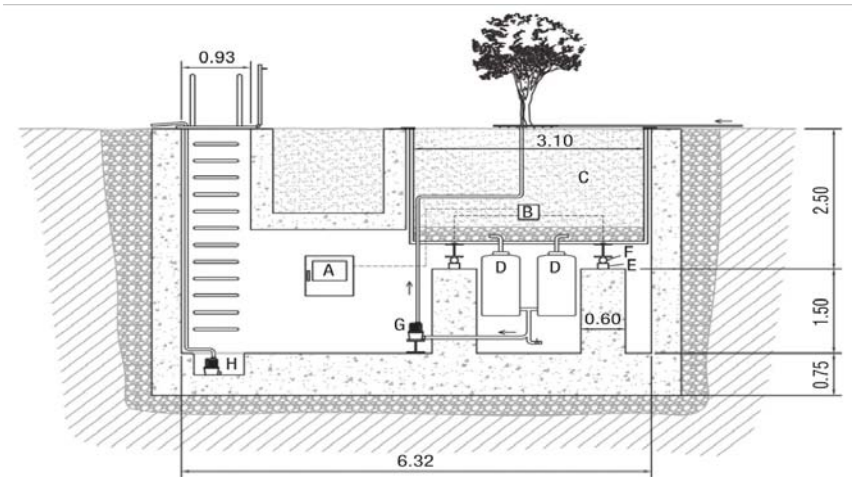
Torrecillas A, Ruiz-Sánchez MC, del Amor F, León A (1988) Seasonal variations on water relations of Amygdalus communis L. under drip irrigated and non irrigated conditions. Plant Soil 106:215-220

Torrecillas A, Alarcón JJ, Domingo R, Planes J, Sanchez-Blanco MJ (1996) Strategies for drought resistance in leaves of two almond cultivars. Plant Sci 118:135-143.

Villalobos FJ, Perez-Priego O, Testi L, Morales A, Orgaz F (2012) Effects of water supply on carbon and water exchange of olive trees. Eur J Agron 40:1-7

Yadollahi A, Arzani K, Ebadi A, Wirthensohn M, Karimi S (2011) The response of different almond genotypes to moderate and severe water stress in order to screen for drought tolerance. Sci Hortic 129:403-413

Capítulo 2. Transpiración de almendros jóvenes en relación a la radiación interceptada



Este capítulo está publicado en la revista ISI Irrigation Science:

Espadafor M, Orgaz F, Testi L, Lorite IJ, Villalobos FJ (2015) Irri Sci 33:265-275

Capítulo 2

Transpiración de almendros jóvenes en relación a la radiación interceptada

Resumen

La escasez de agua es cada vez mayor y esto requiere un uso más eficiente en la gestión del agua en el sector de la agricultura que es el primer consumidor de este recurso. Para la aplicación adecuada del agua es necesaria una estimación precisa de las necesidades de riego, basadas en parámetros específicos del cultivo. En este estudio llevamos a cabo el análisis de 4 años de datos sobre consumo de agua del almendro adquiridos mediante un lisímetro de pesada. El tamaño de la cubierta evolucionó desde un 3% hasta un 48% de cobertura de suelo durante el periodo en estudio. Medidas de flujo de savia realizadas en el árbol del lisímetro permitieron obtener un registro continuo de la transpiración. Proponemos el uso de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada diariamente por la cubierta (fIR_d) como el indicador de la máxima transpiración de un huerto de almendros. El coeficiente de transpiración (T/ET_o o K_T) se relacionó con la fIR_d de los dos últimos años y se comprobó que el cociente entre fIR_d y K_T permaneció más o menos constante y alrededor del valor 1.2. Este valor, extrapolado al tamaño de un huerto adulto que interceptase un 85% de la radiación, da un K_T de aproximadamente 1.0, por encima de las recomendaciones habituales, pero totalmente compatible con los valores de K_c cercanos a 1.15 propuestos en los últimos estudios.

Summary

Increased water scarcity demands more efficient use of water in the agricultural sector which is the primary consumer of this resource. Precise determination of irrigation requirements based on specific crop parameters is needed for accurate water applications. We conducted a 4-year study on almond evapotranspiration using a large weighing lysimeter. Tree canopies changed from 3% to 48% ground cover during the course of the study. Sap flow measurements made on the lysimeter tree provided a continuous record of tree transpiration. We propose to use the daily fraction of photosynthetically active radiation intercepted by the canopy (fIR_d) as a predictor of almond orchard maximum transpiration. The transpiration coefficient (T/ET_o or K_T) was related to the fIR_d during the last two years, and the ratio between fIR_d and K_T stayed more or less constant around a value of 1.2. Such value extrapolated to the size of a mature orchard with 85% intercepted radiation, gives a K_T of around 1.0, a number above the standard recommendations but fully compatible with the maximum K_c values of 1.1-1.15 recently reported.

2.1. Introducción

El sector de la agricultura, como primer consumidor de agua (hasta un 70% del agua obtenida de ríos y subsuelo se destina a regadío) y dentro de un contexto de incertidumbre en las predicciones de disponibilidad de este recurso en el futuro (Stocker et al. 2013), debe tener como principal objetivo el uso eficiente del agua de riego. Para ello, a la vez que se están adoptando métodos de riego más eficientes en todo el mundo, es fundamental realizar una estimación precisa de las necesidades de agua de los cultivos (Lenton 2014). Uno de los métodos que se usan actualmente para calcular dichas necesidades se basa en el procedimiento de los coeficientes de cultivo (K_c) descrito en las monografías de la FAO números 24 y 56 (Doorenbos y Pruitt 1977; Allen et al. 1998). Estos K_c relacionan empíricamente la evapotranspiración de un cultivo (ET_c), agua que consume por transpiración y evaporación desde el suelo, con una evapotranspiración de referencia (ET_o) que sería aquella de una pradera de referencia bajo las mismas condiciones climáticas.

Durante las últimas décadas se han recomendando valores de K_c para distintos cultivos así como para sus distintos estados de desarrollo. En Allen et al. (1998) se puede consultar una tabla resumen de estos valores. Sin embargo, tras nuevos experimentos de campo, los valores que aparecen es esta tabla han sido corregidos, normalmente al alza. En el caso de árboles frutales, y basándose en valores previos propuestos por Doorenbos y Pruitt en 1977, Allen et al. (1998) propusieron un amplio rango de valores de K_c para las diferentes especies. Por ejemplo, para la etapa de mediados de temporada (K_c máximo) los valores de diferentes especies frutales, sin cobertura de suelo, van desde valores de 0.65 a valores de 1.10, es decir, pasaríamos por especies que en plena demanda consumen un 65% de lo que consumiría la pradera de referencia y por especies que llegan a consumir hasta un 10% más. En el caso de un huerto adulto de almendros, los valores propuestos para las etapas inicial, de mediados de temporada y final fueron 0.40, 0.90 y 0.65, respectivamente. Según esta recomendación, la ET_c del almendro en la época de máxima demanda evaporativa sería inferior a la ET_o. De hecho, Doorenbos y Pruitt (1977) propusieron valores K_c entre 0.8 y 0.95 dependiendo de la humedad relativa y de la velocidad del viento medias anuales de la zona en estudio. Sin embargo, algunos trabajos más recientes están encontrando que los valores de K_c del almendro son mayores a los que apuntó Allen et al. (1998). Girona et al. (2006) y Sanden (2007), éste último basado en observaciones puntuales, ha propuesto valores cercanos a 1.05 en verano. Esta discrepancia podría explicarse por la intensificación que se ha producido en los sistemas de producción de almendros en las últimas décadas, con marcos de plantación más intensivos y una poda mínima, que ha hecho que la radiación interceptada por las nuevas

plantaciones sea mayor que la que se interceptaba en los antiguos huertos en los que se midieron los K_c originales.

Trabajos más recientes se han centrado en medir la ET_c del almendro usando la técnica de covarianza de torbellinos (Eddy-Covariance). Éstos han determinado valores máximos de K_c de 1.12 en un huerto de almendros de alto rendimiento (4.3 t ha^{-1}) regado por microaspersión en Australia (Stevens et al. 2012). Sanden et al. (2012) proponen un valor máximo de K_c de 1.15 para almendros de alto rendimiento (4.0 t/ha), a pesar de que los rendimientos fueron los mismos cuando regaron de acuerdo a sus valores anteriores de K_c (Sanden 2007).

Dado que los coeficientes de cultivo incluyen no solo transpiración (T) sino también evaporación desde el suelo (E), la cual puede variar mucho según las características particulares de cada huerto, para ser capaces de generalizar en lo que respecta a recomendaciones de riego, es importante separar los dos componentes del proceso de ET. En Allen et al. (1988) se usa el procedimiento del coeficiente dual para separar E_s de T basado en el trabajo de Wright (1982). Se trata de separar el K_c en un coeficiente basal (K_{cb}) y un coeficiente de evaporación (K_e). K_{cb} se considera equivalente al agua transpirada por el cultivo dividida por la ET_o (si asumimos que la evaporación desde suelo seco es despreciable) y debería ser independiente de la frecuencia y método de riego. Esto hace que K_{cb} sea un coeficiente más aplicable a distintos huertos con diferentes características que afectan al componente E_s de la ET.

En el caso de cultivos leñosos K_{cb} (al igual que el K_c) no sólo varía dentro de la evolución anual, sino que este coeficiente irá aumentando a medida que los árboles aumentan su tamaño desde su plantación hasta llegar a ser un huerto adulto, es decir, aquel en el que la cobertura de suelo es la máxima que permite el paso de maquinaria. Doorenbos y Pruitt (1977) propusieron valores de K_c para huertos que cubrían un 20 y un 50% del suelo. Recomendaron una reducción del K_c correspondiente a un huerto adulto del 25-35% y del 10-15% respectivamente. Allen et al. (1998) usan un coeficiente de ajuste para reducir el K_{cb} correspondiente a cubierta total ($K_{c\ full}$), cuando la cubierta es incompleta. Este coeficiente de ajuste ($K_{c\ adj}$), que se basa tanto en la cobertura de suelo como en la altura del árbol, toma valores de 0.40 y 0.89 para un 20 y 50% de cobertura de suelo respectivamente. Más recientemente, Allen y Pereira (2009) modificaron este procedimiento y sustituyeron $K_{c\ adj}$ por un coeficiente de densidad (K_d) que alcanza valores de 0.30 y de 0.78 para 20 y 50% de cobertura de suelo, respectivamente, bastantes diferentes a los recomendados por Allen et al (1998). En resumen, hay bastante incertidumbre sobre cómo ajustar los valores de K_c o K_{cb} a situaciones de cobertura de suelo incompleta en árboles en crecimiento.

Fereres et al. (1982) midieron la ET de almendros jóvenes (1-3 años) regados por goteo y relacionaron esos valores con el nivel de cobertura de suelo de los árboles (proyección horizontal de la sombra). Las medidas se expresaron como porcentajes de la ET de un huerto maduro, asumiendo un 60% de cobertura del suelo, el cual suponía entonces la máxima cobertura de los huertos comerciales. La relación empírica obtenida en ese estudio se ha utilizado ampliamente desde entonces para calcular las necesidades de riego de árboles jóvenes en climas semi-áridos (Castel 1997; Ayars et al. 2003). Recientemente, Fereres et al. (2012) han propuesto una relación muy similar, basada en datos experimentales de otras especies frutales, donde la ET de árboles jóvenes se calcula como porcentaje de la ET de huertos adultos de acuerdo con el nivel de cobertura de suelo. Sin embargo, la cobertura de suelo medida como el área sombreada por un árbol es una estimación grosera de la radiación interceptada por el árbol ya que no tiene en cuenta factores como la densidad de área foliar, la altura del árbol o la arquitectura de la cubierta, que varían según la especie, variedad y momento de la estación. Estos factores influyen en la cantidad de radiación interceptada que para una conductancia estomática determinada, es el factor clave de la transpiración del árbol.

De hecho, Green et al. (2003a) y Ayars et al. (2003) han demostrado que la transpiración está directamente relacionada con la cantidad de radiación interceptada por el árbol en manzanos y melocotoneros, y además vieron que esa relación se mantiene constante a lo largo de toda la estación. Pereira et al. (2007) encontraron una misma relación lineal entre transpiración diaria (T) y radiación neta diaria multiplicada por el índice de área foliar de manzanos, avellanos y olivos. Sin embargo, Girona et al. (2011) encontraron diferentes relaciones entre porcentaje de radiación fotosintéticamente activa interceptada al mediodía por el árbol (fIR_{md}) y T en manzano y peral, y observaron disminuciones en K_c después de la cosecha a pesar de no haber cambios en la densidad de hojas. Goodwin et al. (2006) en melocotonero y Consoli et al. (2006) en cítricos relacionaron la T con la integral diaria de radiación PAR interceptada (fIR_d) en lugar de con fIR_{md}, y recomendaron esta metodología para mejorar la predicción de K_c a partir de medidas de radiación PAR interceptada.

En estudios recientes, se ha predicho con éxito la T en manzano a partir de fIR_d (Auzmendi et al. 2011; Casadesús et al. 2011). Casadesús et al. (2011) subrayan la necesidad de normalizar la relación T con fIR_d para distintas temperaturas, ya que en algunas especies con poca respuesta estomática a altas demandas evaporativas, la sensibilidad a cambios en ET_o es más importante que a la variación de fIR_d. Marsal et al. (2013, 2014) han usado el modelo de simulación CropSyst para predecir K_c a partir de fIRd en manzano y peral, aunque ellos obtuvieron una relación diferente para cada una de estas dos especies y para cada

estado de desarrollo del árbol. Marsal et al (2013) definen un parámetro, K_{cfc}, que representa el máximo K_c para un cultivo hipotético que cubre completamente el suelo y usan fIR_d para escalar el consumo de agua según tamaño y forma del árbol.

Las variaciones en la relación entre T y fIR_d deben estar relacionadas con diferencias en la conductancia de cubierta (gc). Existen modelos que predicen T basada en el cálculo de gc (Dekker et al. 2000). Estos modelos suelen ser complejos y necesitar una gran cantidad de datos de entrada. Orgaz et al. (2007) desarrollaron un modelo simplificado de gc y que mostró un buen funcionamiento en la predicción de T de olivos. Villalobos et al. (2013) han ampliado el mismo procedimiento a otras varias especies frutales donde la calibración se llevó a cabo midiendo la T con sensores de flujo de savia y la interceptación diaria de radiación.

Dadas las incertidumbres en la magnitud de las necesidades de agua de un huerto de almendros, este trabajo tuvo como objetivos la medida del consumo de agua de árboles jóvenes de almendros y el desarrollo de una relación que pueda ser generalizada entre T y radiación interceptada para cubiertas de almendro.

2.2. Materiales y métodos

El experimento se llevó a cabo en un huerto de almendros de 5.5 ha situado en el centro de Investigación del IFAPA "Alameda del Obispo", en Córdoba, España (37º 52' N, 4º 49' W). En 2009 se plantaron en la parcela almendros de la variedad Guara, un cultivar de floración tardía y autofértil (Felipe y Socias i Company 1987) sobre patrón GF-677. El marco de plantación fue 6 x 7 m con las filas orientadas de este a oeste. La vegetación entre filas se controló con aplicaciones periódicas de herbicidas. El sistema de riego fue por goteo, con una sola línea por fila de árboles y goteros de 2.4 l/h cada metro, es decir, 6 goteros por árbol. En 2013, el sistema de riego se modificó, instalando una segunda línea de goteros por fila de árboles y cambiando los goteros por otros de mayor caudal 4 l/h también a un metro de distancia entre ellos. La frecuencia de riego fue diaria y la cantidad de agua a aplicar se calculó como ET_o x K_c reducido por el coeficiente de Fereres et al. (2012). La datos de la ET_o se obtuvieron de una estación agrometeorológica situada a tan solo 300 de metros de la parcela de estudio.

Justo antes de establecer la plantación, se construyó en el centro de la parcela un lisímetro de pesada. Éste consiste en un contenedor de acero inoxidable de 3m x3m y 2.15 m de profundidad, que se apoya sobre cuatro células de carga que miden su peso continuamente con una precisión de 0.5 kg, equivalente a 0.056 mm de agua. La información se almacena en un datalogger como medias de 5 minutos y se descarga periódicamente a un ordenador. El diseño completo y la

construcción del lisímetro se ha descrito en Lorite et al. (2012). Cuando se realizó la plantación uno de los árboles se colocó en el centro del lisímetro.

Tabla 2.1. Características del suelo (densidad y textura) en el campo experimental "Alameda del Obispo".

Profundidad (cm)	Densidad (g cm^{-3})	Profundidad (cm)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)
15	1.63	30	30.4	52.6	17.0
45	1.50	60	27.0	50.7	22.3
75	1.54	90	30.0	50.4	19.6
105	1.44	120	31.9	45.1	23.0
135	1.54	150	37.6	44.4	18.0
165	1.60	180	46.8	39.3	13.9
195	1.59	210	57.2	32.1	10.7
225	1.57	240	50.6	35.0	14.4
255	1.55	270	47.4	38.8	13.8
285	1.55	300	53.1	33.9	13.0
325	1.53	330	76.4	17.5	6.1
375	1.56	360	43.5	37.4	19.1
		390	58.2	29.6	12.2
		420	34.0	51.6	14.4
		450	58.2	31.4	10.4
		420	34.0	51.6	14.4
		450	58.2	31.4	10.4

Al igual que el resto de árboles del huerto, el del lisímetro se regó con seis goteros de 2.4 l/h, que se dispusieron rodeando el tronco del árbol. En 2013, a la vez que en el resto del campo, el riego en el lisímetro se modificó a 24 goteros de 2 l/h, dispuestos en cuatro líneas con 6 goteros cada una, cubriendo toda la superficie de suelo del lisímetro. Este riego equivale al riego de fuera del lisímetro (48 l/h). El riego del lisímetro se realizó por las noches, simultáneamente al resto de la parcela, y se tomó medida del caudal aplicado cada día con un contador volumétrico. La pérdida de peso durante el día se consideró equivalente a la ET y está información se utilizó para ajustar las dosis de riego en toda la plantación.

En cuanto a la poda y control de plagas y enfermedades el árbol del lisímetro se trató de la misma manera que al resto de los árboles. Para asegurar que el crecimiento del árbol no estaba limitado por falta de nutrientes provocada por un volumen de suelo menor que el correspondiente a un árbol de fuera, se añadió una cantidad mayor de fertilizantes que la del programa estándar de fertilización. De forma periódica el suelo del lisímetro se cubrió con un plástico grueso para evitar la evaporación. Sobre el plástico se dispuso una fina capa de tierra para no cambiar el

albedo alrededor del árbol. La pérdida de peso durante el día de estos periodos se consideró equivalente a la T del árbol.

Los datos de días lluviosos no se consideraron en los análisis, y en caso de fuertes eventos de lluvia, los días siguientes también se descartaron.

El estado hídrico del árbol en el lisímetro se controló periódicamente durante 2011, 2012 y 2013, mediante medidas de potencial hídrico de xilema. Se instalaron cuatro tubos de acceso para sonda de neutrones en el suelo del lisímetro para medir el contenido de agua en el suelo. El estado nutricional del árbol se controló mediante análisis foliar una vez al año en 2012 y 2013.

2.2.1. Medidas con sensores de flujo de savia

La transpiración del árbol del lisímetro se midió con un sistema de medida de flujo de savia, desarrollado y montado en el Instituto de Agricultura Sostenible (IAS) y descrito en Testi y Villalobos (2009). El sistema usa el método de Compensación de Pulsos de Calor (CHP, de sus siglas en inglés), además de la técnica de Gradiente Medio Calibrado (CAG, de sus siglas en inglés). Esta última técnica se utiliza para poder medir velocidades de flujo de savia muy bajas (menores de 12 cm/h), que no podrían medirse por CHP o que se medirían con muy poca precisión. Para medir la velocidad del flujo de savia, un conjunto de sondas junto con su correspondiente electrónica se conecta a un datalogger. Cada conjunto consiste en un una sonda que emite un pulso de calor y otras dos sondas que contienen sensores de temperatura a tres profundidades diferentes desde el cambium hacia el interior del tronco, en nuestro caso a 5, 15 y 35 mm. Midiendo el tiempo que tarda el calor emitido en llegar a cada uno de los sensores de temperatura, se estima la velocidad del flujo de savia a cada una de las profundidades. Integrando esas velocidades a lo largo del radio del tronco y a lo largo de la sección de tronco considerada (Green et al. 2003b) se calcula la transpiración del árbol (l/h). Se realizaba un ciclo completo de medidas cada 15 minutos. Para tener en cuenta la variación acimutal, es decir, las diferencias en flujo de savia según el punto del tronco donde se instalan las sondas, que ya se han observado antes en otras especies (López-Bernal et al. 2010), se dispusieron dos sets de sondas y cada una de ellas se calibró con las medidas del lisímetro en los días en que el suelo de éste estaba tapado. De esta forma se obtuvo un coeficiente de calibración para cada uno de los sets de sondas, que relaciona transpiración diaria medida por flujo de savia (T_{sf}) con transpiración diaria medida con lisímetro (T).

Fig. 2.1. Sondas para medida del flujo de savia en el tronco de uno de los árboles experimentales.

2.2.2. Caracterización de la copa del árbol.

Las características de la copa se obtuvieron por imágenes digitales del árbol del lisímetro tomadas desde al menos cuatro posiciones diferentes. Cada una de las imágenes se escaló a dimensiones reales mediante el programa AutoCAD-2012 (Autodesk, San Rafael, California, USA) y tomando como referencia un jalón marcado cada 10 cm y colocado cerca del tronco y justo en el mismo plano del tronco según la posición del fotógrafo. De cada una de las imágenes se midieron altura del árbol y radios vertical y horizontal de la copa. A partir de esas medidas se calculó un valor promedio de cada uno de los radios. El radio horizontal se usó para calcular el porcentaje de suelo cubierto en relación al marco de plantación. El volumen de copa se obtuvo mediante los radios vertical y horizontal aproximando la forma del árbol a un elipsoide.

El área foliar se estimó mediante el análisis de fotografías tomadas a la sombra proyectada por el árbol sobre el suelo. El procedimiento desarrollado se basa en la teoría de la Transmisividad (τ), que se define como la probabilidad de

que un rayo de luz atraviese la copa del árbol sin ser interceptada por ningún elemento (hojas, ramas) antes de alcanzar la superficie del suelo (Lang 1987).

$$\tau(\theta) = \exp(-G(\theta) \cdot DAF \cdot S(\theta)) \quad [1]$$

donde θ es el ángulo cenital, G(θ) es la proyección de las hojas sobre la perpendicular a la dirección del rayo, DAF es la densidad de área foliar y S(θ) es la longitud del camino que ha de atravesar el rayo de luz por la copa para llegar al suelo. Tomando logaritmos a ambos lados de la Ecuación 1:

$$\log \tau(\theta) = -G(\theta) \cdot DAF \cdot S(\theta) \quad [2]$$

Si consideramos la proyección de la cubierta sobre el suelo dividida en sectores iguales, la densidad de área foliar en un sector *i* correspondiente a un área en el plano normal al rayo A_{ni} es:

$$DAF_i = \frac{PLA_i}{S_i \cdot A_{ni}} \quad [3]$$

Y el área foliar (PLA) puede ser derivada de la Ecuación 2:

$$PLA = \frac{A_{ni}(\theta)}{G(\theta)} \cdot \log \tau_i \quad [4]$$

Cuando θ = 1 rad, G = 0.5 (Lang 1987), y entonces:

$$PLA = -2 \cdot A_{ni}(\theta)(\overline{\log \tau_i}) \quad [5]$$

En el momento del día cuando θ = 1 rad se toma una fotografía en color a la sombra del árbol. Para conseguir un mayor contraste se coloca en el suelo una sábana blanca. La fotografía se importa a ERDAS-IMAGINE (HEXAGON Geospatial, Estocolmo, Suecia) un software de procesamiento de imágenes que nos permite trabajar con los píxeles como una matriz de valores. A continuación, se lleva a cabo una clasificación supervisada en la que a cada píxel se le asigna la clase Luz o la clase Sombra. A cada píxel de la clase Luz se le asigna un valor de 100 y cada píxel de la clase Sombra un valor 0. El siguiente paso es “degradar” la imagen, es decir, a partir de los píxeles originales creamos nuevos píxeles más grandes cuyo valor será el promedio de todos los píxeles originales que contiene. De esta forma conseguimos obtener para cada nuevo píxel el porcentaje de su área que está recibiendo luz, concepto equivalente a la transmisividad. En una hoja de cálculo, se calcula el logaritmo del valor de cada pixel y el promedio, para aplicar la Ecuación 5 y obtener PLA. Finalmente, la densidad de área foliar (DAF) se calcula dividiendo PLA entre volumen de copa.

Fig. 2.2. Método para estimar volumen de copa y densidad de área foliar mediante análisis de fotografías.

Para validar el método descrito arriba, después de realizar las correspondientes fotografías para calcular su PLA, se llevó a cabo el siguiente procedimiento, en cuatro árboles en 2012 y un árbol en 2013: antes de que se comenzaran a caer las hojas, y cuando aún mostraban un aspecto sano, se recogió una muestra de 200 hojas y se midió su área con un planímetro modelo Li-Cor Li-3100. De esta manera obtuvimos el área por hoja. El mismo día que se recogió dicha muestra se cubrió con una malla toda la copa del árbol para poder recoger todas las hojas a medida que se iban cayendo en otoño. Cuando todas las hojas de cada árbol habían caído, se tomó una muestra de 500 y se tomaron los pesos de la muestra y del total. De esta forma obtuvimos el número de hojas por árbol, que multiplicado por el área por hoja nos dio el área de hojas total de cada árbol. Esta área se comparó con los valores obtenidos mediante el método de las fotografías.

2.2.3. Relación entre transpiración y radiación interceptada. Modelo de conductancia de cubierta.

Para obtener datos de fIR_d se utilizó el modelo desarrollado por Mariscal et al. (2000) parametrizado para almendro. Los datos de entrada del modelo son los que describen el tamaño y forma del árbol (volumen de copa, altura y densidad de área

foliar) y los parámetros son marco de plantación, orientación de las filas de árboles y la proyección de las hojas sobre la perpendicular a la dirección del rayo G(θ).

Para los años 2012 y 2013, se dividieron los datos diarios de T/ET (K_T) entre fIR_d y los resultados de las dos campañas fueron representados en una misma gráfica.

Se usó el modelo de conductancia de cubierta, tal y cómo está descrito en Villalobos et al. (2013), para obtener T a partir de fIR_d y del déficit de presión de vapor (DPV) diario:

$$\left(fRI_d / gc \ = a + b \cdot VPD \right) \quad [6]$$

La conductancia de cubierta se calculó por inversión de la ecuación de la evaporación impuesta a partir de la T_{sf} diaria medida:

$$gc = \frac{T_{sf} P_a}{DPV} \quad [7]$$

donde T_{sf} es la transpiración, P_a es la presión atmosférica y DPV es el déficit de presión de vapor.

Los parámetros del modelo (*a* y *b*) se calcularon a partir de los datos del año 2013.

2.3. Resultados

2.3.1. Evolución de tamaño del árbol

El volumen de copa del árbol, asumiendo una forma elipsoidal, aumentó desde menos de 1 m^3 en la primavera de 2010 hasta casi 50 m^3 en otoño de 2013 (Fig. 2.3). La cobertura de suelo aumentó desde el 3% en 2010 hasta casi 50% en 2013, cuando las ramas de árboles adyacentes dentro de cada fila estaban casi en contacto. Durante los cuatro años de estudio, la altura de los árboles aumentó desde 1.5 hasta 4.8 metros.

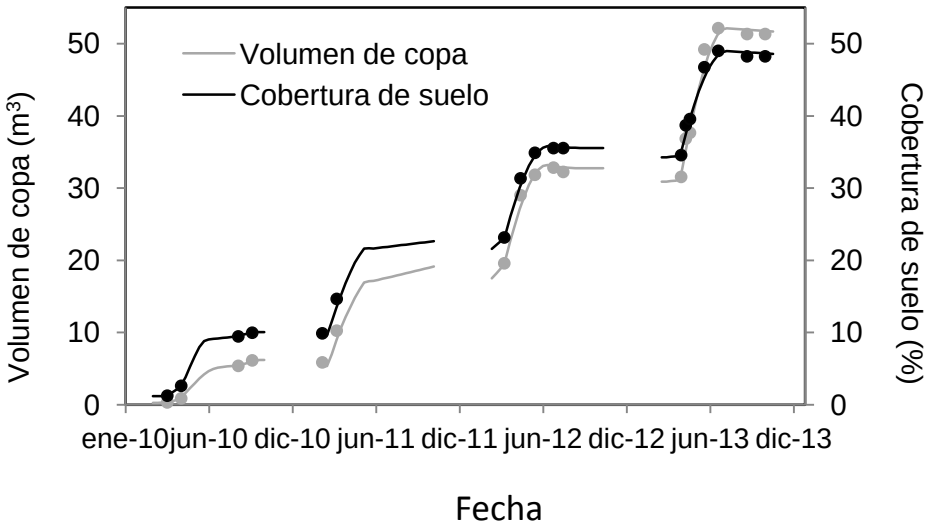


Fig. 2.3. Evolución del volumen de copa y del porcentaje de cobertura del suelo durante los años 2010-2013. Los círculos indican los días de medida. Los periodos sin medidas en 2010 y 2011 fueron dibujados siguiendo patrones de crecimiento similares a los de 2012 y 2013. Para el resto, se usó una interpolación lineal entre medidas.

En la Figura 2.4 se muestra la comparación entre los valores medidos de área foliar y los obtenidos mediante el método de clasificación de fotografías a la sombra del árbol. Vemos que los datos medidos y estimados se relacionan linealmente bastante bien. Sin embargo, cuando los árboles son pequeños la estimación fue mucho más precisa que cuando se trata de árboles de mayor tamaño con un mayor entramado de ramas que también proyectan sombras.

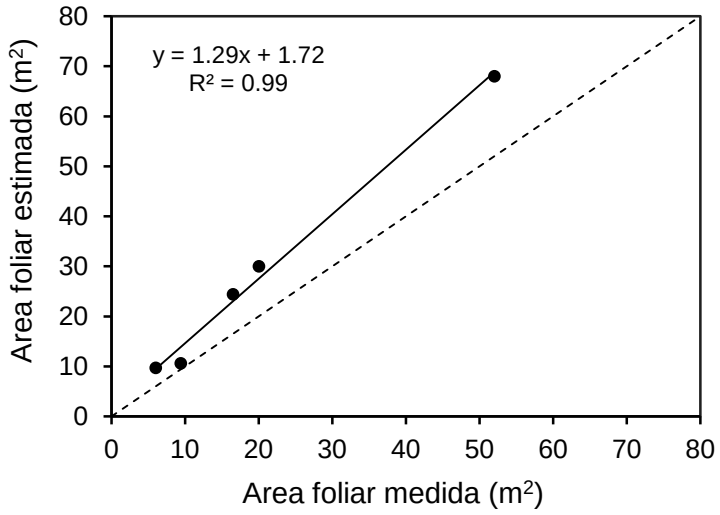


Fig. 2.4. Comparación entre valores de área foliar directamente medidos y los estimados mediante el método basado en fotografías digitales.

Las estimaciones de DAF se presentan en la Figura 2.5. En 2012, la primera estimación se realizó a principios de mayo y dio un valor de 1.0 m^2/m^3, y a medida que el área folia fue aumentando con el tiempo, la DAF alcanzó valores de hasta 1.3 m^2/m^3 en agosto. En 2013, a pesar del retraso en el desarrollo de la cubierta, se observó un patrón similar de evolución de DAF, con un valor máximo en agosto de 1.4 m^2/m^3.

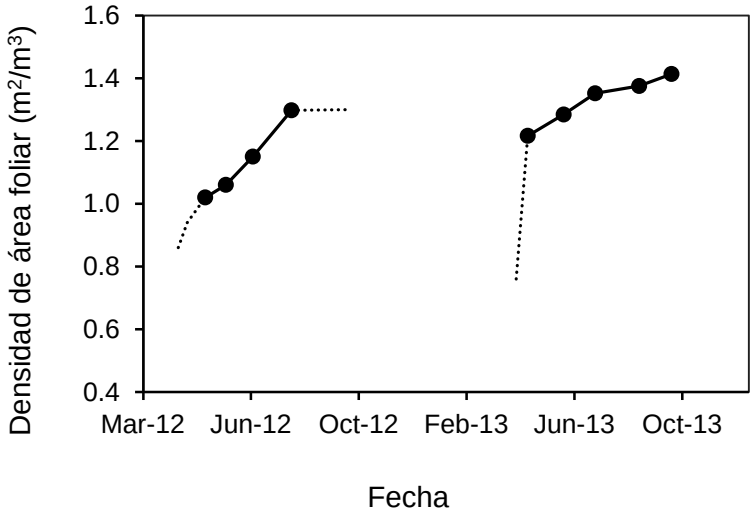


Fig. 2.5. Evolución de la densidad de área foliar durante 2012 y 2013, estimada a partir del área foliar obtenida con el método de las fotografías

digitales y el volumen de copa. Los círculos representan los días de medida. La línea discontinua fue dibujada por observación en campo.

2.3.2. Evolución de la transpiración

La Fig. 2.6 muestra la evolución de la transpiración medida mediante el lisímetro de pesada (T) durante los cuatro años de estudio, así como la transpiración medida mediante sap-flow (T_{sf}) desde 2012. La ET_o también se ha representado para ayudar a la interpretación de los datos. El periodo entre el 18 de mayo y el 12 de junio de 2013 tuvo que ser descartado ya que debido a un fallo en el sistema de riego, el árbol sufrió un ligero estrés hídrico. La evolución de la T a lo largo de una campaña de riego se aprecia muy bien en los años 2012 y 2013. Al comienzo de la campaña la T va aumentando a la vez que la radiación solar y la temperatura se van haciendo mayores (aumenta la ET_o) y a la vez que el árbol va cubriéndose de hojas. Los valores máximos de transpiración se alcanzan a mediados de julio cuando la ET_o es también máxima. A partir de ese momento la T va disminuyendo junto con la ET_o.

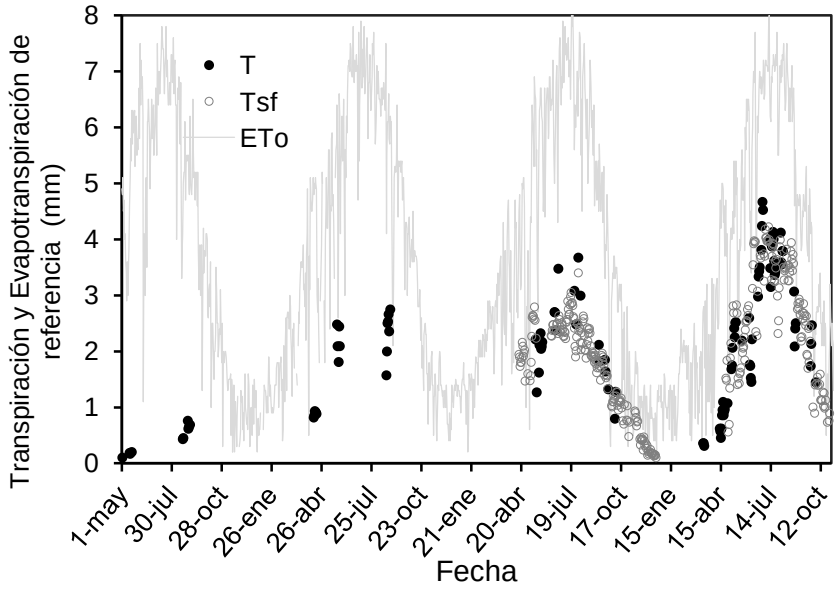
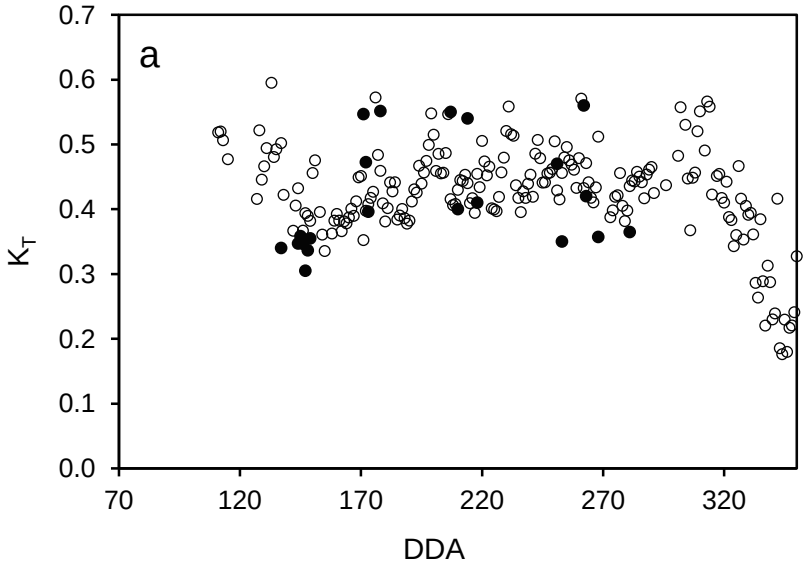


Fig. 2.6. Evolución estacional de la transpiración medida en el lisímetro (T) y mediante la técnica de flujo de savia (T_{sf}) durante los cuatro años de estudio. La evapotranspiración de referencia se muestra para una mejor interpretación de los datos.

En 2012 y 2013, los valores máximos de transpiración fueron 3.1 y 4.2 mm, respectivamente. En 2010 y 2011, se obtuvieron muy pocos datos de T con el lisímetro, pero a la vista de la información recogida es probable que la máxima T alcanzase 1 y 2.5 mm, respectivamente.

En la Figura 2.7 se muestra el coeficiente de transpiración (K_T) para 2012 y 2013, los dos años donde tenemos información continua de transpiración gracias a los sensores de flujo de savia. En primavera, K_T va aumentando a medida que van saliendo nuevas hojas (Fig. 2.7b). Tras completarse el desarrollo de la cubierta, la transpiración responde a variaciones diarias de ET_o lo que hace que K_T permanezca constante, aunque pudimos observar variabilidad entre días consecutivos (Fig. 5). En verano, los valores de K_T alcanzan su máximo y cada año ese máximo aumenta, desde valores de 0.13 en 2010 hasta valores de 0.60 en 2013. Observamos que el periodo de K_T constante se mantuvo hasta bien entrado el otoño, y a partir de entonces comenzó a disminuir, sobre el final de octubre de 2012 y mitad de octubre de 2013. Este periodo en el que K_T disminuye, se caracterizó por una disminución rápida en el consumo de agua debido a la defoliación del árbol.



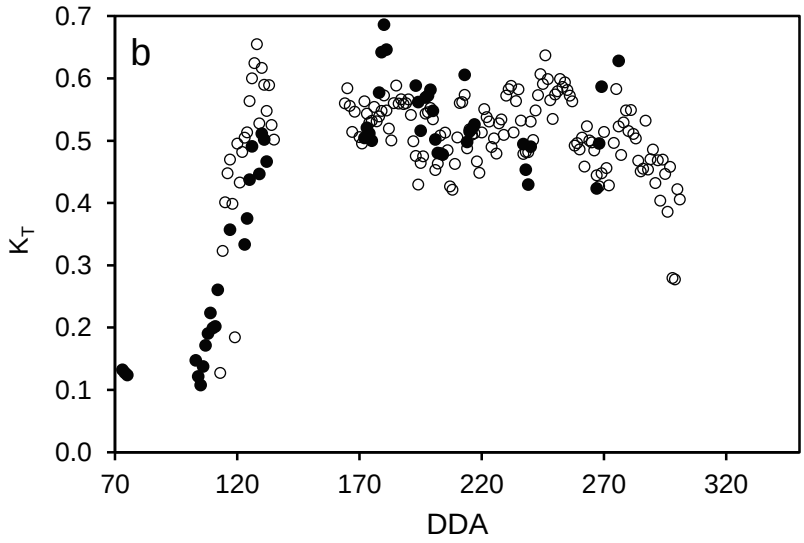


Fig. 2.7. Evolución estacional del coeficiente de transpiración (K_T) medido con el lisímetro (círculos negros) y con sensores de flujo de savia (círculos huecos) en a) 2012 y b) 2013.

2.3.3. Relaciones entre K_T y porcentaje de radiación PAR interceptada.

Se analizó la relación entre K_T y fIR_d en los años 2012 y 2013, donde contábamos con un registro continuo de datos de T. En la Fig. 2.8 se muestra, para esos dos años, la evolución del DAF, cobertura de suelo y fIR_d como función del tiempo. El valor inicial de cobertura de suelo en 2012 fue 21% y el valor final 35%. En 2013, los valores inicial y final fueron 34 y 49%. Por tanto, desde el comienzo de la campaña en 2012 hasta el final de la de 2013, la cobertura de suelo aumentó hasta casi duplicarse.

Dos fases distintas de aumento de fIR_d pueden observarse en la Figura 2.8 una asociada a incrementos en cobertura de suelo y DAF y la segunda, a finales de agosto donde fIR_d aumenta a pesar de que el tamaño del árbol y su estructura ya no varían prácticamente nada.

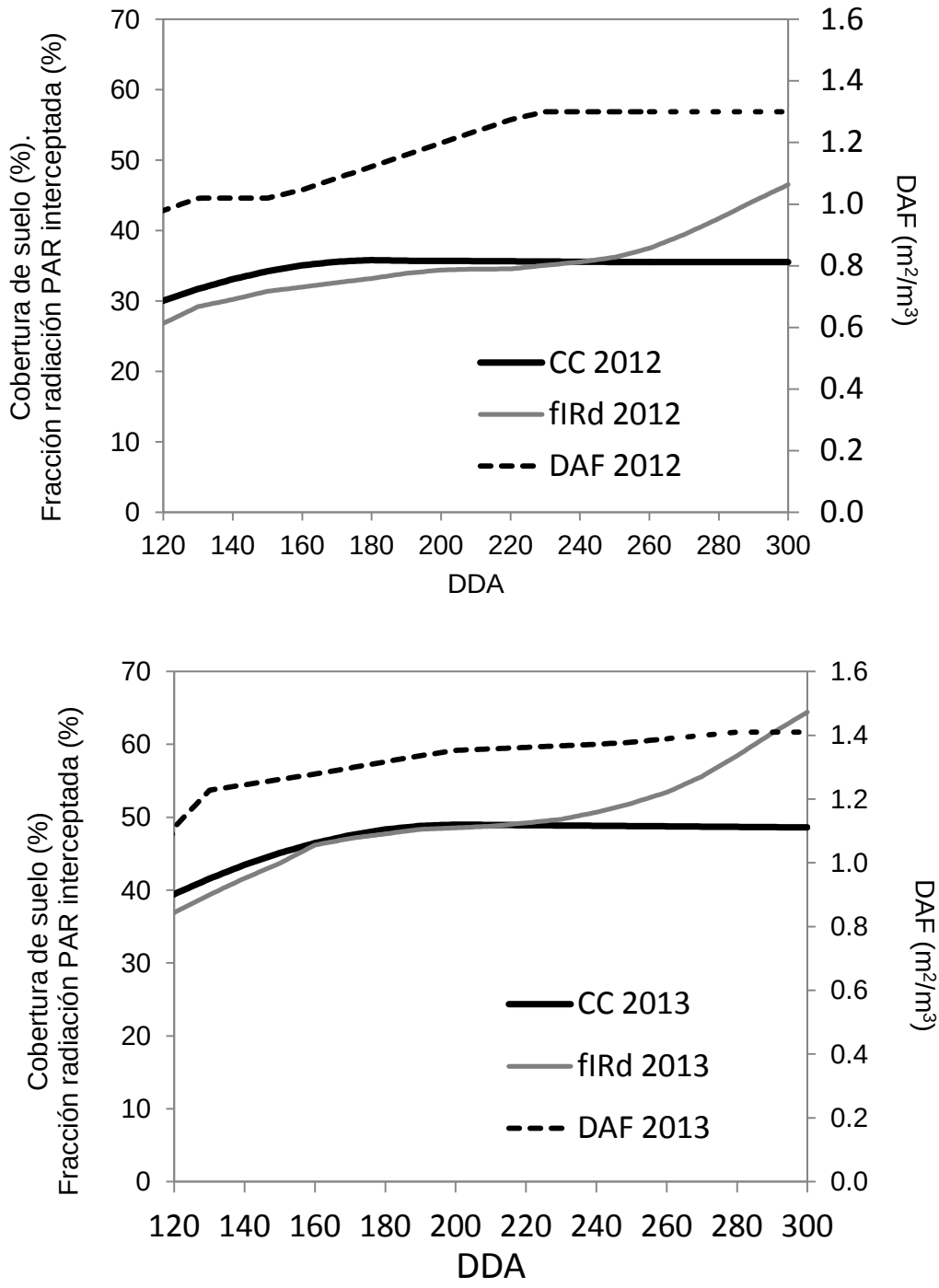


Fig. 2.8. Evolución de los parámetros del árbol: porcentaje de cobertura de suelo (CC), fracción de radiación PAR interceptada (fIR_d) y densidad de área foliar (DAF) a lo largo de las campañas 2012 y 2013.

La Figura 2.9 muestra la evolución del cociente K_T/fIR_d a lo largo de las campañas 2012 y 2013, desde el día del año (DOY) 160 (principios de junio) hasta el 300 (principios de noviembre). Aproximadamente hasta finales de septiembre (DOY 270) los valores diarios del cociente K_T/fIR_d oscilaron alrededor de 1.2, indicando una relación bastante constante entre T y radiación durante ese periodo. En 2012 K_T no disminuyó hasta después del DOY 300, sin embargo, se pudo observar un ligero descenso en el cociente K_T/fIR_d. En 2013 el ratio K_T/fIR_d comenzó a disminuir alrededor del día 255, antes de la caída de K_T que comenzó sobre el día 280.

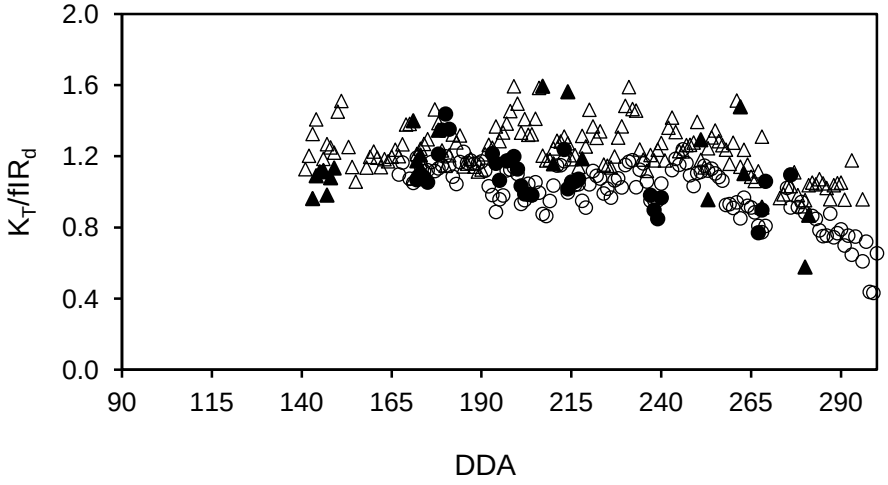


Fig. 2.9. Evolución de la relación entre K_T diario y porcentaje diario de radiación PAR interceptada durante 2012 (triángulos) y 2013 (círculos). Los valores de K_T obtenidos del lisímetro están representados en negro y los obtenidos por medidas de flujo de savia están representados en blanco.

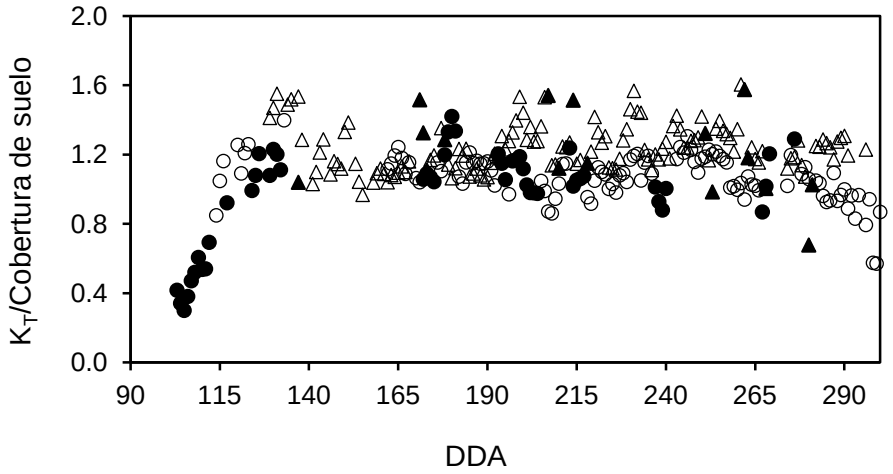


Fig. 2.10. Evolución de la relación entre K_T diario y porcentaje de cobertura de suelo durante 2012 (triángulos) y 2013 (círculos). Los valores de K_T obtenidos del lisímetro están representados en negro y los obtenidos por medidas de flujo de savia están representados en blanco.

Como la evolución de la cobertura del suelo (CC) y de fIR_d fueron muy similares, la evolución del cociente K_T/CC fue muy similar a la evolución del cociente K_T/fIR_d tanto en 2012 como en 2013 (Fig. 2.10). Durante el periodo entre el día 270 y el 300 el cociente fue disminuyendo gradualmente los dos años.

2.3.4. Conductancia de cubierta, radiación interceptada y déficit de presión de vapor

La calibración del modelo presentado por Villalobos et al. (2013) para almendro se muestra en la figura 2.11, obtenida a partir de la representación del cociente K_T/fIR_d frente a los valores diarios de DPV para el año 2013. Se obtuvo una relación lineal con un coeficiente de determinación de 0.87, una interceptación de 1083 µE mol^{-1} y una pendiente de 1106 µE mol^{-1} kPa^{-1}.

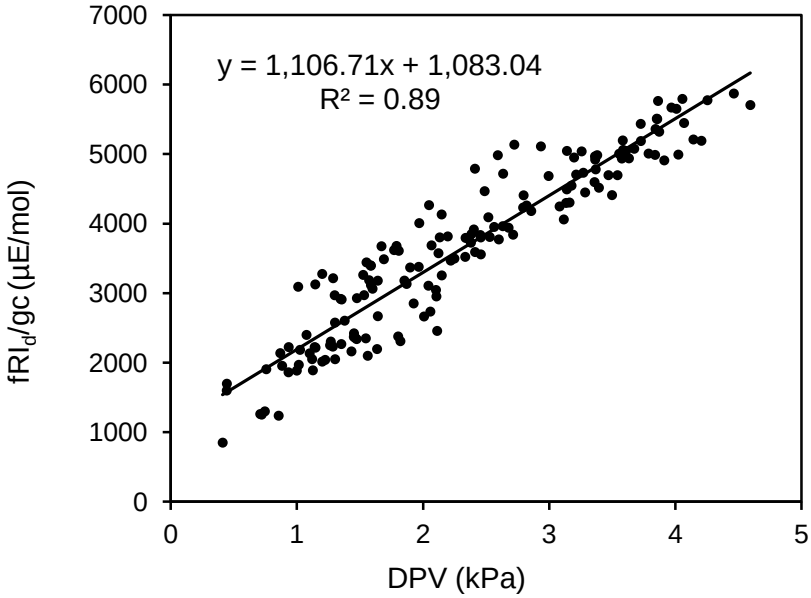


Fig. 2.11. Cociente entre radiación PAR interceptada diaria y conductancia de cubierta diaria frente a valor diario del déficit de presión de vapor durante el día.

2.4. Discusión

La transpiración de un huerto de almendros responde al desarrollo de su cubierta y a la demanda evaporativa, cuantificada como ET_o. En huertos de árboles de hoja caduca, después de que el árbol ha completado el desarrollo de su follaje, la T responde principalmente a cambios en la ET_o, por lo que se espera que el coeficiente de transpiración varíe muy poco y de forma sostenida –si hay generación de nueva área foliar- hasta el comienzo de la defoliación en otoño (Fig. 2.6).

Desde el comienzo de este estudio, la transpiración máxima aumentó desde 1 mm hasta más de 4 mm/día, a la vez que la cobertura de suelo por el cultivo aumentaba desde 3 hasta 50%, revelando la importancia de adaptar la cantidad de agua de riego al tamaño del árbol en plantaciones jóvenes.

El coeficiente de transpiración (K_T), tal y como se ha definido aquí, es función del área foliar y necesita ser escalado conforme la plantación va creciendo. En este trabajo, como en estudios previos (Ayars et al 2003; Green et al. 2003a; Marsal et al. 2014), proponemos el porcentaje de radiación PAR interceptada a lo largo del día (fIR_d) como el mejor parámetro para predecir la evolución de K_T a medida que

el tamaño del árbol aumenta. El cociente entre el K_T diario y su correspondiente fIR_d (K_T/fIR_d) osciló alrededor del valor 1.2 durante la mayor parte de la campaña de riego, desde el día 160 (principios de junio) hasta el día 250 (principios de septiembre) (Fig. 2.9). El cociente no varió entre un año de estudio y el otro, a pesar de que el árbol aumentó significativamente su tamaño y la cobertura de suelo pasó del 21% al 49%. Este resultado implica que es posible predecir el consumo de agua de un huerto de almendro de cualquier edad y tamaño de copa a través de la estimación de fIR_d, con lo que este procedimiento sería una herramienta útil para la realización de calendarios de riego durante la mayor parte de la campaña, hasta que el cociente muestra una caída en otoño (Fig. 2.9)

Después de la cosecha en 2012 (día 237), no se detectó ningún cambio ni en K_T ni en su relación con fRI_d. Por el contrario, Auzmendi et al. (2011) en manzano y Girona et al. (2011) en manzano y peral encontraron un descenso en K_c después de la eliminación de los frutos en la cosecha. En nuestro caso, sólo al final de la campaña de riego (día 250-260), se observó una disminución del cociente K_T/fIR_d. Este comportamiento ocurrió no solo en 2012, año en que K_T disminuyó en esa misma fecha, sino también en 2013 año en que K_T se mantuvo constante hasta el día 300 (Fig. 2.7; Fig. 2.9). Una razón para explicar este hecho puede ser que el incremento en fIR_d en otoño, debido a la disminución en el ángulo de elevación solar, no se traduce en una mayor transpiración ya que las hojas se encuentran ya envejecidas y su conductancia estomática puede ser menor.

Nuestros resultados coinciden con los de Ayars et al. (2003) y Pereira et al. (2007) que encontraron relaciones constantes entre T y energía absorbida durante toda la campaña en melocotonero y en avellano, olivo y manzano, respectivamente. Nosotros no encontramos ninguna reducción en consumo de agua después de la recolección de los frutos. Esto podría explicarse quizá, por la aparición de nuevos sumideros de CO_2, ya que en 2012, cuando la carga de frutos fue muy alta, observamos un importante crecimiento de nuevos brotes a finales de agosto, antes y después de la fecha de la cosecha. Igualmente, es probable que al tratarse de árboles jóvenes, la demanda de carbono no se vea afectada por la recolección, al estar más activos otros sumideros de carbono que cuando los árboles son adultos. No obstante, en 2013, desde el día 190 hasta el 235, el cociente K_T/fIR_d cayó ligeramente por debajo del valor 1.2. Este momento coincide con el periodo de latencia de crecimiento vegetativo en verano y puede explicarse por la baja carga de frutos ese año, lo que pudo provocar una disminución en la transpiración del árbol respecto a un año de carga normal.

De acuerdo con el valor 1.2 del cociente K_T/fIR_d obtenido en este estudio y asumiendo que el valor máximo de fIR_d fuese del 85% (dada la necesidad de mecanización, no es posible alcanzar un 100% de radiación interceptada en las

plantaciones de árboles frutales), el K_T máximo sería 1.2 x 0.85, igual a 1.02. Este valor de K_T es mayor que el valor de 0.85-0.9, valor propuesto para almendro por Allen et al. (1998). Los valores de K_c propuestos por otros autores (Girona et al. 2006; Stevens et al. 2012; Goldhamer et al. 2012) están más en línea con nuestros resultados. De hecho, si asumimos una evaporación de un 10-15% de la ET_c (habitual en plantaciones regadas por microaspersión, como las usadas en los dos últimos estudios mencionados), el acuerdo entre nuestros resultados de K_T y los valores recientemente propuestos de K_c por los autores citados es excelente. Nuestro cociente K_T/fIR_d es comparable con el parámetro K_{cfc} propuesto por Marsal y utilizado en el modelo de simulación CropSyst (Stöckle et al. 2003). Marsal et al. (2014) obtuvieron valores de K_{cfc} de 1.5 para manzano, melocotonero y peral.

La relación encontrada entre cobertura de suelo y transpiración (Fig. 2.10) también fue bastante buena. Sin embargo, la T responde fisiológicamente a la fIR_d, y no a la cobertura de suelo que representa una estima aproximada de la radiación interceptada por la cubierta, por lo que cualquier relación entre CC y T se debe a que CC y fIR_d están muy correlacionadas entre sí. La estabilidad con el tiempo y con el tamaño del árbol del índice K_T/CC es parecida a la de K_T/fIR_d (Fig. 2.9; Fig. 2.10). La cobertura de suelo es mucho más fácil de medir que la fIR_d, por lo que K_T puede ser estimado a partir de datos de CC cuando no sea posible medir o estimar de forma fiable la fIR_d. Sin embargo, factores como cultivar, densidad de área foliar o sistema de poda pueden afectar la relación entre CC y fIR_d, por lo que el valor 1.2 de cociente de la Figura 2.10 podría variar entre diferentes plantaciones o no ser estable en el tiempo tras eventos que puedan cambiar la arquitectura de la copa.

Para la estimación de la transpiración basada en la radiación interceptada, un método alternativo al aquí propuesto de usar un valor fijo, es el uso de la ecuación de Penman-Monteith junto con un modelo de conductancia de cubierta. A partir de los datos de transpiración de 2013, parametrizamos el modelo de conductancia de cubierta de Villalobos et al. (2013) (Eq. 6). La interceptación *a* (Eq. 6) es proporcional a la eficiencia en el uso de la radiación y el valor obtenido para almendro (1083 $\mu E\ mol^{-1}$) indicaría que es una especie más eficiente en la captura de radiación que el naranjo, melocotonero, albaricoquero, manzano y pistachero, y menos eficiente que el nogal y el olivo (cf. Villalobos et al. 2013). La pendiente *b* está relacionada con la respuesta de la especie a cambios en el DPV. Una pendiente alta indica poca sensibilidad al DPV. El valor de b obtenido para almendro (1106 $\mu E\ mol^{-1}\ kPa^{-1}$) cae entre los altos valores de albaricoquero, naranjo y olivo (especies muy sensibles a altos DPVs) y los valores bajos de melocotonero, nogal y pistachero, y muy cerca de los valores para manzano (Villalobos et al. 2013).

En la mayoría de los estudios de lisimetría, el K_c fluctúa sensiblemente entre días consecutivos, especialmente en cultivos leñosos (i.e., Girona et al. 2011) lo que sugiere que la ET_c responde a las condiciones climáticas diarias de una forma algo diferente que la ET_o. En la práctica, esas fluctuaciones del K_c se ignoran ya que un valor promedio de varios días puede ser suficiente para programar los riegos.

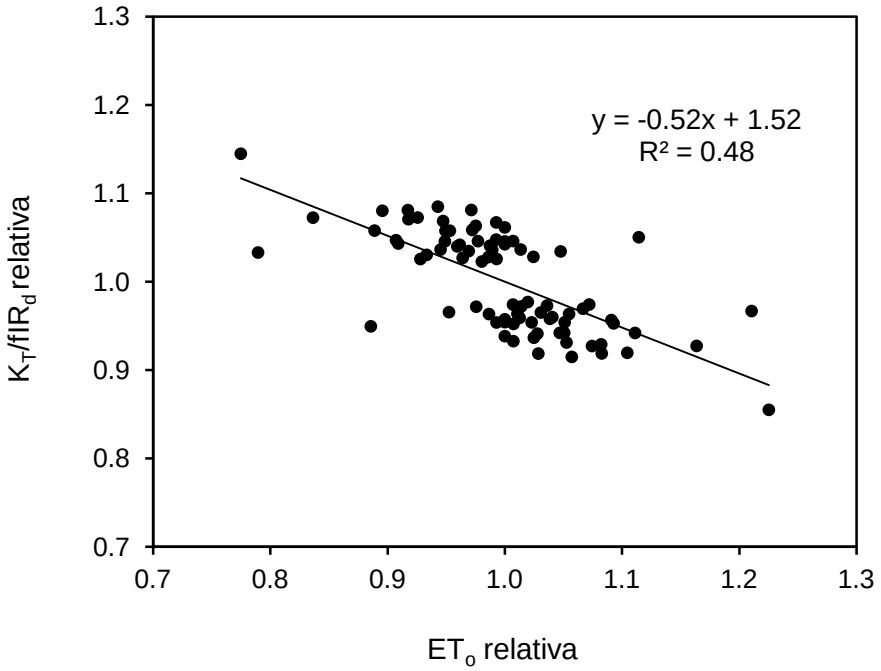


Fig. 2.12. Respuesta del cociente K_T/fIR_d a la variación de la ET_o. Se escogieron pares de días consecutivos en los que se observó una alta variabilidad en el cociente K_T/fIR_d. Su valor relativo se obtuvo dividiendo cada dato diario de K_T/fIR_d y ET_o entre el valor medio de K_T/fIR_d y ET_o del correspondiente par de datos.

Para entender mejor las causas de la variabilidad en los valores diarios del ratio K_T/fIR_d (Fig. 2.9), realizamos un análisis en el que se escogieron todas las parejas de datos de días consecutivos con valores de K_T/fIR_d muy diferentes. Para cada pareja de datos se calculó un valor medio de K_T/fIR_d a partir del cual se indica en qué porcentaje sobrepasa o se queda por debajo cada uno de dos los días. Así podemos buscar una relación entre la variabilidad diaria y ciertos parámetros climáticos utilizando todas las parejas de datos a lo largo del tiempo, evitando introducir en esa relación diferencias en los valores absolutos provocados por el crecimiento o estado del árbol. Los resultados se muestran en la Fig. 2.12,

mostrando una relación negativa entre K_T/fIR_d y ET_o. Es probable que el incremento en la demanda evaporativa causara una disminución de la conductancia de cubierta del árbol (y por tanto de la T) mientras que no afecta a la ET_o. La ET_o se calcula a partir de la ecuación de Penman-Monteith (Allen et al. 1998) basada en la evapotranspiración de una pradera de referencia hipotética con una conductancia de cubierta constante, con lo que un aumento en la demanda evaporativa siempre lleva a un aumento de la ET_o. Sin embargo, es bien sabido que la apertura estomática es sensible a muchos factores medioambientales y por tanto, que la conductancia de cubierta no es constante (Damour et al. 2010). Por otro lado, el grado de acoplamiento con la atmósfera de un cultivo leñoso es mayor que el de un cultivo herbáceo (Jarvis and McNaughton 1986) y así las variaciones de gc en un cultivo arbóreo impactaran más a la tasa de T que en el caso de un cultivo herbáceo no acoplado a la atmosfera. Por tanto, es muy probable que la disminución en la gc del almendro del lisímetro en días de alta demanda evaporativa haya llevado a un descenso del valor del K_T , ya que en la ET_o no se reflejan cambios en la fisiología de la cubierta del cultivo hipotético de referencia. Para profundizar algo más en las causas, realizamos una regresión lineal múltiple paso a paso en la que la variable dependiente era el cociente K_T/fIR_d y las variables independientes eran cada uno de los parámetros que determinan la ET_o: temperatura mínima (t_{min}) y máxima (t_{max}), velocidad del viento (V_v) y déficit de presión de vapor (DPV). El análisis se llevó a cabo con los datos de julio a agosto de 2012 y 2013, meses en los que se considera que el K_T/fIR_d es constante y cualquier variación diaria se achacaría a cambios en las diferentes respuestas de un huerto de almendros y de una pradera de referencia ante cambios en las variables meteorológicas. Los resultados se muestran en las Tablas 2.2 y 2.3.

Tabla 2.2. Coeficientes de correlación de Pearson entre las principales variables climáticas y el cociente K_T/fIR_d

	Coeficiente Pearson	Sig.	t_{min}	t_{max}	DPV	V_v	ET_o
K_T/fIR_d	1.000		.247	.491	.439	-.640	-.186
t_{min}	.247	.003	1.000	.352	.237	.139	-.043
t_{max}	.491	.000	.352	1.000	.932	-.499	.416
DPV	.489	.000	.237	.932	1.000	-.526	.471
V_v	.-640	.000	.139	-.499	-.526	1.000	.147
ET_o	-.186	.021	-.043	.416	.471	.147	1.000

Volvemos a ver aquí la relación negativa entre K_T/fIR_d y ET_o. Además destaca la fuerte relación inversa entre V_v y K_T/fIR_d. Ocurre lo contrario con $t_{min,}$ t_{max} y DPV, que se relacionan de forma positiva con K_T/fIR_d. Al aumentar estas dos últimas variables la ETo aumenta y la transpiración debería aumentar en el mismo porcentaje si el KT fuese constante. Sin embargo, KT aumenta, es decir, hay más transpiración de la esperada ($T > KT \cdot ETo$). Y lo contrario ocurriría con la velocidad del viento que al aumentar hace aumentar la ETo y esperaríamos un aumento en la transpiración, sin embargo lo que observamos fue una disminución de la misma. Puede tener sentido que, cuando el DPV no es muy alto, al aumentar la temperatura la transpiración aumente más en un cultivo de almendros de lo que aumentaría una cubierta de pradera debido al mayor grado de acoplamiento con la atmósfera. También puede ser bastante lógico, que un aumento en la ET_o provocada por un aumento en V_v, no se traduzca en un aumento de la transpiración dentro de un huerto de almendros. Por un lado la velocidad del viento en sí puede ser muy diferente entre la que se mide en una pradera que la que ocurre dentro de una cubierta de copas de árboles, y por otro un aumento real de la V_v provocaría un mayor acoplamiento de la cubierta con la atmósfera y esto provocaría un cierre estomático parcial (y consecuentemente reducción de T debido al alto grado de acoplamiento) al encontrar los altos DPV que suelen medirse en esta época del año en nuestra zona. Sin embargo, lo que no tiene sentido fisiológico es que al aumentar el DPV, la transpiración del almendro aumente más respecto a la de la pradera de referencia, ya que el almendro muestra cierta sensibilidad a altos DPV cerrando estomas (ver más arriba), mientras que la pradera hipotética de referencia tiene una conductancia estomática constante. Este resultado inesperado probablemente se explica por la fuerte correlación negativa que hay en nuestra zona entre DPV y V_v y a que la relación entre V_v y K_T/fIR_d predomina sobre la relación con DPV.

Tabla 2.3. Modelos resultantes de la regresión paso a paso entre K_T/fIR_d y las principales variables climáticas para los meses de julio y agosto de 2012 y 2013.

Modelo			Coeficientes no estandariazdos		Coeficientes tipificados	*t*	Sig.
	R^2		B	Error	B		
1	.409	Constante	1.226	.022		55.902	.000
		V_v	-.113	.012	-.640	-9.074	.000
2	.524	Constante	.906	.063		14.398	.000
		V_v	-.122	.011	-.687	-10.722	.000
		t_{min}	.017	.003	.343	5.354	.000

Con un modelo en el que la variable independiente fuese V_v seríamos capaces de explicar hasta un 40% de la variabilidad diaria de K_T/fIR_d. Este porcentaje aumentaría hasta un 52% si añadimos la t_{min} del aire. Sin embargo, este estudio preliminar necesitaría ser confirmado con medidas más exhaustivas en condiciones diversas. Las fluctuaciones en K_T necesitan estudiarse más si se desea mayor precisión en el riego

Los resultados de este estudio deberían ser útiles a la hora de realizar recomendaciones de riego precisas para huertos de almendro, basadas en la cantidad de agua transpirada por el árbol. La evaporación desde el suelo puede calcularse usando un modelo como el desarrollado por Bonachela et al. (1999, 2001), que ha funcionado con éxito en la programación de los riegos en huertos de olivos (Pastor et al. 1997). Finalmente, hay que resaltar que el valor del cociente K_T/fIR_d que se presenta aquí como resultado de las investigaciones, sólo es válido en árboles sin limitación hídrica, bien fertilizados y libres de plagas y enfermedades.

Referencias

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage. Paper No. 56. FAO, Rome.

Allen RG, Pereira LS (2009) Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. Irrig Sci 28:17-34

Auzmendi I, Mata M, del Campo J, Lopez G, Girona J, Marsal J (2011) Intercepted radiation by apple canopy can be used as a basis for irrigation scheduling. Agr Water Manage 98:886-892

Ayars JE, Johnson RS, Phene CJ, Trout TJ, Clark DA, Mead RM (2003) Water use by drip-irrigated late-season peaches. Irrig Sci 22:187-194

Bonachela S, Orgaz F, Villalobos FJ, Fereres E (1999) Measurement and simulation of evaporation from soil in olive orchards. Irrig Sci 18:205-211

Bonachela S, Orgaz F, Villalobos FJ, Fereres E (2001) Soil evaporation from drip-irrigated olive orchards. Irrig Sci 20:65-71

Casadesus J, Mata M, Marsal J, Girona J (2011) Automated irrigation of apple trees based on measurements of light interception by the canopy. Biosystems Eng 108:220-226

Castel JR (1997) Evapotranspiration of a drip-irrigated clementine citrus tree in a weighing lysimeter. Acta Hort 449:91-98

Consoli S, O´Connell N, Snyder R (2006) Estimation of Evapotranspiration of different-sized navel-orange tree orchards using energy balance. J Irrig Drain E-ASCE 132:1-8

Damour G, Simonneau T, Cochard H, Urban L (2010) An overview of models of stomatal conductance at the leaf level. Plant Cell Environ 33:1419-1438

Dekker S, Bouten W, Verstraten J (2000) Modelling forest transpiration from different perspectives. Hydrol Process 14:251-260

Doorenbos J, Pruitt WO (1977) Crop water requirements. Irrigation and Drainage. Paper No. 24. FAO, Rome.

Felipe AJ, Socias i Company R (1987) 'Aylés', 'Guara', and 'Moncayo' almonds. Hort Sci 22:961-962.

Fereres E, Martinich DA, Aldrich TM, Castel JR, Holzapfel CE, Schulbach H (1982) Drip irrigation saves money in young almond orchards. Calif Agr 36:12-13

Fereres E, Goldhamer DA, Sadras V (2012) Yield response to water of fruit trees and vines: guidelines. In: Steduto P, Hsiao TC, Fereres E, Raes D (Eds.) Cropyield Response to Water. Irrigation and Drainage. Paper No. 66. FAO, Rome.

Girona, J. 2006. La respuesta del cultivo del almendro al riego. Vida Rural, 234:12-16

Girona J, del Campo J, Mata M, López G, Marsal J (2011) A comparative study of apple and pear tree water consumption measured with two weighing lysimeters. Irrig Sci 29:55-63

Goldhamer DA (2012) Almond. In: Steduto P, Hsiao TC, Fereres E, Raes D (Eds.) Cropyield Response to Water. Irrigation and Drainage. Paper No. 66. FAO, Rome.

Goodwin I, Whitfiel DM, Connor DJ (2006) Effects of tree size on water use of peach (*Prunus persica* L. Bastch). Irrig Sci 24:59-68

Green S, McNaughton K, Wünshche JN, Clothier B (2003a) Modeling Light Interception and Transpiration of Apple Tree Canopies. Agron J 95:1380-1387

Green S, Clothier B, Jardine B (2003b) Theory and practical application of heat pulse to measure sap flow. Agron J 95:1371-1379

Jarvis PG, McNaughton KG (1986) Stomatal control of transpiration: Scaling up from leaf to region. Adv Ecol Res 15:1-49

Lang ARG (1987) Simplified estimate of leaf area index from transmittance of the sun's beam. Agric For Meteorol 41:179-186

Lenton R (2014) Irrigation in the twenty-first century: reflections on science, policy and society. Irrig Drain. 63:154-157

López-Bernal A, Alcántara E, Testi L, Villalobos FJ (2010) Spatial sap flow and xylem anatomical characteristics in olive trees under different irrigation regimes. Tree Physiol 30:1536-1544

Lorite IJ, Santos C, Testi L, Fereres E (2012) Design and construction of a large weighing lysimeter in an almond orchard. Span J Agric Res 10:238-250

Mariscal MJ, Orgaz F, Villalobos FJ (2000) Modelling and measurement of radiation interception by olive canopies. Agric For Meteorol 100:183-197

Marsal J, Girona J, Casadesus J, López G, Stöckle CO (2013) Crop coefficient (Kc) for apple: comparison between measurements by a weighing lysimeter and prediction by CropSyst. Irrig Sci 31:455-463

Marsal J, Johnson S, Casadesus J, López G, Girona J, Stöcke C (2014) Fraction of canopy intercepted radiation relates differently with crop coefficient depending on the season and the fruit tree species. Agric For Meteorol 184:1-11

Orgaz F, Villalobos FJ, Testi L, Fereres E (2007) A model of daily mean canopy conductance for calculating transpiration of olive canopies. Funct Plant Biol 32:178-188

Pereira AR, Green SR, Villa Nova NA (2007) Sap flow, leaf area, net radiation and the Priestley-Taylor formula for irrigated orchards and isolated trees. Agr Water Manage 92:48-52

Sanden B (2007) Fall Irrigation Management in a Drought Year for Almonds, Pistachios and Citrus. Kern Soil and Water Newsletter, September 2007. University of California Cooperative Extension, Kern County. http://cekern.ucdavis.edu/files/64007.pdf

Sanden B, Brown P, Snyder R (2012) New Insights on Water Management in Almonds, in 2012 Conference Proceedings. American Society of Agronomy. California Chapter: 88-91

Stevens RM, Ewenz CM, Grigon G, Conner SM (2012) Water use by an irrigated almond orchard. Irrig Sci 30:189-200

Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Alexander LV, Allen SK, Bindoff NL, Bréon FM, Church JA, Cubasch U, Emori S, Forster P, Friedlingstein P, Gillett N, Gregory JM, Hartmann DL, Jansen E, Kirtman B, Knutti R, Krishna Kumar K, Lemke P, Marotzke J, Masson-Delmotte V, Meehl GA, Mokhov II, Piao S, Ramaswamy V, Randall D, Rhein M, Rojas M, Sabine C, Shindell D, Talley LD, Vaughan DG, Xie SP (2013) Technical Summary. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 33–115.

Stöckle CO, Donatelli M, Nelson R (2003) CropSyst, a cropping systems simulation model. Eur J Agron 18:289-307

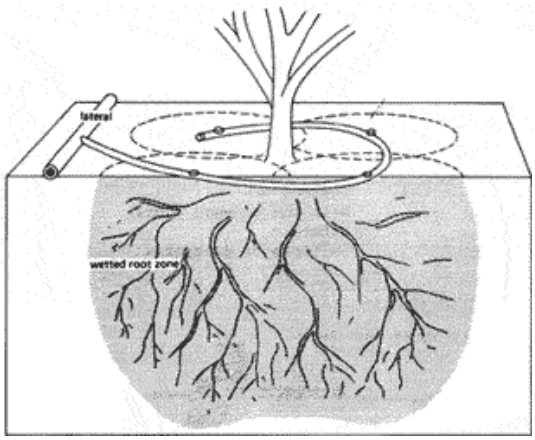
Testi L, Villalobos FJ (2009) New approach for measuring low sap velocities in trees. Agric For Meteorol 149:730-734

Villalobos FJ, Testi L, Orgaz F, García-Tejera O, López-Bernal A, González-Dugo MA, Ballester-Lurbe C, Castel JR, Alarcón-Cabañero JJ, Nicolás-Nicolás

E, Girona J, Marsal J, Fereres E (2013) Modelling canopy conductance and transpiration of fruit trees in Mediterranean areas: A simplified approach. Agric For Meteorol 171-172:93-103

Wrigth JL (1982) New evapotranspiration crop coefficients. J Irrig Drain E-ASCE 108: 57-74

Capítulo 3. Respuesta del almendro a un cambio en el volumen de suelo humedecido bajo riego por goteo



Este capítulo está bajo revisión en la revista ISI Irrigation Science:

Espadafor M, Orgaz F, Testi L, Lorite IJ, García O, Villalobos FJ, Fereres E. Under review in Irrig Sci.

Capítulo 3

Respuesta del almendro a un cambio en el volumen de suelo humedecido bajo riego por goteo

Resumen

Bajo riego localizado, incluso si se aplican cantidades de agua no limitantes, puede haber limitaciones en la transpiración (T) debidas a un limitado volumen de suelo humedecido. El objetivo de este estudio fue estudiar bajo condiciones de campo como responden almendros regados por goteo a un cambio en el volumen de suelo humedecido. Así, durante el verano de 2012 se establecieron dos tratamientos en un huerto de almendros en Córdoba, España. Un tratamiento (T1) se regó inicialmente con microaspersores para humedecer el total de la superficie de suelo, y de ahí en adelante se volvió al riego original por goteo. El otro tratamiento fue siempre mantenido bajo riego por goteo (T2). Los dos tratamientos se regaron con dosis de riego que excedían ligeramente la demanda hídrica del cultivo, determinada por un lisímetro de pesada situado en la misma parcela. Se midió transpiración continua de los árboles, contenido de humedad en el suelo, estado hídrico de los árboles y crecimiento del árbol a través de la sección de tronco. A pesar de que los árboles fueron provistos de suficiente agua en ambos casos, la microaspersión (T1) produjo un incremento en T y una mejoría en el estado hídrico del cultivo respecto de T2. También se observó una disminución en la resistencia hidráulica en T1, así como un aumento en conductancia de cubierta y del crecimiento del tronco. Puede concluirse que hay situaciones en el campo donde la transpiración del almendro está limitada por un volumen de suelo humedecido insuficiente, incluso cuando el aporte de agua es adecuado, debido a una alta resistencia hidráulica durante periodos de alta demanda evaporativa.

Summary

Under localized irrigation, even when applying non-limiting amounts of water, there could be transpiration (T) limitations due to a limited wetted soil volume. The goal was to study under field conditions how drip-irrigated almond trees responded to a change in wetted soil. Two treatments were established in summer 2012 in a drip irrigated almond orchard in Cordoba, Spain. One treatment (T1) was initially irrigated with micro-sprinklers (MS) to wet the entire ground surface, and then reverted to drip irrigation, while other was kept under drip (T2). Both treatments were irrigated slightly exceeding crop water requirements, as determined by a lysimeter in the orchard. Continuous monitoring of T and measurements of soil moisture content, tree water status and trunk growth were carried out. Even though trees were supplied with adequate amount of water, the MS application induced an increase in T and an improvement in water status in T1 relative to T2. A reduction in the hydraulic resistance of the tree was also detected in T1, as well as an enhancement in canopy conductance and tree growth. There are situations in the field where almond tree transpiration is limited by an insufficient wetted soil volume, even when supplied with adequate amount of water, due to a high hydraulic resistance during times of high evaporative demand.

3.1. Introducción

El riego localizado se ha extendido mucho durante las últimas décadas, especialmente desde la introducción del riego por goteo a principios de los años 60. Actualmente más de 18 millones de hectáreas están bajo sistemas de riego localizado en todo el mundo. El uso de estos sistemas aumenta la eficiencia en el uso del agua, ya que el suelo es mojado de forma parcial, mientras que otros sistemas mojan toda o gran parte de la superficie del suelo. El riego localizado es especialmente apropiado en huertos de árboles frutales en los que no hay necesidad de mojar el 100% de la superficie, más aún cuando los árboles son todavía jóvenes.

En cultivos bajo riego localizado, además de aplicar una cantidad suficiente de agua, la distribución de la misma tanto en el tiempo como en el espacio es importante para alcanzar los rendimientos máximos. En este sentido, el cambio de sistemas de riego por superficie u otros riegos de cobertura total a sistemas localizados, llevó al desarrollo de estudios de diseño, donde la velocidad de descarga de los emisores, la distancia entre ellos, la frecuencia de riego y el porcentaje de suelo a mojar eran los principales parámetros analizados (Bresler 1978), donde uno de los principales objetivos es aplicar el agua suficiente a la zona de las raíces, encontrando un equilibrio entre un volumen suficiente de suelo (y por tanto una superficie de suelo) que debe ser mojado para permitir el óptimo crecimiento y desarrollo del cultivo, a la vez que la superficie mojada deber ser lo más pequeña posible para disminuir la evaporación desde el suelo al mínimo posible. Inicialmente, Keller y Karmeli (1974) y después Keller (1987) propusieron, para zonas con baja pluviosidad, unos porcentajes mínimos y máximos de superficie de suelo mojado del 30% y del 50%, respectivamente. Sin embargo, es frecuente encontrar huertos de frutales bajo riego por goteo con unos porcentajes mojados mucho menores. Keller y Karmeli (1974) desarrollaron una tabla de referencia en la que indicaban qué porcentaje de suelo resultaría mojado bajo un riego por goteo tras la aplicación de una cantidad de agua determinada dependiendo de la textura del suelo, del espaciamiento entre goteros y de la velocidad de descarga de los mismos. Sin embargo, para mojar suficiente cantidad de raíces sin que llegue a haber percolación profunda, no sólo es importante la superficie mojada, sino también la forma del volumen de suelo humedecido (Clothier y Green 1994; Gispert et al. 2012). Es posible que con un número limitado de goteros, las pérdidas por percolación sean inevitables si se aplican las necesidades totales de agua. De hecho, Andreu et al. (1997) detectaron pérdidas por

drenaje bajo almendros regados por goteo, a pesar de que las cantidades de riego estaban por debajo de las necesidades del cultivo.

En cuanto al efecto del volumen de suelo humedecido sobre el desarrollo y el rendimiento del cultivo, estudios previos han concluido que un volumen reducido puede disminuir la transpiración (T) (Moreshet et al. 1983; Green and Clothier, 1995) y como consecuencia la productividad del cultivo (Bielorai 1982; Porras et al. 1988; Pastor et al. 1997; Schwankl et al. 1999; Edstrom and Schwankl 2002; Bryla et al. 2003, 2005; Gispert et al. 2012).

Keller (1987) propuso una relación entre productividad potencial y porcentaje de superficie humedecida, aunque esta era una curva hipotética basada en el conocimiento hasta la fecha. Bielorai (1982), aplicando una cantidad determinada de agua a un viñedo, obtuvo rendimientos ligeramente superiores con un sistema de riego localizado que mojaba hasta un 40% de la superficie del suelo que con aspersores que mojaban hasta un 70%, probablemente por las mayores pérdidas de agua por evaporación desde el suelo en este último caso. Moreshet et al. (1983) compararon en naranjos adultos un sistema de riego que mojaba el 100% de la superficie con otro que mojaba sólo el 40%. Observaron que la transpiración al mediodía y el rendimiento se reducían en un 28 y un 18% respectivamente, en el tratamiento del 40% de humedecimiento respecto al del 100%. En olivo, Porras et al. (1988) observaron una correlación entre volumen de suelo humedecido y crecimiento de la sección de tronco, y Pastor et al. (1997) observaron que aumentando el número de goteros alrededor de cada tronco, la productividad del olivo aumentaba. Gispert et al. (2012) llevaron a cabo un experimento en el que combinaban diferentes patrones de humedecimiento con varias estrategias de riego deficitario controlado (RDC) en almendro. Ellos no encontraron diferencias entre rendimiento de los tratamientos regados al 100% de sus necesidades comparados con los tratamientos bajo RDC. Igualmente no se encontraron diferencias entre tratamientos regados al 100% cuando se cambiaron los porcentajes de humedecimiento, sin embargo, en los tratamientos de RDC las mayores producciones se alcanzaron con los mayores porcentajes de volumen de suelo humedecido (Gispert et al. 2012). Más recientemente, Morales-Sillero et al. (2013) midieron menores rendimientos de fruto en olivos regados por goteo, comparados con un tratamiento control donde el total de la zona de raíces fue humedecida. Estos autores atribuyen los menores rendimientos a una disminución en el intercambio gaseoso en el tratamiento bajo riego por goteo; sin embargo este último tratamiento recibió una cantidad de agua bastante menor que el control. En cualquier caso, la respuesta aparentemente negativa a un volumen de suelo

reducido que se encontró en el olivo en los trabajos citados, contrasta con el excelente desarrollo que muestran los olivares comerciales bajo riego por goteo por todo el mundo.

En almendro Schwankl et al. (1999) realizaron un experimento para determinar el efecto del método de riego sobre el rendimiento del cultivo. Para ello aplicaron la misma cantidad de agua pero mediante cuatro métodos diferentes: micro-aspersión, superficie, goteo superficial y goteo subterráneo, y observaron que el mayor crecimiento de diámetro de tronco y los mayores rendimientos se producían con el riego por micro-aspersión, lo que sugiere (pero no prueba) un efecto concreto positivo de la fracción humedecida sobre el comportamiento del árbol. En este trabajo, no se sabe bien si la cantidad de agua aplicada fue suficiente para cubrir las necesidades máximas. Para separar de forma inequívoca los efectos de reducir el volumen de suelo humedecido de los de reducir la cantidad de agua, se ha de asegurar la aplicación de suficiente agua para evitar déficit hídricos en el árbol. El tema del volumen de suelo humedecido es de tal importancia que puede afectar a las conclusiones de trabajos donde el objetivo es dilucidar la cantidad de agua necesaria para el desarrollo óptimo de los cultivos. Hutmacher et al. (1994) encontraron una estrecha relación entre el crecimiento de almendros y la cantidad de agua aplicada, sin embargo, atribuyeron el mayor crecimiento no solo a las mayores cantidades de agua, sino también al mayor volumen de suelo humedecido al ir aumentando las dosis de agua. Esta misma confusión entre los efectos del patrón de humedecimiento y de la cantidad de agua, podría explicar por qué algunos estudios en almendros concluyen que aplicar más agua que la calculada como requerimientos totales promueve el crecimiento vegetativo (Shackel et al. 1998; Torrecillas et al. 1989), mientras que Girona et al. (2005), aplicando un 130% de las necesidades totales en un experimento de almendros, no observaron mayores rendimientos que aplicando 100%. Una posible explicación podría estar en que Girona et al. (2005) usaron un sistema de microaspersión y por tanto el volumen de suelo no fue en ningún caso limitante al mojar un gran porcentaje de la superficie del suelo, mientras que en los otros experimentos se usó riego por goteo, con lo que probablemente en esos experimentos el volumen de suelo humedecido aumentó con la cantidad de agua de riego.

Existen dos hipótesis que intentan explicar cómo un volumen limitado de suelo humedecido puede reducir la transpiración. Por una parte, la hipótesis que podemos denominar hidráulica, propone que cuando la densidad de raíces en contacto con suelo mojado es insuficiente para atender a la demanda de agua de la parte aérea la resistencia hidráulica del sistema radical aumenta, es decir el agua

encuentra mayor dificultad para fluir desde las raíces hasta las hojas (Kramer 1988; Kramer and Boyer 1995). Por otra parte, la hipótesis de señales químicas defiende que la T disminuye por el cierre estomático inducido por señales químicas enviadas desde las raíces que tocan suelo seco (Davies y Zhang 1991). Recientemente, Sperry (2002) revisó estudios donde se manipuló la conductancia hidráulica desde el suelo a las hojas y esto derivó en cierre estomático. Por lo que concluye que las señales químicas desde las raíces hasta la parte aérea no pueden ser el único mecanismo que limita la T. En la misma línea, estudios recientes también sugieren una combinación de las dos hipótesis, donde la importancia relativa de cada uno de los mecanismos depende de la especie y de las condiciones ambientales (Comstock 2002; Tardieu et al. 2010). Otro grupo de estudios que han dedicado esfuerzos en determinar el mecanismo implicado en la reducción de T es el que trata de la técnica de secado parcial de raíces (PRD, de sus siglas en inglés "partial-root drying). Esta técnica se originó en Australia (Dry y Loveys 2008) y se basa en el intento de promover un cierre estomático por señales químicas originadas en la fracción del sistema radical en suelo seco, a la vez que se mantiene un buen estado hídrico de la planta gracias al aporte de suficiente agua en la fracción del sistema radical en suelo húmedo. Sin embargo, en un meta-análisis realizado por Sadras (2009) se demostró que a pesar de que la productividad del agua (rendimiento por unidad de agua aplicada) mejoró en los tratamientos bajo PRD en comparación con tratamientos control, este aumento se debió a las diferentes cantidades de agua aplicadas y no a la técnica en sí. Es más, cuando comparó PRD y control de experimentos en los que las cantidades de agua fueron similares, no se detectaron diferencias en productividad del agua de riego (IWP), gs ni ψ_x. Esto cuestiona el papel de las señales químicas de la raíz en suelo como principal promotor del control estomático.

Otra cuestión en debate es si las conclusiones alcanzadas bajo condiciones de laboratorio son también válidas ante condiciones de campo, ya que aunque en laboratorio es posible someter a las raíces a estrés hídrico antes de que a la parte aérea, en el campo esto es improbable ya que la parte aérea suele mostrar síntomas de estrés en suelos cerca de capacidad de campo (Kramer, 1988). La medida ininterrumpida de la T de árboles respondiendo a diferencias en volumen de suelo humedecido bajo condiciones de campo, acompañada de un control del estado hídrico del árbol y del contenido de humedad en el suelo, permitiría una interpretación más clara de los resultados.

Si el volumen de suelo humedecido influye en el estado hídrico y la respuesta del árbol cuando se está aplicando agua suficiente para compensar las pérdidas por

T, las implicaciones para el diseño y manejo del riego por goteo así como de otros sistemas de riego localizado son muy relevantes. En este estudio nos planteamos dos objetivos: a) determinar si el volumen de suelo humedecido reduce la transpiración de almendros que están recibiendo cantidades adecuadas de agua; y b) explorar la naturaleza de la respuesta de los almendros a un cambio repentino en volumen de suelo humedecido bajo condiciones de campo.

3.2. Materiales y métodos

El experimento se realizó en el verano de 2012, en un huerto de almendros de 4 años de edad (*Prunus dulcis* Mill., cv. Guara) localizados en el centro experimental "Alameda del Obispo" del IFAPA, en Córdoba. El marco de plantación es de 6x7m; el volumen de copa medio era de 31 m^3 con un 35% de cobertura de suelo. La precipitación media anual de la zona es de 615 mm y la evapotranspiración 1350 mm, de los cuales 920 ocurren de junio a septiembre. El sistema de riego consiste en una línea por fila de árboles, con goteros integrados cada 1 metro y caudal 2.4 l/h (un total de seis goteros por árbol). La frecuencia de riego fue diaria. Durante todo el experimento no hubo ningún evento de lluvia. Las necesidades de riego se calcularon usando los coeficientes recomendados para almendro por Allen et al. (1998) y corregidos considerando el porcentaje de cobertura de suelo mediante el coeficiente de ajuste ($K_{r,t}$) de Fereres et al. (2012). El coeficiente de cultivo (K_c) utilizado fue 0.96 y el $K_{r,t}$ fue de 0.63 para un 34% de cobertura de suelo. Durante el experimento, las dosis de riego se fueron corrigiendo según las pérdidas de peso de un lisímetro de pesada instalado en el centro del huerto que contiene un árbol de las mismas características y sometido a las mismas prácticas que el resto de árboles (Lorite et al. 2012).

El año 2012 fue un año relativamente seco ya que la lluvia desde invierno hasta el principio de la campaña de riego en primavera (desde 21 de diciembre hasta 1 abril) fue sólo de 54 mm, mientras que en ese mismo periodo la ET_o fue de 215 mm. Como no se dio ningún riego inicial para recargar el perfil del suelo, las reservas de agua del perfil estaban prácticamente agotadas al inicio del experimento que comenzó el 11 de julio y terminó el 10 de agosto. Se establecieron dos tratamientos diferentes con tres repeticiones cada uno:

Tratamiento 1 (T1): se aplicó un riego por micro-aspersión al principio del periodo de medidas (comienzo el 12 de julio) para incrementar de forma

substancial el volumen de suelo humedecido respecto al existente por el sistema de riego por goteo. Los micro-aspersores funcionaron durante 50 horas seguidas para aplicar una lámina de 100 mm. Al terminar dicha aplicación, el riego volvió a aplicarse diariamente a través del sistema de riego por goteo.

Tratamiento 2 (T2): Control. Los árboles se regaron siempre bajo el sistema de riego por goteo habitual en la finca. La única diferencia con el T1 es, por tanto, que durante el periodo experimental, se mantuvo el reducido volumen de suelo humedecido por el sistema de riego por goteo.

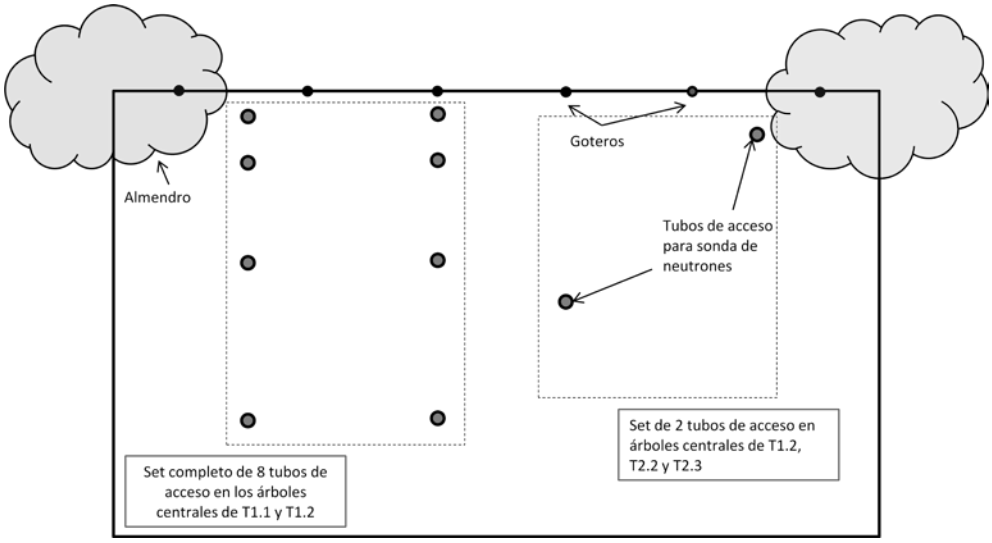


Fig. 3.1. Esquema de localización de los tubos de acceso para sonda de neutrones en los árboles centrales de cada tratamiento.

Desde el día 1 de julio hasta el final del experimento se aplicó un ligero exceso (5%) en la cantidad de agua de riego calculada para compensar las pérdidas por ET_c, de manera que se garantizaba que cualquier diferencia entre tratamientos no se debiese a falta de agua en T2. El contenido de agua en el suelo se midió cada semana con una sonda de neutrones (Campbell Scientific, Model 503). Se instalaron ocho tubos de acceso de aluminio en los árboles centrales de T1.1 y T2.1, como se muestra en la Fig. 1. Los tubos se dispusieron en dos filas de cuatro tubos cada una y perpendiculares a la línea de goteros, una justo en línea con un gotero y otra entre dos goteros. Las distancias a la línea de goteros fueron 15, 60, 140 y 270 cm. Para llevar a cabo medidas adicionales en los árboles centrales de otras repeticiones (T1.2, T2.2 y T2.3) se instalaron dos tubos por árbol, uno a 40 cm de la línea de goteros y otro a 160 cm. Se tomaron medidas hasta 150 cm de profundidad, las dos primeras medidas cada 15 cm y las siguientes cada 30 cm. El

contenido de agua en el suelo (CAS) hasta 150 cm se calculó como media del CAS obtenido para cada tubo ponderando según el área correspondiente a cada uno. Para los árboles centrales de T1.1 y T1.2 se realizaron gráficos de curvas de contorno de humedad usando SigmaPlot 12.5 (Systat Software Inc.).

Fig. 3.2. Detalle de los efectos de la microaspersión realizada al inicio del experimento en las parcelas del tratamiento T1.

La transpiración de en los árboles centrales de T1.1, T1.2, T2.1, T2.2 y T2.3 se estimó de forma continua mediante el sistema de flujo de savia. No todos los árboles centrales en las parcelas experimentales pudieron equiparse con el sistema de medida de flujo de savia, debido a la insuficiente disponibilidad de sondas. El sistema usa el método de Compensación de Pulsos de Calor (CHP, de sus siglas en inglés) que se basa en la estimación de la velocidad del flujo de savia a partir de la medida de tiempo que tarda el calor emitido por un emisor en llegar a dos sensores de temperatura situados a distancias conocidas desde el mismo (Testi y Villalobos 2009). Integrando esas velocidades a lo largo del radio del tronco y a lo largo de la sección de tronco considerada (Green et al. 2003b) se calcula la transpiración del árbol (l/h) (para más detalle ver Capítulo 2).

El potencial hídrico de xilema (Ψ_x) se midió al mediodía usando una bomba de presión Scholander. Para ello se escogieron hojas sombreadas cercanas al tronco o a ramas principales. Siguiendo las recomendaciones de Hsiao (1990) las hojas se cubrieron con papel de aluminio durante 30 minutos, después fueron cortadas e inmediatamente colocadas en la bomba de presión. Para estimar el potencial de agua en las raíces ($\Psi_{pd)}$ se siguió este mismo procedimiento, midiendo antes de

amanecer, momento en que se supone que el árbol está alcanzando el equilibrio con el suelo. En cada hora de medida se tomaron entre tres y cuatro hojas en el árbol central de cada parcela. En varias ocasiones, antes y después de la aplicación de la microaspersión (MA), se estudió la evolución diurna del Ψ, tomando medidas cada 2-3 horas desde el amanecer hasta el atardecer.

El volumen de copa se midió utilizando el procedimiento explicado en el Capítulo 1, realizando fotografías desde varios puntos para obtener valores medios de radio horizontal y vertical y calculando luego el volumen asimilando la copa del árbol a una elipsoide. El perímetro de tronco a 30 cm de altura se midió una vez al mes desde junio hasta septiembre para evaluar el crecimiento del árbol.

3.3. Resultados

3.3.1. Contenido de agua en el suelo.

La Figura 3.3 muestra la evolución del CAS hasta la profundidad de 150 cm para los árboles centrales de T1.1 y T2.1, aquellos que tenían instalados un conjunto de ocho tubos de acceso de sonda de neutrones cada uno. El efecto de la micro-aspersión (MA) puede observarse en el aumento del CAS en T1.1 desde 175 mm previo al riego hasta 260 mm, un diferencia de 85 mm. A partir de ese momento, después de un ligero descenso justo después del fin del riego por MA, el CAS en este tratamiento se mantuvo constante hasta que el riego se cortó en agosto. En el caso de T2.1, el CAS fue aumentando ligeramente durante el experimento, probablemente debido al exceso (5%) de riego aplicado sobre las necesidades calculadas.

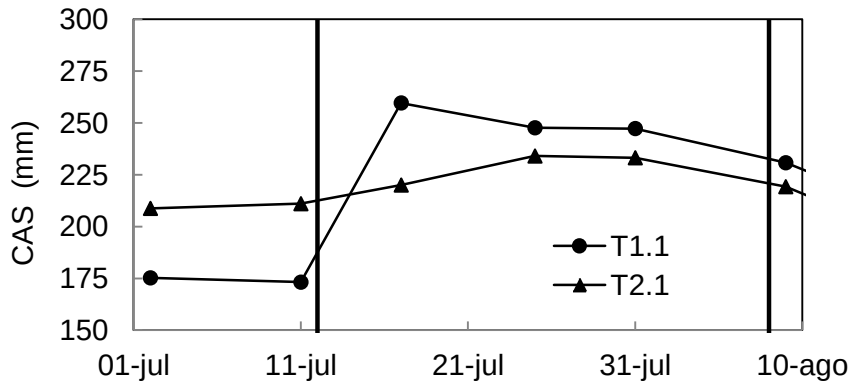


Fig. 3.3 Evolución del contenido de agua en el suelo (CAS) para los árboles de los tratamientos T1 y T2 con set completo de tubos de acceso para sondas de neutrones durante el periodo experimental. Cada punto represente la humedad de suelo media medida hasta la profundidad de 150 cm en ocho puntos del suelo alrededor de cada árbol. Las líneas verticales representan el momento de inicio de la MA y el final del experimento el 9 de agosto

En la Figura 3.4 se muestra la distribución de la humedad bajo los árboles centrales de T1.1 y T2.1. Las observaciones justo antes del riego por MA nos muestran que la zona húmeda estaba claramente definida bajo los goteros con cambios abruptos en el contenido volumétrico de agua en el suelo. La zona húmeda bajo el gotero llegaba a una profundidad de entre 90 y 120 cm y su radio a 30 cm de profundidad era de unos 50 cm. Tras el riego por MA, la humedad de suelo a 50 cm de profundidad aumentó drásticamente hasta extenderse por toda la calle entre árboles. Más adelante, la humedad del suelo en las capas más superficiales fue disminuyendo debido a la evaporación, mientras que el agua iba penetrando lentamente a mayores profundidades. No se observaron grandes cambios en la humedad de suelo bajo el árbol central de T1.1 en el periodo del 17 de junio al 31 julio, aunque sí se observó una disminución el 9 de agosto. En cuanto a T2.1, la silueta de la mancha húmeda continuó claramente definida durante todo el experimento. El ligero exceso en la dosis de riego hizo que el volumen de suelo humedecido aumentase con el tiempo. El contenido de agua por encima de 0.15 cm^3/cm^3 a 30 cm de profundidad alcanzó una distancia de 80 cm desde la línea de goteros el 11 de julio y llegó a 125 cm para el día 31 de julio. Es muy probable que ocurrieran durante el experimento pérdidas de agua por percolación profunda ya

que la humedad de la última profundidad medida continuó aumentando con el tiempo (Fig. 3.4).

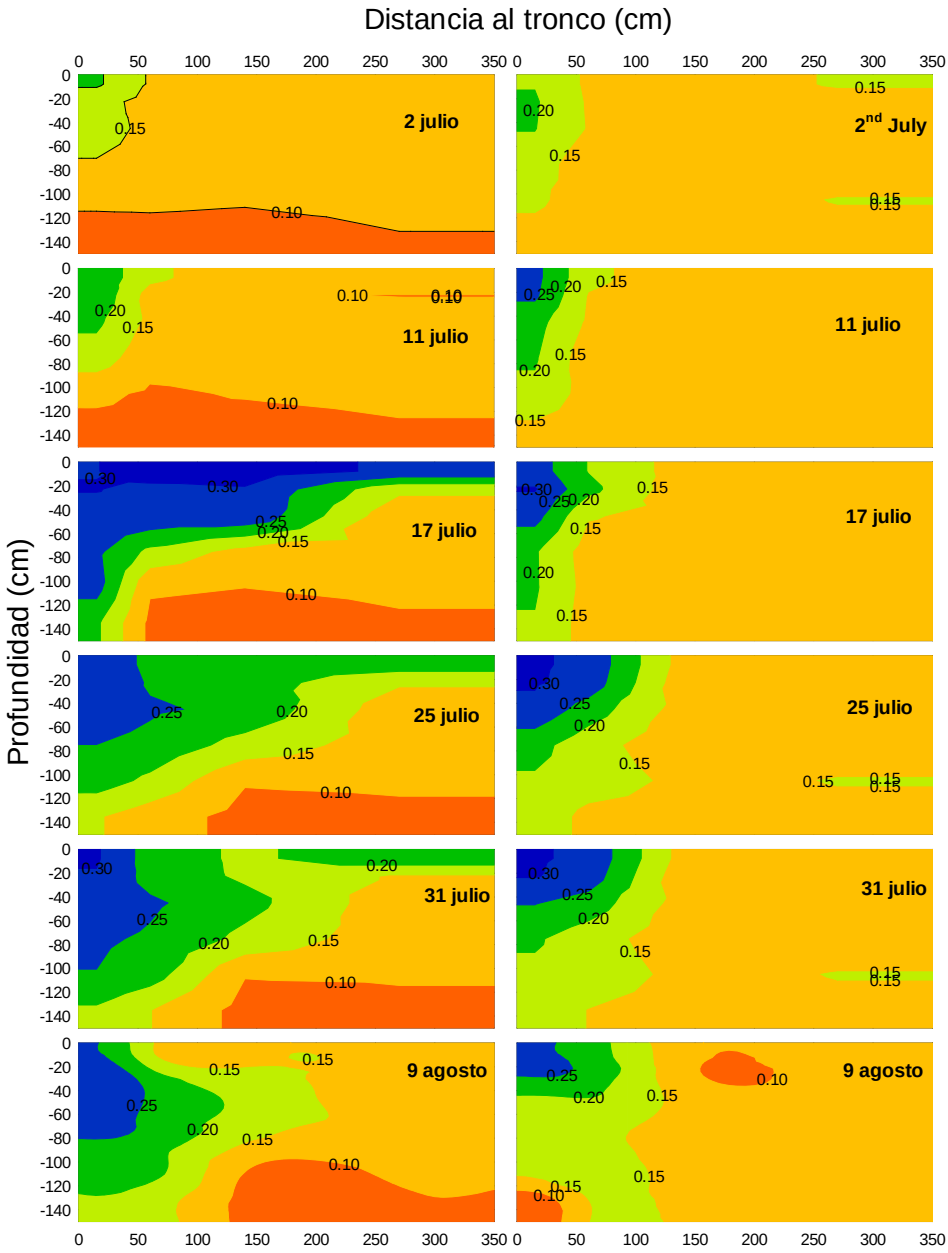


Fig. 3.4. Distribución espacial del contenido del agua en el suelo (cm^3 cm^{-3}) hasta una profundidad de 150 cm, en distintas fechas durante el experimento. Los gráficos de la columna de la izquierda corresponden al árbol central de T1.1 y los de la columna de la izquierda al de T2.1.

3.3.2. Evolución de la transpiración

La transpiración se expresa a través del coeficiente de transpiración (K_T) que la normaliza respecto a la ET_o diaria. La figura 3.5 muestra la evolución de K_T de ambos tratamientos a lo largo del experimento. Antes de aplicar la MA ambos tratamientos siguieron una evolución prácticamente idéntica en la T, donde las diferencias nunca superaron un 5%. Tras solo tres días después del inicio de la MA, empezó a notarse un incremento de K_T en T1. La separación de los dos tratamientos se fue haciendo cada vez mayor y sobre el día 20 de julio K_T del T1 ya era un 15% mayor que K_T del T2. Desde el 18 de julio hasta el 23 de julio, la diferencia entre los dos tratamientos fue constante, aproximadamente un 12%. Después, coincidiendo con una disminución de ET_o desde el 24 de julio, las diferencias entre los dos tratamientos se redujeron. Una vez que ET_o aumentó de nuevo, la diferencia entre T1 y T2 también aumentó, alcanzando un máximo de 0.10 (una diferencia relativa a favor del T1 del 22%) el día 9 de agosto. El aumento medio de K_T de T1 respecto al de T2 después de la aplicación de la MA fue del 14%, para un periodo de 25 días.

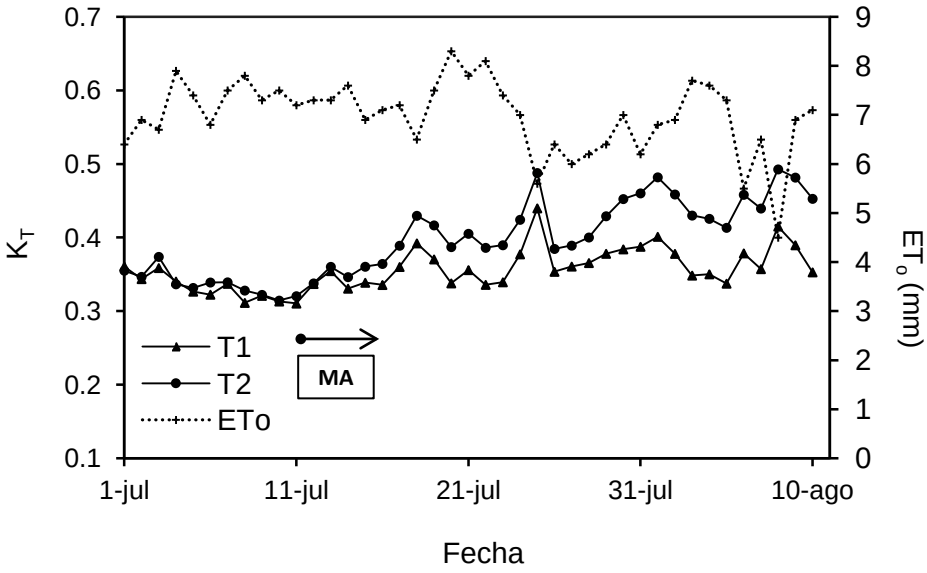


Fig. 3.5. Evolución del coeficiente de transpiración (K_T). Cada punto representa el valor diario medio de los dos árboles de T1 y los tres árboles en T2 monitorizados con sensores de flujo de savia. El valor diario de la evapotranspiración de referencia ET_o también se muestra.

La dinámica del incremento de la transpiración en T1 se puede ver en la Figura 3.6, junto con la indicación de la aplicación de la MA. El primer evento de riego por MA (36 mm) se completó en la mañana del 13 de julio y ya es posible ver un pequeño aumento de T en T1. Ese aumento se hizo más notable tras la aplicación del segundo evento de riego (32 mm) que tuvo lugar entre el día 13 y el 14 de julio. Incluso aunque la aplicación de la MA se interrumpió hasta el día 16 de julio, la transpiración de T1 continuó aumentando esos días respecto la de T2, probablemente por el lento avance del frente húmedo a través de un suelo no saturado. Para el momento en que los 100 mm planificados de riego por MA se completaron, ya había una diferencia importante entre la T de T1 y la de T2. Estas diferencias fueron más notables durante las horas centrales del día, cuando la demanda evaporativa es más alta. La diferencia de transpiración siguió incrementándose con el tiempo a pesar de que ambos tratamientos estaban desde el día 17 de julio bajo riego por goteo como antes del experimento.

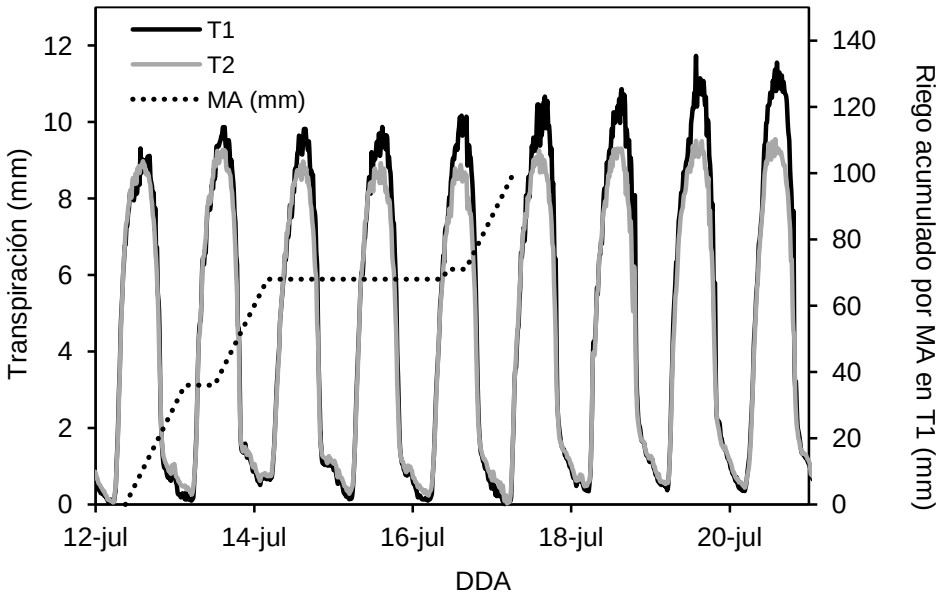


Fig. 3.6. Evolución de la transpiración instantánea desde el comienzo de la microaspersión (MA) en T1. La línea negra representa la media de los dos árboles de T1 monitorizados con sap-flow y la línea gris representa la media de los tres árboles de T2. La línea de puntos muestra la aplicación del riego por MA como riego acumulado (mm). El día 17 de julio, ambos tratamientos volvieron a regarse igual que antes de riego por MA.

3.3.3. Estado hídrico de los árboles.

La evolución del potencial hídrico de tronco (Ψ_x) al mediodía antes y durante el periodo experimental se representa en la Figura 3.7. Las medidas realizadas desde junio hasta justo antes del inicio de la MA, resultaron en valores de prácticamente idénticos de Ψ_x en todos los árboles del experimento, con valores comprendidos entre -0.9 y -1.2 MPa. La primera diferencia estadísticamente significativa (test de Tukey, p=0.05) se detectó el día 16 de julio, tan sólo 4 días después de comenzar con la MA, con valores de -0.9 y -1.1 La diferencia entre Ψ_x de los dos tratamientos se mantuvo prácticamente constante y siempre estadísticamente significativa durante todo el periodo experimental, indicando que el estado hídrico del T1 mejoró respecto al del T2. La diferencia máxima se alcanzó la primera semana después de la MA, con valores para T2 hasta 0.3 MPa por debajo de T1. La mínima diferencia (0.1 MPa) se midió el día 1 agosto, un día nublado con baja demanda evaporativa. Como valor medio, el Ψ_x del T1 fue alrededor de 0.2 MPa más alto que el del T2.

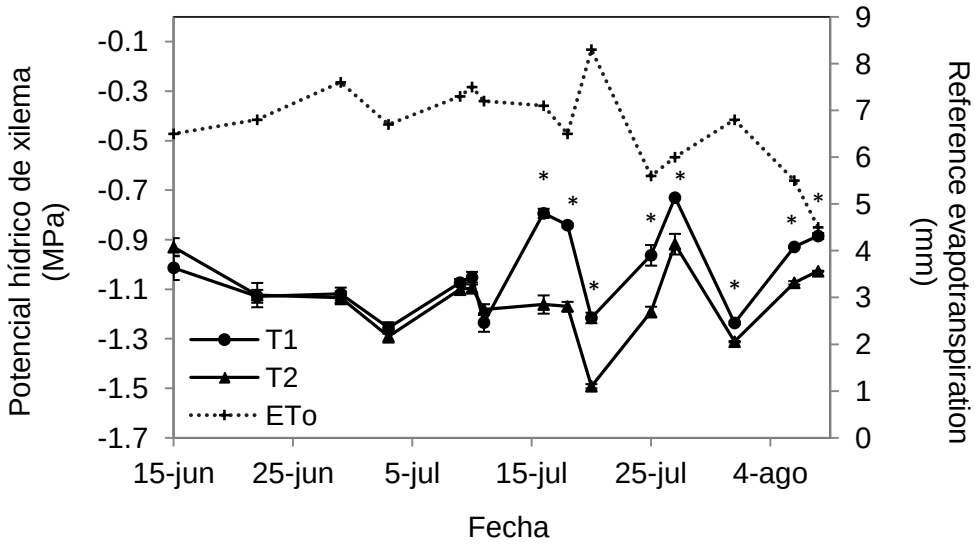


Fig. 3.7. Evolución temporal de potencial hídrico de xilema al mediodía en T1 y en T2. Cada punto es la media de tres o cuatro hojas por árbol medidas en tres árboles del T1 y en cuatro árboles del T2. La ET_o diaria también se muestra en la figura. Las barras verticales muestran el error estándar.

Para estudiar el comportamiento de las diferencias de Ψ_x a escala diaria, se realizaron en varias fechas medidas de Ψ_x desde el amanecer hasta la tarde cada dos horas aproximadamente. En la Fig. 7 se muestran las medidas en dos de estas fechas que son representativas de las demás. La primera fecha (Fig. 7a) fue el 11 de julio, el día de antes de empezar con la MA donde la ET_o fue de 7.2 mm, y la segunda fecha (Fig. 7b) fue el día 20 de julio en el que la ET_o fue de 8.3 mm. En la Fig. 7a podemos ver como antes de la MA el Ψ_x fue idéntico en los dos tratamientos durante todo el día. Durante la mañana el Ψ_x va disminuyendo desde su valor máximo antes de amanecer (-0.4 MPa) hasta su mínimo al mediodía (-1.2 MPa) que se mantiene constante hasta que sobre las 1600 h comienza a recuperarse, llegando a -0.8 MPa a las 1800 h. En la segunda fecha (Fig. 7b) se ven ya claramente las diferencias entre los dos tratamientos en todas las horas de medida. T1 mostró mejor estado hídrico que T2 durante todo el día. Las diferencias de Ψ_x oscilaron entre 0.1 MPa por la mañana hasta un máximo de 0.3 MPa sobre el mediodía. Por la tarde, ambos tratamientos se fueron recuperando y mostraron valores más parecidos entre sí. Todas las diferencias observadas en este día fueron estadísticamente significativas ($p=0.05$).

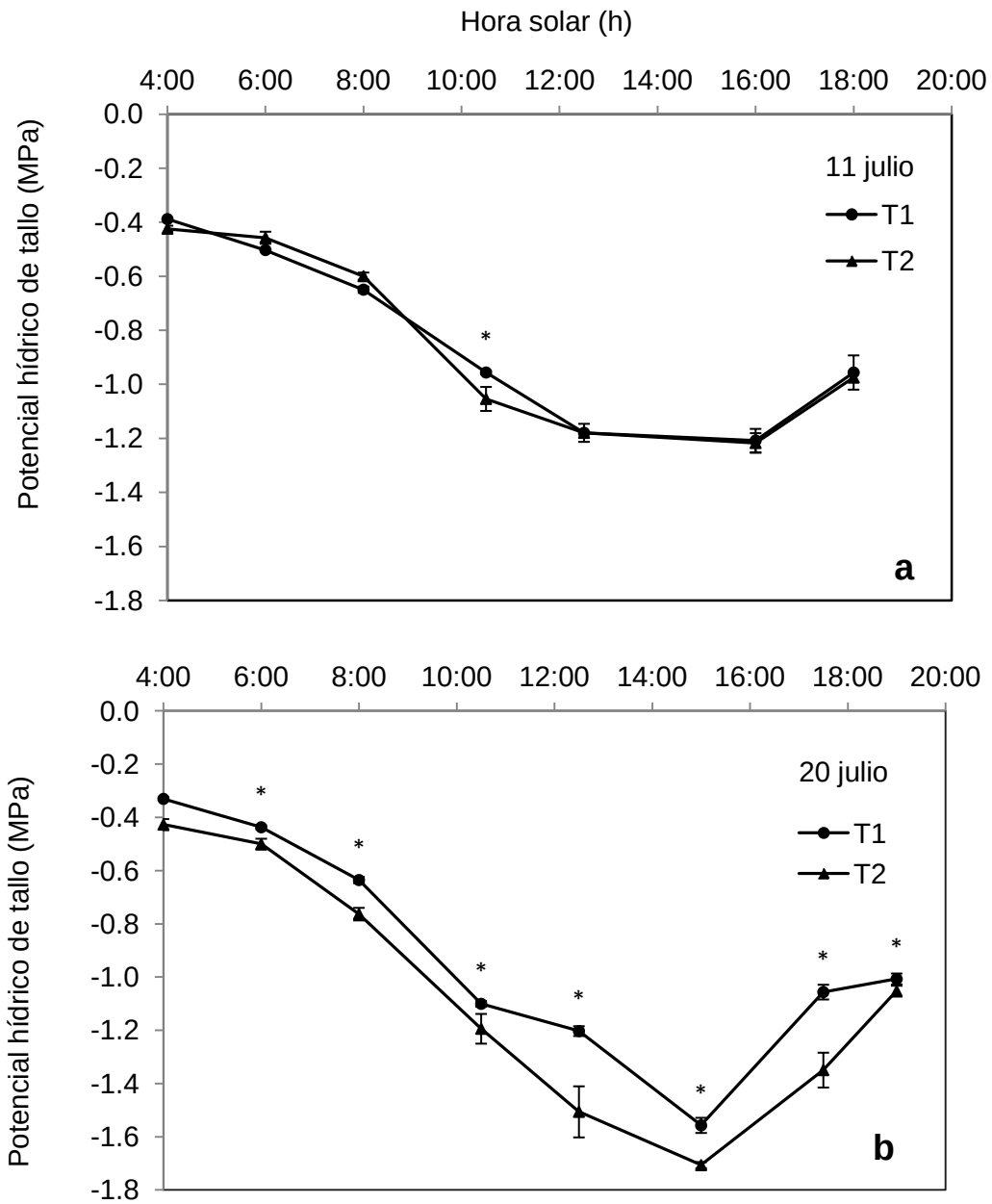


Fig. 3.8. a, b. Evolución diurna del potencial hídrico de xilema en dos fechas: a) 11 de julio, un día antes del inicio de la microaspersión en T1; b) 20 de julio tres días después de final del riego por MA. Las barras verticales muestran el error estándar.

3.3.4. Cálculo de la resistencia hidráulica de los árboles.

La Fig. 3.9 muestra la evolución diurna de la resistencia hidráulica (R_h) en dos fechas diferentes, calculada a partir de los datos de Ψ_x, Ψ_{pd} y las medidas de transpiración instantánea. El día de antes de empezar la MA, la R_h no mostró ninguna diferencia significativa entre tratamientos excepto en la primera hora de medida (0600 h solar) cuando la transpiración instantánea era tan baja que el cálculo de R_h resultó en valores improbablemente altos. A partir de esa estima, la R_h fue constante desde las 1000 h a las 1800 h. Después de la MA, las R_h de T1 y T2 coincidieron durante las primeras horas de medida; sin embargo, desde las 1200 h en adelante los dos tratamientos se separaron claramente, siendo la resistencia en T1 menor que en T2 (FIg. 3.9). Este día la resistencia no fue constante sino que fue aumentando hasta un valor máximo a las 1500 h y después disminuyó.

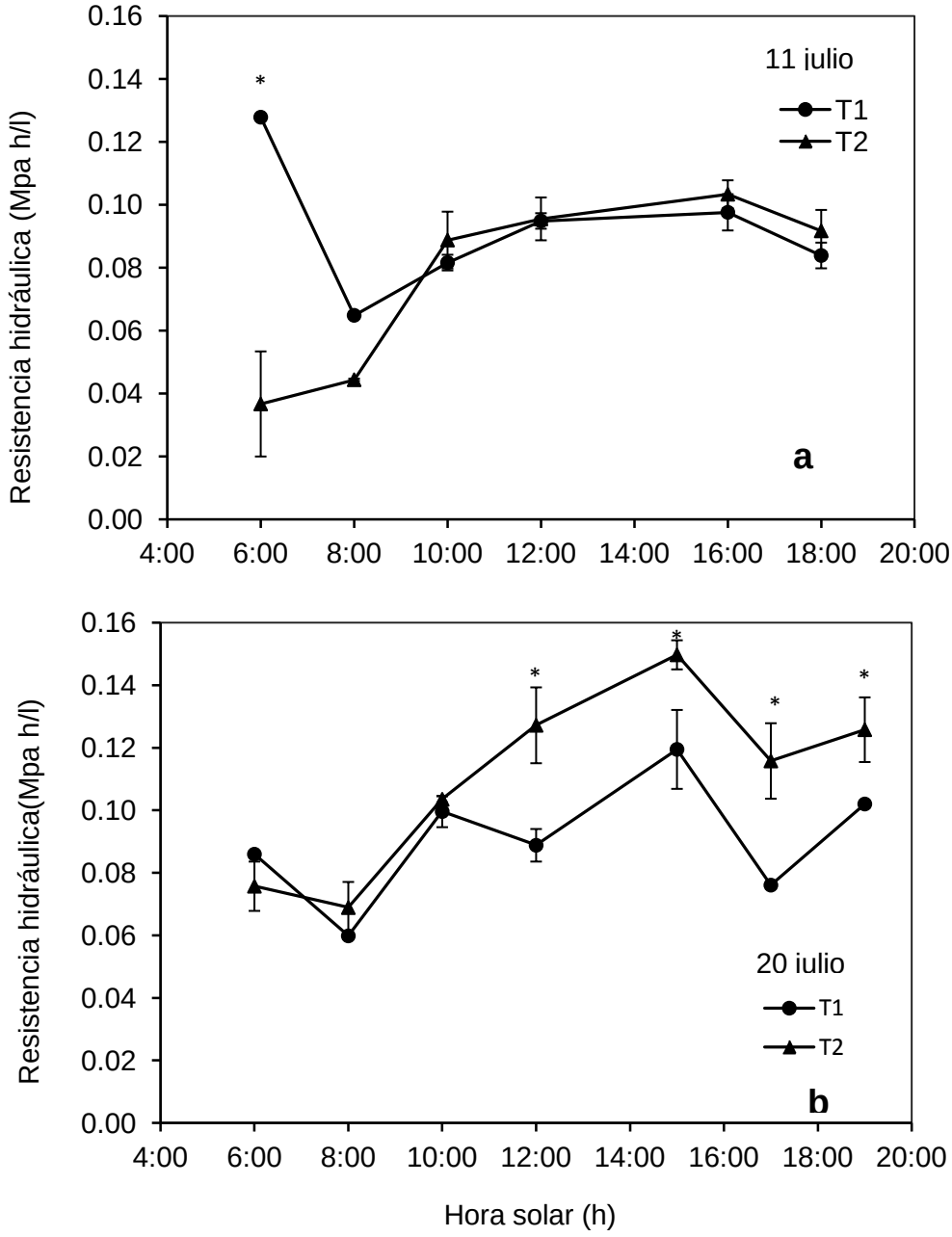


Fig. 3.9. a, b Evolución diurna de la resistencia hidráulica en dos fechas: a) 11 de julio, un día antes del inicio de la microaspersión en T1; b) 20 de julio tres días después de final del la MA. Las barras verticales muestran el error estándar.

En la Figura 3.10 la diferencia entre el Ψ_x y el Ψ_{pd} se representa frente a las medidas correspondientes de T instantánea para cada hora de medida de potencial hídrico. La pendiente de esta relación sería equivalente a la R_h. En la gráfica se incluyen medidas a diferentes horas del día y para varias fechas todas posteriores a la MA (20 de julio, 27 de julio, 1 de agosto y 8 de agosto). La primera medida de cada día no se incluye debido a los altos errores en el cálculo de la R_h que provocan los bajos valores de transpiración en ese momento. El T1 exhibió una R_h menor que el T2, tal y cómo muestran las distintas pendientes en la Fig. 9., concretamente un valor de 0.11 MPah/l para T1 frente a 0.15 MPah/l para T2

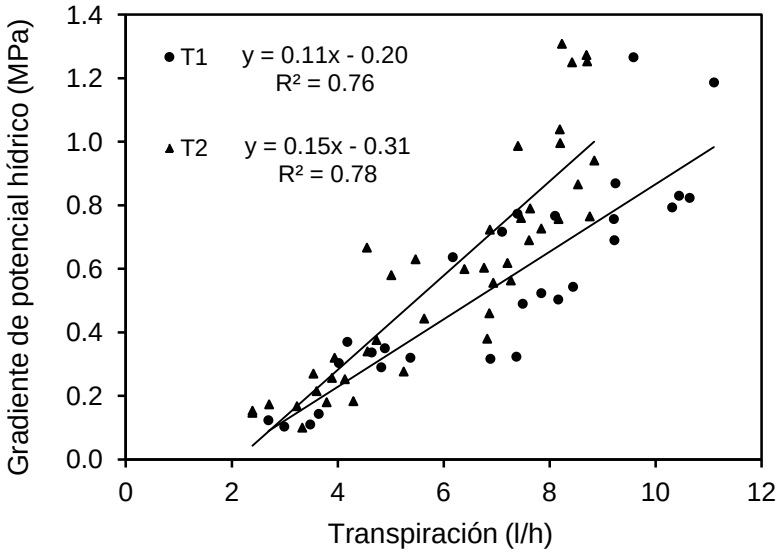


Fig. 3.10. Gradiente de potencial hídrico entre el suelo y el xilema frente a la transpiración instantánea de los árboles centrales de T1 y T2. Las medidas se hicieron en varias fechas después de la MA: 20 de julio, 27 de julio, 1 de agosto y 8 de agosto.

Estos resultados se observan también en la Figura 3.11 donde se muestran los valores de R_h al mediodía en varias fechas durante el experimento. Para todos los días de medida R_h fue menor en el tratamiento T1 que en el T2. La diferencia máxima fue de 0.004MPah/l, que ocurrió el 20 de julio, día con la ET_o más alta de todos los días de medida. En el resto de fechas, las diferencias entre los tratamientos se mantuvieron alrededor de 0.002 MPal/h.

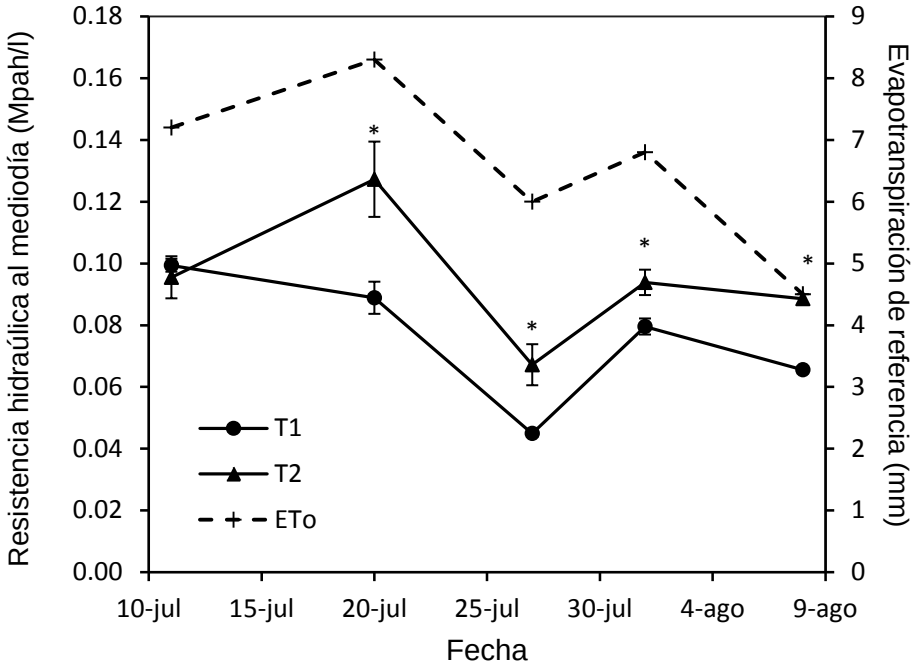


Fig. 3.11. Evolución temporal de la resistencia hidráulica de T1 y T2. La evapotranspiración de referencia (ET_o) también se muestra. Las barras verticales indican el error estándar.

3.3.5. Crecimiento y conductancia de cubierta.

La conductancia de la cubierta del día 20 de julio, derivada de los datos de transpiración mediante la inversión de la ecuación de la evaporación impuesta de Penman-Monteith (Villalobos et al. 2013), mostró diferencias entre los dos tratamientos (Fig. 3.12). Al comenzar el día los valores de gc de ambos tratamientos era muy similares, sin embargo desde las 1000 h hasta las 2000 h, coincidiendo con las horas del día en que también el Ψ_x se separa entre los dos tratamientos, los árboles del tratamiento T1 presentaron mayor gc que los del tratamiento T2.

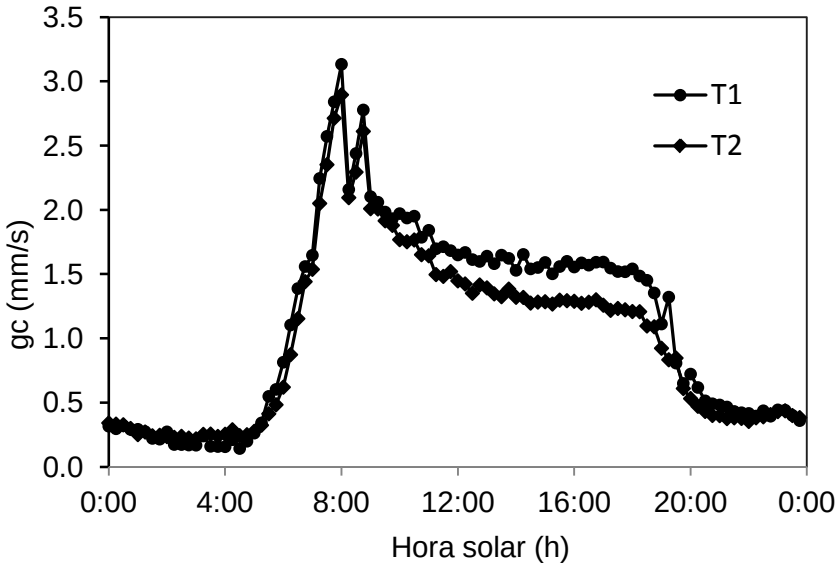


Fig. 3.12. Evolución diurna de la conductancia de cubierta (gc) de T1 y T2 el día 20 de julio. Cada punto representa el valor medio de los dos árboles de T1 y los tres árboles en T2 monitorizados con sensores de flujo de savia.

En la Figura 3.13 vemos que la relación entre Ψ$_x$ al mediodía y la gc correspondiente a esa hora del día es la misma en los dos tratamientos. Conforme el potencial se va haciendo más negativo la conductancia de cubierta va disminuyendo de forma lineal.

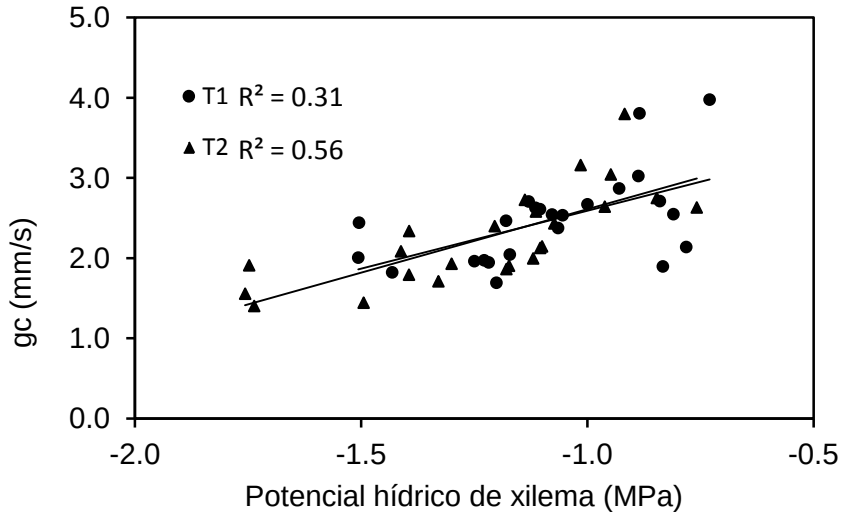


Fig. 3.13. Potencial hídrico de xilema al mediodía frente a conductancia de cubierta a la misma hora del día en varias fechas, desde antes del riego por MA hasta después del periodo sin riego previo a la cosecha. Cada punto corresponde a la media de seis medidas de Ψ_x en T1 y de nueve medidas en el tratamiento T2

Las medidas de intercambio gaseoso realizadas a nivel de hoja con el analizador de gases IRGA (ADC) no desprendieron ninguna resultado claro. Los dos tratamientos mostraron la misma fotosíntesis al mediodía (E, μmol/m^{2}s) durante todo el experimento (Fig. 3.14). En cuanto a la conductancia estomática (gl, mol/m^{2}s) solo en una de las fechas de medida, el 25 de julio, hubo diferencia entre tratamientos, siendo la g_l del T1 mayor que la del T2 (Fig. 14).

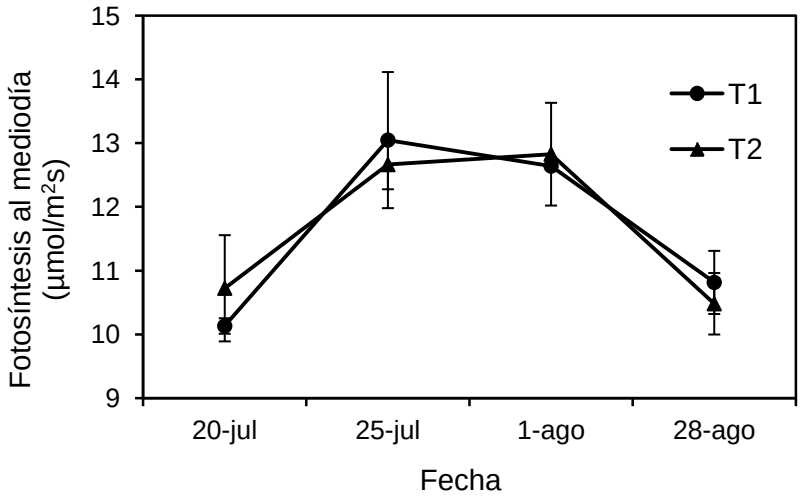


Fig. 3.14. Evolución temporal de la fotosíntesis al mediodía a nivel de hoja. Cada punto representa la media de tres hojas por árbol medidas en dos árboles del T1 y en tres árboles del T2. Las barras verticales indican el error estándar.

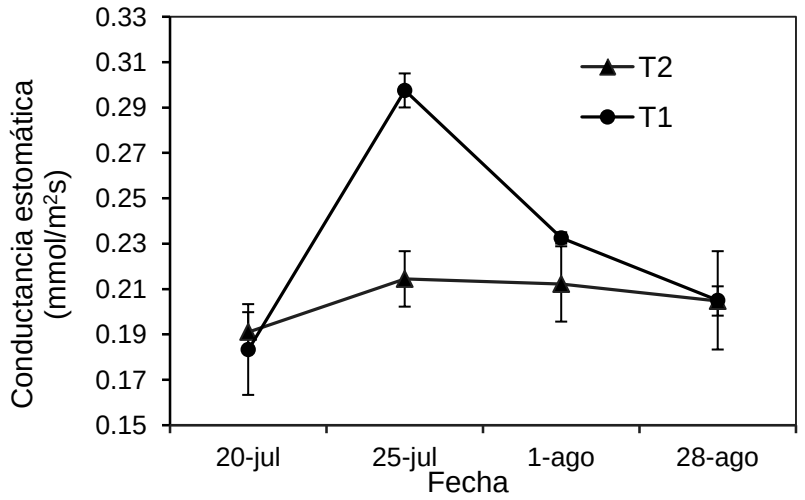


Fig. 3.15. Evolución temporal de la conductancia estomática al mediodía (gs mmol/m^{2}s). Cada punto representa la media de tres hojas por árbol medidas en dos árboles del T1 y en tres árboles del T2. Las barras verticales indican el error estándar.

En cuanto al crecimiento, analizado a través del diámetro de tronco, observamos que en el periodo de después de la MA, los árboles de T1 crecieron más que los de T2 (Fig. 3.16).

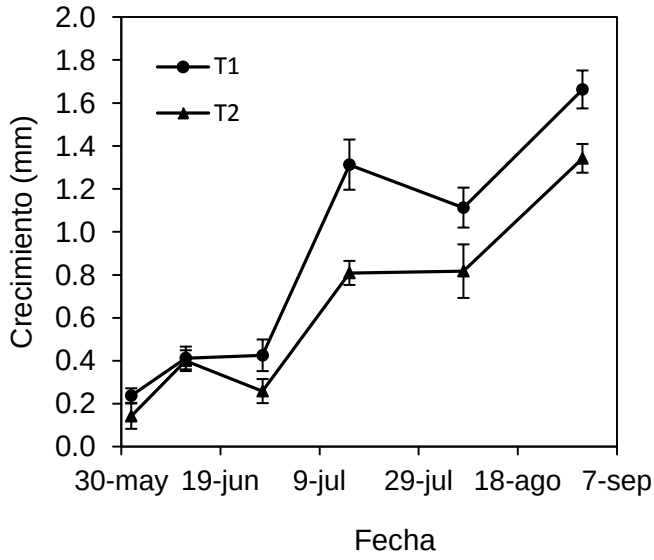


Fig. 3.16. Crecimiento del perímetro de tronco medido a 30 cm de altura del suelo. Cada punto representa la media de tres árboles de T1 y de tres árboles de T2. Las barras verticales indican el error estándar. Cada punto de crecimiento está situado en la fecha media entre las dos fechas de medida consecutivas correspondientes.

3.3.6. Respuesta durante un periodo de sequía.

El riego se cortó durante el periodo comprendido entre el 09/08 y el 24/08 para facilitar la recolección del huerto. Los valores del Ψ_x al mediodía de ambos tratamientos disminuyeron durante ese espacio de tiempo (Fig. 3.17). Sin embargo, se puede observar cómo en el T1 esa disminución es menor que en el T2 y por tanto la diferencia entre ambos tratamientos se amplía. Los mínimos valores de Ψ_x de T1 y T2 fueron -1.4 y -1.8 MPa, respectivamente. Al reiniciarse el riego, ambos tratamientos se recuperan, aunque la diferencia entre ellos continuó siendo mayor que la previa al corte de riego, lo que implica una mayor dificultad del T2 para recuperar su estado anterior al periodo de sequía.

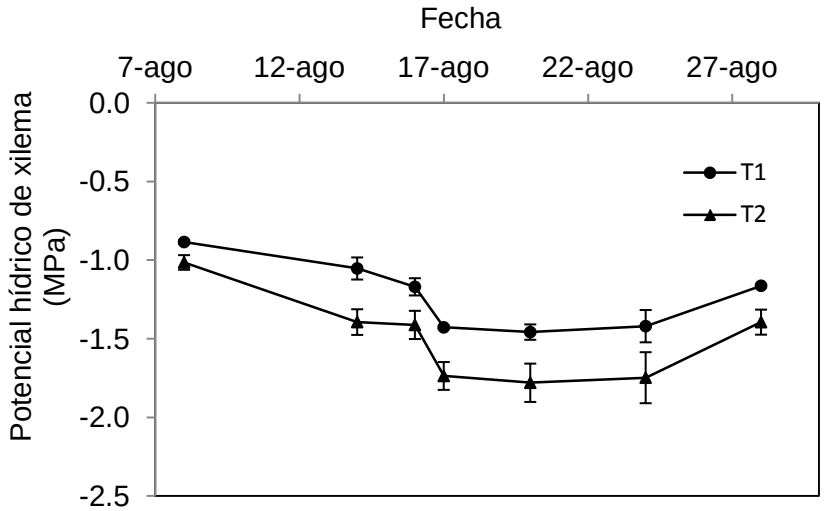


Fig. 3.17. Evolución del potencial hídrico de xilema al mediodía durante el periodo sin riego (09/08-24/08) antes de la cosecha.

La caída del Ψ_x al mediodía vino acompañada de una caída en la conductancia de cubierta a esa hora del día (Fig. 3.18).

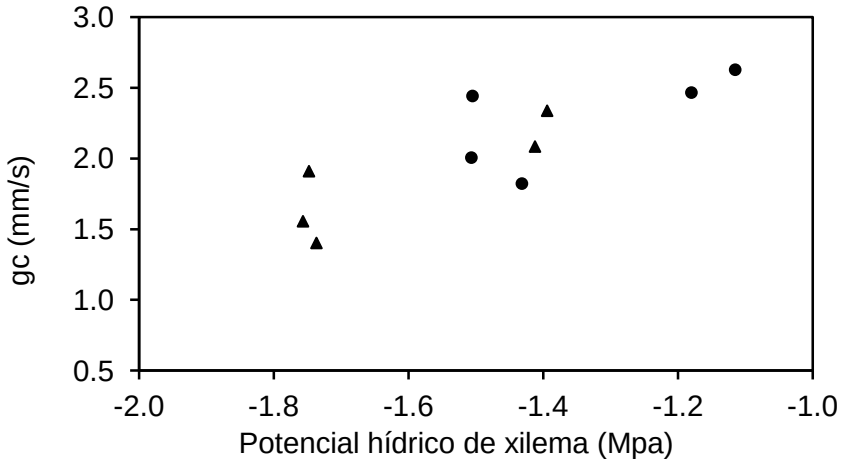


Fig. 3.18. Potencial hídrico de xilema al mediodía frente a conductancia de cubierta a la misma hora del día durante el periodo de sequía antes de la cosecha. Cada punto corresponde a la media de seis medidas de Ψx en T1 y de nueve medidas en el tratamiento T2

Observando la evolución del perfil de humedad volumétrica podemos valorar cómo fue la extracción de agua por las raíces en este período sin riego. En el caso del T1 (Fig. 3.19), entre el 09/08 y el 14/08, aunque la principal fuente de agua para las raíces del árbol es la zona húmeda cerca de los goteros (Fig. 3.19 a), las raíces también extraen el agua almacenada en zonas más alejadas (Fig. 3.19 b, c). En cuanto al perfil de humedad a una distancia de 270 cm de la línea de goteros (Fig. 3.19 d) vemos que permanece prácticamente igual entre las dos fechas, por lo que no parece que haya ninguna extracción. En todos los casos la disminución de θ_v en las primeras dos profundidades de suelo (1-15 y 15-30 cm) se deberá no sólo a extracción por raíces sino también, y principalmente, a la evaporación.

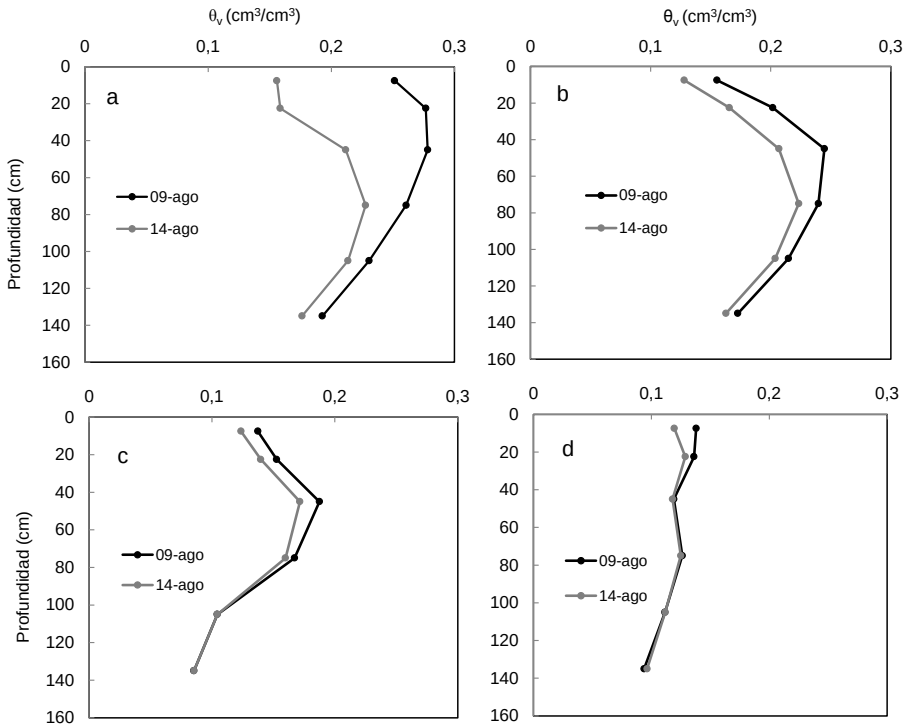


Fig. 3.19. Evolución del perfil de humedad en el suelo en T1 entre las fechas 9 agosto y 14 agosto. Cada gráfico representa el perfil a: a) 15 cm, b) 60 cm, c) 140 cm, d) 270 cm de distancia de la línea de goteros. Cada punto es la media de los dos tubos situados a cada una de esas distancias.

A diferencia del árbol de T1, el de T2 extrajo agua sólo de las zonas más cercanas a la línea de goteros, donde estaban localizadas las reservas de agua del suelo (Fig. 3.20 a, b), mientras que los perfiles de humedad correspondientes a las medidas de las zonas más alejadas muestran que la extracción fue nula o mínima (Fig. 3.20 c, d), debido al bajo contenido de agua de todo el perfil del suelo.

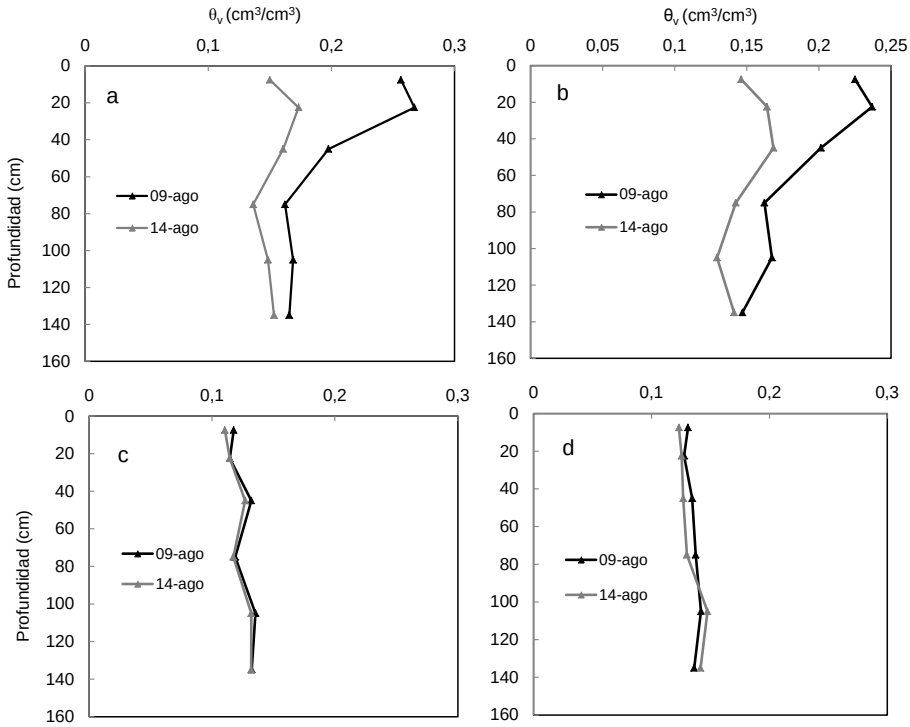


Fig. 3.20. Evolución del perfil de humedad en el suelo en T2 entre las el 9 agosto y el 14 agosto. Cada gráfico representa el perfil a: a) 15 cm, b) 60 cm, c) 140 cm, d) 270 cm de distancia de la línea de goteros. Cada punto es la media de los dos tubos situados a cada una de esas distancias.

3.4. Discusión

Desde que el riego por goteo fue inventado a principios de los años 60, ha habido un gran interés en conocer qué porcentaje de superficie se debe humedecer, especialmente en el riego de cultivos leñosos. De hecho, las primeras recomendaciones tenían como objetivo mojar un porcentaje de suelo considerable.

Keller y Karmeli (1974) recomendaban mojar un mínimo de 30% del suelo. Sin embargo, la expansión y el éxito comercial del riego por goteo ha ocurrido a través de sistemas instalados bajo muy diversas condiciones, y la experiencia ha demostrado que los árboles se desarrollaban bien y que producían altos rendimientos con porcentajes de suelo humedecido mucho menores que el 30%. En la década de los 80 se llevaron a cabo trabajos de investigación para identificar el mínimo volumen a mojar, pero no se alcanzaron resultados definitivos (Bielorai 1982; Moreshet et al. 1983; Porras et al. 1988). Existe una dificultad en la determinación experimental de la respuesta de los árboles al volumen de suelo humedecido, dado que un aumento en el volumen puede conducir en ocasiones a un mayor nivel de agua disponible por el cultivo. En ese caso y si el aporte de agua está limitado, la planta responderá directamente a la mejor disponibilidad de agua más que al aumento del volumen de suelo humedecido. Por tanto, es difícil separar la respuesta de un mayor volumen de la respuesta a una mayor disponibilidad de agua, y esto ha afectado a muchos experimentos donde este tema se ha estudiado.

En este trabajo, la respuesta de árboles en condiciones de campo fue investigada para evaluar el impacto a corto plazo de un cambio en el volumen de suelo humedecido sobre la T, una vez asegurado que el aporte de agua fue más que suficiente. Tras la aplicación del riego por microaspersión (MA), la cantidad de agua aplicada diariamente mediante el riego por goteo fue la misma en ambos tratamientos y suficiente para cubrir totalmente las necesidades del cultivo. Mediante un aporte de agua más que suficiente en ambos tratamientos, podemos afirmar que el incremento en T y por tanto en crecimiento observados en T1 se atribuye a la distribución del agua en el suelo y no a la cantidad aplicada. Esta es la primera vez que se han utilizado medidas continuas de T por flujo de savia para caracterizar la respuesta dinámica de los árboles ante un cambio repentino de volumen humedecido en un experimento de campo.

Después de la aplicación de la MA, la T y el potencial hídrico de xilema (Ψ_x) de los árboles del tratamiento T1 aumentó en relación a los del T2 (Figs. 3.5-3.8) que permanecieron más o menos constantes a pesar de que el contenido de agua en el suelo fue aumentando durante el experimento (Fig.3.3). El aumento en T en el tratamiento T1 fue detectado unos 4 días después de comenzar la MA (Fig. 3.6), mientras que la medida de Ψ_x realizada dos días después del inicio de la MA ya resultó en diferencias significativas entre tratamientos (Fig. 3.7). Estudios anteriores (Moreshet et al. 1983; Porras et al. 1988, Pastor et al. 1997; Schwankl et al. 1999) sugerían que hay una respuesta positiva de los árboles a un aumento del volumen de suelo humedecido.

A nivel de cubierta la diferencia en gc entre tratamientos fue clara (Fig 3.12). A primera hora de la mañana la gc de T1 y de T2 fue prácticamente idéntica, sin embargo, se separan a partir de las 1000 h, coincidiendo con el momento del día en que los Ψ_x se separan entre tratamientos. En cuanto al crecimiento del árbol, el mejor estado hídrico de T1 frente a T2 indujo un mayor crecimiento en términos de perímetro de tronco (Fig. 3.16). El hecho de que la diferencia de T entre los dos tratamientos fuese aumentando con el tiempo (Fig. 3.5) podría ser explicado por esta diferente velocidad de crecimiento de los árboles.

A partir del perímetro de tronco se puede calcular el área de la sección del tronco (AST), un parámetro que se relacionó bien con los pesos acumulados de poda por Bryla et al. (2003) indicando que es un buen indicador del crecimiento del árbol. Estos autores encontraron diferencias significativas en AST en tratamientos que recibían la misma cantidad de agua pero mediante diferentes sistemas de riego. En concreto, encontraron que el riego por surcos producía árboles más grandes que el riego por aspersión y por goteo, al final de los tres primeros años de una plantación de melocotoneros. Sin embargo, para melocotoneros maduros estos mismos autores apuntaron al riego por goteo como el sistema más efectivo para incrementar la producción ya que es un método que mantiene una alta disponibilidad de agua en el suelo entre eventos de riego, evitando momentos de estrés hídrico. En almendro, Schwankl et al. (1999) midieron los mayores incrementos en la sección de tronco y los mayores rendimientos en árboles bajo riego por micro aspersión. Sin embargo, Edstrom y Schwankl (2002) indicaron que un solo método de riego no puede ser considerado como óptimo y que las ventajas y desventajas de cada uno de los métodos deben ser analizadas dependiendo de las características específicas de cada huerto.

La resistencia del agua a fluir desde el suelo hasta las hojas (R_h) fue mayor en T2 que en T1 (Figs. 3.9 y 3.11), sugiriendo una limitación de la T por mecanismos hidráulicos. Trabajos previos también detectaron aumentos de R_h durante un desecamiento progresivo del suelo (Lu et al. 1996). En ese estudio, después de rehidratar los árboles estresados, el incremento de la R_h se revirtió y por tanto estos autores lo atribuyen principalmente a cambios en el entorno suelo-raíz y no a cambios en la conductividad hidráulica en las ramas por, por ejemplo, cavitación. En nuestro estudio la situación era la contraria, ya que nosotros no desecamos sino que aumentamos repentinamente el volumen de suelo humedecido de un grupo de árboles, pero nuestros resultados coinciden con los de Lu et al. (1996), ya que la Rh de estos árboles se redujo rápidamente. Estos resultados indican que debe haber una señal hidráulica presente; sin embargo, no hay evidencia para rechazar la

hipótesis, defendida por muchos autores (Davies y Zhang, 1991; Tardieu et al. 2010), de que se produce una señal química desde las raíces en contacto con suelo seco que provocan el cierre de los estomas y la consecuente disminución de la T. Es posible que una combinación de ambas respuestas, química e hidráulica, sea la responsable del incremento de T que siguió al aumento de volumen de suelo humedecido. El hecho de que la diferencia relativa entre T de los dos tratamientos fuera menor durante un periodo de menor demanda evaporativa (24-29 de julio) sugiere que el mecanismo hidráulico modula la respuesta en este caso, y que pudiera ser predominante sobre el papel de las señales químicas desde las raíces. La humedad del suelo no cambió durante ese periodo y por tanto, si el único mecanismo implicado fuesen las señales químicas desde las raíces en suelo seco hasta la parte aérea, la diferencia entre tratamientos se hubiese mantenido constante. Es más, durante el transcurso de un mismo día las diferencias entre tratamientos en T, Ψ_x y R_h aumentaron desde por la mañana temprano hasta el mediodía, momento con máxima demanda evaporativa, y después volvieron a disminuir durante la tarde a medida que los árboles se recuperaban. En este sentido, la hipótesis de señales químicas es difícil de reconciliar con las respuestas a corto plazo (horas) que ocurren normalmente en árboles bajo condiciones de campo, donde se observa el típico cierre estomático al mediodía (Chaves et al. 2003). Buckley y Mott (2013) propusieron que bajo condiciones de alta demanda evaporativa, las hojas pierden turgor y se envía una señal que cambia la presión osmótica de las células guarda, lo que finalmente provoca un cierre estomático.

En conclusión, un aumento en el volumen de suelo humedecido en almendros bajo riego por goteo, condujo a un incremento de la transpiración y del crecimiento de los árboles, en relación a un tratamiento regado por goteo sin aparente limitación en la cantidad de agua precisa. Se observó que, aunque los árboles bajo riego por goteo estaban dotados de suficiente agua, su estado hídrico mejoró después de la aplicación de la MA, sugiriendo que el volumen de suelo humedecido por el habitual uso de una sola línea de riego por fila de árboles puede estar limitando el crecimiento y desarrollo potencial de los árboles en almendro. Posibles opciones alternativas podrían ser: usar doble línea de goteros por fila de árboles o el uso de sistemas de microaspersión. Por otra parte, el comienzo temprano del riego permite conservar el agua almacenada en el suelo tras las lluvias de otoño-invierno, para que pueda ser utilizada más adelante en la estación, cuando la demanda evaporativa es alta en verano. En caso de que dichas precipitaciones sean escasas, una opción es la aplicación de un riego abundante al principio de la campaña, para continuar después con la programación de riego normal. Ambas opciones darán una mayor flexibilidad ante un posible fallo del riego o un golpe de calor. Otro aspecto

importante es que la cosecha de las almendras se realiza a finales de agosto principios de septiembre, un momento en el que la demanda de agua por parte de los árboles es todavía alta, pero la recomendación es que el suelo se encuentre seco para facilitar el barrido de las almendras. En caso de que la recolección se realice con paraguas, el único problema es el daño a la madera por la vibración del tronco. Para minimizar estos daños se recomienda llevar los árboles hasta un ligero estrés hídrico, por tanto sería conveniente cortar el riego unos días antes para ir agotando reservas, lo cual también es conveniente para recoger el agua de las posibles precipitaciones de otoño.

Este estudio fue llevado a cabo en un tipo específico de suelo; la determinación del volumen mínimo de suelo humedecido para la máxima producción y crecimiento del árbol requiere más investigación, tanto en experimentos de campo como de modelización bajo distintas condiciones.

Referencias

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage. Paper No. 56. FAO, Rome.

Andreu L, Hopmans JW, Schwankl LJ (1997) Spatial and temporal distribution of soil water balance for a drip-irrigated almond tree. Agr Water Manage 35:123-146

Bielorai H (1982) The effect of partial wetting of the root zone on yield and water use efficiency in a drip- and sprinkler-irrigated mature grapefruit grove. Irrig Sci 3:89-100

Bresler E (1978) Analysis of trickle irrigation with application to design problems. Irrig Sci 1:3-17

Bryla DR, Trout TJ, Ayars JE (2003) Growth and production of young peach trees irrigated by furrow, microjet, surface drip, or surbsurface drip systems. Hort Sci 38:1112-1116

Bryla DR, Dickson E, Shenk R (2005) Influence of irrigation method and scheduling on patterns of soil and tree water status and its relation to yield and fruit quality in peach. Hort Sci 40:2118-2124

Buckley TN, Mott KA (2013) Modelling stomatal conductance in response to environmental factors. Plant Cell Environ 36:1691-1699

Chaves MM, Maroco JP, Pereira JS (2003) Understanding plant responses to drought – from genes to the whole plant. Funct Plant Biol 30:239-264

Clothier BE, Green SR 1994 Rootzone processes and the efficient use of irrigation water. Agr Water Manage 25:1-12

Comstock JP (2002) Hydraulic and chemical signalling in the control of stomatal conductance and transpiration. J Exp Bot 53:195-200

Davies WJ, Zhang J (1991) Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Bioi 42:55-76

Edstrom JP, Schwankl LJ (2002) Microirrigation of almonds. Acta Hort 591:505-508

Fereres E, Goldhamer DA, Sadras V (2012) Yield response to water of fruit trees and vines: guidelines. In: Steduto P, Hsiao TC, Fereres E, Raes D (Eds.) Crop yield Response to Water. Irrigation and Drainage. Paper No. 66. FAO, Rome.

Girona J, Mata M, Marsal J (2005) Regulated deficit irrigation during the kernel-filling period and optimal irrigation rates in almond. Agr Water Manage 75:152-167

Gispert JR, Ramírez de Cartagena F, Villar JM, Girona J (2012) Wet soil volume and strategy effects on drip-irrigated olive trees (cv. 'Arbequina'). Irrig Sci 31:479-489

Green SR, Clothier BE (1995) Root water uptake by kiwifruit vines following partial wetting of the root zone. Plant Soil 173:317-328

Green SR, Clothier BE, Jardine B (2003) Theory and practical application of heat pulse to measure sap flow. Agron J 95:1371-1379

Hsiao TC (1990) Measurements of plant water status. In: Irrigation of agricultural crops (Stewart BA, Nielsen DR, Eds) American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA Monograph No. 30:243-279

Hutmacher RB, Nightingale HI, Rolston DE, Biggar JW, Dale F, Vail SS, Peters D (1994) Growth and yield responses of almond (*Prunus amygdalus*) to trickle irrigation. Irrig Sci 14:117-126

Kang S, Hu X, Jerie P, Zhang J (2003) The effects of partial rootzone drying on root, trunk sap flow and water balance in an irrigated pear (Pyrus cummunis L.) orchard. J Hydrol 280:192-206

Keller J, Karmeli D (1974) Trickle irrigation design parameters. T ASAE 17:678-684

Keller (1978) Trickle Irrigation. In: National Engineering Handbook. Soil Conservation Service. USDA

Kramer PJ (1988) Changing concepts regarding plant water relations. Plant Cell Environ 11:565-568

Kramer PJ, Boyer JS (1995) Water relations of plants and soils. San Diego California : Academic Press.

Lorite IJ, Santos C, Testi L, Fereres E (2012) Design and construction of a large weighing lysimeter in an almond orchard. Span J Agric Res 10:238-250

Lu P, Biron P, Granier A, Cochard H (1996) Water relations of adult Norway spruce (Picea abies (L) Karst) under soil drought in the Vosges mountains: Whole-tree hydraulic conductance, xylem embolism and water loss regulation. Ann Sci Forest 53:113-121

Morales-Sillero A, García JM, Torres-Ruiz JM, Montero A, Sánchez-Ortiz A, Fernández JE (2013) Is the productive performance of olive trees under localized irrigation affected by leaving some roots in drying soil? Agr Water Manage 123:79-92

Moreshet S, Cohen Y, Fuchs M (1983) Response of mature 'Shamouti' orange trees to irrigation of different soil volumes at similar levels of available water. Irrig Sci 3:223-236

Pastor M, Orgaz F, Vega V, Hidalgo J, Castro J (1997) Programación del riego en olivares de la provincia de Jaén. Riegos y Drenajes XXI 103:43-53

Porras A, Arnal J, Muñoz F (1988) Influencia de la superficie de suelo regada sobre el consumo del agua y producción de plantones de olivo. Un sistema electrónico de automatización y control del riego. Fruticultura Profesional 17:51-62

Shackel K, Gurusighe S, Kester D, Micke W (1998) Water stress responses of almond [*Prunus dulcis* (Mill.) Webb.] trees under field conditions. Acta Hort (ISHS) 470:309-316

Sperry JS, Hacke UG, Oren R, Comstock JP (2002) Water deficits and hydraulic limits to leaf supply. Plant Cell Environ 25:251-263

Schwankl LJ, Edstrom JP, Hopmans JW, Andreu L, Koumanov KS (1999) Microsprinklers wet larger soil volume; boost almond yield, tree growth. Calif Agr 53:39-43

Stoll M, Loveys B, Dry P (2000) Hormonal changes induced by partial rootzone drying of irrigated gravepine. J Exp Bot 51:1627-1634

Tardieu F, Parent B, Simonneau T (2010) Control of leaf growth by abscisic acid: hydraulic or non-hydraulic processes? Plant Cell Environ 33:636-647

Testi L, Villalobos FJ (2009) New approach for measuring low sap velocities in trees. Agric For Meteorol 149:730-734

Torrecillas A, Ruiz-Sánchez MC, León A, del Amor F (1989) The response of young almond trees to different drip-irrigated conditions. Development and yield. J Hortic Sci 64:1-7

Capítulo 4. Transpiración del almendro (cv. Guara) en respuesta a déficits hídricos moderados.

Capítulo 4

Transpiración del almendro (cv. Guara) en respuesta a déficits hídricos moderados

Resumen

Ante la previsible escasez de recursos hídricos en un futuro, es de gran interés estudiar las respuestas a dosis deficitarias de riego de cultivos de alto valor económico como el almendro. Este cultivo se considera tolerante a la sequía. Sin embargo, su puesta en regadío hace que el rendimiento se multiplique de una forma espectacular. Aunque varios estudios han demostrado el buen comportamiento del almendro bajo riego deficitario (RD) algunas cuestiones continúan inciertas. Por un lado, la respuesta fisiológica ante situaciones de estrés hídrico se ha estudiado a nivel de hoja, pero no se ha podido extrapolar al nivel de copa debido a la gran variabilidad de comportamiento entre hojas de una misma copa. Por otro lado, se ha comprobado que cada variedad presenta una respuesta diferente cuando se enfrenta a escasez de humedad en el suelo. Así, los objetivos de este estudio fueron a) investigar el efecto del estrés hídrico sobre la transpiración a nivel de copa, y b) estudiar el efecto de un estrés moderado en la eficiencia en la transpiración de almendros de la variedad Guara. Para ello se llevó a cabo un experimento durante el verano de 2013, con tres tratamientos de riego al que se añadió el estudio de un grupo de árboles en secano. Como principales resultados se observó una gran sensibilidad del cultivar Guara ante déficits hídricos moderados, con una reducción de su transpiración cuando el potencial hídrico de xilema (Ψ_x) disminuyó por debajo de -1.1 MPa, un umbral más alto que el observado en estudios previos en otras variedades. Además, se comprobó que la eficiencia instantánea en la transpiración fue la misma para todos los tratamientos de riego, incluidos árboles en secano. Por otro lado el hecho de que a lo largo de un día el patrón de transpiración también resultó idéntico en todos los tratamientos, hace descartar la hipótesis, cierta para otros frutales, de un mayor intercambio gaseoso durante las

horas del día con menor déficit de presión de vapor (DPV), respecto al ocurrido durante las horas del día con altos DPV.

Summary

Anticipating scarcity of water resources in the future, it is of great interest to study the responses to deficit irrigation dose of high economic value crops such as almonds. This crop is considered drought tolerant and has traditionally been grown without irrigation. However, under irrigation the production of this crop greatly enhances. Although several studies have demonstrated the good performance of almond under deficit irrigation (DI) some issues remain uncertain. On the one hand, the physiological response to water stress has been studied at the leaf level, but could not be extrapolated to the canopy level because of the great variability in behavior between leaves of the same crown. Furthermore, it was found that each variety has a different response when facing shortage of moisture in the soil. Therefore, the objectives of this study were a) to investigate the effect of water stress on transpiration of almond cv. Guara at the canopy level b) to study the effect of moderate stress on transpiration efficiency almond cv. Guara. To do so a experiment with three irrigation treatments, plus a group of rainfed trees, was carried out during the summer of 2013. The main results of this study showed a high sensitivity this cultivar to moderate water deficit, with a reduction of transpiration when the xylem water potential decreased below a threshold of -1.1 MPa, higher than those observed in previous studies in other varieties. In addition, it was found that the instantaneous transpiration efficiency was the same for all irrigation treatments, including rainfed trees. On the other hand the fact that over a day the water consumption pattern was also identical in all treatments, does rule out the hypothesis, true for some other fruit trees, of a higher gas exchange during daylight hours with low DPV respect the gas exchange occurred during the daylight hours with high DPV.

4.1. Introducción

Aunque el almendro se considera una especie tolerante a la sequía, bajo condiciones de riego su producción aumenta de forma notable comparada con la alcanzada en plantaciones de secano. Esto, unido a las buenas perspectivas de mercado de este cultivo, está llevando a presentar al almendro incluso como una alternativa al olivar, el cultivo leñoso más importante de la zona mediterránea en España. Sin embargo, en el contexto de escasez de recursos hídricos de esta área, cubrir a través del riego las necesidades totales de agua de un huerto de almendros es una opción poco realista. Muchos experimentos han confirmado el buen desarrollo de almendro cuando se riega por debajo de sus necesidades máximas (Egea et al., 2013; Goldhamer et al., 2006; Girona et al., 2005), por lo que la implementación de estrategias de riego deficitario (RD) parece una opción viable.

El éxito de una estrategia de RD requiere que la productividad del agua de riego sea mayor en comparación a la alcanzada mediante riego a máxima demanda (FI, en sus siglas en inglés), es decir, que aumente el rendimiento del cultivo para una cantidad de agua aplicada por riego. A su vez, el rendimiento está directamente relacionado con la asimilación de CO_2 de la atmósfera. Tanto el vapor de agua como el CO_2 comparten como lugar de salida y entrada, respectivamente, los estomas presentes principalmente en las hojas y por tanto cuando los estomas cierran se pierde menos agua pero también se asimila menos CO_2. Se sabe que diferentes especies muestran comportamientos diferentes en el intercambio gaseoso cuando las condiciones climáticas o la humedad del suelo cambian. En almendro, Romero y Botía (2006) estudiaron la respuesta diaria y estacional de las hojas de almendros de la variedad Cartagenera bajo varios niveles de estrés hídrico. Estos autores encontraron que bajo condiciones de estrés la conductancia estomática máxima se reducía y que el potencial hídrico de hoja disminuía. En el mismo trabajo, se obtuvo una fuerte relación entre la conductancia estomática y la asimilación de CO_2 (A) indicando que el cierre estomático es la principal fuente de

limitación de la fotosíntesis. Sin embargo, las relaciones entre el potencial de hoja (Ψ_l) y por un lado gs y por otro A no fueron robustas ya que los estomas están afectados también por otros factores climáticos (esencialmente por el déficit de presión de vapor, DPV) y probablemente por señales hidráulicas o químicas desde las raíces creciendo en suelo seco. Otros estudios ya habían llegado a esas mismas conclusiones (Castel and Fereres, 1982; Torrecillas et al., 1988; Marsal et al., 1997) y también hallaron un cierre estomático gradual a medida que el potencial de hoja disminuía. Además, de acuerdo con Hsiao (1973), algunos de estos trabajos encontraron un valor umbral de potencial de hoja por debajo del cual, gs comienza a disminuir gradualmente, mientras que por encima del valor umbral, gs permanece constante. A escala de copa, este comportamiento de intercambio gaseoso en la hoja, se traduce en un mantenimiento de la transpiración máxima bajo un estrés moderado y en una posterior disminución cuando el estrés se intensifica. Gracias a este cierre parcial y gradual de los estomas se puede mantener cierto nivel de fotosíntesis a medida que las condiciones de sequía van progresando, lo cual es típico de especies adaptadas a zonas con baja precipitación. Por otro lado, algunos estudios que han comparado distintas variedades de almendros (Torrecillas et al., 1988; Rouhi et al., 2007; Yadollahi et al., 2011; Karimi et al., 2015) y han comprobado que mostraban distintos comportamientos, ya que cada variedad parece reaccionar al estrés a distintos niveles de estado hídrico.

El estudio del comportamiento de cada especie ante situaciones de estrés hídrico es importante ya que será lo que determine el incremento de la eficiencia en la transpiración (TE) a nivel de hoja, es decir del ratio A/E, que se traducirá en un incremento de la productividad del agua a nivel de copa. Por ejemplo, en olivo Villalobos et al. (2010) vieron que a pesar de que la TE instantánea no mostró ningún cambio, su integral diaria fue mayor en árboles estresados que en árboles bien regados. Esto se explica por el hecho de que el olivo es muy sensible a DPV, y bajo condiciones de estrés hídrico, sus estomas cierran muy pronto por la mañana. La mayor parte de su intercambio gaseoso se realiza durante las horas del día cuando el DPV es todavía bajo que coincide con las horas del día en las que la TE instantánea es máxima.

En cuanto al almendro, los numerosos estudios de RD en esta especie demuestran que, bajo estrés, la productividad de agua aumenta en los tratamientos deficitarios frente a los bien regados. Sin embargo, no está claro si ese aumento en la productividad del agua se debe a un aumento en la TE instantánea o diaria a nivel de hoja o a un aumento de la productividad a escala estacional. Aunque estudios previos han comparado el estado hídrico de la planta con parámetros de intercambio gaseoso a nivel de hoja, debido a la alta variabilidad en el cierre estomático dentro de una misma copa, se hacen necesarios estudios que trabajen a nivel de copa. Por tanto, los objetivos de este estudio fueron: a) investigar el efecto de estrés hídrico sobre la transpiración a nivel de copa y b) investigar el efecto de un estrés moderado en la eficiencia en la transpiración de almendros de la variedad Guara.

4.2. Materiales y métodos

El estudio fue realizado durante el verano de 2013 en el huerto de almendros descrito en el Capítulo 1. Ese año los árboles tenían ya 5 años y hasta entonces habían sido regados para cubrir totalmente su demanda de agua. A partir de 2013 se estableció un experimento con cinco tratamientos de riego y diseñado como bloques totalmente al azar, en el que cada parcela estaba formada por 16 árboles de los cuales los cuatro centrales son los de medida y los demás son bordes. En este trabajo, nos centramos en una de las cuatro repeticiones a la que se añadió un grupo de 20 árboles bajo condiciones de secano. En esta repetición se instalaron equipos de sap-flow en el tronco de un árbol por tratamiento y en dos de los del grupo bajo secano. El método usado fue el mismo que el anteriormente descrito en el Capítulo 1. La calibración se llevó a cabo mediante balance de agua a través de los datos obtenidos mediante la sonda de neutrones.

La frecuencia del riego fue diaria y las necesidades se calcularon como ET_o x K_c corregido por el coeficiente de reducción de Fereres et al. (2012) que depende del porcentaje de cobertura de suelo por el cultivo y después se ajustó conforme a datos del lisímetro de pesada situado en la misma parcela (descrito en el Capítulo 1). Los

datos climáticos para el cálculo de la ET_o se tomaron de una estación agrometeorológica situada a unos 300 m del huerto.

Los tratamientos de riego fueron los siguientes: un tratamiento control (T1) regado al 100% de las necesidades hídricas; un tratamiento de riego deficitario moderado sostenido (T2) con un 55% del total del riego aplicado a T1; y un tratamiento deficitario severo (T3) que recibió un 40% del total aplicado a T1.

El contenido de agua en el suelo de los primeros 210 cm de profundidad se midieron con una frecuencia semanal mediante sonda de neutrones para lo cual se instalaron para cada uno de los tratamientos 8 tubos de acceso en el área situada entre el árbol con equipo de sap-flow y el árbol siguiente y 9 tubos en el área entre cuatro troncos de los árboles bajo secano, siendo dos de ellos los equipados con sap-flow.

El estado hídrico de la planta se midió con una cámara de presión del tipo Scholander (Model 3005F01, Santa Bárbara, CA, USA). Durante cada fecha de medidas se realizó una primera medida antes del amanecer, y después se realizaron medidas simultáneas cada 2-3 horas de potencial hídrico de hoja de xilema. El potencial hídrico de hoja (Ψ_l) se midió en hojas adultas, sanas, descubiertas y totalmente iluminadas. El potencial hídrico de xilema (símbolo) se midió en hojas sombreadas, cerca del tronco o de una rama principal y previamente cubiertas con papel de aluminio durante 30 minutos. En esos mismos días e intentando hacer coincidir las horas de medida para cada tratamiento, se tomaron medidas de intercambio gaseoso a nivel de hoja utilizando un analizador portátil de gas por infrarrojos (model LCA-4, ADC Bioscientific Ltd.) sobre 3-4 hojas totalmente expandidas e iluminadas. A partir de estas medidas se calculó la eficiencia instantánea en la transpiración (TE) como cociente entre asimilación de CO2 (A) y transpiración (E) a nivel de hoja.

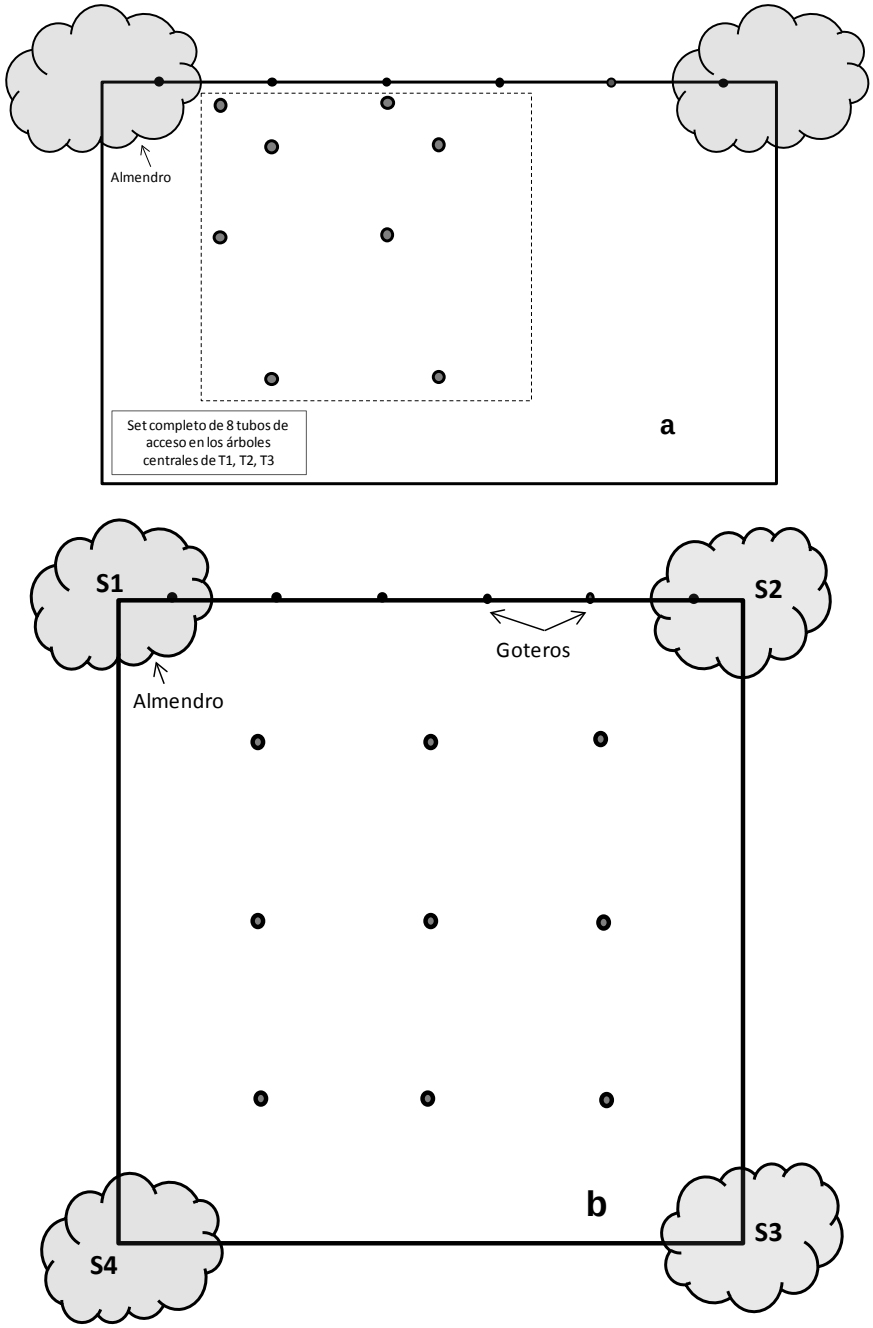


Fig 4.1. Esquema de localización de tubos de sonda: a) en árboles centrales de los tratamientos T1, T2 y T3; y b) entre los cuatro árboles centrales de secano.

Para estudiar el comportamiento a escala diaria de la conductancia de cubierta se calculó como índice "gc_{max}/gc" el cociente entre la suma de la gc durante las dos horas centradas en la hora de gc máxima y la gc total diaria. Para el estudio de la evolución diaria de la T se consideró la T acumulada como porcentaje de la transpiración total del día.

4.3. Resultados.

Durante la primavera de 2013 la precipitación fue excepcionalmente alta, sumando un total de 383 mm durante los meses de marzo, abril y mayo, lo que supone más que el doble de la media. Por tanto, el riego ese año no comenzó hasta principios de junio. La figura 4.2 muestra el riego acumulado durante la estación para cada uno de los tratamientos de riego. El tratamiento control (T1) recibió 4893 m^3 ha^{-1}, los tratamientos de riego deficitario moderado, el T2 recibió 3623 m^3 ha^{-1}, un 55% del T1, respectivamente. El tratamiento de riego deficitario severo, T3, recibió un 38% respecto del control. Durante el periodo experimental no hubo precipitación, excepto por un fuerte evento (40 mm) a finales de agosto y ligeros eventos en septiembre.

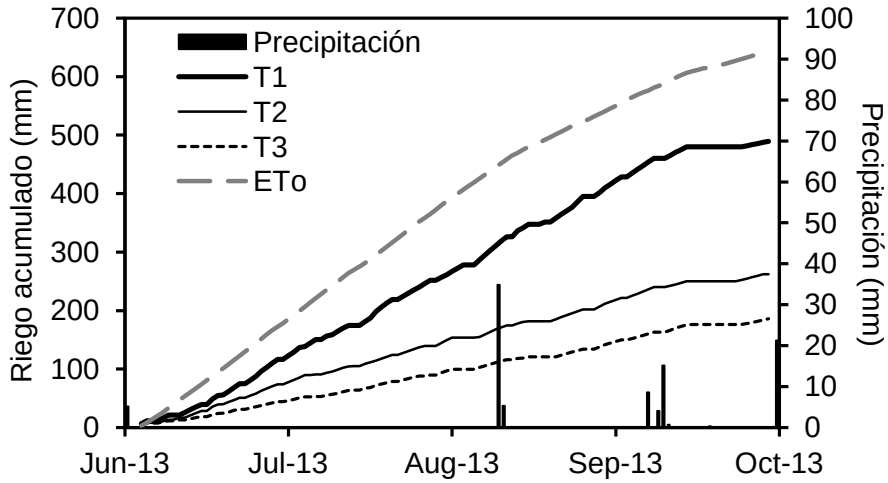


Fig 4.2 Riego acumulado para cada uno de los tratamientos, evapotranspiración de referencia acumulada (ET_o) y precipitación durante el periodo experimenta.

La figura 4.3 presenta la evolución de los potenciales hídricos antes de amanecer (a) y de xilema al mediodía (b) a lo largo de todo el periodo experimental. El potencial hídrico antes del amanecer (Ψ_{pd}) fue de unos -0.2 a -0.3 MPa en todos los tratamientos al principio del periodo experimental. A lo largo de la estación el Ψ_{pd} del tratamiento control permaneció constante, mientras que para el resto de los tratamientos se observó una pequeña y gradual disminución hasta valores de -0.4 MPa. El valor mínimo se observó en uno de los árboles de secano que alcanzó -0.55 MPa a mediados de agosto. En cuanto al potencial de xilema al mediodía ($\Psi_{xmd)}$, todos los tratamientos mostraron valores muy similares, cerca de -1.0 MPa. En el tratamiento control, el Ψ_{xmd} se mantuvo por encima de -0.9 MPa durante todo el experimento. El potencial del tratamiento de déficit moderado (T2) se mantuvo próximo al del control con pequeñas diferencias de -0.2 MPa, hasta llegar a mediados de julio a diferencias máximas de -0.4 MPa, a partir de entonces el potencial comenzó a aumentar debido a la disminución de la demanda evaporativa. El T3 mostró una disminución en Ψ_{xmd} hasta finales de agosto cuando alcanzó valores de -1.4 MPa. Después se observó una recuperación debida al menor ET_o y mayores cantidades de riego. La evolución de Ψ_{xmd} en los árboles en secano S1 y S2 fue idéntica durante el experimento, comenzando con un descenso brusco a finales de junio hasta valores de -1.4 MPa para mantenerse después constante hasta septiembre, cuando comenzó la recuperación por menor demanda evaporativa. En este caso a diferencia en los otros tratamientos, la recuperación en septiembre no fue completa. El S3 fue el que alcanzó valores más negativos de Ψ_{xmd} llegando hasta valores por debajo de -2.0 MPa y comparado con el resto de medidas mostró los valores más negativos en septiembre.

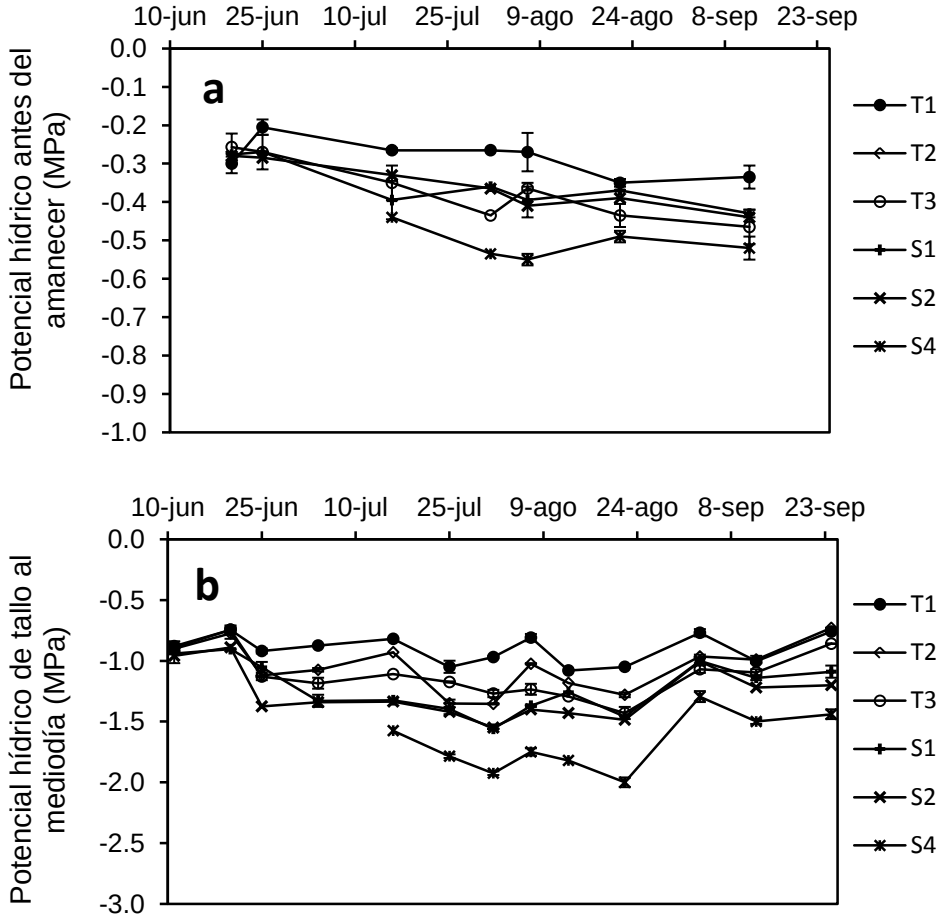


Fig 4.3. Evolución estacional de a) potencial hídrico antes del amanecer y b) potencial hídrico de xilema al mediodía para cada tratamiento. Cada punto representa la media de 2-3 medidas. Las barras verticales representan el error estándar de la media.

En la figura 4.4 se muestra la evolución de la transpiración en los distintos tratamientos. La fluctuación en los valores de ET_o a lo largo de la estación se tradujo en una alta variabilidad de la tasa de transpiración. En cuanto a los valores absolutos existen dos fuentes de variación, el diferente tamaño de copa y los distintos niveles de estrés. Para eliminar el efecto del tamaño de la copa (Fig. 4.5), los valores diarios de transpiración se normalizaron respecto a la transpiración máxima (T_{pot}), calculada para cada árbol como la media de la transpiración para un

periodo de 10 días en los que ninguno de los árboles presentaba estrés hídrico (Fig. 4.3). De este modo, obtenemos una transpiración relativa (T_{rel}) como el ratio entre la transpiración diaria y T_{pot}, en la que las variaciones pueden atribuirse a los diferentes niveles de riego. Dividiendo a su vez esta T_{rel} entre la ET_o obtenemos un coeficiente de transpiración relativo (K_{Trel}) como se observa en la Figura 4.6 Al ser valores normalizados por los valores medios de ese periodo, al principio del experimento todos los tratamientos mostraron valores cercanos a 1. A partir de entonces los tratamientos T1 y T2 continuaron alrededor de 1 mientras que el resto de tratamientos mostró un K_{Trel} decreciente con el tiempo. En el caso del T3, el descenso comenzó a principios de julio y a partir de entonces fluctuó alrededor de 0.8. El K_{Trel} de los árboles de secano S1 y S2 comenzó a disminuir antes, a finales de junio, y durante la mayor parte del periodo experimental K_{Trel} se mantuvo en 0.8 y 0.7, respectivamente.

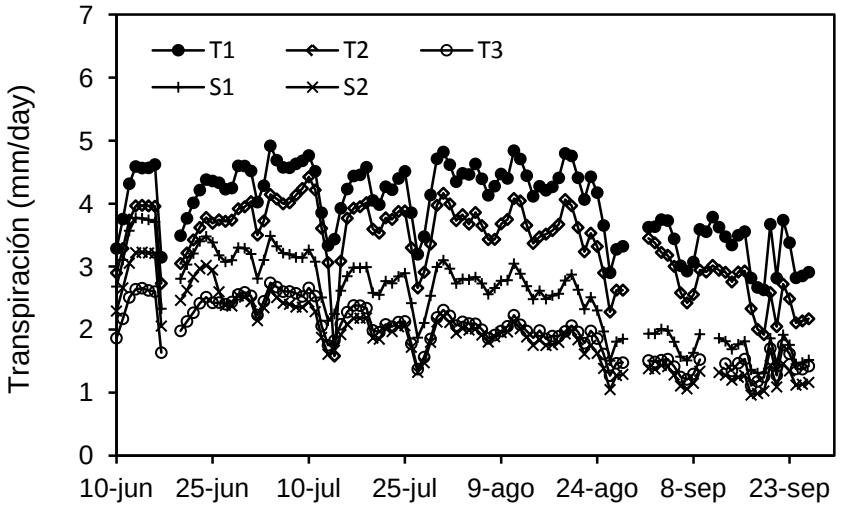


Fig 4.4. Evolución estacional de la transpiración diaria medida mediante el sistema de flujo de savia instalado en un árbol por tratamiento de riego y en dos árboles de los del grupo bajo condiciones de secano (S1 y S2).

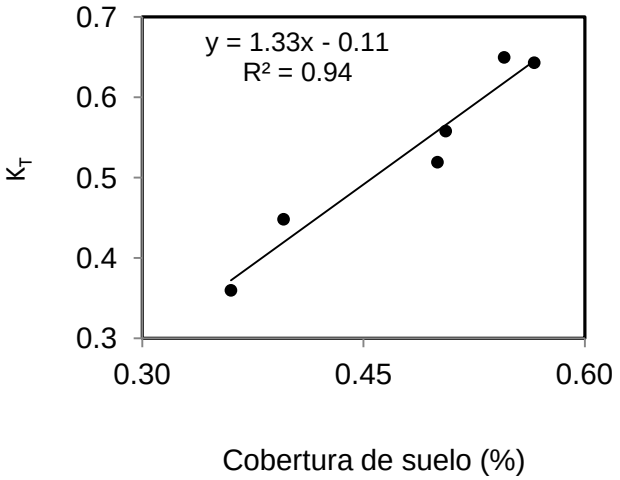


Fig. 4.5. Relación entre cobertura de suelo y coeficiente de transpiración para los árboles equipados con equipos de sap-flow.

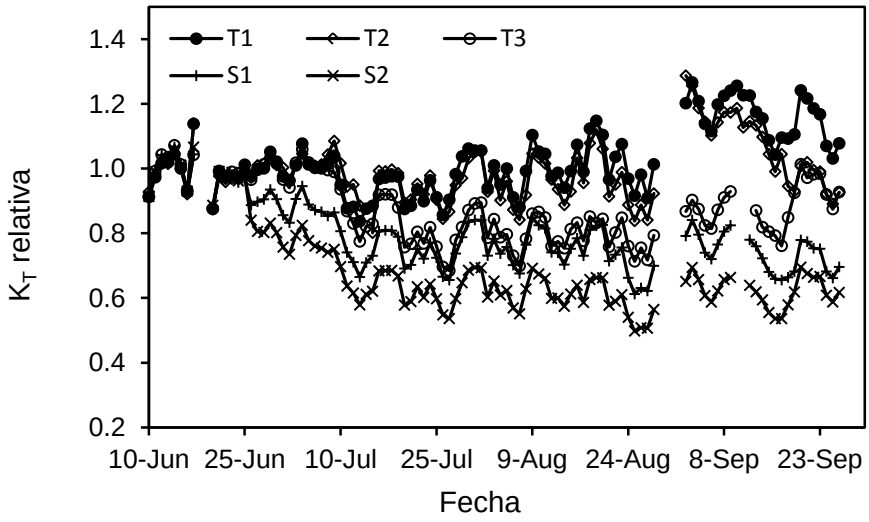


Fig 4.6. Evolución estacional del coeficiente de transpiración relativo a la media calculada para el periodo inicial 11/06-20/06 cuando el estado hídrico de los árboles era bueno y similar en todos los tratamientos.

Combinando los datos de potencial de xilema al mediodía (Fig. 4.3) y los de transpiración relativa (Fig. 4.6) encontramos que K_{Trel} se mantuvo constante hasta que el Ψ_{xmd} cayó por debajo de -1.1 MPa. Para valores por debajo de ese umbral Ψ_{xmd} y K_{Trel} siguieron una relación linear y para valores de Ψ_{xmd} entre -1.5 y -1.6 MPa, la transpiración se había reducido a un 67% de la potencial.

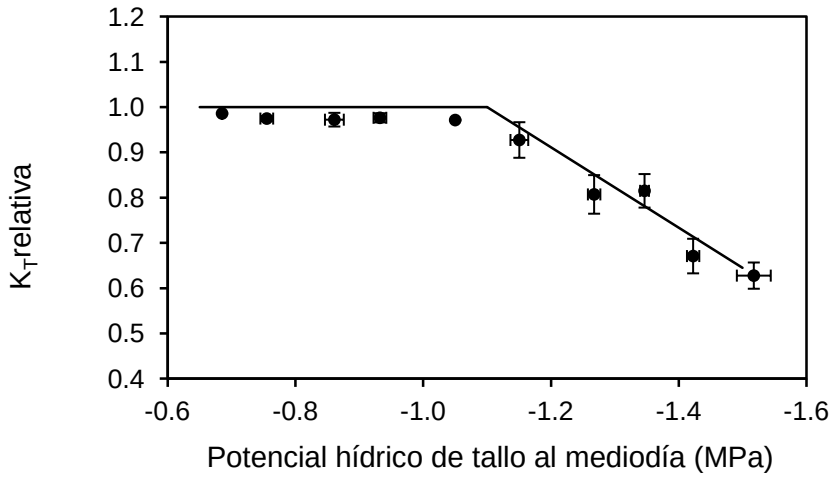


Fig 4.7. Relación entre potencial hídrico de xilema al mediodía y el K_T relativo. Cada punto representa, para cada media de todos los valores de potencial cada intervalo de 1 MPa, la correspondiente media de K_T para todos los tratamientos.

La eficiencia instantánea en la transpiración (TE) se correlacionó fuertemente con el DPV (r^2= 0.79) a través de una relación única independiente del estado hídrico. La curva que mejor se adaptó fue una potencial con valores de TE próximos a 8 µmol mol-1 cuando el DPV es menor que 1 kPa mientras que según la relación encontrada para olivo por Moriana et al. (2002) a este valor de DPV le corresponde una TE de 10 µmol mol-1. Tanto en almendro como en olivo a medida que el DPV aumenta los valores decrecieron rápidamente, para llegar así a valores de 2 µmol mol-1 y de 3.3 µmol mol-1, respectivamente, cuando el DPV es de 2 kPa. Para valores de DPV por encima de 3 kPa, la TE de ambas especies fueron bastantes similares con medias de 1.1 µmol mol^{-1} (almendro) y 1.2 µmol mol^{-1} (olivo) para el rango 3-7 kPa.

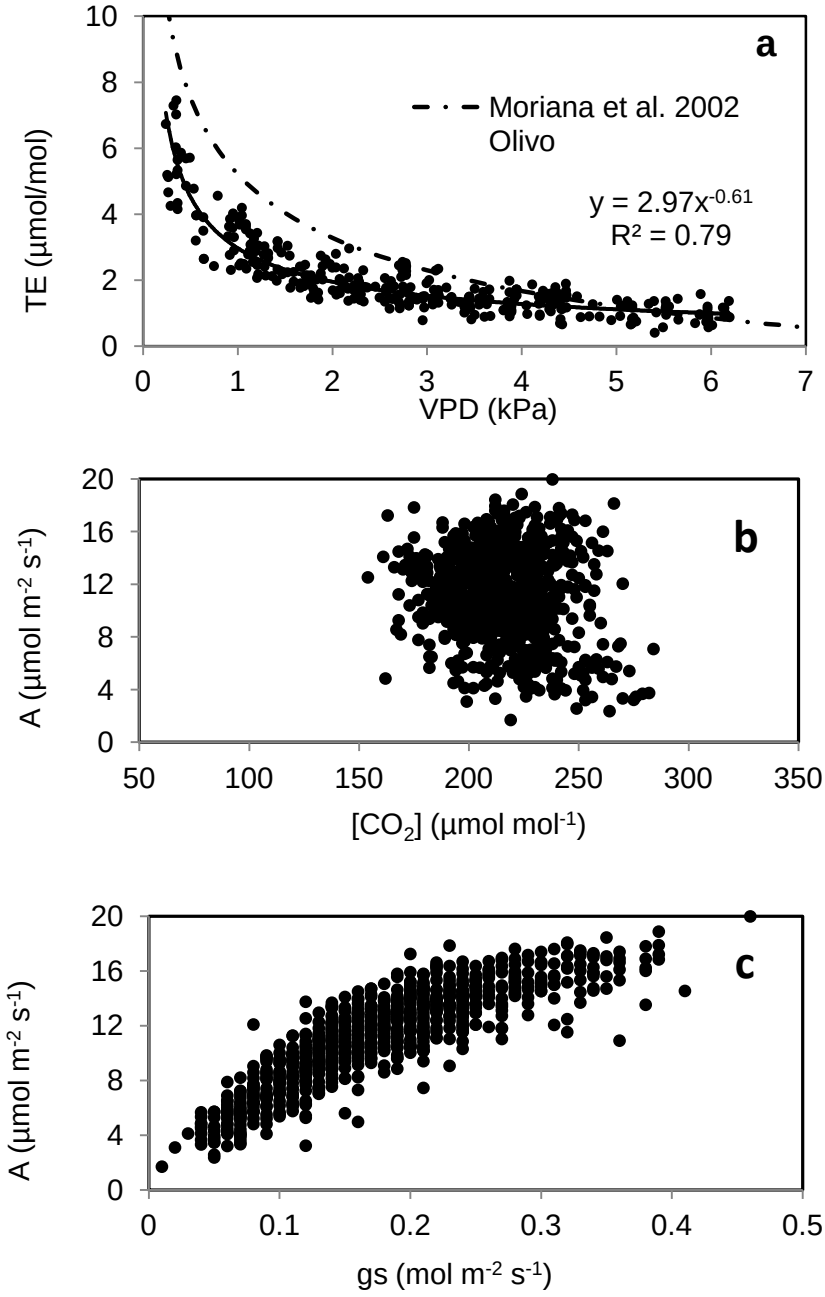


Fig 4.8. a) Relación entre la eficiencia en la transpiración y el DPV diarios para todos los tratamientos, b) relación entre la asimilación de CO_2 y la concentración interna de CO_2 a nivel de hoja, c) relación entre la asimilación de CO_2 y la conductancia estomática a nivel de hoja.

Los valores de asimilación encontrados durante el periodo de estudio fueron desde 2 hasta 18 µmol s^{-1} m^{-2}, mientras que la concentración de CO_2 en el interior de la hoja (ci) se mantuvo constante para ese amplio rango de A (Fig 4.8b). El valor de ci varió entre 170 y 250 ppm con un valor medio de 220 ppm. gs y A mostraron una relación polinómica para ese rango de A (Fig 4.8c) con valores máximos de A de para una gs máxima de 0.4 mol m^{-2} s^{-1}.

A escala diaria, antes del desarrollo del estrés, todos los tratamientos presentaron el mismo estado hídrico a cualquier hora de medida (Fig. 4.9). La TE instantánea fue similar para todos los árboles. Cuando la estación avanzó, las distintas dosis de riego se tradujeron en un diferente estado hídrico para cada uno de los tratamientos, especialmente durante las horas centrales del día cuando la diferencia máxima fue de 1 MPa entre T1 y S4 (Fig. 4.10). A pesar de las claras diferencias entre tratamientos, la TE fue idéntica independientemente del nivel de riego, variando solamente como respuesta al DPV instantáneo. Durante el periodo de recuperación, el potencial de todos los tratamientos comenzó a aproximarse de nuevo, mientras que la TE continuó siendo la misma para todos los tratamientos (Fig. 4.11). Cada uno de los días mostró valores de eficiencia en transpiración diferentes según el DPV de esa fecha determinada, como puede observarse en cada una de las gráficas. Así, de las fechas seleccionadas, el día con mayores DPV fue el 7 de agosto (Fig. 4.10), mostrando TE menores de 1 µmol mol^{-1} al mediodía, cuando el DPV superó 4 kPa.

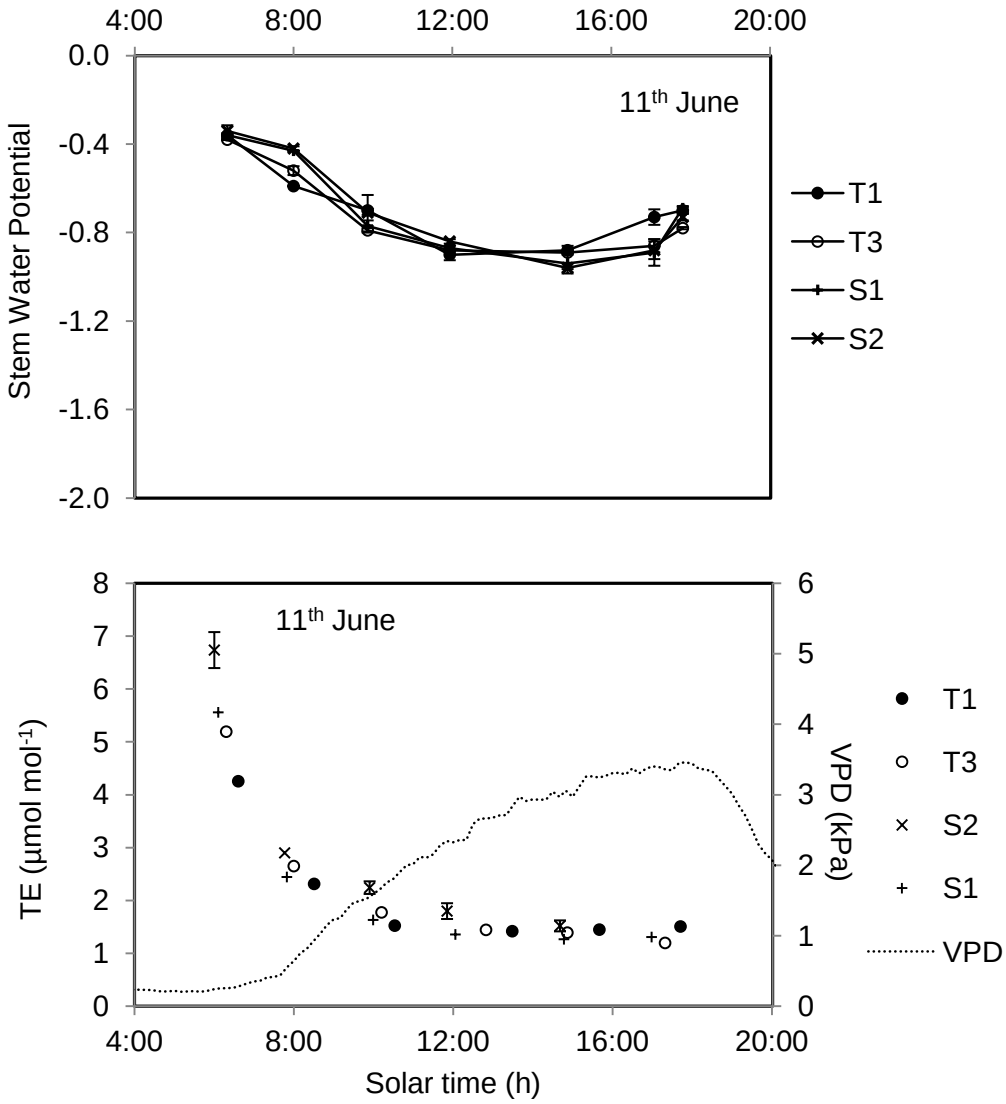


Fig 4.9. Evolución diurna del potencial hídrico de xilema y de la eficiencia en la transpiración el día 11 de junio de 2013 (antes del comienzo de los tratamientos). Se presenta la evolución del DPV para mejor interpretación de los datos de TE.

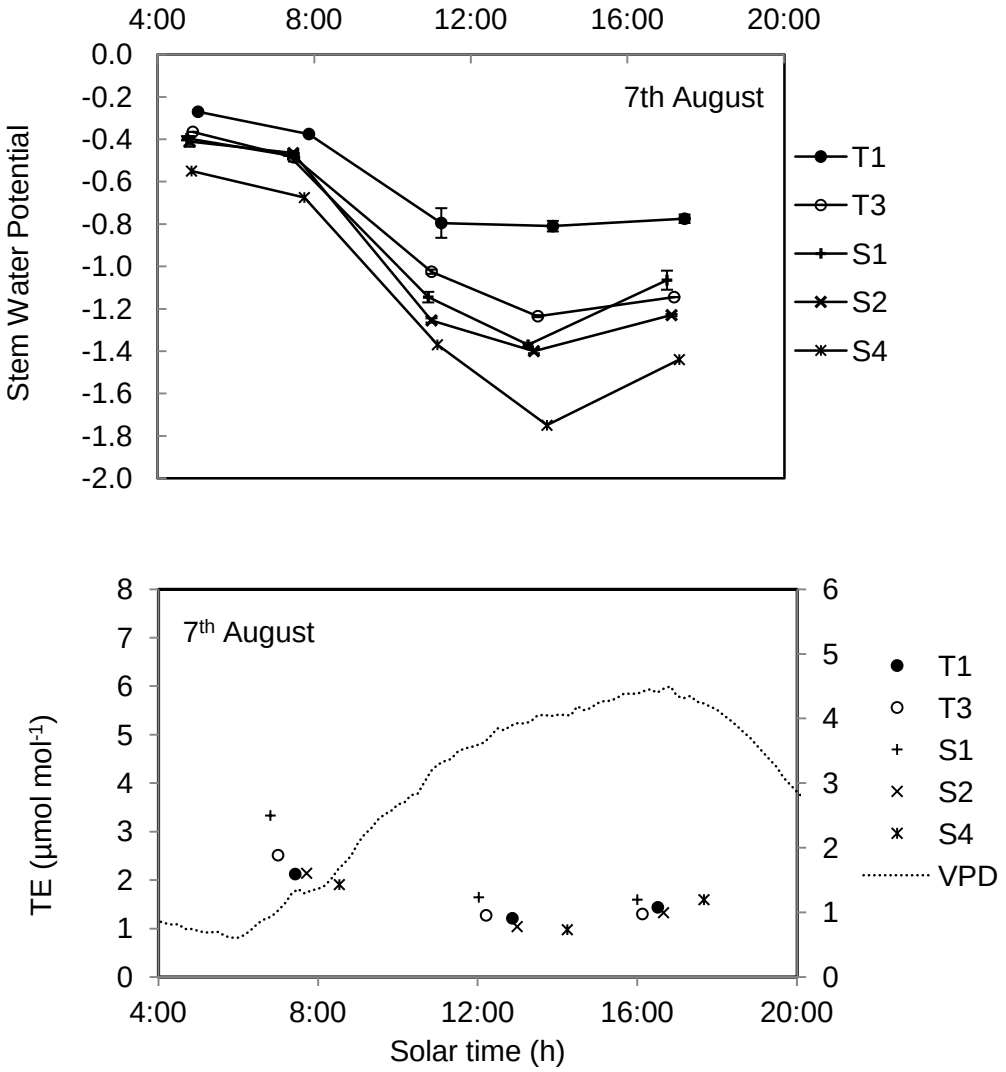


Fig 4.10. Evolución diurna del potencial hídrico de xilema y de la eficiencia en la transpiración el día 7 de agosto de 2013. Se presenta la evolución del DPV para mejor interpretación de los datos de TE.

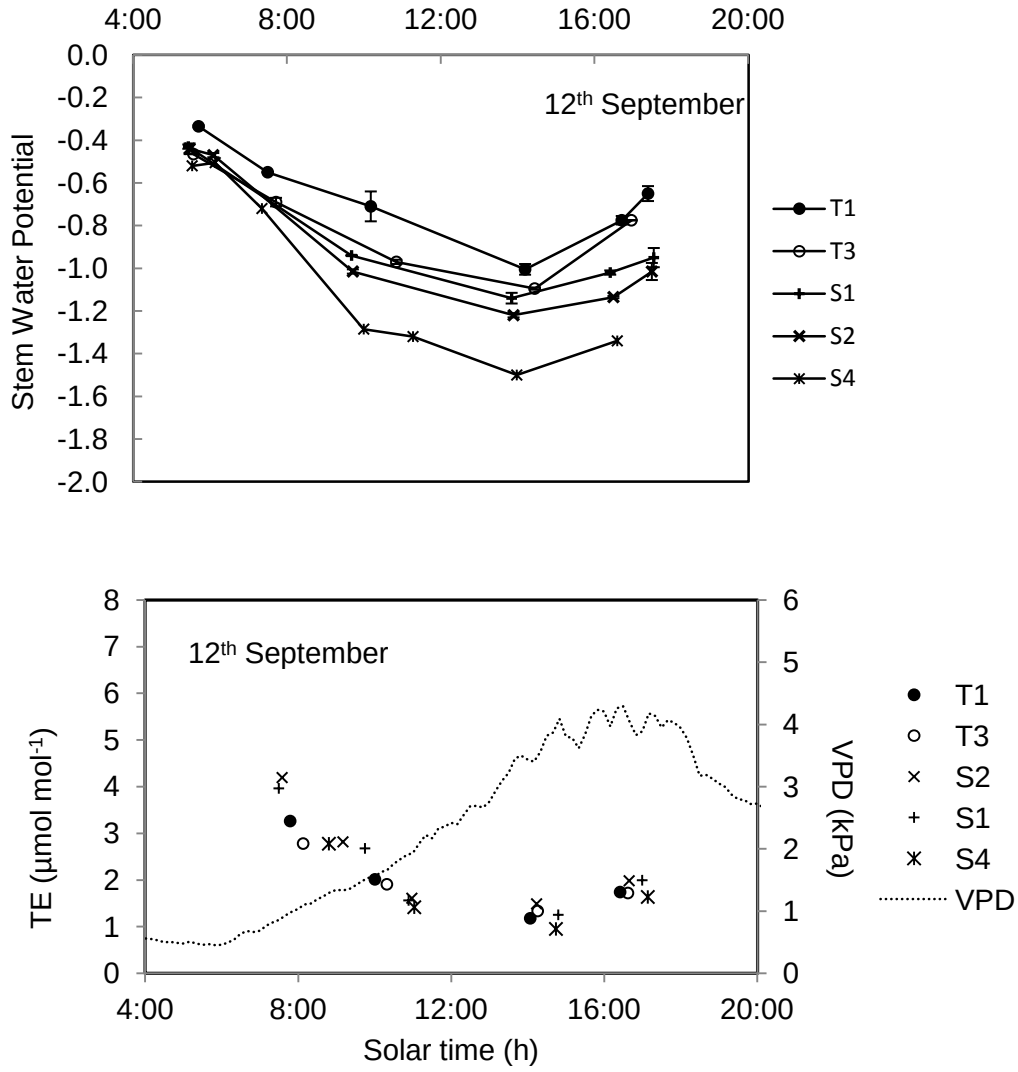


Fig 4.11. Evolución diurna del potencial hídrico de xilema y de la eficiencia en la transpiración el día 12 de septiembre de 2013. Se presenta la evolución del DPV para mejor interpretación de los datos de TE.

En la figura 4.12 se representa el índice gc_{max}/gc para todas las fechas en las que se midió el estado hídrico de los árboles. Para cada una de estas fechas todos los tratamientos obtuvieron valores similares que rondaron entre el 25 y el 30%. Respecto a la transpiración acumulada (Fig. 4.13) durante el transcurso de un día y expresada como porcentaje de la transpiración diaria total, se observó un mismo patrón de evolución para todos los tratamientos y para cada una día.

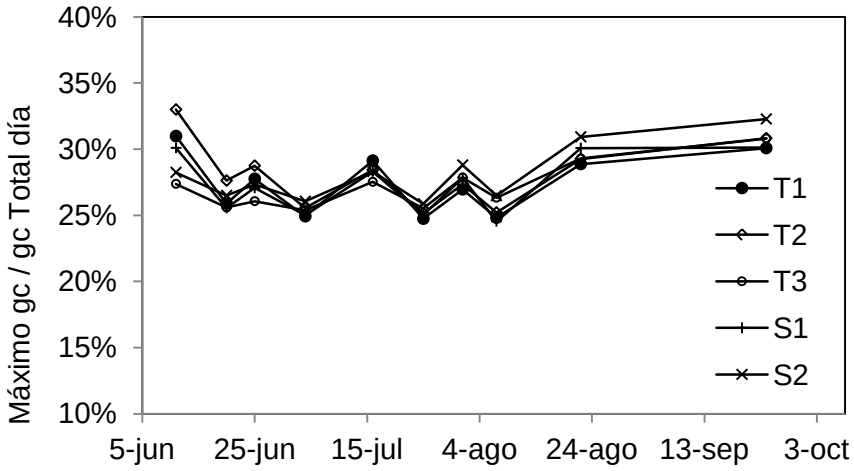


Fig 4.12. Evolución estacional del índice gc_{max}/gc para cada uno de los tratamientos con medidas de transpiración.

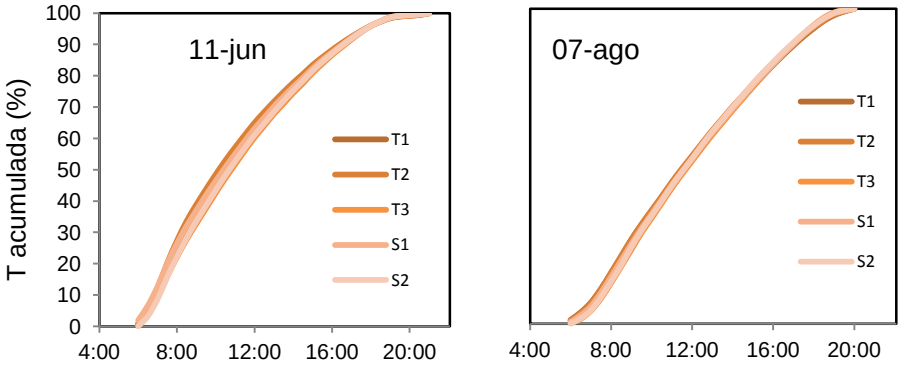


Fig. 4.13. Evolución de la transpiración a lo largo de dos fechas, el 11 de junio, antes de comenzar los tratamientos, y el 7 de agosto, época de máximo estrés hídrico.

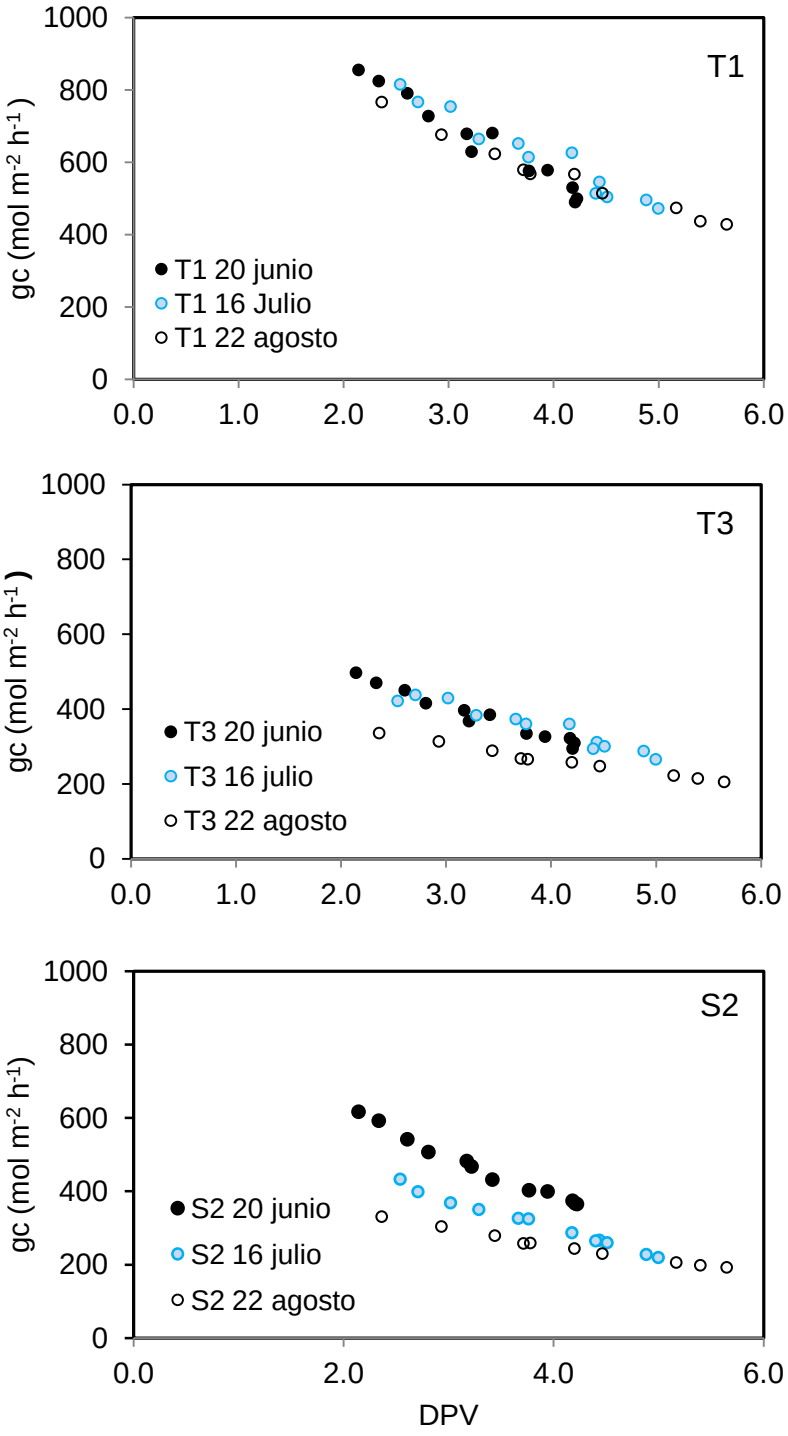


Fig. 4.15. Relación entre conductancia de cubierta derivada de la transpiración de los árboles centrales de T1, T3 y del S2 y DPV para tres fechas durante el periodo experimental.

En la figura 4.15 se muestra la respuesta de gc ante variaciones del DPV a lo largo de tres días dentro del periodo experimental. Mostramos por claridad de datos sólo tres de los tratamientos que sirven para ilustrar los comportamientos extremos (T1 y S2) y un comportamiento intermedio (T3). La sensibilidad de gc al DPV en el T1 fue alta y constante para todas las fechas analizadas, mientras que fue disminuyendo conforme el estrés se desarrollaba en el S2, que mostraba un Ψ_x de -1.6 el 16 de julio y de -2.0 MPa el 22 de agosto. Como comportamiento intermedio encontramos el T3 en el que la sensibilidad fue constante en las dos primeras fechas, en las que el Ψ_x era aún superior a -1.1 MPa y disminuyó en la última, en la que el Ψ_x había disminuido hasta -1.5 MPa.

4.4. Discusión

Debido a los distintos niveles de riego, los árboles desarrollaron diferentes estados hídricos. Sin embargo, según los valores de potencial de xilema al mediodía, sólo se llegó a un estrés moderado, e incluso en los árboles sin riego el Ψ_x no bajó de -2.0 MPa. Recientemente, Romero y Botía (2006) midieron Ψ_x por debajo de -3 MPa en almendros (cv. Cartagenera) regados al 20% del total de las necesidades durante el periodo de llenado de grano, incluso cuando la demanda evaporativa fue menor que en nuestras condiciones. Dos razones pueden explicar este estrés moderado incluso bajo condiciones de secano. Por un lado, la primavera extremadamente lluviosa de ese año dejó el perfil del suelo totalmente recargado de agua. Y por otro lado, a la vez que las capas menos profundas de suelo iban secándose el sistema de raíces fue probablemente extendiéndose a capas más profundas donde todavía había humedad disponible. A partir de las medidas de humedad en el suelo con sonda de neutrones y de transpiración por sap-flow se confirmó la extracción de agua por debajo de los 2 metros de profundidad a los que llegaban los tubos de acceso de las sondas. Girona et al. (2005) también encontraron un estrés moderado durante el primer año de un experimento de riego

deficitario en almendro (cv. Ferragnes) y en el que se aplicaba sólo un 20% de la ET_c durante el llenado de la almendra. Esto pudo deberse a un desarrollo de raíces explorando zonas profundas del suelo donde aún había humedad disponible.

A pesar del estrés moderado que se encontró, la transpiración (T) de los árboles de tratamientos deficitarios disminuyó con el transcurso del tiempo. Valores alrededor de transpiración relativa cercanos a 1 indican que los árboles del tratamiento control y de riego deficitario moderado transpiraron cerca de su potencial durante toda la estación, mientras que el árbol del tratamiento deficitario severo y los dos árboles de secano fueron reduciendo su transpiración gradualmente. El hecho de que la disminución no sea constante durante toda la estación sino que se atenúa en el mes de agosto vendría a confirmar que existe extracción de agua en capas profundas de suelo. Los valores de K_{Trel} superiores a 1 encontrados al final de la estación se pueden explicar por una limitación de la transpiración debido a cierre estomático como respuesta a los altos DPV durante el periodo de 10 días usado para calcular transpiración potencial. De este modo el hecho de que en otoño los valores de DPV disminuyesen de forma brusca desde 4 kPa a 2 kPa en posiblemente se tradujo en una mayor apertura de estomas que antes en esa misma estación incluso en árboles bien regados. Por tanto, debe resaltarse que la transpiración potencial calculada hace referencia a un nivel de transpiración que no está limitado por estrés hídrico, pero otros factores como la respuesta estomática al DPV pueden estar presentes. No obstante, como el valor de K_{Trel} sólo se utiliza en este estudio con fines comparativos entre tratamientos, este hecho no modifica las conclusiones alcanzadas.

El umbral de -1.1 MPa por debajo del cual el K_{Trel} comenzó a disminuir por debajo de 1, indicó la gran sensibilidad de Guara al estrés hídrico. Shackel (2007) observó que la conductancia estomática (gs) de almendros de la variedad Nonpareil comenzaba a disminuir cuando el potencial bajaba por debajo de -1.8 MPa. Sin embargo, el cambio de escala de hoja (gs) a escala de copa (gc) no es directo, ya que dentro de una copa existe mucha heterogeneidad en el grado de apertura de los estomas. El grado de variabilidad en la disipación de energía dentro de la copa de

los almendros, especialmente en niveles de estrés moderado, se observó con el análisis de imágenes térmicas (González-Dugo et al., 2012). Con fines prácticos, deberíamos saber cuánta agua será transpirada por la cubierta de un árbol bajo condiciones de déficit hídrico, ya que es el parámetro directamente relacionado con el rendimiento. En nuestro caso, por ejemplo, aunque no hubo diferencias grandes diferencias entre asimilación de CO_2 y transpiración a nivel de hoja entre control y tratamientos bajo estrés hídrico, sí que hubo una gran reducción de la transpiración medida a escala de copa. Esta diferencia puede deberse a que el limitado número de hojas que se pueden medir en el campo no es suficientemente representativo del conjunto total de hojas transpirando en el árbol.

Se sabe que la principal reducción de la transpiración cuando comienza el estrés por falta de agua se debe principalmente a un cierre estomático, y que al menos en niveles moderados de estrés esta es la principal causa de la limitación en A. Nuestros resultados coinciden con esta afirmación ya que encontramos por un lado una fuerte correlación entre A y gs a nivel de hoja, y por otro lado un valor relativamente constante de c_i para un amplio rango de valores de A (Figs. 4.8 b, c). Esta fuerte correlación ya se encontró previamente en otros estudios (Fereres y Castel 1982; Romero y Botía 2006).

En cuanto a la eficiencia en la transpiración (TE), medida a nivel de hoja como A/E, bajo estrés hídrico algunos cultivos como el olivo (Villalobos et al. 2012) y el naranjo (Roccuzzo et al. 2014) son capaces de aprovechar los momentos del día cuando el coste de agua por asimilación de CO2 es más bajo, para realizar la mayor parte de su intercambio gaseoso diario. Así, en estas especies se observa una apertura estomática durante las primeras horas de la mañana, para bajos niveles de DPV. Más tarde, una vez que el DPV aumenta, los estomas se cierran rápidamente. De esta forma, a pesar de mostrar valores idénticos de TE instantáneos, a lo largo de un día la integral de TE será mayor en árboles estresados que en bien regados. A la vista de los resultados obtenidos en este estudio, las hojas de almendro (cv. Guara) no siguen esta misma estrategia. En el caso de que fuese esta la estrategia presente, se obtendrían diferentes patrones de gc instantánea, mostrando los árboles

estresados una mayor conductancia por la mañana temprano que los árboles bien regados. Sin embargo, como vemos en la Fig. 4.12, esto no ocurrió y todos los árboles mostraron un mismo reparto entre la conductancia alrededor de la hora de máxima gc y la del resto del día, siendo el índice gc_{max}/gc muy similar tanto entre tratamientos como a lo largo de toda la estación. Hay que resaltar que este ratio sólo tiene sentido como índice, ya que la conductancia de copa es un parámetro instantáneo que no se acumula en el tiempo. Sin embargo, pudimos llegar también a la misma conclusión observando los patrones de transpiración de los distintos tratamientos. Si ocurriese en los árboles estresados un mayor gasto de agua cuando la TE instantánea es mayor, es decir durante las horas del día con bajo DPV, se observaría un aumento del porcentaje de transpiración más rápido que en los árboles bien regados y a partir de las horas en las que el DPV aumenta, el crecimiento de esta curva se atenuaría mucho. Sin embargo, las curvas definidas tanto por los árboles bien regados, como para los deficitarios moderados, estresados y en secano, fueron idénticas en todas las fechas, la Fig. 4.13 muestra dos fechas como representativas de las demás en el periodo de estudio.

Romero y Botía (2006) analizaron la TE de almendros cv. Cartagenera y no encontraron diferencias entre tratamientos. Sin embargo, dado el estrecho rango de DPV durante sus fechas de medida (máximo DPV = 2.2 kPa) no podemos comparar sus resultados con los de nuestra zona donde valores de DPV por encima de 4 kPa son normales en verano.

El éxito del riego deficitario en huertos de almendros, demostrado en muchos trabajos, está vinculado necesariamente a una mayor productividad del agua en los árboles estresados que en los árboles bien regados (Torrecillas et al., 1989; Romero et al., 2004; Girona et al., 2005, Goldhamer et al., 2006; Egea et al., 2013). El cociente entre rendimiento y agua aplicada puede incrementarse a base de minimizar pérdidas de agua por drenaje, escorrentía o evaporación desde el suelo, con lo que más agua sería utilizada para evapotranspiración y especialmente para transpiración. A parte de esto, un incremento de la eficiencia en la transpiración a nivel de hoja también se verá traducido en un aumento de la productividad del

agua. De hecho, Phogat et al. (2013) estudió la productividad del agua de almendros (cv. Nonpareil) y obtuvo valores más altos bajo riego deficitario que bajo riego total, sin embargo, cuando calculó la productividad como el cociente entre ET_c y rendimiento las diferencias entre tratamientos disminuyeron, y aún más cuando el cociente considerado fue T entre rendimiento. A la vista de los resultados obtenidos en nuestro estudio, el riego deficitario de almendro (cv. Guara) incrementaría la productividad del agua por un aumento en la eficiencia del riego y por un incremento en la TE a escala estacional, pero no por un aumento de TE a escala instantánea ni diaria. Es decir, durante la estación de riego, los estomas de las hojas de árboles bajo riego deficitario permanecerán más cerrados en verano, cuando el DPV es alto y la TE instantánea es baja, y más abiertos en primavera y otoño cuando ocurre lo contrario.

El comportamiento observado en este experimento puede enmarcarse dentro del concepto de especie isohídrica, con alta sensibilidad al DPV, y por tanto con un cierre de estomas gradual a medida que el estrés se desarrolla y que el DPV aumenta. Como consecuencia de ello, el potencial hídrico se mantuvo en niveles altos, indicando que el almendro cierra sus estomas como estrategia para tolerar condiciones de sequía. Esto está en consonancia con trabajos anteriores donde se observó un cierre gradual de estomas bajo condiciones de sequía (Torrecillas et al., 1996; Marsal et al., 1997) Este es un comportamiento típico de especies de zonas áridas o semiáridas, que consiguen de esta forma permitir un cierto grado de fotosíntesis a medida que el suelo se seca. A partir de nuestros resultados encontramos una decreciente sensibilidad de la conductancia estomática a DPV conforme aumentaba el grado de estrés (Fig. 4.15) lo cual está en consonancia con la descripción de especie isohídrica de Domec y Johnson (2012). Sin embargo, la inclusión de una especie dentro del término isohídrico o anisohídrico debería tomarse con precaución ya que, por un lado el comportamiento puede cambiar de un grupo a otro dependiendo del nivel de estrés y por otro lado, algunos estudios han encontrado que diferentes cultivares de una misma especie muestran estrategias totalmente diferentes bajo condiciones de estrés por sequía (Domec and Johnson, 2012).

Referencias

Castel JR, Fereres E (1982) Responses of young almond trees to two drought periods in the field. J Hortic Sci 57:175-187

Domec JC, Johnson DM (2012) Does homeostasis or disturbance of homeostasis in minimum leaf water potential explain the isohydric versus anisohydric behavior of *Vitis vinifera* L. cultivars? Tree Physiol 00:1-4.

Egea G, Nortes PA, González-Real MM, Baille A, Domingo R (2010) Agronomic response and water productivity of almond trees under contrasted deficit irrigation regimes. Agr Water Manage 97:171-181

Egea G, Nortes PA, Domingo R, Baille A, Pérez-Pastor A, González-Real MM (2013) Almond agronomic response to long-term déficit irrigation applied since orchard establishement. Irrig Sci 31:445-454

Fereres E, Soriano MA (2007) Deficit irrigation for reducing agricultural water use. J Exp Botany 58:147-159

Girona J, Mata M, Marsal J (2005) Regulated deficit irrigation during the kernel-filling period and optimal irrigation rates in almond. Agr. Water. Manage. 75, 152-167

Goldhamer DA, Viveros M, Salinas M (2006) Regulated deficit irrigation in almonds: effects of variations in applied water stress timing on yield and yield components. Irrig. Sci 24:101-114

González-Dugo V, Zarco-Tejada P, Berni JAJ, Suárez L, Goldhamer D, Fereres E (2012) Almond tree canopy temperature reveals intra-crown variability that is water stress-dependent. Agr Forest Meteorol 154-155:156-165

Hsiao TC (1973) Plant responses to water stress. Ann Rev Plant Physiol 24:519-570

Karimi S, Yadollahi A, Arzani K, Imani A, Aghaalikhani M (2015) Gas-exchange response of almond genotypes to water stress. Photosynthetica 53:29-34

Lorite IJ, Santos C, Testi L, Fereres E (2012) Design and construction of a large weighing lysimeter in an almond orchard. Span J Agric Res 10:238-250

Marsal J, Girona J, Mata M (1997) Leaf water relation parameters in almond compared to hazelnut trees during a deficit irrigation period. J Amer Soc Hort Sci 122:582-587

Moriana A, Villalobos FJ, Fereres E (2002) Stomatal and photosynthetic responses of olive (Olea europaea L.) leaves to water deficits. Plant Cell Environ. 23:395-405

Phogat V, Skewes MA, Mahadevan M, JW Cox (2013) Evaluation of soil plant system response to pulsed drip irrigation of an almond tree under sustained stress conditions. Agr Water Manage 118:1-11

Roccuzzo G, Villalobos FJ, Testi L, Fereres E (2014) Effects of water deficits on whole tree water use efficiency of orange. Agr Water Manage 140:61-68

Rouhi V, Samson R, Lemeur R, Van Damme P (2007) Photosynthetic gas exchange characteristics in three different almond species during drought stress and subsequent recovery. Environmental and Experimental Botany 59:117-129

Romero P, Navarro JM, García F, Botia P (2004) Effects of regulated deficit irrigation during pre-harvest period on gas exchange, leaf development and crop yield of mature almond trees. Tree Physiol 24:303-312

Romero P, Botía P (2006) Daily and seasonal patterns of leaf water relations and gas exchange of regulated deficit-irrigated almond trees under semiarid conditions. Environ Exp Bot 56:158-173

Rouhi V, Samson R, Lemeur R, Van Damme P (2007) Photosynthetic gas exchange characteristics in three different almond species during drought stress and subsequent recovery. Environ Exp Bot 59:117-129

Shackel KA (2007) Water relations of woody perennial plant species. J Int Sci Vigne Vin 41:121-129

Torrecillas A, Ruiz-Sánchez MC, del Amor F, León A (1988) Seasonal variations on water relations of Amygdalus communis L. under drip irrigated and non irrigated conditions. Plant Soil 106:215-220

Torrecillas A, Ruiz-Sánchez MC, León A, del Amor F (1989) The response of young almond trees to different drip-irrigated conditions. Development and yield. J. Hortic. Sci. 64, 1-7.

Torrecillas A, Alarcón JJ, Domingo R, Planes J, Sanchez-Blanco MJ (1996) Strategies for drought resistance in leaves of two almond cultivars. Plant Sci 118:135-143.

Villalobos FJ, Perez-Priego O, Testi L, Morales A, Orgaz F (2012) Effects of water supply on carbon and water exchange of olive trees. Eur J Agron 40:1-7

Yadollahi A, Arzani K, Ebadi A, Wirthensohn M, Karimi S (2011) The response of different almond genotypes to moderate and severe water stress in order to screen for drought tolerance. Scientia Horticulturae 129:403-413

Capítulo 5. Discusión general y conclusiones

Capítulo 5

Discusión general y conclusiones

Los buenos precios alcanzados durante los últimos años, la creciente demanda de almendra y las buenas condiciones climáticas de Andalucía para el cultivo del almendro, lo muestran como una buena opción en Andalucía, suponiendo incluso una alternativa al olivar, principal cultivo leñoso en esta región. Los rendimientos de una plantación intensiva de almendro en regadío son muy altos, por encima de 2500 kg/ha. Sin embargo, la cantidad de agua necesaria para alcanzar ese nivel de producción, superior a 9000 m3/ha, es tal que el riego a demanda total (FI) aparece como una opción poco realista en la situación actual en la que las dotaciones de riego son en muchos casos bastante limitadas. Por tanto, el riego deficitario (RD), que ya ha mostrado muy buenos resultados en estudios previos, surge como la opción más adecuada. Además, es fundamental asegurar un uso eficiente del agua en la agricultura ya que es un recurso escaso por el que compiten varios sectores.

A pesar de que el FI en almendro sea una opción poco probable, es necesario estudiar el consumo potencial de agua de este cultivo, para tener una referencia sólida en base a la cual planificar las estrategias de RD. Esa fue la primera cuestión planteada en esta tesis (**Capítulo 2**) y para resolverla se realizaron medidas de la transpiración (T) de almendro durante el periodo 2010-2013 mediante un lisímetro de pesada, la técnica más precisa para la medida de consumo de agua de un cultivo. Sin embargo, esta instalación es compleja y no suele usarse fuera del ámbito de la investigación, con lo que el objetivo final fue obtener una relación entre la T máxima del almendro y algún parámetro que tuviese en cuenta las distintas fases en el desarrollo de la plantación. Hasta ahora se ha usado la fracción de cobertura de suelo (CC), sin embargo, esto tiene la desventaja de posibles discrepancias entre huertos de características diferentes (poda, variedad…) por lo que se necesita un parámetro que responda más a la fisiología del cultivo. Nosotros propusimos la fracción de radiación PAR interceptada por la copa a lo largo del día (fIR_d). Combinando los datos de K_T con las correspondientes fIR_d, observamos una relación constante, con un cociente K_T/fIR_d de 1.2 durante la mayor parte de la campaña de riego, para dos años de estudio en los que el tamaño del árbol se duplicó. Este resultado implica que es posible predecir el consumo de agua de un huerto de almendro de cualquier edad y tamaño de copa a través de la estimación de fIRd, con lo que este procedimiento sería una herramienta útil para la realización de calendarios de riego. No obstante, la medida de radiación interceptada es algo complejo, que no suele estar en manos de cualquier agricultor, por lo que como alternativa se puede usar la relación entre K_T y CC, mucho más sencillo de medir, y que también ha mostrado buenos resultados. Sin embargo, esta última relación ha

de tomarse con cautela ya que factores como cultivar, densidad de área foliar o sistema de poda pueden hacer que esa relación no se mantenga igual entre un huerto y otro. Sería interesante desarrollar algún factor de corrección que atienda a esas características particulares de cada plantación y que ayude a afinar un calendario de riego basado en el cálculo de la T a partir de CC.

De acuerdo con el valor 1.2 del cociente K_T/fIR_d obtenido en este estudio y asumiendo que el valor máximo de fIR_d fuese del 85%, el K_T máximo igual a 1.02, mayor que el valor de 0.85-0.9, valor propuesto para almendro por Allen et al. (1998). Los valores de K_c propuestos por otros autores (Girona et al. 2006; Stevens et al. 2012) están más en línea con nuestros resultados. De hecho, si asumimos una evaporación de un 10-15% de la ET_c (habitual en plantaciones regadas por microaspersión, como las usadas en los dos últimos estudios mencionados), el acuerdo entre nuestros resultados de K_T y los valores recientemente propuestos de K_c por los autores citados es excelente.

En el cultivo del almendro suelen usarse sistemas de riego localizado, esencialmente goteo y microaspersión. Estos sistemas se desarrollaron para aumentar la eficiencia del riego minimizando las pérdidas por evaporación a base de humedecer un porcentaje del suelo en lugar de su totalidad. Sin embargo, existe un volumen mínimo que hay que humedecer para asegurar que el cultivo se desarrolla de forma potencial. En nuestro estudio pudimos observar que el uso de una sola línea de goteros por árbol estaba limitando la T del árbol ya en su tercer año desde la plantación. Para comprobarlo, procedimos a humedecer un amplio volumen de suelo mediante una microaspersión inicial continuando después con el sistema de riego original con una sola línea de goteros (**Capítulo 3**). A pesar de que las cantidades de agua aportadas no eran limitantes, llegando a registrarse pérdidas por percolación, los árboles con un menor volumen humedecido mostraron una T menor y un peor estado hídrico que aquellos con un amplio volumen de suelo humedecido. Además, se observó que la resistencia hidráulica de los árboles a los que se les realizó la MA disminuyó, mostrando que la limitación en la T se debe a un mecanismo hidráulico (Kramer y Boyer 1995), aunque la hipótesis de señales químicas (Davies y Zhang 1991) desde la parte del sistema radical en suelo seco no puede descartarse. El porcentaje mínimo de suelo que se debe humedecer dependerá de factores como tipo de suelo y frecuencia de riego y por tanto son necesarios más estudios para obtener recomendaciones concretas. De cualquier forma, sí se debe recomendar el uso de doble línea de goteros o de microaspersión, especialmente cuando el árbol crece y llega a cubrir gran parte del suelo. Una práctica recomendada es el comienzo temprano del riego con el objetivo de conservar agua almacenada en el suelo, que además de aportar un amplio porcentaje de raíces creciendo en suelo húmedo, supondrá un margen de seguridad ante un fallo de riego o ante una ola de calor. Estas reservas se deben consumir al

finalizar la campaña de riego para permitir al suelo albergar el agua procedente de precipitaciones en otoño-invierno. El manejo del agua en una plantación de almendro también tiene implicaciones en la recolección del fruto. Por un lado, si el sistema elegido es el derribo y barrido de las almendras el suelo ha de hallarse seco para el momento de la recolección, y por tanto el riego tendrá que cortarse unos días antes. Así, el hecho de contar con algunas reservas en el suelo, supondrá una ventaja al permitir a los árboles atravesar ese periodo de sequía con mejor estado hídrico, aunque se recomienda que lleguen a un nivel de estrés ligero para evitar daños en la madera debidos a la vibración del tronco.

En cuanto a la cantidad de agua disponible para regar, son normales en nuestra región dotaciones entre 2000-3000 m^3/ha y año. Este valor contrasta con las necesidades máximas, que considerando el valor de K_T = 1.02 para un huerto adulto encontrado en el **Capítulo 2** pueden llegar en un año medio con una ET_o total para los meses de junio-septiembre de 700 mm, a más de 7000 m3/ha sólo para atender a la transpiración de los árboles durante esos meses. A eso hay que añadir, suponiendo el sistema de riego totalmente eficiente en el resto de temas, las inevitables pérdidas por evaporación y en casos de agua de riego salina la fracción de lavado para evitar problemas de toxicidad. Por lo tanto, es muy probable que las necesidades máximas superen los 9000 m^3/ha. De esta situación surge la necesidad de estudiar la respuesta del almendro a distintas estrategias de RD. En el **Capítulo 4** enfocamos esta cuestión a escala de árbol, lo que supone un avance respecto a estudios previos en los que se estudia el comportamiento fisiológico a nivel de hoja frente a distintos niveles de estrés hídrico. Como principal resultado observamos que la transpiración comenzó a disminuir cuando el potencial hídrico de xilema (Ψ_x) cayó por debajo de -1.1 MPa. Este valor es superior a los encontrados por otros autores que encontraron umbrales más negativos como punto de partida para el cierre estomático y la consecuente disminución en la T. Por otro lado, comprobamos que la eficiencia instantánea en la transpiración (TE), cociente entre asimilación de CO_2 (A) y transpiración (E) a nivel de hoja, no varió con el estado hídrico y que fue función solamente del DPV. A lo largo de un día el patrón de consumo de agua, y por tanto de conductancia de cubierta fue el mismo en tratamientos bien regado y en deficitarios. Por tanto, el incremento en la productividad de agua del riego en una plantación de almendro, que ya se ha demostrado en otros trabajos (Egea et al. 2013; Phogat et al. 2013), se ha de deber a un mejor reparto estacional del intercambio gaseoso, realizando la mayor parte en los periodos con bajo DPV (alta TE) y limitándolo en momentos de alto DPV (baja TE). A nivel práctico esto cuadra muy bien con el periodo en que el almendro es menos sensible a estrés hídrico, que va desde que el fruto alcanza su tamaño externo máximo hasta su madurez (junio-agosto) coincidiendo con la época de mayor DPV. Sería ese el momento de aplicar una reducción en las dosis de riego

con el mínimo efecto sobre la producción del año y años posteriores. El experimento iniciado en 2013 continuará hasta 2017, con el objetivo de obtener una función de producción del almendro en la que para cada dotación de riego podamos predecir el rendimiento máximo cuando el resto de factores (fertilización, estado sanitario…) sean óptimos.

Conclusiones

- El consumo de agua máximo del almendro, con un coeficiente de transpiración de 1.02 para un huerto adulto en la época de mayor demanda, es superior al propuesto anteriormente, 0.85-0.90. El coeficiente de transpiración está directamente relacionado con la fracción de radiación PAR interceptada por la cubierta, por lo que este parámetro es una buena herramienta para el cálculo de las necesidades hídricas de cualquier huerto de almendros.
- El volumen de suelo humedecido puede limitar la transpiración del almendro y por tanto su crecimiento y producción. Esta limitación está relacionada con un incremento de la resistencia hidráulica, aunque la hipótesis de un cierre estomático por señales químicas desde la parte del sistema radical en suelo seco no puede descartarse.
- La transpiración del almendro (cv. Guara) es muy sensible al déficit hídrico y muestra una disminución cuando el potencial hídrico de xilema cae por debajo del umbral -1.1 MPa. Ante distintos niveles de estrés hídrico la eficiencia instantánea en la transpiración permanece constante, así como el patrón de consumo de agua a lo largo del día. Esto implica que el incremento en la productividad del agua del riego bajo estrategias de riego deficitario ha de deberse a un mejor reparto estacional del intercambio gaseoso.

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage. Paper No. 56. FAO, Rome.

Davies WJ, Zhang J (1991) Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Bioi 42:55-76

Egea G, Nortes PA, Domingo R, Baille A, Pérez-Pastor A, González-Real MM (2013) Almond agronomic response to long-term déficit irrigation applied since orchard establishement. Irrig Sci 31:445-454

Girona, J. 2006. La respuesta del cultivo del almendro al riego. Vida Rural, 234:12-16

Kramer PJ, Boyer JS (1995) Water relations of plants and soils. San Diego California : Academic Press.

Phogat V, Skewes MA, Mahadevan M, JW Cox (2013) Evaluation of soil plant system response to pulsed drip irrigation of an almond tree under sustained stress conditions. Agr Water Manage 118:1-11

Stevens RM, Ewenz CM, Grigon G, Conner SM (2012) Water use by an irrigated almond orchard. Irrig Sci 30:189-200

ANEXO 1. PRODUCCIÓN CIENTÍFICA.

Como parte del **Capítulo 1** se publicó un artículo en Irrigation Science (Espadafor et al. 2015) y como parte del **Capítulo 2** hay un artículo en revisión también en Irrigation Science (Se incluye carta de aceptación del manuscrito para su revisión). Como parte del **Capítulo 3** hay un artículo preparado para enviar en las próximas semanas.

Durante el periodo de tesis los resultados han ido presentándose a Congresos Internacionales:

- Cruz-Blanco M, Santos C, Lorite IJ, Allen RG, Zhao W, Espadafor M, Testi L, Ramírez-Cuesta JM, de Bruin HAR (2013) First measurements provided by a Large Aperture Scintillometer over a small almond orchard in Southern Spain Tübingen Atmospheric Physics Symposium "Scintillometers and Applications" Tübingen (Alemania)
- Espadafor M, Lorite IJ, Orgaz F, Testi L, Fereres E (2013) Assessing almond orchard water use: evaluation of methods. VI International Symposium on Almond and Pistachios (ISHS) Murcia (España) Acta Horticulturae. (ISHS) 1028:341-345. ***Presentación Oral.*** (Se incluye publicación en Acta Horticulturae)
- Espadafor M, Orgaz F, García O, Testi L, Lorite IJ, Fereres E (2014) Transpiration and water relations of young almond trees. XIII ESA Congress. Debrecen (Hungría)
- Espadafor M, González-Dugo, Orgaz F, Testi L, López-López M, Fereres E (2015) Transpiration and water relations of almond trees (cv. Guara) under moderate water deficits VIII International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops (ISHS). Lleida (España). ***Presentación Oral.***
- González-Dugo, Espadafor M, López-López M, Lorite IJ, Testi L, Fereres E (2015) Use of crop water stress index for monitoring water status in young almond orchards. VIII International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops (ISHS). Lleida (España)
- López-López M, Espadafor M, Lorite IJ, Orgaz F, Testi L, Fereres E (2015) Measurement of almond evapotranspiration by lysimetry in a semiarid

environment. VIII International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops (ISHS). Lleida (España)

En febrero de 2014 se celebró el curso El Cultivo del Almendro en el Centro Experimental del Chaparrillo (Ciudad Real) en el que impartí la parte correspondiente a Riego del almendro, pudiendo explicar gran parte de los resultados alcanzados hasta el momento en esta tesis.

Durante un contrato previo en el IFAPA de la junta de Andalucía (2009-2010) realizamos un estudio sobre las tendencias en las principales variables climáticas y su efecto en la demanda hídrica de los cultivo (Espadafor et al. 2011, incluido al final de este anexo). Aunque se trata de un trabajo fuera del periodo de tesis, hemos querido añadirlo porque introduce bien la necesidad de una investigación dirigida a aumentar la productividad del agua de riego.

Preview

From: ag2moprm@uco.es

To: mespadafor@ias.csic.es

CC:

Subject: Irrigation Science - Manuscript ID IrrSci-2015-0030

Body: 17-Feb-2015

Dear Mrs. Espadafor:

Your manuscript entitled "Almond tree response to a change in wetted soil volume under drip irrigation" has been successfully submitted online and is presently being given full consideration for publication in Irrigation Science.

Your manuscript ID is IrrSci-2015-0030.

Please mention the above manuscript ID in all future correspondence or when calling the office for questions. If there are any changes in your street address or e-mail address, please log in to Manuscript Central at https://mc.manuscriptcentral.com/irrsci and edit your user information as appropriate.

You can also view the status of your manuscript at any time by checking your Author Center after logging in to https://mc.manuscriptcentral.com/irrsci.

Thank you for submitting your manuscript to Irrigation Science.

Sincerely,
Irrigation Science Editorial Office

Date Sent: 17-Feb-2015

Close Window

ISHS Acta Horticulturae 1028: VI International Symposium on Almonds and Pistachios

ASSESING ALMOND ORCHARD WATER USE: EVALUATION OF METHODS

Authors: M. Espadafor, I. Lorite, P. Orgaz, L. Testi, E. Fereres

Keywords: *Prunus dulcis* D.A. Webb, lysimeter, evapotranspiration, crop coefficient, Eddy-covariance

Abstract:
Orchard water requirements have been the subject of controversy in recent years because the traditional methods for estimating crop ETc do not always determine correctly tree water needs. Reports of intensive almond production under full irrigation indicate that seasonal requirements exceed 1000 mm/season and that peak ETc values of 7-9 mm/day are possible. This is in contrast with traditional irrigation plantations where, given the reputation of drought resistance that almond has, seasonal amounts of 30-50% of maximum ETc are applied in some form of deficit irrigation. Experimental determination of maximum ETc using a large weighing lysimeter was started at Cordoba, Spain in 2009. Since that year, measurements of E and T together with ancillary information on tree leaf area have been taken with the aim of developing models to compute almond tree water requirements. Sap flow sensors have been installed in the experimental tree to obtain detailed T records in response to environmental conditions. The performance of different ETc models will be evaluated against actual ETc measurements.

- **Full Text** (PDF format, 192500 bytes)
- **Citation**
- Translate

Seleccionar idioma

Con la tecnología de Google **Traductor**

Download Adobe Acrobat Reader (free software to read PDF files)

Agricultural Water Management 98 (2011) 1045–1061

Contents lists available at ScienceDirect

Agricultural Water Management

journal homepage: www.elsevier.com/locate/agwat

An analysis of the tendency of reference evapotranspiration estimates and other climate variables during the last 45 years in Southern Spain

M. Espadafor, I.J. Lorite*, P. Gavilán, J. Berengena

IFAPA, Centro "Alameda del Obispo", Alameda del Obispo s/n, Box 3092, 14080 Córdoba, Spain

ARTICLE INFO

Article history:
Received 5 August 2010
Accepted 30 January 2011
Available online 23 February 2011

Keywords:
Reference evapotranspiration
Climate change
Temporal trends
Penman-Monteith

ABSTRACT

Climate change will have important implications in the agriculture of semi-arid regions, such as Southern Spain, where the expected warmer and drier conditions might augment crop water demand. To evaluate these effects, a data set consisting of observed daily values of air temperature, relative humidity, sunshine duration and wind speed from eight weather stations in Andalusia and covering the period 1960–2005 was used for estimating reference evapotranspiration (ET_o). ET_o was calculated using five methods: the more complex Penman-Monteith FAO-56 (PM) equation, considered as a reference in this study, and four alternative methods with fewer data requirements, Hargreaves, Blaney-Criddle, Radiation and Priestley-Taylor. These methods were compared to PM with respect to ET_o average values and trends. The non-parametric Mann-Kendall test was used to evaluate annual and seasonal trends in the main climate variables and ET_o.

Due to increases in air temperature and solar radiation, and decreases in relative humidity, statistically significant increases in PM-ET_o were detected (up to 3.5 mm year^{-1}). Although the Hargreaves equation provided the closest average values to PM, this method did not detect any ET_o trend. On the other hand, trends found from Blaney-Criddle and Radiation ET_o values were similar to those obtained from PM. In addition, after a local adjustment, these two methods gave accurate ET_o average values. Therefore, Blaney-Criddle and Radiation methods have shown themselves to be the most accurate approaches for ET_o determination in climate change studies, when available data provided by climate models are limited.

© 2011 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

In the last decades, a global change in the main meteorological variables has been observed. According to the recent report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007) the air temperature at the earth surface level rose by 0.74 °C during the last century, mainly due to an increase in concentrations of greenhouse gases in the atmosphere. Furthermore, this temperature rise, is likely to continue in the 21st century, causing changes in the hydrological cycle by affecting precipitation and evaporation (Huntington, 2006). The increase in precipitation observed in the mid and high latitudes contrasts with decreases in the northern sub-tropics and with the fact that, overall, the area affected by drought has increased since 1970 (IPCC, 2007). The Mediterranean region has shown large climate shifts in the past and it has been identified as one of the most prominent "Hot-Spots" in future climate change projections (Giorgi and Lionello, 2008). Previous studies have focused attention on both, the quantification of climate changes (Turkes et al., 2002; Wu et al., 2006; Toreti and Desiato, 2008; Gonzalez-Hidalgo et al., 2009, De Luis et al., 2009; El Kenawy et al., 2009) and the assessment of the impacts of those changes on different fields (Walther et al., 2002; Izaurralde et al., 2003; Mizyed, 2009).

How can irrigated agriculture be affected by those changes? Mainly, in two ways: (i) increasing the crop water needs (water demand), and (ii) modifying crop patterns and growing seasons (Döll, 2002). In Andalusia, Spain, located in a semiarid Mediterranean environment, approximately 50% of the surface is occupied by agricultural lands; 20% of that cropped surface is being irrigated (CAP, 2007). In the last decades, irrigation has provided economic growth and development to this Spanish region, allowing the introduction of new high-value crops, complementing or even replacing some of those considered more traditional in the area. Accurate estimations of crop water requirements are necessary for planning an efficient use of water resources. Thus, in Andalusia, as in other arid and semiarid environments, where the lack of rain severely limits crop growth and yields, there is a need to assess and quantify the impacts of climate changes on water availability and on agricultural water demands (Mizyed, 2009).

* Corresponding author. Tel.: +34 957 016 023; fax: +34 957 016 043.
E-mail address: ignacioj.lorite@juntadeandalucia.es (I.J. Lorite).

0378-3774/$ – see front matter © 2011 Elsevier B.V. All rights reserved.
doi:10.1016/j.agwat.2011.01.015

These water demands will depend on reference evapotranspiration (ET_o), which is an integrated climate parameter that gives a measure of the evaporation demand of the air. ET_o is essentially dependent on four meteorological variables: air temperature, solar radiation, relative humidity and wind speed (Allen et al., 1998). ET_o has been extensively used to evaluate the impacts of climate change on irrigated agriculture (Izaurralde et al., 2003; Elgaali et al., 2007; Thomas, 2008), as it is a key component of the hydrological cycle, essential to water resource management and irrigation scheduling. According to climate change model predictions, ET_o is expected to increase in the next years on a par with temperature rise. Nevertheless, although several research works have pointed in this direction, decreasing trends of ET_o were found in some areas of China (Thomas, 2000; Chen et al., 2006; Wang et al., 2007), India (Chattopadhyay and Hulme, 1997), USA (Hobbins et al., 2004), and Australia (Roderick and Farquhar, 2004, 2005). Rising global temperatures may, therefore, not lead in all cases to rising ET_o rates. For instance, the decrease in solar radiation, usually called global dimming, described for many regions (Stanhill and Cohen, 2001; Wild et al., 2005) could make up for the effect of warmer temperatures on ET_o. Changes in mean wind speed and relative humidity have also been reported for the last half century at different locations, and thus affecting ET_o (Cohen et al., 2002; Wang et al., 2007; Todisco and Vergni, 2008). Chen et al. (2006) studied the correlation between ET_o trends and some climate variables on the Tibetan Plateau, concluding that the decrease in wind speed was the meteorological factor that contributed the most to the observed reduction of ET_o rates. Other authors who have reported decreasing trends in ET_o have pointed to solar radiation reduction along with wind speed as the main contributing variables (Gao et al., 2006; Wang et al., 2007). Consequently, an analysis of the contribution of these four climate variables (air temperature, solar radiation, humidity and wind speed) to the estimated ET_o changes is essential.

One or more of those four meteorological variables can be taken into account, depending on the ET_o calculation method selected. In fact, ET_o can be estimated by a diversity of methods that vary in data requirements. They go from very simple, empirically based or simplified equations requiring only monthly average air temperatures (Blaney and Criddle, 1950; Hargreaves and Samani, 1982, 1985), to more complex, physically based equations requiring daily data for temperature and relative humidity of the air, solar radiation and wind speed [e.g. FAO-56 Penman-Monteith (PM) (Allen et al., 1998)]. The main advantage of the PM approach is that it takes into account the most significant variables, so that the influence of each of them can be analysed. This method has been recommended by the American Society of Civil Engineers (ASCE, 2004), and it had been also selected before as the most accurate method for estimating ET_o in Mediterranean environments (Utset et al., 2004; Berengena and Gavilán, 2005). However, the need for a relatively large number of climate variables limits the widespread use of this equation (Pereira and Pruitt, 2004). In addition, stations with accurate, complete and consistent long-term weather data are still scarce (Karl et al., 1995; Simolo et al., 2010). Several authors have compared different ET_o equations (Allen et al., 1989; Smith et al., 1996) but, in a context of a changing climate, the ability of the different ET_o-approaches to define ET_o trends should also be tested.

Besides, it is necessary to estimate the evolution of ET_o and meteorological variables affecting ET_o during the 20th century in order to establish a solid baseline for future adaptation strategies. Regional climate models (RCMs), in combination with crop simulation models, have arisen as a useful tool to evaluate the impacts of possible climate changes on agriculture. For instance, Mínguez et al. (2007) utilized the results of eleven regional climate models as inputs in the CERES wheat and maize models to predict the impacts of climate change on winter and summer crops in the Iberian Peninsula. However, there is still a need for studying past trends of temperature and ET_o values. Firstly, because the predictions provided by the RCMs must be validated using observed data (Mearns et al., 2003). Secondly, because as the uncertainties in the outputs given by those models are too large for a direct use as inputs in crop simulation models (Mearns et al., 2003), it is recommended to transfer the relative changes provided by climate models to observed climate data (Castro, 2009). On the other hand, some climate models frequently used in Europe (Christensen and Christensen, 2007; Jacob et al., 2007) estimate weather data for the period 2070–2100, with a period of control data (1960–1990) for validation. From the analysis of the RCM data for the Andalusian region, bias values for wind speed and humidity were detected, while values for temperature were similar to the real data (preliminary data not published). This fact will require the consideration of alternative ET_o-approaches in order to obtain accurate ET_o values.

The objectives of this study were to investigate the trends for reference evapotranspiration in Andalusia in the past, to evaluate the major factors related to the changes in ET_o, and to test the ability of several ET_o-approaches to detect these trends.

2. Material and methods

2.1. Study area

The study was carried out in Andalusia (Southern Spain) located between the meridians 1°W and 7°W and the parallels 37°N and 39°N and occupying an extension of around 9 Mha. The elevation ranges from 0 to 2800 m, with an average altitude of 500 m a.s.l. The climate is generally described as semiarid, typically Mediterranean, with very hot, dry summers. Due to the Atlantic influence, there is a temperature gradient between coastal areas, with mild temperatures throughout the year, and inland locations that show more seasonal variability. There is also a strong altitudinal gradient that makes mean temperatures drop below 9–10 °C in the mountainous areas.

Seasonal precipitation in Andalusia is mainly concentrated in the autumn and winter periods. Summers are usually hot and dry, with mean rainfall amounting to around 4% of the annual rate. Therefore, the water balance is extremely unfavourable to spring/summer crops. In addition, there is a high inter-annual variability in the annual rainfall, which is the reason why, frequently, the available water resources are not able to meet the increasing irrigation water requirements, even, as is the case, when these water resources are relatively well-regulated in the main basins of the area.

2.2. Weather data and quality control

Data from eight weather stations provided by the Spanish National Meteorology Agency (AEMET, in Spanish) were used in this study (Table 1). Daily observed maximum and minimum air temperature, rainfall, wind speed measured at 10 m height, maximum and minimum relative humidity and daily sunshine duration data were available (Table 2). Among the analyzed weather stations, coastal stations (such as Almería, Cádiz, Jerez and Málaga) and inland stations (such as Córdoba, Morón, Granada and Seville) are included. Average maximum temperatures ranged from 25 °C for Seville station to 21.3 °C for Cádiz station, while the averaged minimum temperature ranged from 15.1 °C for Cádiz to 8.7 °C for Granada station (Table 2).

The weather stations were selected by the following two criteria. First, the spatial distribution had to guarantee such a coverage that could be representative of irrigated lands in Andalusia. In addition, time series had to be long enough to obtain statistically significant results in trend analyses. Thus, the 45-year period from 1960 to

Table 1
Location and altitude of the weather stations used in the study and period of time analysed.

Station name	Latitude (N)	Longitude (W)	Altitude (m)	Time period
Seville	37.42	5.59	31	1960–2005
Córdoba	37.84	4.85	91	1960–2005
Almería	36.84	2.39	21	1968–2005
Morón	37.15	5.58	88	1960–2005
Granada	37.14	3.63	685	1960–2005
Jerez	37.74	6.06	27	1960–2005
Cádiz	36.53	6.28	8	1960–2005
Málaga	36.67	4.49	7	1964–2005

2005 was studied when it was possible, although data from some stations covered shorter periods (Almería: 1968–2005 and Málaga: 1964–2005). In addition, due to maintenance problems, gaps of one year or even longer were observed for various stations. These periods were discarded for the analysis.

Meteorological data were validated following Estévez and Gavilán (2006) and Estévez (2008), including different tests: range, step and persistence, according to Meek and Hatfield (1994), Allen (1996) and Shafer et al. (2000). After application of these tests, a small percentage of erroneous daily values were discarded. In Table 3, a description of the percentage of days with erroneous and missing data per weather station for temperature, humidity, number of hours of sunshine and wind speed has been included. For the three first variables, with the exception of Jerez station, the quality of the data could be considered to be acceptable.

Missing data were reconstructed for ET_o calculation, while trends in the other variables were analyzed from measured data only. Specifically, relative humidity and solar radiation were estimated using the procedures recommended by Allen et al. (1998). Relative humidity was calculated from dew point temperature (T_{dew}); for the semiarid environment of the study site it is assumed that:

$$T_{dew} = T_{min} - 2 \quad (1)$$

Where sunshine hour data were missing, solar radiation (R_s) was estimated from daily minimum (T_{min}) and maximum (T_{max}) temperature, using the Hargreaves radiation equation (Hargreaves and Samani, 1982):

$$R_s = k_{Rs} \cdot \sqrt{(T_{max} - T_{min})} \cdot R_a \quad (2)$$

where the empirically adjusted coefficient k_{Rs} is usually 0.16 and 0.19 for inland and coastal regions, respectively (Hargreaves and Samani, 1982; Allen et al., 1998; Annandale et al., 2002), and R_a is the extraterrestrial radiation (MJ m^{-2} d^{-1}). In both cases (relative humidity and solar radiation), correlation coefficients were obtained when simulated and measured ET_o values were compared by linear regression. In Table 4, the correlation coefficients for Seville station are shown as an example.

Finally, in the case of wind speed (Table 3), as the amount of missing values was high and as no trend was found in this variable, daily data were replaced with a monthly average value calculated for each weather station using the most consistent series of every location. In this way, the recommended value of 2 ms^{-1} (Allen et al., 1998) was replaced by values more adjusted to the regional and seasonal conditions. The use of a single monthly value for the entire period prevents confusing changes in the values due to changes in the instruments with real climate changes.

The seasonal and annual averages of air temperature, relative humidity, daily sunshine hours and reference evapotranspiration were calculated on a spreadsheet. The following criterion was set to calculate average values and trends: months with more than 5 days with missing values were discarded, and years with one or more months already discarded were also rejected. A similar criterion was used by Roderick and Farquhar (2005) in a study of pan evaporation trends in New Zealand.

2.3. ET_o estimation

ET_o was estimated using five different methods. They were selected because they are commonly used and/or because they have been previously employed to investigate the impact of climate change on ET_o (McKenney and Rosenberg, 1993; Palutikof et al., 1994). This makes the comparison of results easier. These five ET_o estimation methods are briefly described below.

2.3.1. FAO-56 Penman-Monteith equation (PM)

The FAO-56 Penman-Monteith equation (Allen et al., 1998) is a simplification of the original Penman-Monteith equation (Monteith, 1965), and is expressed as:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + 100/T + 273U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (3)$$

where ET_o is the reference evapotranspiration (mm day^{-1}); R_n is net radiation at the crop surface (MJ m^{-2} day^{-1}); G is soil heat flux (MJ m^{-2} day^{-1}); T is mean daily air temperature at 2-m height (°C); U_2 is wind speed at 2-m height (m s^{-1}); e_s is saturation vapour pressure (kPa); e_a is actual vapour pressure (kPa); $(e_s - e_a)$ is saturation vapour pressure deficit (kPa); Δ is the slope of saturated vapour–pressure curve (kPa °C^{-1}); and γ is the psychometric constant (kPa °C^{-1}).

Table 2
Long term annual averages over the entire studied period of the main meteorological variables in the selected weather stations. T_{max}: maximum temperature, T_{min}: minimum temperature, RH: relative humidity, n: number of annual sunshine hours; U_2: wind speed, R: rainfall, ET_o: Penman-Monteith reference evapotranspiration.

Site	T_{max} (°C)	T_{min} (°C)	RH (%)	N (h)	U_2 (m s^{-1})	R (mm year^{-1})	ET_o (mm d^{-1})
Seville	25.0	12.0	66.0	2935	2.2	561	3.8
Córdoba	24.7	10.7	67.2	2872	2.0	616	3.7
Almería	23.3	14.3	68.0	2978	2.8	195	3.6
Morón	24.2	10.6	65.4	2924	2.9	510	4.1
Granada	21.8	8.7	62.9	2773	1.8	371	3.4
Jerez	23.9	11.7	67.7	2977	2.5	601	3.6
Cádiz	21.3	15.1	72.6	3075	2.8	576	3.3
Málaga	22.9	13.4	68.1	2865	2.6	542	3.5

Table 3
Percentage of missing and erroneous data (days without data divided by total days in the entire period of time used for each station × 100) of temperature, relative humidity,sunshine hours and wind speed.

Site	Temperature	Relative humidity	Sunshine hours	Wind speed
Seville	0.5	0.7	0.8	9.7
Córdoba	1.0	1.4	9.3	16.4
Almería	0.0	0.7	0.2	14.4
Morón	0.6	14.4	14.3	34.6
Granada	1.6	5.7	2.6	43.1
Jerez	0.7	95.7	26.8	13.6
Cádiz	1.0	17.2	4.9	21.3
Málaga	1.0	8.4	1.4	0.5

2.3.2. Hargreaves temperature equation (HAR)

The Hargreaves equation (Hargreaves and Samani, 1985) can be written as:

$$ET_o = \alpha \cdot (T + 17.8) \cdot \sqrt{(T_{max} - T_{min})} \cdot R_a \quad (4)$$

where ET_o is the computed reference evapotranspiration (mm day^{-1}); $\alpha = 0.0023$ is the original empirical coefficient proposed by Hargreaves and Samani (1985); T, T_{max} and T_{min} are the daily mean, maximum and minimum air temperature (°C), with T calculated as the average of T_{max} and T_{min}; and R_a is the water equivalent of the extraterrestrial radiation (mm day^{-1}), computed according to Allen et al. (1998).

2.3.3. FAO-24 Radiation method (RAD)

The FAO-24 Radiation equation can be written as follows (Doorenbos and Pruitt, 1977):

$$ET_o = a + bWR_s \quad (5)$$

where a and b are regression coefficients that depend on solar radiation, relative humidity and wind velocity and W is a weighting factor including effects of temperature and altitude (Allen and Pruitt, 1991); R_s is solar radiation (mm day^{-1}).

2.3.4. FAO-24 Blaney-Criddle method (BC)

The Blaney-Criddle method modified by the FAO can be written as follows (Doorenbos and Pruitt, 1977):

$$ET_o = a_b + b_b f \quad (6)$$

where a_b and b_b are coefficients of the linear regression of ET_o on f (Allen and Pruitt, 1991); f is the Blaney-Criddle factor (mm day^{-1}), which is expressed as:

$$f = p(0.46T + 8.13) \quad (7)$$

where p is mean daily percentage of annual daytime hours; T is mean air temperature (°C).

2.3.5. Priestley-Taylor equation (PT)

Priestley and Taylor proposed a method to estimate ET_o from the energy available to evaporate water from the surface by using an empirical factor α (Priestley and Taylor, 1972).

$$\lambda ET_o = \alpha \left[\frac{\Delta (R_n - G)}{\Delta + \gamma} \right] \quad (8)$$

where ET_o is reference evapotranspiration (mm day^{-1}); α is a dimensionless coefficient with a proposed empirical value of 1.26 (Priestley and Taylor, 1972); R_n is net radiation and G is soil heat flux density in MJ m^{-2} day^{-1}; λ is latent heat of vapourization in MJ kg^{-1}; Δ is the slope of the saturated vapour pressure curve and γ is the psychrometric constant (kPa °C^{-1}).

Computation procedures to estimate ET_o were based in all cases on recommendations given in Chapter 3 of the FAO-56 Paper (Allen et al., 1998).

Due to the lack of R_n data, this variable was estimated for PM, PT and RAD methods from solar radiation by using the Angstrom formula (1924), which relates solar radiation to extraterrestrial radiation and relative sunshine duration:

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (9)$$

where R_s is the solar radiation (MJ m^{-2} day^{-1}), n is daily bright sunshine duration (h), N is maximum possible duration of sunshine or daylight hours (h), n/N is relative sunshine duration, R_a is extraterrestrial radiation (MJ m^{-2} day^{-1}), a_s and b_s are regression coefficients. The recommended values $a_s = 0.25$ and $b_s = 0.50$ proposed by Allen et al. (1998) were used in this study.

To estimate ET_o, wind speed measured at a 2 m height is required. To adjust the 10 m height wind speed provided by AEMET, the logarithmic vertical wind speed profile was assumed, as recommended by Allen et al. (1998):

$$U_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} \quad (10)$$

Table 4
Linear regression and determination coefficient (r^2) from comparison between ET_o values (using PM equation) calculated using measured and estimated data of relative humidity and solar radiation for Seville station.

	Relative humidity		Solar Radiation	
	Linear regression coefficient	r^2	Linear regression coefficient	r^2
January	1.16	0.39	0.99	0.99
February	1.08	0.61	0.98	0.97
March	1.02	0.78	1.00	0.96
April	0.99	0.84	1.00	0.91
May	0.98	0.89	0.99	0.92
June	0.97	0.91	0.99	0.88
July	0.97	0.85	0.99	0.91
August	0.98	0.90	0.99	0.91
September	0.98	0.88	1.00	0.94
October	1.03	0.78	0.99	0.97
November	1.11	0.64	0.98	0.99
December	1.19	0.51	0.99	1.00

Table 5
Regional adjustments carried out for the different ET_o estimation methods. DTR: diurnal temperature range ($T_{max} - T_{min}$), U_2: long-term average wind speed, $T_{mx.summ}$: long-term average maximum temperature in summer.

Evapotranspiration method	Regional adjustment
Hargreaves[a]	$\alpha' = 0.0027$
Priestley-Taylor	$\alpha' = \frac{1.26}{(-0.0164 \times DTR + 1.0523)}$
FAO-24 Blaney-Criddle	$f = 1.161 \times \frac{U_2}{T_{mx.summ}} + 0.805$
FAO-24 Radiation	$f = 0.0111 \times T_{mx.summ} + 0.524$

[a] Regional adjustment using Hargreaves equation was uniquely required for Almería, Cádiz and Málaga stations (Gavilán et al., 2006).

where z is the height of measurement above ground surface [m], u_z the wind speed at the height z m and U_2 is the wind speed at a 2 m height.

2.3.6. Local adjustment for ET_o equations

PM estimates were used for local calibration of the rest of the equations. The use of the PM estimates as a reference for these adjustments is sufficiently justified by previous studies (Gavilán et al., 2006).

For the Hargreaves equation, the regional calibration developed by Gavilán et al. (2006) was used. In the case of the Priestley-Taylor equation, the typically used $\alpha = 1.26$ parameter was substituted by a modified daily α', based on the strong correlation found between the long term average diurnal temperature range (DTR) of the eight stations as an independent variable and their corresponding ET_{oPT}/ET_{oPM} ratio. For the Radiation method, it was found that the ET_{oRAD}/ET_{oPM} ratio was highly dependent on a long term average maximum temperature in summer. Thus, based on that relationship, a correction factor was calculated for every station and then used to adjust ET_o. Similarly, for the Blaney-Criddle equation, the relationship between long term mean wind speed and maximum temperature in summer for each station was highly correlated with the corresponding ET_{oBC}/ET_{oPM} ratio. Thus, a correction factor for each station was derived from this correlation. A mathematical description of the adjusted coefficients for each method is shown in Table 5.

2.4. Trend test

The nonparametric Mann-Kendall test was used to detect increasing or decreasing trends in the data series of temperature and relative humidity of the air, solar radiation and ET_o. Thus, the nonparametric Sen method was used for estimating the slope of a linear trend (Sen, 1968). The Mann-Kendall test is one of the most widely used non-parametric tests to detect significant trends in time series (Hamed, 2008), and a conventional procedure for temporal change detection in climate studies (Estebanparra et al., 1995; Wang et al., 2007). This test is based on the statistic S:

$$S = \sum_{z=1}^{N-1} \sum_{j=z+1}^{N} \text{sign}(x_j - x_z) \tag{11}$$

where x_j and x_z are two generic sequential data values of the variable, N is the length of the data set, and the sign(y) takes the following values:

$$\text{sign}(y) = \begin{cases} +1 & \text{if } y > 0 \\ 0, & \text{if } y = 0 \\ -1 & \text{if } y < 0 \end{cases} \tag{12}$$

That is, each pair of observed consecutive values is compared to find out whether or not the second one is larger than the first one.

Therefore, a positive value of S represents a positive trend in the observed data series, and a negative value of S represents a negative trend. Under the null hypothesis of no trend in the data, H_0, the statistic S is approximately normally distributed with the mean $E(S) = 0$. For data sets with more than 10 values, the variance (var_S) associated with the Mann-Kendall statistic S, can be calculated considering the distribution as very close to normal:

$$\sigma_S = \sqrt{var_S} = \sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^{n} t_i i(i-1)(2i+5)}{18}} \tag{13}$$

where t_i is the number of ties of extent i.

Therefore, a normalized test statistic Z can be computed as follows:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma_S}, & \text{if } S > 0 \\ 0, & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sigma_S}, & \text{if } S < 0 \end{cases} \tag{14}$$

To test for a trend at α level of significance, H_0 is rejected if the absolute value of Z is greater than $Z_{1-\alpha/2}$, where $Z_{1-\alpha/2}$ is obtained from the standard normal cumulative distribution tables.

A nonparametric estimate for the magnitude of the slope of the trend is given by the Theil-Sen estimator (Sen, 1968):

$$b = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_z}{j-1}\right) \quad \forall z < j \tag{15}$$

where b is a robust estimate of the slope. For a time series of annual values, b represents the annual increment under the hypothesis of a linear trend. This estimator gives the real slope of the tendency, which can slightly differ from the slope of the trend line obtained by linear regression.

The Mann-Kendall test was applied to seasonal and annual mean series of the available meteorological variables, as well as to the ET_o values estimated by different methods.

3. Results

3.1. Temperature trends

An increase in mean annual temperatures was found for all the analysed locations in the period 1960–2005 (Table 6). Thus, the average slope was 0.028 °C year^{-1} with values ranging between 0.040 °C year^{-1} for Almería and 0.016 °C year^{-1} for Cádiz station. For the majority of the stations, statistically significant increasing trends at the significance level of $\alpha \leq 0.001$ were found. In spite of this positive trend for the complete period, a shift in the behaviour of mean temperatures was observed around 1970. Thus, during the 1960s, a drop in temperatures was detected, especially in Seville, Morón and Cádiz stations (Fig. 1). This is in agreement with previous studies that pointed out a shift in the sign of the temperature trend around 1970 (Guilderson and Schrag, 1998; Brunet et al., 2007; Toreti and Desiato, 2008; Miranda and Tomé, 2009; Pavia et al., 2009). Abanades et al. (2007) characterized three different periods in Spain: 1900–1949 with positive trends in temperature, 1950–1972 with negative trends and 1973–2007 with a new increment of temperatures. In our study, an average trend in mean temperature of 0.047 °C year^{-1} for the period 1970–2005 was detected. Brunet et al. (2007) found a very similar mean temperature trend in Spain (0.048 °C year^{-1}) while Toreti and Desiato (2008) also obtained similar results in Italy. In addition, no spatial patterns in temperature trends were found; thus, coastal stations showed very similar trends to those found for inland stations.

The average temperature analysis was also carried out at a seasonal scale. Thus, the increase in the temperatures was higher and more statistically significant during summer and spring. In autumn and winter there was also an increase, but at a lower significance level (Table 6). This is partially in disagreement with the findings of Brunet et al. (2007), which indicate that the greatest contribu-

Table 6
Sen's slope of the linear trend of annual and seasonal mean, minimum and maximum temperature for the period 1960–2005. Asterisks represent the significance level (α) of the trend according to the Mann-Kendall test.

°C year^{-1}	Seville	Córdoba	Almería[a]	Morón	Granada	Jerez	Cádiz	Málaga[a]
Mean temperature								
Annual	0.039***	0.025***	0.040***	0.029**	0.020**	0.022***	0.016*	0.029***
Winter	0.028**	0.011	0.034***	0.022^{+}	0.016	0.010	0.021^{+}	0.021*
Spring	0.053***	0.034*	0.061***	0.042*	0.024^{+}	0.024^{+}	0.023*	0.031**
Summer	0.048***	0.039***	0.049***	0.032**	0.037**	0.032**	0.021*	0.041***
Autumn	0.028**	0.021*	0.019	0.018	0.012	0.018^{+}	0.010	0.020**
Minimum temperature								
Annual	0.053***	0.032***	0.043***	0.033*	0.008^{+}	0.011^{+}	0.014^{+}	0.028**
Winter	0.032^{+}	0.001	0.036**	0.000	−0.012	−0.012	0.009	0.017
Spring	0.058***	0.040**	0.061***	0.039*	0.014^{+}	0.014***	0.026**	0.032*
Summer	0.074***	0.060***	0.053***	0.055***	0.035***	0.029***	0.034***	0.041***
Autumn	0.048***	0.040***	0.028*	0.016	0.006	0.017^{+}	0.013	0.017
Maximum temperature								
Annual	0.023**	0.020*	0.036***	0.024***	0.031**	0.030***	0.020*	0.030***
Winter	0.027**	0.019*	0.029**	0.037***	0.035**	0.026**	0.032**	0.026**
Spring	0.048***	0.038*	0.058***	0.038*	0.034^{+}	0.034*	0.027^{+}	0.020
Summer	0.028^{+}	0.025^{+}	0.049***	0.015	0.039**	0.037**	0.012	0.040***
Autumn	0.002	−0.004	0.008	0.005	0.011	0.015	0.002	0.022*

Values without symbol are non-significant.
[a] Almería and Málaga data started in 1968 and 1964 respectively.
*** $\alpha \leq 0.001$.
** $\alpha \leq 0.01$.
* $\alpha \leq 0.05$.
$^{+}$ $\alpha \leq 0.1$.

tion to the higher annual warming are winter and summer over the period 1901–2005, and spring and summer for the shorter period 1973–2005. During summer, slopes ranged from 0.049 °C year^{-1} of Almería to 0.021 °C year^{-1} for Cádiz. Todisco and Vergni (2008) found similar results for summer in a study carried out in Italy.

Likewise, analyses for maximum and minimum temperatures were made. The average slopes were very similar, 0.028 °C year^{-1} and 0.027 °C year^{-1}, respectively. This contrasts with the asymmetry of the increase in maximum and minimum temperatures pointed out by several authors (Karl et al., 1993; Easterling et al., 1997; IPCC, 2001). They found faster increments in minimum than in maximum temperatures and, consequently, a decrease in the diurnal range temperature (DTR) for the period 1950–2004. However, this behaviour is not common to all regions, and Vose et al. (2005) found no statistically significant decrease in DTR for the period 1979–2004. In our study area, the Mann Kendall test did not detect similar trends in DTR for the different stations; thus, while for Seville the trend was negative (with a significance level of $\alpha \leq 0.01$), for Granada this trend was positive (also with a significance level of $\alpha \leq 0.01$) (Table 7). Regarding the seasonal analysis, in the case of minimum temperatures, summer was the period with most significant increases ($\alpha \leq 0.001$) for all the analysed weather stations (Table 6). Thus, in Seville, the slope reached 0.074 °C year^{-1} in that season. For other seasons, increases were also detected, although at a lower significance level. On the other hand, winter, spring and summer were the periods with the most significant

Table 7
Sen's slope of the linear trend of annual and seasonal diurnal range of temperature ($T_{max} - T_{min}$) for the period 1960–2005. Asterisks represent the significance level (α) of the trend according to the Mann-Kendall test.

Diurnal Temperature Range (°C year^{-1})	Seville	Córdoba	Almería[a]	Morón	Granada	Jerez	Cádiz	Málaga[a]
Annual	−0.030**	−0.016^{+}	−0.007	−0.001	0.021**	0.016*	0.000	0.003
Winter	0.001	0.02	−0.005	0.046*	0.047**	0.038*	0.023*	0.013
Spring	−0.011	−0.002	−0.005	0.01	0.022^{+}	0.014	−0.001	−0.009
Summer	−0.046***	−0.029*	−0.009	−0.028**	0.006	0.008	−0.021*	0.001
Autumn	−0.047**	−0.044*	−0.020^{+}	−0.012	0.007	0.000	−0.012^{+}	0.009

Values without symbol are non-significant.
[a] Almería and Málaga data started in 1968 and 1964 respectively.
*** $\alpha \leq 0.001$.
** $\alpha \leq 0.01$.
* $\alpha \leq 0.05$.
$^{+}$ $\alpha \leq 0.1$.

Table 8
Sen's slope of the linear trend of annual solar radiation for the period 1960–2005. Asterisks represent the significance level (α) of the trend according to the Mann-Kendall test.

Solar radiation (MJ m^{-2} day^{-1} year^{-1})	Seville	Córdoba	Almería[a]	Morón	Granada	Jerez	Cádiz	Málaga[a]
Annual	−0.006	0.015**	0.005	0.010^{+}	0.030***	−0.026***	−0.017*	0.016*

Values without symbol are non-significant.
[a] Almería and Málaga data started in 1968 and 1964 respectively.
*** $\alpha \leq 0.001$.
** $\alpha \leq 0.01$.
* $\alpha \leq 0.05$.
$^{+}$ $\alpha \leq 0.1$.

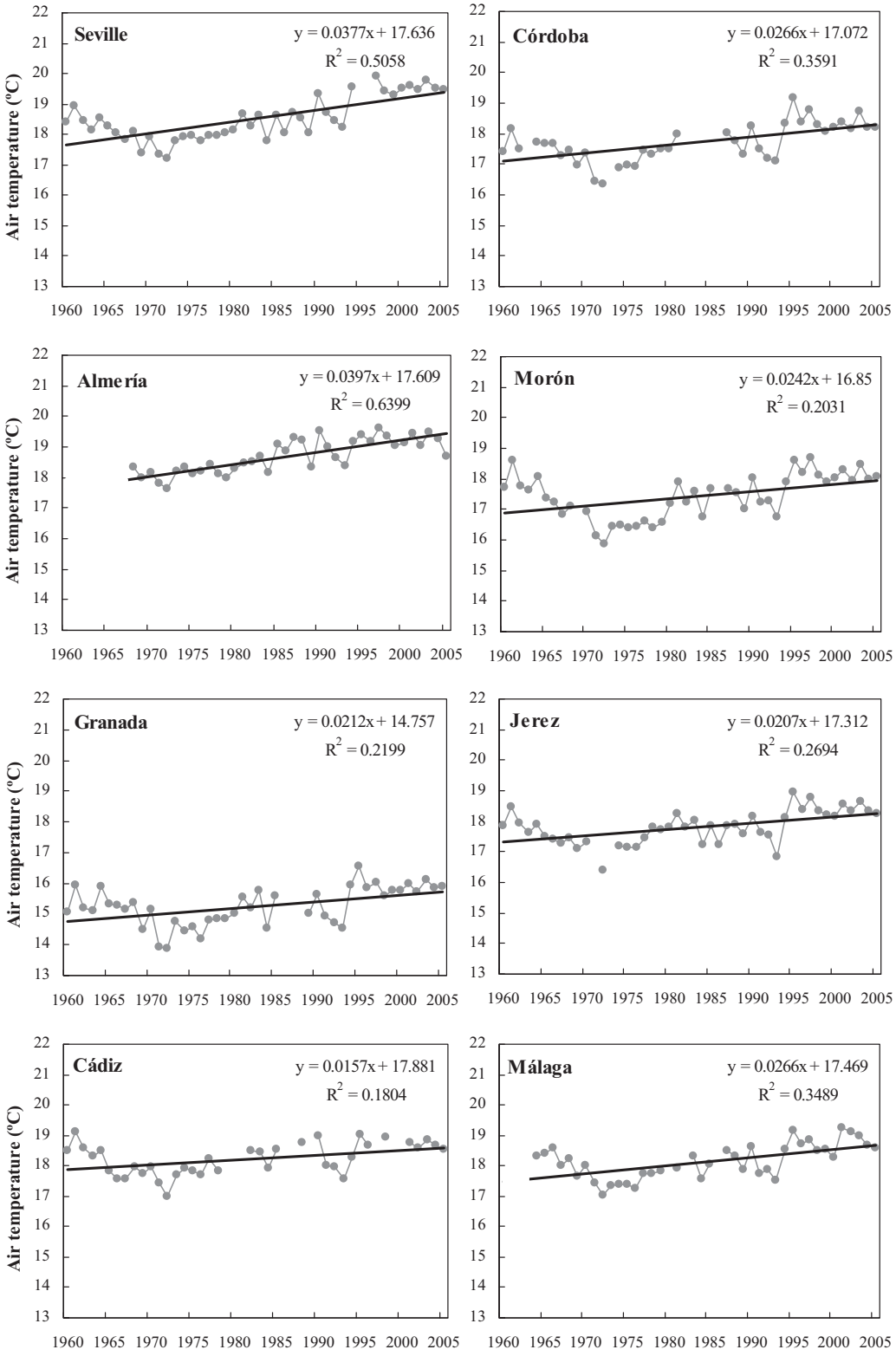


Fig. 1. Trends of average annual temperature during the period 1960–2005 for the selected weather stations.

maximum temperature increases, while for autumn the changes detected were not significant.

3.2. Solar radiation trends

Long-term data available for solar radiation are commonly found as number of hours of bright sunshine. In this analysis, when number of sunshine hour data was not available, we estimated solar radiation using the Eqs. (2) and (9). Different solar radiation trends were obtained for the different stations under study during the period 1960–2005, and so both, increasing and decreasing trends were found. Jerez and Granada stations stand out from the rest, with very significant ($\alpha \leq 0.001$) positive and negative trends, respectively (Table 8). However, solar radiation data for an extended

period of analysis for Seville (1951–2005), Granada (1951–2005) and Jerez (1952–2005) stations fitted a second order polynomial curve very well (Fig. 2). This suggested, according to previous studies (Stanhill and Cohen, 2001; Wild et al., 2005), that solar radiation first decreased and then started to increase. This effect, usually called global dimming, is probably caused by man made aerosols and other air pollutants that have changed the optical properties of the atmosphere, in particular those of clouds (Stanhill and Cohen, 2001). As the inflection point was found around 1982 (Fig. 2), the Mann-Kendall trend test was carried out again for solar radiation data from the whole set of stations, before and after the inflection year and with the extended period of analysis previously described. Thus, in the first period, a drop in the radiation was detected for all the stations except Cádiz (Table 9). This drop in the radiation showed a high significance level for some weather stations (Seville, Granada, Jerez) and was around 3% per decade from 1950 to 1980, similar to previous analyses that reported a global mean decrease of 2.7% per decade (Stanhill and Cohen, 2001). From 1982, a clear linear trend indicated a consistent increase in the radiation. The slope of that increase was similar for the eight weather stations analysed (around 0.04 MJ m^{-2} day^{-1} $year^{-1}$). In all cases, this increase was statistically significant, with a significance level of $\alpha \leq 0.001$ for Morón and Málaga. Previous works also detected a similar recovery of the solar radiation as from the 1980s, after a decrease between 1950 and 1980 (Wild, 2009). At the seasonal scale, summer showed the greatest decreases and increases over the periods 1950–1982 and 1982–2005, respectively (Table 9).

3.3. Relative humidity trends

Minimum and maximum values of relative humidity (RH) have been analysed for seven weather stations (accurate values for this variable were not available at Jerez station). A clear drop for the relative humidity values was detected (Table 10 and Fig. 3). For minimum RH, a significant trend was found ($\alpha \leq 0.001$) for the Seville and Granada stations, while for Córdoba and Almería the significance level was lower. The maximum RH had similar trends but with a higher significance level ($\alpha \leq 0.001$ for Seville, Córdoba, Almería and Granada stations). These results are in agreement with those from previous studies (Mozny et al., 2009) and this could be due to the different thermal regimes (higher temperature records) (Elgaali et al., 2007).

No spatial differences in trends were detected when comparing coastal and inland stations.

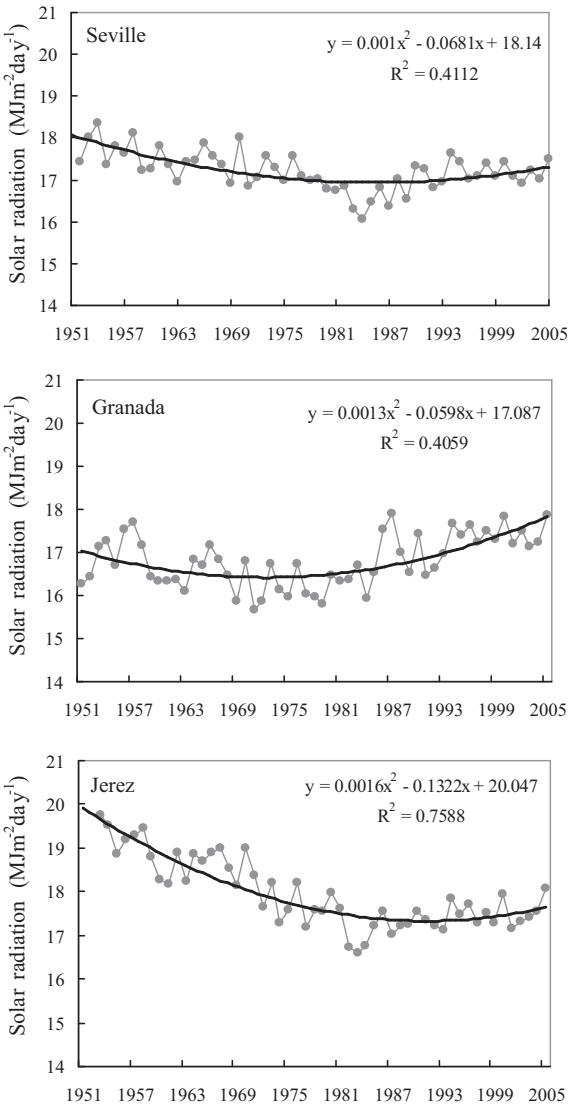


Fig. 2. Trends of average annual solar radiation during the period 1950–2005 for Seville, Granada and Jerez weather stations.

Table 9
Sen's slope of the linear trend of annual solar radiation for the periods 1950[a]–1982 and 1982–2005. Asterisks represent the significance level (α) of the trend according to the Mann-Kendall test.

Solar radiation ($MJm^{-2}day^{-1}$ per year)	Seville	Córdoba	Almería	Morón	Granada	Jerez	Cádiz	Málaga
1950[a]–1982								
Annual	−0.028**	−0.004	−0.005	−0.002	−0.027*	−0.071***	0.017	−0.028
Winter	0.000	0.047	−0.010	0.015	0.011	−0.017	0.019	0.038
Spring	−0.025	−0.118+	0.000	−0.028	−0.039	−0.132***	−0.051	−0.099*
Summer	−0.077***	−0.042*	−0.053	−0.033*	−0.050***	−0.062***	−0.013	−0.069**
Autumn	−0.001	0.011	−0.001	−0.003	−0.014	−0.061**	0.038	0.007
1982–2005								
Annual	0.036**	0.051**	0.024*	0.044***	0.045*	0.033**	0.054**	0.040***
Winter	0.032	0.154**	0.005	0.033	0.039+	0.020	0.048+	0.016
Spring	0.020	0.093*	0.049+	0.036+	0.051+	0.034	0.055*	0.061**
Summer	0.066**	0.181***	0.031*	0.095**	0.079***	0.061**	0.065	0.066**
Autumn	0.009	0.079**	0.002	0.025	0.004	−0.005	0.024*	0.018

Values without symbol are non-significant.
[a] Sevilla, Granada: 1951; Jerez: 1953; Cádiz: 1956; Morón: 1957; Córdoba: 1960; Málaga: 1961; Almería: 1968.
*** $\alpha \leq 0.001$.
** $\alpha \leq 0.01$.
* $\alpha \leq 0.05$.
+ $\alpha \leq 0.1$.

Table 10
Sen's slope of the linear trend of annual and seasonal mean, minimum and maximum relative humidity for the period 1960–2005. Asterisks represent the significance level (α) of the trend according to the Mann-Kendall test.

% per year	Seville	Córdoba	Almería[a]	Morón	Granada	Jerez	Cádiz	Málaga[a]
Mean relative humidity								
Annual	−0.23***	−0.15***	−0.13***	−0.03	−0.19***	–	−0.01	−0.04
Winter	−0.19**	−0.11+	−0.04	0.06	−0.14**	–	−0.07	−0.04
Spring	−0.28***	−0.15**	−0.13+	−0.12*	−0.22***	–	0.00	−0.03
Summer	−0.28***	−0.24***	−0.15***	−0.14	−0.30***	–	−0.02	−0.13*
Autumn	−0.08	−0.09+	−0.09*	0.060	−0.10+	–	−0.02	−0.03
Minimum relative humidity								
Annual	−0.20***	−0.09*	−0.12**	−0.02	−0.20***	–	−0.02	0.02
Winter	−0.19*	−0.150	−0.040	0.090	−0.23**	–	−0.09+	0.010
Spring	−0.25***	−0.15*	−0.11+	−0.20*	−0.26***	–	0.000	−0.010
Summer	−0.18***	−0.10*	−0.15**	−0.060	−0.17***	–	−0.010	−0.040
Autumn	−0.05	−0.030	−0.09+	0.060	−0.110	–	0.000	0.010
Maximum relative humidity								
Annual	−0.25***	−0.18***	−0.12***	−0.04	−0.18***	–	−0.01	−0.10**
Winter	−0.18**	−0.09***	−0.040	0.000	−0.05*	–	−0.05+	−0.09
Spring	−0.032***	−0.12**	−0.11*	−0.080	−0.17***	–	0.000	−0.12*
Summer	−0.37***	−0.36***	−0.16***	−0.17***	−0.40***	–	−0.020	−0.17**
Autumn	−0.13*	−0.13**	−0.07	0.06	−0.11*	–	0.010	−0.03

Values without symbol are non-significant.
[a] Almería and Málaga data started in 1968 and 1964 respectively.
*** $\alpha \leq 0.001$.
** $\alpha \leq 0.01$.
* $\alpha \leq 0.05$.
+ $\alpha \leq 0.1$.

Table 11
Sen's slope of the linear trend of annual and seasonal ET_o for the period 1960–2005 calculated using different estimation methods. Asterisks represent the significance level (α) of the trend according to the Mann-Kendall test.

mmday^{-1} per year	Seville	Córdoba	Almería[a]	Morón	Granada	Jerez	Cádiz	Málaga[a]
Penman-Monteith								
Annual	0.009***	0.006**	0.010***	0.001	0.008***	0.006***	0.005*	0.007***
Winter	0.009***	0.0039*	0.003*	−0.005	0.003	0.005	0.008	0.004
Spring	0.016***	0.007+	0.016***	0.004	0.011**	0.008**	0.009**	0.007*
Summer	0.010**	0.011***	0.014***	0.001*	0.016***	0.011***	−0.002	0.013***
Autumn	0.002	0.001	0.004	−0.003	0.004	0.001	0.006	0.004
Hargreaves								
Annual	0.000	0.001	0.002	0.001	0.004*	0.004**	0.000	0.003***
Winter	0.002*	0.003	0.001	0.004	0.004	0.004	0.003	0.002
Spring	0.004	0.002	0.005*	0.005+	0.005	0.005*	0.003	0.000
Summer	−0.001	0.002	0.004	0.000	0.007*	0.007*	−0.005	0.006***
Autumn	−0.004	−0.004	−0.003	−0.001	0.000	0.000	−0.002	0.003
Blaney-Criddle								
Annual	0.014***	0.010***	0.013***	0.004	0.013***	0.004**	−0.004	0.007***
Winter	0.011***	0.007**	0.005**	−0.001	0.004*	0.002	0.003*	0.003
Spring	0.021***	0.012*	0.021***	0.006	0.016**	0.001	0.000	0.006
Summer	0.018***	0.018**	0.019***	0.012*	0.023***	−0.002	−0.013	0.013***
Autumn	0.004	0.004	0.005+	−0.002	0.008**	−0.005	−0.002	0.003
Priestley-Taylor								
Annual	−0.002	0.002+	0.0027**	0.002	0.002*	−0.004	−0.006	0.001
Winter	0.000	0.001	0.001	0.002**	0.001	0.000	0.001*	0.000
Spring	0.002	0.006*	0.001***	0.002	0.006**	−0.004	0.001	0.004+
Summer	−0.002	0.001	0.001	0.001	0.004+	−0.009**	−0.016**	0.000
Autumn	−0.002	0.000	0.000	0.001	0.002**	−0.004**	−0.001	0.000
Radiation								
Annual	0.007***	0.010***	0.010***	0.005*	0.014***	−0.005	−0.005	0.009***
Winter	0.006**	0.006*	0.002	0.003+	0.004*	0.000	0.005*	0.004
Spring	0.015**	0.011*	0.021***	0.005	0.019***	−0.005	0.000	0.010*
Summer	0.009+	0.015**	0.012*	0.013**	0.023***	−0.011**	−0.018**	0.013***
Autumn	0.001	0.003	0.001	0.000	0.009***	−0.007*	−0.001	0.004

Values without symbol are non-non-significant.
[a] Almería and Málaga data started in 1968 and 1964 respectively.
*** $\alpha \leq 0.001$.
** $\alpha \leq 0.01$.
* $\alpha \leq 0.05$.
+ $\alpha \leq 0.1$.

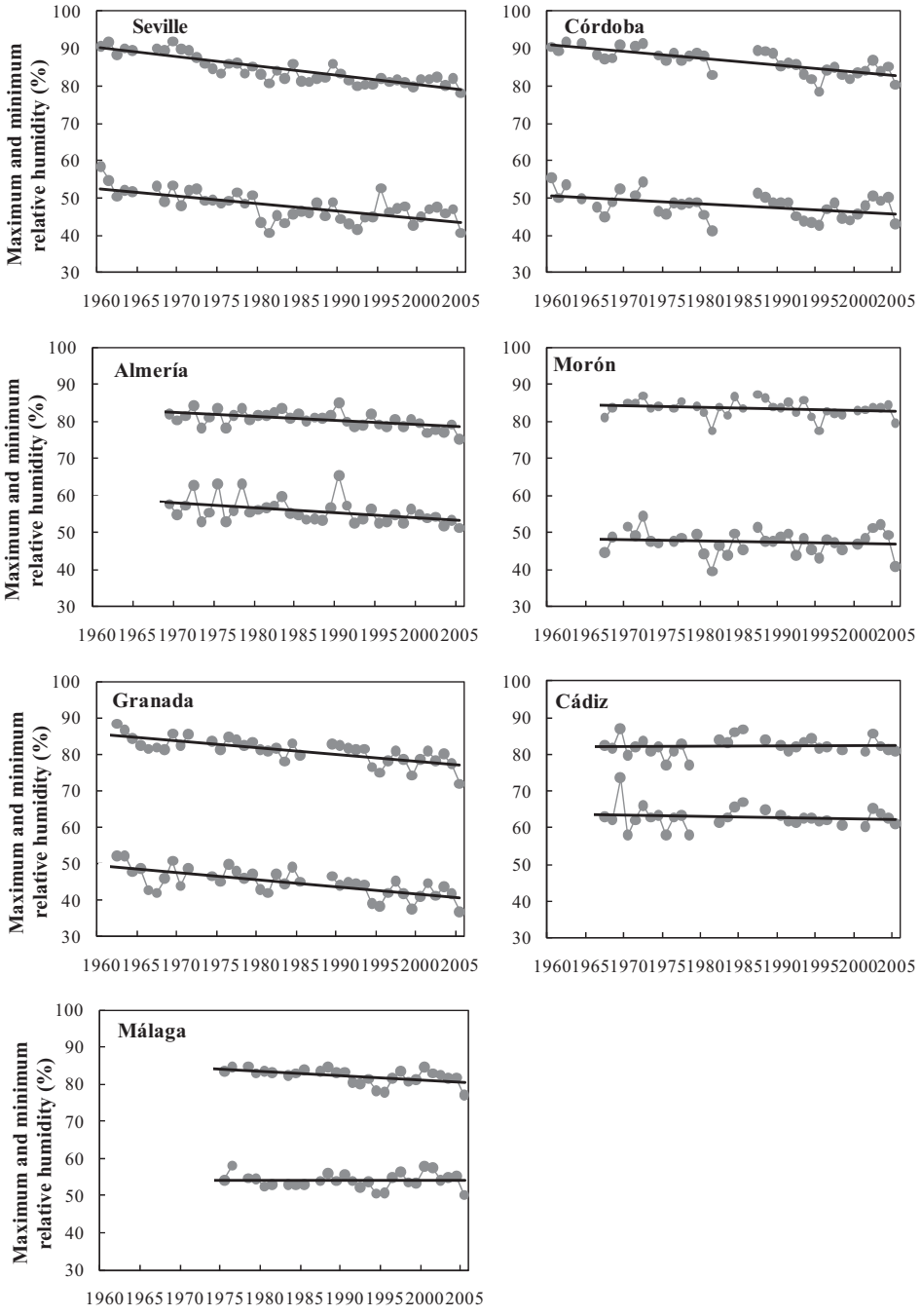


Fig. 3. Trends of average annual maximum and minimum relative humidity during the period 1960–2005.

3.4. Evapotranspiration trends

Due to the increases in temperature and solar radiation, and the decrease in the relative humidity of the air, an increase in ET_o for the analysed weather stations was detected (Table 11). Using the PM equation, a significant ET_o increase was found for the weather stations considered (Fig. 4). Thus, for most of the stations the increase was statistically significant ($\alpha \leq 0.001$).

Table 12
Linear regression coefficient and determination coefficients (r^2) from comparison between ET_o values using PM equation and ET_o values using alternative methods.

ET_o Method	Seville		Córdoba		Almería		Morón		Granada		Jerez		Cádiz		Málaga	
	b	r^2	*b*	r^2	*b*	r^2	*b*	r^2	*b*	r^2	*b*	r^2	*b*	r^2	*b*	r^2
Hargreaves	1.00	0.99	1.03	0.99	0.84	0.96	0.92	0.98	1.01	0.99	1.01	0.99	0.77	0.96	0.98	0.97
Radiation	1.13	0.99	1.11	0.99	1.16	0.95	1.05	0.99	1.17	0.99	1.16	0.97	1.23	0.98	1.17	0.98
Blaney-Criddle	1.15	0.99	1.14	0.99	1.08	0.98	1.08	0.99	1.12	0.98	1.18	0.98	1.08	0.99	1.10	0.99
Priestley-Taylor	0.83	0.95	0.81	0.97	0.90	0.88	0.74	0.93	0.84	0.96	0.93	0.98	0.99	0.91	0.91	0.91

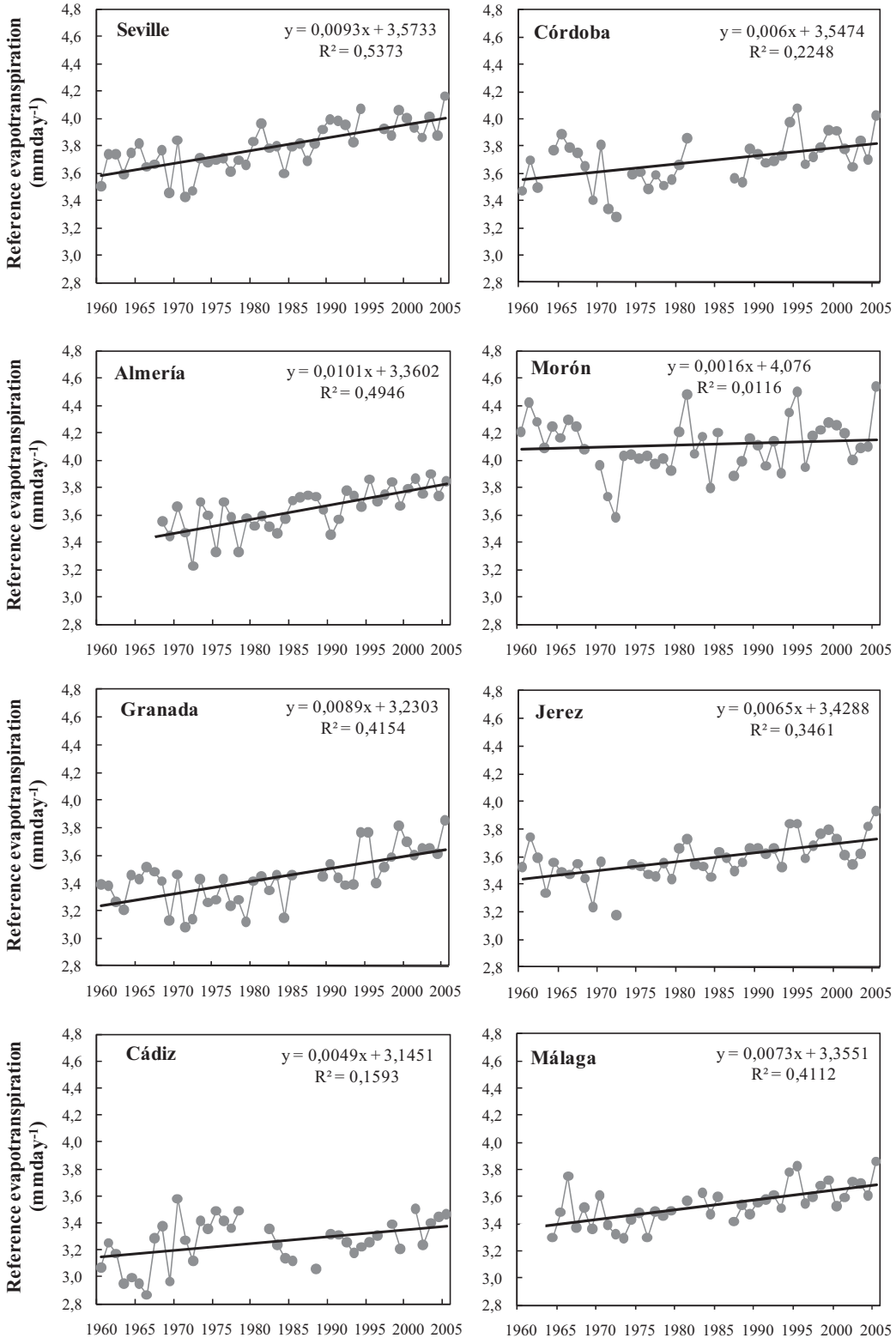


Fig. 4. Trends of average annual ET_o using Penman-Monteith FAO-56 equation during the period 1960–2005.

However, no trend was found for Morón, and a small tendency was found for Cádiz station with a low significance level. These anomalous trends could be due to the combination of two effects. First, these stations presented the strongest decrease in temperature during the 1960s, compensated by the increments in this variable as from 1970. Secondly, as in these stations no trends of relative humidity were found (Table 10 and Fig. 3), the effect of decreasing humidity on ET_o, observed in other stations (Seville, Córdoba, Almería and Granada) was not present in this case.

The maximum ET_o increase reached 0.010 mm day^{-1} year^{-1} (around 3.5 mm year^{-1}) for Almería station. Analysing by seasons,

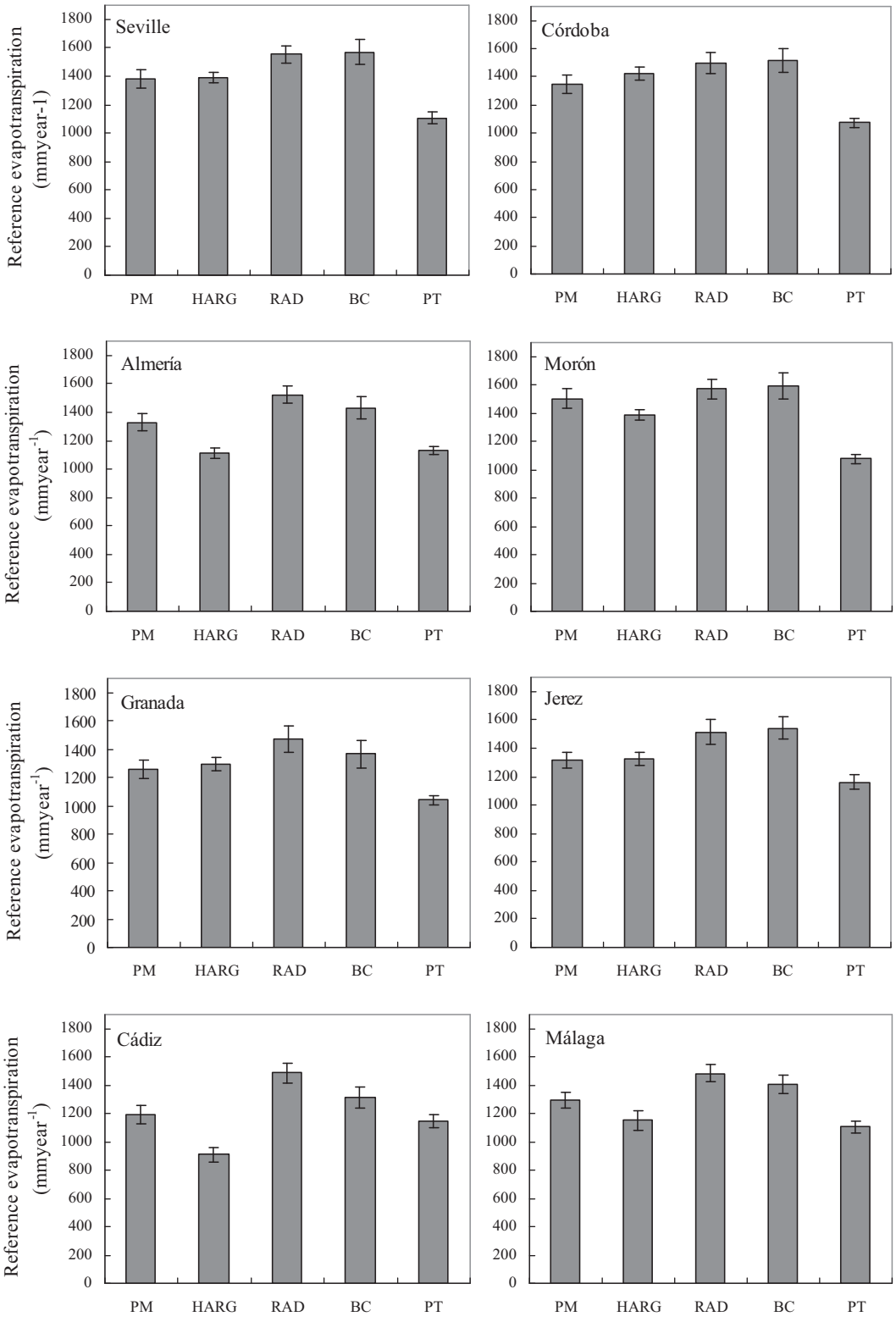


Fig. 5. Average and standard deviation (in bars) of ET_o for each calculation method before regional adjustment.

spring and summer showed higher increases while for autumn no statistical trends were detected and for winter only three stations (Seville, Córdoba and Almería) had a significant ET_o increase (Table 11). In some stations, ET_o decreased during the first years of the analysed period, coinciding with the decrease in temperature. So, from the beginning of the 1970s, the ET_o increment has been constant (Fig. 4), in spite of the fall in radiation rates reported previously before the 1980s (Table 9); this is probably because it has a lesser effect on ET_o computation than the decrease in relative humidity and the increase in the temperatures. This agrees with the results obtained by Estévez et al. (2009) from the sensitivity analysis of the PM equation in Andalusia, which showed smaller sensitivity coefficients for solar radiation than for temperature and relative humidity.

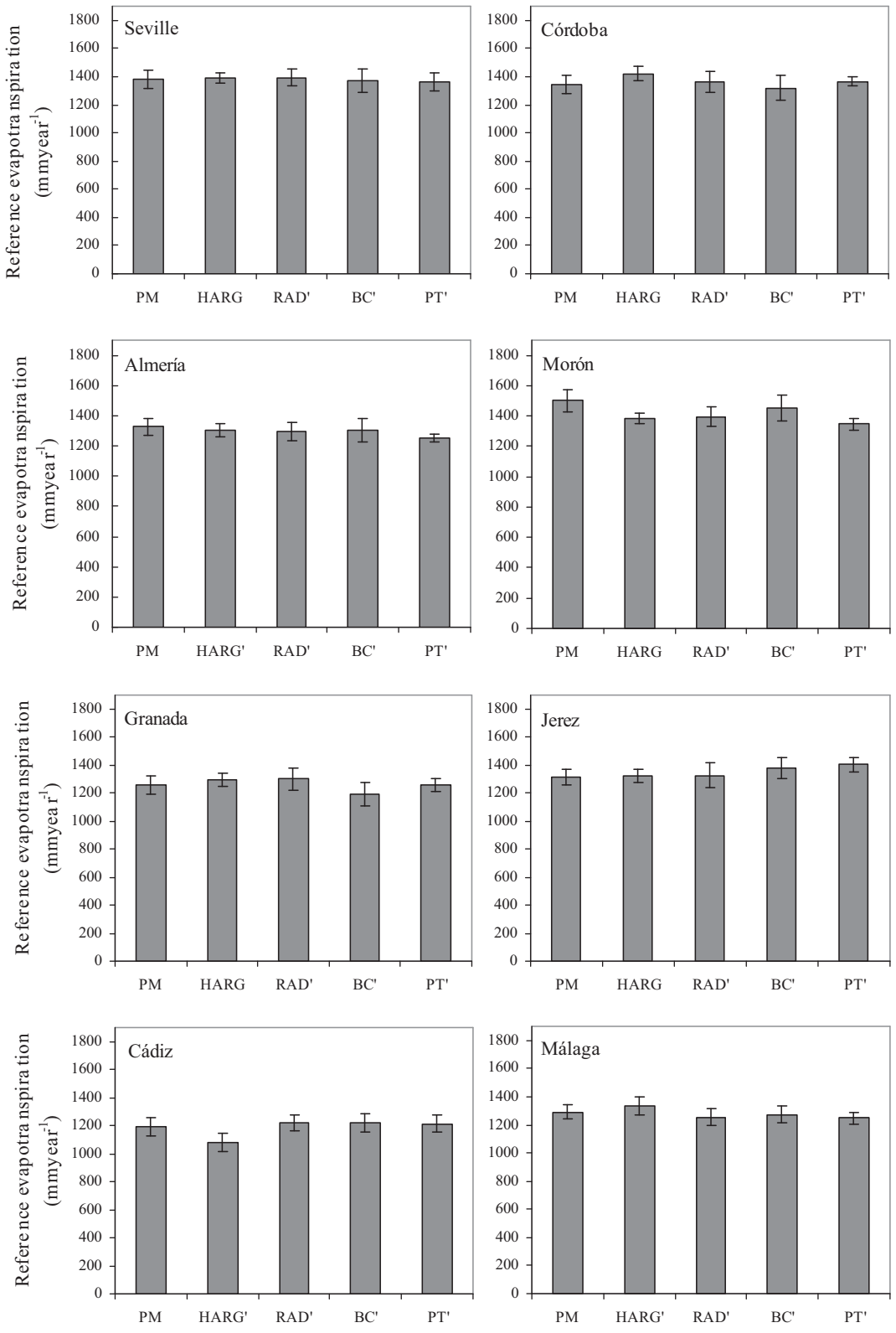


Fig. 6. Average and standard deviation (in bars) of ET_o for each calculation method after regional adjustment.

3.5. ET_o method comparison

To avoid the problems derived from the high data requirements of the PM equation, other equations with fewer data requirements were analysed in this study. Thus, monthly PM ET_o values for each weather station were compared with calculations from the other alternative methods by using simple linear regression analysis. PM values were taken as the independent variable, and those from the alternative methods as the dependent variable. The ET_o values obtained using RAD and BC methods were significantly higher than PM ET_o values, up to 15% and 12%, respectively. On the contrary, the PT method gave ET_o values of up to 13% lower than PM-ET_o. How-

Table 13
Linear regression coefficient and determination coefficients (r^2) from comparison between ET_o values using PM equation and ET_o values using regionally adjusted alternative methods.

ET_o Method	Seville		Córdoba		Almería		Morón		Granada		Jerez		Cádiz		Málaga	
	b	r^2	*b*	r^2	*b*	r^2	*b*	r^2	*b*	r^2	*b*	r^2	*b*	r^2	*b*	r^2
Hargreaves	[a]	[a]	[a]	[a]	0.99	0.96	[a]	[a]	[a]	[a]	[a]	[a]	0.90	0.93	1.04	0.97
Radiation	1.01	0.99	1.00	0.99	0.99	0.98	0.94	0.99	1.03	0.99	1.02	0.97	1.03	0.97	0.99	0.98
Blaney-Criddle	1.01	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	1.06	0.98	1.00	0.99	0.99	0.98
Priestley-Taylor	1.03	0.95	1.05	0.97	1.00	0.88	0.94	0.93	1.04	0.97	1.14	0.93	1.05	0.92	1.03	0.91

[a] Following Gavilán et al. (2006) it was not required any correction for the marked stations.

ever, HAR yielded ET_o values very close to PM, with the deviation between the two methods being around 5% (Table 12).

Due to the differences between PM and the rest of the methods, a regional adjustment was made for HAR, PT, BC and RAD equations. Average ET_o values estimated using the original and adjusted equations, and their variability in the period 1960–2005 in terms of standard deviation, are presented in Figs. 5 and 6, respectively. The adjustments carried out gave ET_o estimations very close to those obtained using the PM equation (Table 13 and Fig. 6). Thus, the lineal regression coefficient between BC ET_o and PM estimations was around 0.99 for all the stations except for Jerez, where a deviation around 6% was found. Similar differences were detected for RAD, HAR, and PT (average coefficients equal to 1.0, 0.99 and 1.04, respectively). As an example, adjusted monthly ET_o values for the Almería station are presented in Fig. 7. It is worth noting the adjustment carried out for BC equation, with monthly and daily ET_o estimations very close to those determined with PM (Figs. 7 and 8, respectively).

In relation to ET_o trends, in accordance with earlier studies (McKenney and Rosenberg, 1993; Donohue et al., 2010), we consider PM trends as being the most realistic because it is the equation that incorporates the most climate variables. Original Hargreaves (HAR) and Priestley-Taylor (PT) equations did not show any trend, while Blaney-Criddle (BC) and Radiation (RAD) showed a similar behaviour as Penman-Monteith (PM), although the slopes were different in some stations to those found for PM (Table 11 and Fig. 9). The ET_o adjusted values (Table 5) did not affect ET_o trends. This is because the correction factor is the same for the whole range.

4. Discussion and conclusion

The present study has quantified changes in a set of meteorological variables and in ET_o under the weather conditions of Andalusia during the last 45 years. Trends in temperature were found with rates of 0.28 °C decade^{-1} (0.16–0.40 °C decade^{-1}) (Table 6), higher

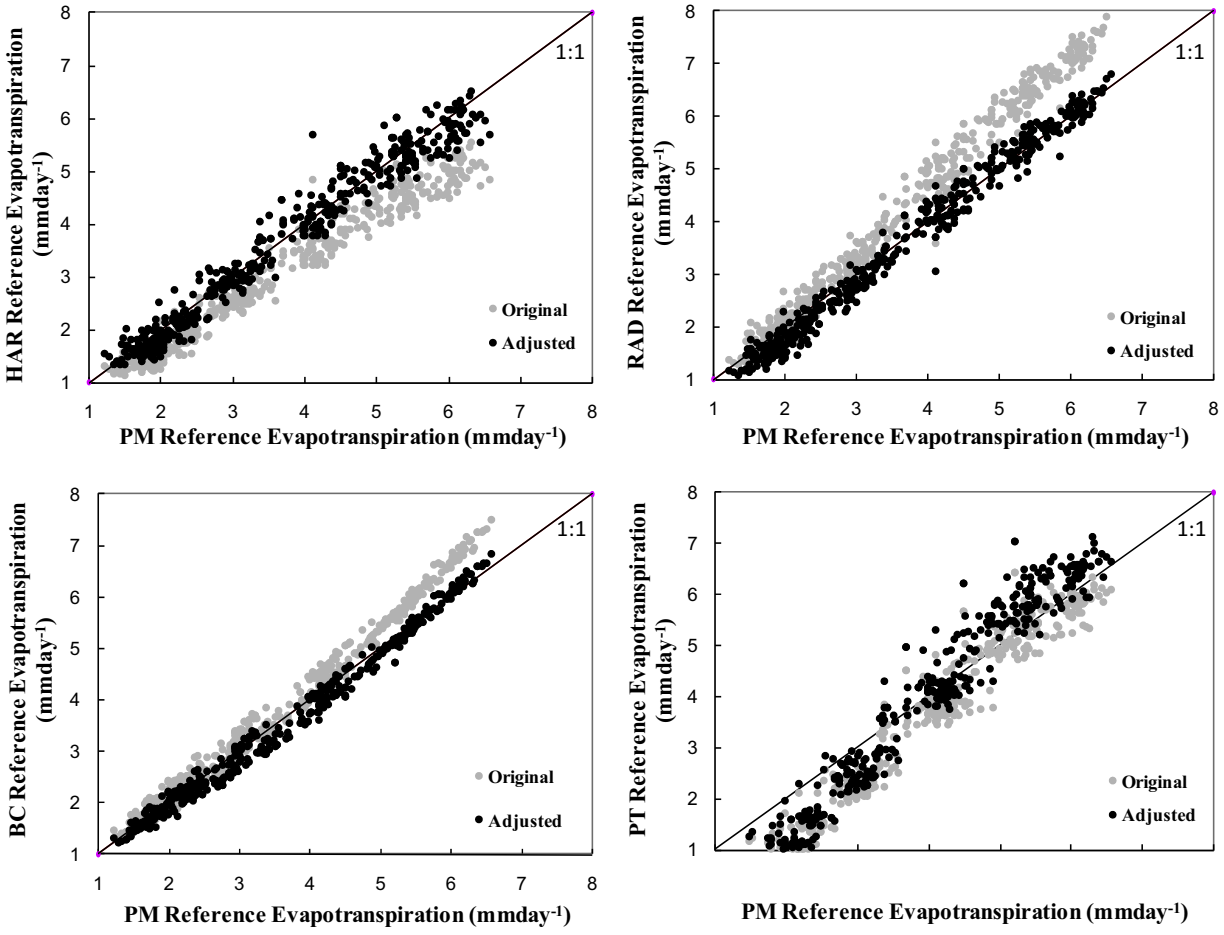


Fig. 7. Monthly PM-ET_o values versus alternative method ET_o values for Almería station for the period 1968–2005. Line 1:1 is presented to facilitate the interpretation.

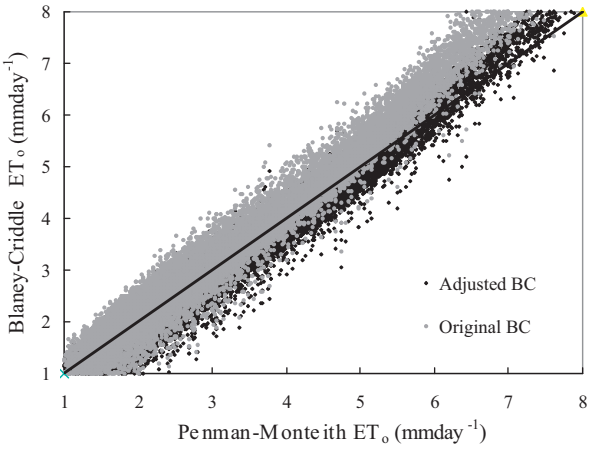


Fig. 8. Daily Blaney-Criddle ET_o values versus daily Penman-Monteith ET_o values for the period 1968–2005 in the Almería station.

than that of the global change, i.e. 0.13 °C decade^{-1} (IPCC, 2007). This is in agreement with other authors (Giorgi and Lionello, 2008; IPCC, 2007) who pointed to the Mediterranean basin as being one of the most sensitive areas to climate change. Trends in the other climate variables affecting ET_o have also been detected. Solar radiation showed behaviour for Andalusia that agrees with the concept of global dimming described by Stanhill and Cohen (2001) and Wild et al. (2005), firstly decreasing until around 1980 and then increasing until 2005 (Table 9). In the case of relative humidity, a decrease was observed for the whole set of stations (except for Jerez, where no data were available) (Table 10).

As a result of these changes in the climate variables, annual values of ET_o calculated using the Penman-Monteith equation showed a positive trend (annual ET_o has been increasing by around 2.4 mm year^{-1} as from 1960, ranging from 0.4 to 3.7 mm year^{-1}). ET_o trends observed under Andalusian conditions have been compared with previous studies under similar climate conditions. A recent study carried out in France (Chaouche et al., 2010) found very similar temperatures (0.2–0.41 °C decade^{-1}) and ET_o trends (1.6–4 mm year^{-1}), while Cohen et al. (2002) found positive trends in pan evapotranspiration in Israel, but not in reference evapotranspiration calculated by Penman-Monteith equation. Even though the Penman-Monteith equation has proved to be the most accurate procedure under semi-arid Mediterranean conditions (Berengena and Gavilán, 2005; López-Urrea et al., 2006), its extensive use has been limited due to the lack of availability of climate data.

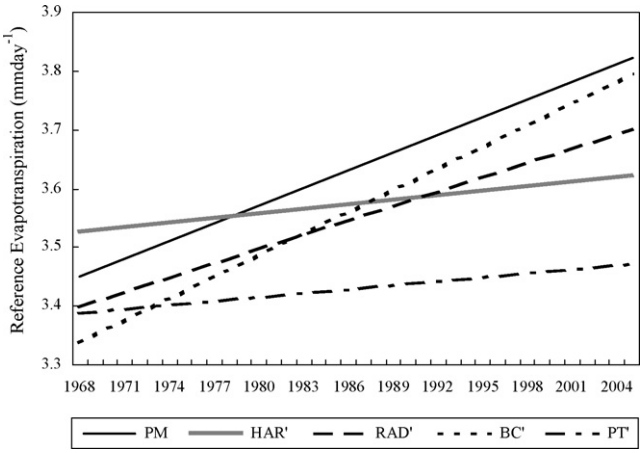


Fig. 9. Comparison of ET_o trends during the period 1968–2005 using PM equation and the other methods after regional adjustment in the Almería station.

The ability to reproduce ET_o average values, as well as trends in ET_o, of several alternative methods with fewer data requirements has also been tested in this study. According to other studies (Martínez-Cob, 2002), the ET_o estimation method that compared best with Penman-Monteith (PM) was Hargreaves (HAR), while Radiation (RAD) and Blaney-Criddle (BC) overestimated PM values by up to 15%. On the other hand, Priestley-Taylor (PT) values were around 13% lower than PM. However, in spite of its goodness in estimating average values of ET_o, the Hargreaves method failed when representing trends for that variable. For some stations, the decrease observed in the diurnal temperature range ($DTR = T_{max} - T_{min}$) (Table 7), compensating for the increase in temperature, could be the main reason for this wrong estimation. This fact indicated the need for introducing some other meteorological variables, apart from temperature, to detect tendencies in ET_o. Indeed, the methods that take into account solar radiation (BC, RAD) succeeded in detecting trends in ET_o in a similar way as when using the PM method. Nevertheless, as the methods have a highly empirical base, adjustments to local conditions are needed to obtain more accurate ET_o estimates. Therefore, a regional adjustment was applied, reaching average ET_o values very close to PM-ET_o values, which was used as the reference.

From the results obtained in this study, Blaney-Criddle and Radiation methods could be considered as being good alternatives to the PM equation for an accurate ET_o estimation, the base for the calculation of crop irrigation demands. In any case, it is important to indicate that the adjustments made in this analysis were done for the weather conditions found in Andalusia. A local/regional adjustment would be required for other areas, mainly those with climate conditions differing substantially from those of the present study. From these ET_o estimates, and using adequate crop coefficients (Doorenbos and Pruitt, 1977; Allen et al., 1998), irrigation schedules can be defined. In addition, it could be of great help to simulating optimisation procedures under water restrictions. Obviously, other weather variables such as rainfall or extreme temperatures will also have a significant impact on irrigation management in the future.

With the results provided in this study, agronomic effects due to changes in ET_o could be inferred for irrigated agriculture in Andalusia. Thus, the increase in ET_o would increase irrigation requirements if crop coefficient curves were not affected by the weather conditions. In addition, it would be expected for the crop cycle to begin earlier due to the temperature increase during the winter/spring season (Table 6). This hypothetical change would preclude the growth of the crops during summer time, reducing the irrigation requirements under semiarid conditions with rainless and high ET demand summers. In relation to this, Döll (2002) estimated a decrease in irrigation requirements in Spain for 2020 due to the possibility of sowing earlier in time when the temperature regime is more favourable (higher temperatures).

Finally, further analyses on the agronomic consequences of climate change in semi-arid environments such as that found in Andalusia are in process, studying the interactions of the different components in the determination of crop irrigation requirements.

Acknowledgements

The study was supported by the grant INIA-RTA08-0006-C1 from the Spanish Ministry of Education and Science.

References

Abanades, J.C., Cuadrat, J.M., Castro, M., Fernández, F., Gallastegui, C., Garrote, L., Jiménez, L.M., Juliá, R., Losada, I.J., Monzón, A., Moreno, J.M., 2007. El cambio climático en España. Estado de situación. Technical report for Spanish government (available at http://www.mma.es/portal/secciones/cambio_climatico/documentacion_cc/divulgacion/pdf/ad_hoc_resumen.pdf).

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome.
Allen, R.G., Pruitt, W.O., 1991. FAO-24 Reference evapotranspiration factors. J. Irrig. Drainage Eng. ASCE 117 (5), 758–774.
Allen, R.G., 1996. Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation. J. Irrig. Drainage Eng. ASCE 122 (2), 97–106.
Allen, R.G., Jensen, M.E., Wright, J.L., Burman, R.D., 1989. Operational estimates of reference evapotranspiration. Agron. J. 81, 650–662.
Angstrom, A., 1924. Solar and terrestrial radiation. Q. J. R. Meterol. Soc. 50, 121–125.
Annandale, J.G., Jovanovic, N.Z., Benade, N., Allen, R.G., 2002. Software for missing data error analysis of Penman-Monteith reference evapotranspiration. Irrig. Sci. 21 (2), 57–67.
ASCE Environmental and Water Resources Institute (ASCE-EWRI), 2004. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. Standardization of Reference Evapotranspiration Task Committee Final Rep., Reston, VA.
Berengena, J., Gavilán, P., 2005. Reference evapotranspiration estimation in a highly advective semiarid environment. J. Irrig. Drain. Eng. ASCE 131 (2), 147–163.
Blaney, H.F., Criddle, W.D., 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data, USDA SCSTP-96. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC.
Brunet, M., Jones, P.D., Sigró, J., Saladié, O., Aguilar, E., Moberg, A., Della-Marta, P.M., Lister, D., Walther, A., López, D., 2007. Temporal and spatial temperatura variability and change over Spain during 1850–2005. J. Geophys. Res. 112, D12117.
CAP (Consejería de Agricultura y Pesca), 2007. Anuario de estadísticas agrarias y pesqueras año 2007. Servicio de estudios y estadísticas.
Castro, 2009. Escenarios regionalizados de cambio climático en España y métodos de aplicación para evaluar impactos. In: Observed and Modelled regional climate change (Solicited talks given at the 6th International Congress of the AEC), Brunet, M., Sigró, J., Aguilar, E. (Eds.). Publ. AEC serie B, no. 6, pp 29–40. Asoc. Española de Climatología.
Chaouche, K., Neppel, L., Dieulin, C., Pujol, N., Ladouche, B., Martin, E., Salas, D., Caballero, Y., 2010. Analyses of precipitation, temperature and evapotranspiration in a French Mediterranean region in the context of climate change. C. R. Geosci. 342 (3), 234–243.
Chattopadhyay, N., Hulme, M., 1997. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change. Agric. For. Meteorol. 87 (1), 55–73.
Chen, S.B., Liu, Y.F., Thomas, A., 2006. Climatic change on the Tibetan Plateau: potential evapotranspiration trends from 1961–2000. Clim. Change 76 (3–4), 291–319.
Christensen, J.H., Christensen, O.B., 2007. A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. Clim. Change 81, 7–30.
Cohen, S., Ianetz, A., Stanhill, G., 2002. Evaporative climate changes at Bet Dagan Israel, 1964–1998. Agric. For. Meteorol. 111 (2), 83–91.
De Luis, M., Gonzalez-Hidalgo, J.C., Longares, L.A., Stepanek, P., 2009. Seasonal precipitation trends in the Mediterranean Iberian Peninsula in second half of 20th century. Int. J. Climatol. 29 (9), 1312–1323.
Döll, P., 2002. Impact of climate change and variability on irrigation requirements: a global perspective. Clim. Change 54 (3), 269–293.
Donohue, R.J., McVicar, T.R., Roderick, M.L., 2010. Assessing the ability of potential evaporation formulations to capture the dynamics in evaporative demand within a changing climate. J. Hydrol. 386 (1–4), 186–197.
Doorenbos, J., Pruitt, W.O., 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24. FAO, Rome.
Easterling, D.R., Horton, B., Jones, P.D., Peterson, T.C., Karl, T.R., Parker, D.E., Salinger, M.J., Razuvayev, V., Plummer, N., Jamason, P., Folland, C.K., 1997. Maximum and minimum temperature trends for the globe. Science 277 (5324), 364–367.
El Kenawy, A.M., Lopez-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Mekld, M.S., 2009. Temperature trends in Libya over the second half of the 20th century. Theor. Appl. Climatol. 98 (1–2), 1–8.
Elgaali, E., Garcia, L.A., Ojima, D.S., 2007. High resolution modeling of the regional impacts of climate change on irrigation water demand. Clim. Change 84 (3–4), 441–461.
Estebanparra, M.J., Rodrigo, F.S., Castrodiez, Y., 1995. Temperature trends and change-points in the northern Spanish plateau during the last 100 years. Int. J. Climatol. 15 (9), 1031–1042.
Estévez, J., Gavilán, P., Berengena, J., 2009. Sensitivity analysis of a Penman-Monteith type equation to estimate reference evapotranspiration in southern Spain. Hydrol. Process. 23 (23), 3342–3353.
Estévez, J., 2008. Diseño de un sistema integrado de control de calidad para datos de estaciones meteorológicas automáticas. PhD dissertation, University of Córdoba, Córdoba (in Spanish).
Estévez J, Gavilán P., 2006. Quality control procedures in the Agroclimatic Information of Andalusia. 4th International Conference on Experiences with Automated Weather Stations, Lisboa, 24–26 May 2006.
Gao, G., Chen, D., Ren, G., Liao, Y., 2006. Spatial and temporal variations and controlling factors of potential evapotranspiration in China: 1956–2000. J. Geogr. Sci. 16 (1), 3–12.
Gavilán, P., Lorite, I.J., Tornero, S., Berengena, J., 2006. Regional calibration of Hargreaves equation for estimating reference ET in a semiarid environment. Agric. Water Manage. 81 (3), 257–281.
Giorgi, F., Lionello, P., 2008. Climate change projections for the Mediterranean region. Glob. Planet. Change 63, 90–104.
Gonzalez-Hidalgo, J.C., Lopez-Bustins, J.A., Stepanek, P., Martin-Vide, J., de Luisa, M., 2009. Monthly precipitation trends on the Mediterranean fringe of the Iberian Peninsula during the second-half of the twentieth century (1951–2000). Int. J. Climatol. 29 (10), 1415–1429.
Guilderson, T.P., Schrag, D.P., 1998. Abrupt shift in subsurface temperatures in the Tropical Pacific associated with changes in El Nino. Science 281 (5374), 240–243.
Hamed, K.H., 2008. Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. J. Hydrol. 349 (3–4), 350–363.
Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Appl. Eng. Agric. 1 (2), 96–99.
Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1982. Estimating potential evapotranspiration. J. Irrig. Drainage Division ASCE 108 (3), 225–230.
Hobbins, M.T., Ramirez, J.A., Brown, T.C., 2004. Trends in pan evaporation and actual evapotranspiration across the conterminous US: Paradoxical or complementary? Geophys. Res. Lett. 31 (13), L13503.
Huntington, T.G., 2006. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. J. Hydrol. 319 (1–4), 83–95.
IPCC, 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A. (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom/New York, NY, USA, 881 pp.
IPCC, 2007. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom/New York, NY, USA.
Izaurralde, R.C., Rosenberg, N.J., Brown, R.A., Thomson, A.M., 2003. Integrated assessment of Hadley Center (HadCM2) climate-change impacts on agricultural productivity and irrigation water supply in the conterminous United States—Part II Regional agricultural production in 2030 and 2095. Agric. For. Meteorol. 117 (1–2), 97–122.
Jacob, D., Bärring, L., Christensen, O.B., Christensen, J.H., de Castro, M., Déqué, M., Giorgi, F., Hagemann, S., Hirschi, M., Jones, R., Kjellström, E., Lenderink, G., Rockel, B., Sánchez, E., Schär, C., Seneviratne, S.I., Somot, S., van Ulden, A., van der Hurk, B., 2007. An inter-comparison of regional climate models for Europe: model performance in present-day climate. Clim. Change 81, 31–52.
Karl, T.R., Jones, P.D., Knight, R.W., Kukla, G., Plummer, N., Razuvayev, V., Gallo, K.P., Lindseay, J., Charlson, R.J., Peterson, T.C., 1993. A new perspective on recent global warming—Asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature. Bull. Am. Meteorol. Soc. 74 (6), 1007–1023.
Karl, T.R., Knight, R.W., Plummer, N., 1995. Trends in high-frequency climate variability in the 20th-century. Nature 377 (6546), 217–220.
López-Urrea, R., Olalla, F.M.D., Fabeiro, C., Moratalla, A., 2006. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. Agric. Water Manage. 85 (1–2), 15–26.
Martínez-Cob, A., 2002. Evaluación de métodos de cálculo de la evapotranspiración de referencia diaria y mensual en Aragón. ITEA 23, 126–132.
McKenney, M.S., Rosenberg, N.J., 1993. Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. Agric. For. Meteorol. 64 (1–2), 81–110.
Mearns, L.O., Giorgi, F., McDaniel, L., Shields, C., 2003. Climate scenarios for the southeastern US based on GCM and regional model simulations. Clim. Change 60 (1–2), 7–35.
Meek, D.W., Hatfield, J.L., 1994. Data quality checking for single station meteorological databases. Agric. For. Meteorol. 69 (1–2.), 85–109.
Mínguez, M.I., Ruiz-Ramos, M., Díaz-Ambrona, C.H., Quemada, M., Sau, F., 2007. First-order impacts on winter and summer crops assessed with various high-resolution climate models in the Iberian Peninsula. Clim. Change 81, 343–355.
Miranda, P.M.A., Tomé, A.R., 2009. Spatial structure of the evolution of surface temperatura (1951–2004). Clim. Change 93, 269–284.
Mizyed, N., 2009. Impacts of climate change on water resources availability and agricultural water demand in the West Bank. Water Resour. Manag. 23 (10), 2015–2029.
Monteith, J.L., 1965. Evaporation and the environment. The state and movement of water in living organisms. In: Proc. 19th Symp. Soc. Exp. Biol. , Cambridge University Press, Swansea, UK.
Mozny, M., Tolasz, R., Nekovar, J., Sparks, T., Trnka, M., Zalud, Z., 2009. The impact of climate change on the yield and quality of Saaz hops in the Czech Republic. Agric. For. Meteorol. 149 (6–7), 913–919.
Palutikof, J.P., Goodess, C.M., Guo, X., 1994. Climate-change, potential evapotranspiration and moisture availability in the Mediterranean basin. Int. J. Climatol. 14 (8), 853–869.
Pavia, E.G., Graef, F., Reyes, J., 2009. Annual and seasonal surface air temperature trends in Mexico. Int. J. Climatol. 29 (9), 1324–1329.
Pereira, A.R., Pruitt, W.O., 2004. Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration. Agric. Water Manage. 66 (3), 251–257.
Priestley, C.H.B., Taylor, R.J., 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. Mon. Weather Rev. 100, 81–92.
Roderick, M.L., Farquhar, G.D., 2004. Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002. Int. J. Climatol. 24 (9), 1077–1090.
Roderick, M.L., Farquhar, G.D., 2005. Changes in New Zealand pan evaporation since the 1970s. Int. J. Climatol. 25 (15), 2031–2039.

Sen, P.K., 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. J. Am. Stat. Assoc. 63, 1379–1389.
Shafer, M.A., Fiebrich, C.A., Arndt, D.S., 2000. Quality assurance procedures in the Oklahoma Mesonetwork. J. Atmos. Ocean. Technol. 17, 474–494.
Simolo, C., Brunetti, M., Maugeri, M., Nanni, T., 2010. Improving estimation of missing values in daily precipitation series by a probability density function-preserving approach. Int. J. Climatol. 30, 1564–1576.
Smith, M., Allen, R., Pereira, L., 1996. Revised FAO methodology for crop water requirements. Evapotranspiration and irrigation scheduling. In: Proc. Int. Conf. ASAE , San Antonio, pp. 116–123.
Stanhill, G., Cohen, S., 2001. Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. Agric. For. Meteorol. 107 (4), 255–278.
Thomas, A., 2000. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China. Int. J. Climatol. 20 (4), 381–396.
Thomas, A., 2008. Agricultural irrigation demand under present and future climate scenarios in China. Glob. Planet. Change 60 (3–4), 306–326.
Todisco, F., Vergni, L., 2008. Climatic changes in Central Italy and their potential effects on corn water consumption. Agric. For. Meteorol. 148 (1), 1–11.
Toreti, A., Desiato, F., 2008. Temperature trend over Italy from 1961 to 2004. Theor. Appl. Climatol. 91 (1–4), 51–58.
Turkes, M., Sumer, U.M., Demir, I., 2002. Re-evaluation of trends and changes in mean, maximum and minimum temperatures of Turkey for the period 1929–1999. Int. J. Climatol. 22 (8), 947–977.
Utset, A., Farre, I., Martínez-Cob, A., Cavero, J., 2004. Comparing Penman-Monteith and Priestley-Taylor approaches as reference-evapotranspiration inputs for modeling maize water-use under Mediterranean conditions. Agric. Water Manage. 66 (3), 205–219.
Vose, R.S., Easterling, D.R., Gleason, B., 2005. Maximum and minimum temperature trends for the globe: An update through 2004. Geophys. Res. Lett 32, L23822.
Walther, G.R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T.J.C., Fromentin, J.M., Hoegh-Guldberg, O., Bairlein, F., 2002. Ecological responses to recent climate change. Nature 416 (6879), 389–395.
Wang, Y., Jiang, T., Bothe, O., Fraedrich, K., 2007. Changes of pan evaporation and reference evapotranspiration in the Yangtze River basin. Theor. Appl. Climatol. 90 (1–2), 13–23.
Wild, M., Gilgen, H., Roesch, A., Ohmura, A., Long, C.N., Dutton, E.G., Forgan, B., Kallis, A., Russak, V., Tsvetkov, A., 2005. From dimming to brightening: decadal changes in solar radiation at earth's surface. Science 308 (5723), 847–850.
Wild, M., 2009. Global dimming and brightening: A review. J. Geophys. Res. Atmosph. 114, D00D16, doi:10.1029/2008JDO11470.
Wu, S.H., Yin, Y.H., Zheng, D., Yang, Q.Y., 2006. Moisture conditions and climate trends in China during the period 1971–2000. Int. J. Climatol. 26 (2), 193–206.