

UNIVERSIDAD DE SEVILLA
E.T.S. DE INGENIERIA AGRÍCOLA

TRABAJO FIN DE GRADO

Influencia del estrés hídrico acumulado en las relaciones hídricas en hojas y frutos de olivo (*Olea europaea* L, c.v. Manzanilla) bajo déficit hídrico moderado

Directores:

Dr. Félix Moreno Lucas
Dra Mireia Corell González

Alumno:

Ignacio F. Girón Moreno

Septiembre 2014





UNIVERSIDAD DE SEVILLA
E.T.S. DE INGIENERIA AGRÍCOLA

TRABAJO FIN DE GRADO

**Influencia del estrés hídrico acumulado en las relaciones
hídricas en hojas y frutos de olivo (*Olea europaea* L, c.v.
Manzanilla) bajo déficit hídrico moderado**

DIRECTORES:

DRA. MIREIA CORELL GONZÁLEZ

DR. FELIX MORENO LUCAS

ALUMNO:

IGNACIO F. GIRÓN MORENO

Sevilla, Septiembre de 2014

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer al proyecto AGL2010-19201-CO4-03 por darme la oportunidad de realizar el presente Trabajo de Fin de Grado. Igualmente, quiero agradecer al Profesor de Investigación Dr. Félix Moreno Lucas y a la Profesora Ayudante Dra. Mireia Corell González, directores del trabajo, así como al Profesor Titular Alfonso Moriana Elvira por haber confiado en mí para la realización de este proyecto de investigación. A todos ellos quiero mostrar mi más sincero agradecimiento por el apoyo recibido, así como por las recomendaciones, críticas y sugerencias, sin las cuales la realización de este Trabajo no hubiese sido posible. De la misma manera, quiero expresar mi agradecimiento a todos los miembros del equipo “Dendrómetro” y el personal de la Finca “La Hampa”, por su gran ayuda, interés mostrado, compañía y simpatía, a pesar del calor sufrido durante las medidas en campo.

Agradecer también a Dra. Pilar Burgos Domenech, por sus revisiones y apoyo, y sobre todo por soportar el peso del hogar que he dejado atrás todo este tiempo, dedicado en la realización de este trabajo. También dar gracias a todos mis compañeros del IRNAS: Engracia, Patri, Pao, y un largo etcétera, por la ayuda y confianza puestas en mí.

A todos ellos, muchas gracias

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 El cultivo del olivo.....	1
1.2 Fisiología del olivo.....	3
1.2.1 Adaptación morfológica a la sequía	3
1.2.2 Relaciones hídricas.....	4
1.2.3 Efecto del estrés hídrico en el desarrollo del cultivo.....	8
1.2.4 Programación del riego en olivo	10
2. OBJETIVOS.....	13
3. MATERIALES Y MÉTODOS.	15
3.1 Zona de estudio	15
3.2 Suelo.	16
3.3 Descripción de la parcela experimental.	17
3.4 Clima.....	18
3.5 Variables meteorológicas.....	19
3.6 Tratamientos de riego.....	19
3.7 Medidas del agua en el suelo.	20
3.8 Medidas en planta.....	21
3.8.1 Medidas del crecimiento de ramos.....	21
3.8.2 Crecimiento del fruto y cosecha	21
3.9 Medidas del estado hídrico de la planta.....	23
3.9.1 Potencial hídrico.....	23
3.9.2 Conductancia estomática en hoja	25

3.10	Relaciones hídricas de las hojas y del fruto.	25
3.11	Medida de las variaciones del diámetro del tronco mediante dendrómetros	27
4.	<i>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</i>	31
4.1	Resultados.....	31
4.2	Discusión.....	45
5.	<i>CONCLUSIONES</i>	49
6.	<i>Bibliografía</i>	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de dos ciclos diarios de expansión y contracción del tronco.....	7
Figura 2. Evolución de la longitud de la aceituna medida durante el período experimental.....	21
Figura 3. Temperatura media y máxima del aire, evapotranspiración de referencia y precipitación diaria y contenido volumétrico medio de agua en el suelo.....	30
Figura 4. Evolución del potencial hídrico del tallo al mediodía y conductancia estomática máxima..	32
Figura 5. Evolución del potencial hídrico foliar, potencial hídrico del fruto y la diferencia entre el potencial hídrico del fruto y foliar	35
Figura 6. Evolución del potencial osmótico foliar, presión de turgencia de la hoja y potencial osmótico foliar a saturación.....	36
Figura 7. Evolución del potencial osmótico del fruto y presión de turgencia del fruto	38
Figura 8. Evolución del crecimiento del tronco	40
Figura 9. Evolución del volumen de fruto y longitud brotes.....	41
Figura 10. Integral de estrés hídrico.....	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Efectos del déficit hídrico en los procesos de crecimiento y producción del olivo.....	10
Tabla 2. Características texturales del suelo de la parcela experimental.....	16
Tabla 3. Promedio de la tasa de crecimiento del diámetro del tronco en los tres periodos fenológicos diferenciados durante el cultivo.	41
Tabla 4. Resultados de producción.....	44

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Foto 1. Vista aérea de la localización de la finca experimental “La Hampa”	14
Foto 2. Cámara de presión y detalle de medida del potencial hídrico.....	23
Foto 3: Hojas envueltas en papel de aluminio.	23
Foto 4: Bobina del dendrómetro y aguja colocado en un árbol experimental	27
Foto 5: Portasensor colocado en un árbol experimental	28

I. INTRODUCCIÓN

1.1 EL CULTIVO DEL OLIVO

El agua es un recurso natural escaso muy importante en las prácticas agrícolas. Aunque las superficies en riego a nivel mundial están en torno al 17% de la superficie agrícola total, éstas representan más del 40% de la producción mundial (Fererres y Evans, 2006). El aumento en la producción agrícola, por el uso del agua en la agricultura, ha hecho que la superficie regada mundial se haya duplicado en los últimos 50 años.

En el mundo, según la FAO hay 9.499.931 ha de olivares, de las cuales 2.092.800 ha se encuentran en España, lo que supone aproximadamente un 22% de la superficie total mundial, seguida de Túnez con 1.645.100 ha e Italia con 1.190.800 ha (FAOSTAT, 2012). España es el primer país en el ranking de producción mundial de aceite de oliva, con una producción media anual en los últimos diez años de 1.000.000-1.200.000 toneladas, llegando a alcanzar 1.450.000 en recientes campañas (FAOSTAT, 2012).

La superficie del cultivo del olivo en España no se ha mantenido constante a lo largo de los años, ha evolucionado a medida que las condiciones cambiaban, dependiendo en general de la situación económica del sector. A partir de los años ochenta cambia sustancialmente la apreciación del consumidor por este producto y se incorpora a unas nuevas condiciones de regulación en la Unión Europea. Por estas razones, el sector, esperanzado ante el futuro, recupera una parte de la superficie de este cultivo, perdida en años anteriores.

En el año 2012 la superficie total del olivar nacional era de 2.584.564 ha, de las cuales el 94,4% (2.439.660 ha) son de olivar de almazara, el 3% (77.734 ha) son olivar de mesa y el 2,6% (67.170 ha) son de olivar de doble aptitud. El mayor volumen de producción de aceite de oliva se encuentra en la región de Andalucía con un 60,2%, seguido de Castilla la Mancha con el 15,7%, Extremadura el 10 % y el resto de Comunidades Autónomas suman el 13,7% de la superficie nacional de olivar. Con respecto a la aceituna de mesa, el 74,1 % se encuentra en Andalucía, el 25,7 % en Extremadura, ocupando ambas comunidades prácticamente la totalidad de la superficie nacional. En la actualidad, Andalucía dedica al olivar una superficie que supera el millón y medio de hectáreas, lo que equivale al 43,9% de las tierras de cultivo y

al 16% de la superficie total de la región. Como es bien conocido, la producción de aceite de oliva constituye una de las principales actividades económicas de Andalucía.

Este incremento en la producción, tanto de aceite como de aceituna de mesa, está relacionado con varios factores. En los últimos años se ha incrementado paulatinamente la densidad de las plantaciones, se han usado mejores variedades y se ha incrementado el uso del riego. Posiblemente uno de los factores más llamativos es el incremento de la cantidad de agua empleada en este cultivo.

Antes del año 1982, el Ministerio de Agricultura no separaba los datos de secano y regadío en este cultivo. El comienzo del crecimiento de la superficie de regadío se produce desde principios de los 90, con una subida constante, recortando progresivamente las diferencias entre los dos sistemas de cultivo. Este incremento es especialmente grande en el caso de la aceituna de mesa, en donde, actualmente, alrededor del 30% de la superficie nacional está en regadío. De acuerdo con estos datos, en los últimos años el olivar se ha convertido en el cultivo más importante a nivel nacional en superficie de regadío.

1.2 FISIOLÓGÍA DEL OLIVO

1.2.1 ADAPTACIÓN MORFOLÓGICA A LA SEQUÍA

El olivo es un árbol típico del clima mediterráneo, es capaz de desarrollarse con bajos contenidos de agua en el suelo, posee la capacidad de realizar importantes cambios fisiológicos y morfológicos que contribuyen al mantenimiento hídrico de la planta, ajustando el consumo a la alta demanda ambiental y a los bajos niveles de agua en el suelo (Connor, 2005).

La morfología de las hojas de olivo son las típicas de una especie muy adaptada a las condiciones de sequía. Las hojas se caracterizan por ser pequeñas, coriáceas, con los estomas concentrados en el envés y rodeados de una capa externa de pelos pubescentes (Rapoport, 1997). El control estomático, es posiblemente la respuesta fisiológica mejor documentada, tanto como respuesta al estrés como a las variaciones en la humedad ambiental (Fernández et al, 1997) que le proporciona un control importante de la transpiración. Las hojas de olivo reducen la carga de la radiación debido a su pequeño tamaño, la alta reflexión, y por su predominante posición vertical (Mariscal et al, 2000), además de moverse en situaciones de estrés hídrico para reducir la radiación incidente (Natali et al, 1999).

La mayoría de los árboles de plantaciones comerciales se producen mediante enraizamiento de estaquillas, por lo que el crecimiento radical no se desarrolla en un eje central. En este caso, se forman en la zona basal de la estaquilla múltiples raíces adventicias, que se comportan como raíces principales múltiples en el árbol. La profundidad y extensión lateral del sistema radicular y el grado de ramificación dependen del tipo y profundidad del suelo, de la aireación y del contenido de agua del mismo (Fernández et al, 1991). La combinación de la capacidad del olivo de soportar un potencial hídrico foliar al mediodía extremadamente bajo (-8,0 MPa) y el extenso desarrollo radical, mejoran la capacidad de extraer agua del suelo por debajo del punto de marchitez permanente (Moriani et al., 2002).

La continua bajada del potencial hídrico en la hoja, por efecto de la disminución del agua en el suelo, puede provocar la cavitación, dando como resultado la pérdida de la conductividad hidráulica del xilema (Tyree y Zimmerman, 2002). El olivo es una especie en la que la cavitación es menor. Este fenómeno se produce porque el sistema conductor del xilema está formado por vasos conductores más estrechos de lo habitual (Lo Gullo y Salleo,

1988), lo que repercute en mayores gradientes de potencial hídrico pero en menor probabilidad de cavitación de los vasos.

1.2.2 RELACIONES HÍDRICAS

Las relaciones hídricas son el conjunto de respuestas de la fisiología de la planta a las variaciones ambientales y las condiciones de estrés. Las variables que se pueden medir en las plantas para poder evaluar su estado hídrico frente a las variaciones del contenido de agua en el suelo y a la demanda atmosférica son muy diversas; siendo el potencial hídrico, la conductancia estomática y las variaciones diarias del tronco las principales variables seleccionadas para comprender esas relaciones hídricas.

1.2.2.1 Potencial hídrico

El potencial hídrico (Ψ , MPa) es uno de los indicadores más usados a la hora de conocer el estado hídrico de una planta. La medida de Ψ aporta información sobre el movimiento del agua en el sistema suelo-planta-atmósfera, ya que el agua tiende a desplazarse desde las zonas de mayor a las de menor potencial hídrico. Las medidas de Ψ pueden hacerse en cualquier órgano de la planta. Hasta ahora, se han empleado frecuentemente las medidas de potencial hídrico de la hoja o potencial hídrico foliar, que varían como resultado de la falta de correspondencia entre las tres componentes que determinan el estado hídrico de una planta: absorción, translocación y pérdida de agua (Halevy, 1972; Kaufman y Hall, 1974), siendo éstas una descripción cuantitativa de los estados de energía libre. Por otro lado, su valor puede considerarse igual a la presión de la savia en el xilema de la hoja (Hanan, 1972; Castel y Fereres, 1972), parámetro fácil de medir en campo con la cámara de presión (Scholander et al., 1965).

Este parámetro es una de las medidas más tradicionales en todos los estudios de relaciones hídricas. El potencial hídrico varía a lo largo del día por efecto de las variaciones que la demanda evaporativa genera en el transporte del agua (Klepper, 1968). En el olivo los ciclos diarios de potencial hídrico, en ausencia de déficit hídrico, presentan un efecto claro del ambiente con valores mínimos alrededor del mediodía (Moriana et al., 2002). El hecho de que la regulación estomática module la tasa de transpiración en función de la demanda evaporativa de la atmósfera, hace que estos valores mínimos de potencial hídrico permanezcan generalmente constante hasta últimas horas de la tarde. A pesar de este efecto de

la humedad ambiental, la relación entre el potencial hídrico mínimo diario y diferentes medidas de la demanda evaporativa (por ejemplo el déficit de presión de vapor, DPV) no presentan una gran variación (Moriani y Fereres, 2004).

El déficit de agua en el suelo tiene un efecto muy marcado sobre el potencial hídrico en el olivo, disminuyéndolo para mantener el flujo de agua y así compensar las pérdidas por transpiración (Angelopoulos et al., 1996; Fernández et al., 1997; Moriani et al., 2002). El olivo es capaz de disminuir su potencial hídrico por debajo de valores que causarían la deshidratación y muerte de casi la totalidad de plantas cultivadas. Esto dota a esta especie de una capacidad de extraer agua del suelo por debajo del punto de marchitez permanente (Orgaz y Fereres, 1996). Ello supone, que las medidas de potencial hídrico sean una muy buena referencia para cuantificar el nivel de estrés en el olivar. Tradicionalmente, en cultivos leñosos, se han empleado medidas del potencial hídrico antes del amanecer (coincidiendo con el máximo) y al mediodía. Este último puede realizarse en hoja descubierta y soleada o en hoja que previamente se ha cubierto para evitar su transpiración (el denominado potencial de tallo). McCutchan y Shackel (1992) en ciruelo, describen que el potencial de tallo es más sensible a las condiciones de estrés hídrico que los medidos al amanecer o en hoja descubierta al mediodía. Esto ha supuesto que, en los últimos trabajos en cultivos leñosos, se emplee de forma más habitual el potencial de tallo.

1.2.2.2 La conductancia estomática

La conductancia estomática (g_s) se define como el inverso de la resistencia que ofrecen los estomas al paso de CO_2 y H_2O en la superficie de las hojas. Los estomas juegan un papel clave en la fisiología de la planta, ya que controlan tanto la fijación de CO_2 , como la pérdida de agua por transpiración. Esto hace que su funcionamiento esté muy influenciado por las condiciones ambientales, tanto del aire (radiación, humedad, temperatura, concentración de CO_2) como del suelo (contenido de agua).

Uno de los mecanismos más efectivos para evitar los valores críticos de potencial hídrico en situaciones de estrés hídrico, mencionados anteriormente, es el cierre estomático (Choat et al., 2012). El control estomático es también una ventaja en ambientes con grandes fluctuaciones tanto de la demanda evaporativa como de la humedad del suelo (Franks et al., 2007), como son los hábitats donde se desarrolla y cultiva el olivo (Fernández y Moreno, 1999). Los olivos minimizan las pérdidas de agua, en condiciones de demanda hídrica

elevada, mediante la regulación estomática incluso en ausencia de estrés hídrico (Fernández et al., 1997; Moriana et al., 2002; Togneli et al., 2009; Boughalled y Hajlaoui, 2011). Esto da lugar a ciclos diarios característicos con máximos a primera hora de la mañana y mínimos a partir de mediodía (Angelopoulos et al., 1996; Fernández et al., 1997). Este ciclo diario es característico de plantas resistentes a sequía en contraposición a otras especies más sensibles, en las que el ciclo diario es de una apertura máxima en ausencia de estrés (Tenhunen et al., 1987).

1.2.2.3 La variación del diámetro del tronco

El tallo/tronco de todas las plantas tiene ciclos diarios de expansión y contracción, incluso en ausencia de estrés hídrico (Klepper et al., 1971). Estas oscilaciones están producidas por el desfase entre la absorción radicular y la transpiración de la planta. Este desfase da lugar a una deshidratación parcial, principalmente de la corteza (Brough et al., 1986), que produce un ciclo diario característico (Figura 1). Antes del amanecer, la planta se está rehidratando y el tronco se expande. A primeras horas de la mañana, la transpiración supera la capacidad de absorción del árbol y, para compensar este desfase, el tronco cede agua a la corriente transpiratoria, comenzando el periodo de deshidratación. Durante la tarde, cuando la absorción es mayor que la transpiración, el tronco comienza a rehidratarse empezando de nuevo un ciclo de expansión.

El ciclo diario de variación del diámetro del tronco no es utilizado directamente para determinar el estado hídrico de la planta. Aunque ha habido diferentes interpretaciones de los parámetros a emplear, Goldhamer et al (1999) definen, dentro de la curva, el diámetro máximo (valor máximo a primeras horas del día), el diámetro mínimo (valor mínimo a última hora de la tarde) y la máxima contracción diaria (diferencia entre los dos anteriores). Estos parámetros han sido habitualmente los más empleados, especialmente el último, a la hora de definir la respuesta al estrés hídrico (Ortuño et al., 2010). El estrés hídrico da lugar a variaciones en el ciclo diario de contracción y expansión provocando un incremento muy acentuado de la máxima contracción diaria y una disminución del crecimiento en la mayor parte de las especies estudiadas (Ortuño et al., 2010).

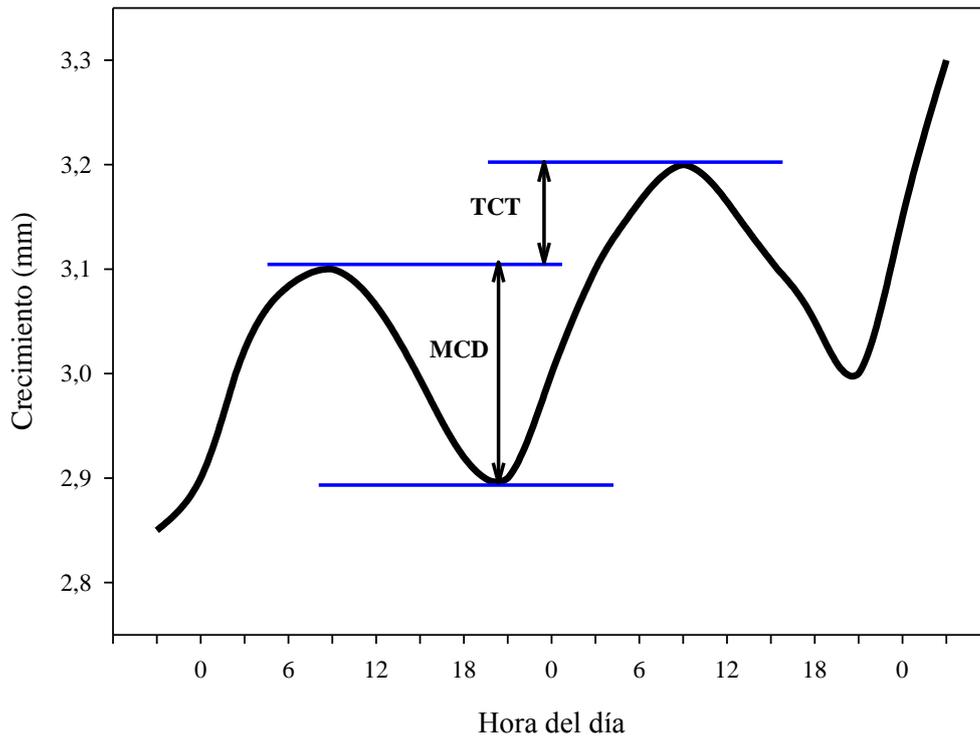


Figura 1. Esquema de dos ciclos diarios de expansión y contracción del tronco y de los parámetros empleados para caracterizar el estado hídrico de la planta. TCT (tasa de crecimiento del tronco). MCD (máxima contracción diaria).

La respuesta al estrés hídrico de la variación del diámetro del tronco en olivo, es sensiblemente diferente de la mayoría de los frutales. En condiciones de estrés hídrico moderado no hay un incremento de la máxima contracción diaria, incluso con caídas significativas del potencial hídrico (Moriana y Fereres, 2002). Esta diferencia, respecto a la respuesta más común en otras especies, está relacionada con la gran capacidad del olivo para deshidratarse. La relación entre potencial hídrico y máxima contracción diaria es una curva con dos tramos bien diferenciados en todas las especies leñosas (Ortuño et al., 2010). A valores elevados de potencial hídrico, cercanos a 0, una disminución da lugar a un incremento de la máxima contracción diaria. A partir de un cierto nivel de potencial hídrico, que oscila entre -1 a -2 MPa dependiendo de la especie, la disminución de potencial hídrico da lugar a una caída de la máxima contracción diaria (Ortuño et al., 2010). En la mayor parte de los frutales el nivel de deshidratación es pequeño y su respuesta está en la primera parte de la curva, de aquí que un déficit hídrico moderado da lugar a grandes incrementos de la máxima contracción diaria. En olivo, en cambio, debido a su capacidad de deshidratación este primer tramo de la curva corresponde a valores de potencial hídrico normales en ausencia de estrés (hasta aproximadamente -1.4 MPa, Moriana et al 2000) por lo que los cambios se deben en su

mayor parte a la demanda evaporativa del medio (Pérez-López et al., 2013). Esto da lugar a que condiciones de estrés hídrico moderado no presenten diferencias claras en la máxima contracción diaria (Moriana et al., 2010) y sólo en condiciones de estrés hídrico severo, cuando la máxima contracción diaria es menor, las diferencias son claras.

La máxima contracción diaria, por lo tanto, sólo sería de interés, en el caso del olivar, cuando queramos aplicar condiciones de estrés hídrico severo. Los máximos diarios es el parámetro alternativo de los ya indicados (Figura 1), ya que su evolución es similar a la de los mínimos diarios. Los máximos diarios representan el crecimiento del tronco, sin embargo, su uso en valor absoluto tiene poco interés y es en realidad la tasa de crecimiento del tronco (TCT, Figura 1), la pendiente de la curva de diámetros máximos, la que sería un indicador de interés (Moriana y Fereres, 2002). La TCT está muy relacionada con la presencia de fruta en el árbol (Ortuño et al., 2010) por lo que su uso debe tener en consideración el estado fenológico en el que se está empleando.

1.2.3. EFECTO DEL ESTRÉS HÍDRICO EN EL DESARROLLO DEL CULTIVO

El efecto del estrés hídrico en las relaciones hídricas de las hojas ha sido ampliamente estudiado en el olivo (Bongi y Long, 1987; Angelopoulos et al., 1996; Fernández et al., 1997; Dichio et al., 1997, 2003, 2006; Moriana et al., 2002) pero se ha estudiado menos a nivel de fruto. El olivo es un árbol muy resistente a la sequía, en el que el estrés hídrico da lugar de forma progresiva a un ajuste osmótico a nivel de la hoja (Dichio et al., 1997, 2003, 2006); disminución del crecimiento vegetativo (Moriana y Fereres, 2002; Pérez-López et al., 2007); un fuerte control estomático (Angelopoulos et al., 1996; Moriana et al., 2002); y elevados niveles de deshidratación (Moriana et al., 2002).

Las plantas sometidas a un déficit hídrico sintetizan y acumulan aminoácidos, proteínas, azúcares y ácidos orgánicos (Ingram y Bartels, 1996). Las altas concentraciones de estos solutos contribuyen a la bajada del potencial osmótico originando un flujo de agua hacia el interior de la célula, manteniendo así el potencial de turgencia e incrementando la tolerancia de los tejidos a bajos potenciales hídricos del suelo (Tyree y Jarvis, 1992; Bray, 1993). Estos solutos también secuestran a las moléculas de agua, protegen a las membranas de la célula y el complejo de proteínas y permiten que la maquinaria metabólica continúe funcionando (Chaves et al., 2003). La bajada del potencial osmótico como resultado de la acumulación neta de solutos compatibles, se define como ajuste osmótico activo y puede ser

determinado midiendo el potencial osmótico a plena turgencia (Girma y Krieg, 1992). Por otro lado, se denomina ajuste osmótico pasivo a los mecanismos que causan las pérdidas netas del agua del simplasto de los tejidos, provocando una reducción del volumen de la célula y un incremento en la concentración del soluto (Lakso, 1985).

Las relaciones hídricas en fruto han sido menos estudiadas que en hoja. El crecimiento del fruto requiere, entre otros factores, un adecuado flujo de agua hacia el interior del fruto y un óptimo estado de turgencia para ser capaces de soportar el crecimiento y la expansión celular. Berger y Selles (1993) en melocotonero, sugirieron que el flujo del agua hacia el interior del fruto era la suma del transporte hídrico entre el xilema y el floema. De esta manera, cualquier cambio del estado fenológico y/o del estado hídrico del árbol puede cambiar el movimiento del agua, por consiguiente la transpiración del fruto. Greenspan et al. (1994,1996), describieron en uva cambios en el transporte de agua hacia el fruto con el envero. Durante el pre-envero la entrada de agua se produce vía xilema, mientras que en el post-envero corresponde al floema (Greenspan et al., 1994,1996). En el olivo, Proietti et al. (1999) encuentran una disminución de la fotosíntesis en fruto desde al principio del desarrollo del fruto hasta las 6-8 semanas después de la polinización. Dell'Amico et al (2012) sugiere en olivo que condiciones poco severas de estrés hídrico, durante el endurecimiento masivo del hueso, cambian el flujo de agua hacia el fruto desde el xilema, en las plantas no estresadas, al floema.

A pesar de estar hablando de una de las especies más resistentes a las condiciones de sequía, los árboles, evidentemente, ven afectada su fisiología por efecto de la falta de agua en el suelo. La diferencia con otros frutales es que el nivel de afectación es mucho menor y por lo tanto, es una especie apta para condiciones muy limitantes de agua. Estos niveles de estrés hídrico varían según el estado fenológico de la planta, ya que los procesos que se ven afectados son diferentes y tendrán una repercusión distinta en la cosecha (Tabla 1). En olivar es muy importante distinguir entre los efectos del déficit hídrico que se verán en el año en curso y cuales tendrán una repercusión en cosechas posteriores. El crecimiento vegetativo, por ejemplo, es un proceso que podría verse afectado durante todo el año (Tabla 1) dependiendo de la edad de plantación. Sin embargo, el efecto más drástico de la reducción de este proceso se obtiene a largo plazo con la reducción de cosecha por el menor tamaño de los árboles (Caruso et al., 2013). La reducción del crecimiento también se ha relacionado con el incremento del ciclo vecero del olivo (Rallo, 1997), ya que el ciclo reproductivo del olivo es

bianual. La capacidad de resistencia a la falta de agua en el suelo supone que el olivar pueda responder de una forma muy importante al riego, y lo que es más importante, a dosis de agua relativamente pequeñas en comparación con otras especies como las hortícolas (Morianana et al., 2003).

Tabla 1. Efectos del déficit hídrico en los procesos de crecimiento y producción del olivo (Fuente: Orgaz y Fereres, 1997. Elaboración propia).

Proceso	Período	Efecto del Déficit Hídrico	Sensibilidad al déficit hídrico
Crecimiento vegetativo	Todo el año	Reducción del crecimiento. Efecto sobre la cosecha del año siguiente	Muy alta
Desarrollo de yemas florales	Febrero- Abril	Reducción del número de flores. Efecto sobre la cosecha del año	Muy alta
Floración	Mayo	Reduce la fecundación. Efecto sobre la cosecha del año	Muy alta
Cuajado de frutos	Mayo-Junio	Disminuye la cosecha actual	Moderada
Crecimiento fruto	Junio-Cosecha	Disminuye el tamaño del fruto. Efecto cosecha del año	Moderada
Acumulación de aceite	Julio- Noviembre	Disminuye el contenido en aceite del fruto	Moderada

1.2.4. PROGRAMACIÓN DEL RIEGO EN OLIVO

La programación del riego de los frutales se suele realizar en base a la estimación de la evapotranspiración del cultivo, teniendo en consideración los valores de coeficiente de cultivo y el coeficiente reductor (Fereres y Goldhamer, 1990). En olivo, recientemente, se ha desarrollado un modelo específico, que permite integrar en el coeficiente de cultivo, tanto el tamaño de la planta como la evaporación, lo que permite una mejora considerable de la estimación de las necesidades de agua (Orgaz et al., 2006). Este modelo está ajustado al manejo del agua en condiciones de ausencia de estrés hídrico. Sin embargo, cada vez son más frecuentes las restricciones de agua para el riego, especialmente para cultivos como el olivar, que debido a su capacidad de resistencia suele tener las menores dotaciones disponibles. Esto

ha supuesto la obligación de realizar riegos deficitarios, es decir, por debajo de las necesidades teóricas del cultivo. En estas condiciones, las estimaciones de las necesidades de riego en base a balance de agua o modelos de cultivo no son válidas. De aquí, que la percepción de los agricultores, que habitualmente riegan con dotaciones de agua muy deficitarias, sea que el modelo de Orgaz et al. (2006), que suele estar incluido en herramientas muy populares de manejo del riego, estime necesidades de riego “excesivas y alejadas de la realidad”.

El riego deficitario controlado es una técnica de programación que se desarrolló a comienzos de los 80 en melocotón (Chalmers et al., 1985). Este sistema de programación del riego se basa en la existencia de estados fenológicos de la planta más resistentes a las condiciones de estrés hídrico y que, por lo tanto, nos permitirían disminuir la cantidad de agua a aplicar sin afectar, o disminuyendo muy poco, la producción. La programación del riego en olivar han sido ampliamente estudiadas en los últimos años, estableciéndose, en la mayor parte de los trabajos, que la restricción del riego debe realizarse desde el comienzo del endurecimiento masivo del hueso (Goldhamer, 1999; Moriana et al., 2003; Iniesta et al., 2009) y evitando condiciones de estrés hídrico, incluso moderados, durante la fase de floración-cuajado (Moriana et al., 2003). Sin embargo, otros trabajos (Magliulo et al., 2003; Lavee et al., 2007; Tognetti et al., 2007) van en contra de esta recomendación tradicional y sugieren regar sólo a partir del comienzo del endurecimiento de hueso. La gran capacidad de deshidratación del cultivo y su resistencia al estrés hídrico (Moriana et al., 2002) podrían estar relacionadas con esta desavenencia en los resultados. Lavee et al. (2007) al dar su recomendación de riego en olivar a partir de endurecimiento, matiza que es válida siempre que se asegure un buen estado hídrico durante la floración. Otro ejemplo, en olivar, que nos ilustra la importancia del conocimiento del nivel de déficit hídrico en la planta es la fase de acumulación de aceite. Lavee y Wonder (1991) describieron una disminución en la acumulación de aceite con un estrés severo durante la fase de acumulación, mientras que Lavee et al (2007) sugiere que restricciones moderadas en este momento fomentan la acumulación.

Los trabajos tradicionales de riego han tenido en consideración, a la hora de programar riegos deficitarios, el hacerlo en base a un porcentaje de la evapotranspiración del cultivo, es decir controlando el agua aplicada. Esto supone una menor exactitud a la hora de definir el nivel de estrés hídrico y su duración, ya que el suelo puede compensar, o no, esta restricción, y los niveles de estrés hídrico alcanzados por los árboles serán diferentes y en distinto

momento, dependiendo de las condiciones climatológicas del año. Por lo tanto el manejo preciso del nivel del estrés hídrico al que se somete la planta es muy importante para obtener resultados comparables en distintas condiciones (Behboudian et al., 2011).

En los últimos años se está comenzando a sugerir diferentes medidas realizadas directamente en planta para poder programar el riego. La idea de este manejo sería regar en función de un determinado nivel de déficit hídrico, de manera que ajustemos el agua aplicada para mantenernos entorno a este umbral. En este sentido uno de los primeros trabajos fue el de Shackel et al. (1997) en diferentes cultivos y empleando el potencial hídrico. A partir de la década de los 90, comienzan a desarrollarse en trabajos de investigación una gran cantidad de sensores que permiten un control automatizado del sistema suelo-agua-planta (Cohen, 1992). Algunos de estos sistemas se están sugiriendo como herramientas para la programación de riego de frutales, especialmente los sensores de flujo de savia y los de variación del diámetro del tronco (Ortuño et al., 2010).

2. OBJETIVOS

La programación del riego en función de medidas realizadas en la planta supone la necesidad de información sobre la respuesta fisiológica del cultivo a las condiciones de estrés hídrico. El conocimiento de este tipo de respuesta dará la información básica para establecer los umbrales precisos de los parámetros a considerar. Es precisamente, la ausencia de umbrales lo que más limita el uso de estas medidas en la programación del riego en plantaciones “comerciales”.

El objetivo de este trabajo ha sido el estudio de las relaciones hídricas en fruto y hoja en olivo, durante un periodo de estrés hídrico en la fase de endurecimiento del hueso. El estado fenológico seleccionado para este trabajo es el más importante desde el punto de vista de la programación del riego, ya que es en el que el árbol permite mayores niveles de déficit con menores pérdidas de cosecha. Sin embargo, hay muy poca información sobre la respuesta conjunta que tienen hoja y fruto ante estas condiciones de estrés, especialmente si nos referimos al crecimiento del fruto. Esta variable es muy importante en aceituna de mesa ya que es un criterio de calidad fundamental (a diferencia de las variedades de aceite). A esto, hay que añadir que el periodo de rehidratación, después de la restricción de la fase de endurecimiento, es breve ya que la recolección se inicia a final del verano.



3. MATERIALES Y MÉTODOS.

3.1 ZONA DE ESTUDIO

El presente trabajo se ha desarrollado en la finca experimental "La Hampa" perteneciente al Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (CSIC). Se encuentra localizada en el término municipal de Coria del Río (37° 1' N, 6° 3' W; altitud 30 m), a unos 15 Km al suroeste de Sevilla (Foto 1).



Foto 1. Vista aérea de la localización de la finca experimental “La Hampa”, a la que se accede desde Sevilla por la A-3122 dirección Coria del Río. En la imagen inferior vista ampliada de la situación de la parcela experimental (en rojo).

3.2 SUELO.

La finca se encuentra situada en una zona ondulada, perteneciente al Mioceno de El Aljarafe, presentando el suelo de la parcela una pendiente comprendida entre el 3 y el 6 %. La profundidad del suelo varía entre 1 y 2 m, viéndose limitada por el material original, que está constituido por areniscas calizas. Según la Soil Taxonomy (USDA, 1975), el suelo se clasifica como Xerocept. Su clasificación edafológica completa puede verse en Moreno et al., (1983).

El suelo de la plantación es de textura franco arenosa. La composición granulométrica del suelo se realizó al comienzo del estudio de acuerdo con el procedimiento descrito por Gee y Bauder (1986) para lo cual se tomaron muestras a distintas profundidades, desde 0 hasta 0,9 m de profundidad, en tres puntos de la parcela experimental. Las muestras se disgregaron, se tamizaron (2mm) y se dispersaron empleando hexametáfosfato sódico como agente dispersante. Las fracciones de arena gruesa (2-0.2 mm) y fina (0.2 mm-50 μ m) se determinaron por tamizado en húmedo y posterior pesada. Las fracciones de limo (50-2 μ m) y arcilla (< 2 μ m) se determinaron por las lecturas obtenidas con un hidrómetro de Bouyoucos. Los resultados se encuentran en la Tabla 2.

Tabla 2. Características texturales del suelo de la parcela experimental. Cada valor es la media de tres medidas acompañadas del error estándar.

Profundidad (m)	Arena gruesa (%)	Arena fina (%)	Limo (%)	Arcilla (%)
0 - 0,3	75,1 \pm 4,2	3,6 \pm 1,8	6,7 \pm 1,8	14,6 \pm 1,7
0,3 - 0,6	72,8 \pm 0,8	5,2 \pm 0,9	7,2 \pm 0,2	14,8 \pm 1,6
0,6 - 0,8	71,4 \pm 4,4	5,7 \pm 0,7	6,4 \pm 1,6	16,5 \pm 2,5
0,8 - 0,9	74,6 \pm 5,4	4,2 \pm 1,4	7,8 \pm 3,6	13,4 \pm 1,7

La determinación de la densidad aparente se llevó a cabo mediante el método propuesto por Henin et al. (1972), tomando muestras superficiales de suelo inalteradas con cilindros de acero inoxidable de 8 cm de diámetro y 4 cm de altura, con un volumen de 201 cm³. Los cilindros fueron desecados en estufa a 105 °C durante 24 h y pesados posteriormente. El cálculo se realiza relacionando el contenido de agua determinado gravimétricamente con el volumen de los cilindros. La densidad aparente media en los primeros centímetros es de 1,30 g cm⁻³ y entre 0,1 y 0,2 m de 1,50 g cm⁻³. El contenido volumétrico de agua a capacidad de campo es de 0,33 m³ m⁻³ y 0,1 m³ m⁻³ para el punto de

marchitez permanente (-1,5 MPa). Palomo et al., (1999) encontraron que la conductividad hidráulica en un rango cercano a saturación es 0,01- 0,03 mm s⁻¹ en la superficie del suelo y 0,007 - 0,015 mm s⁻¹ en la suela de labor, a unos 0,2 m de profundidad.

El contenido de materia orgánica se determinó siguiendo el método de Walkley y Black (1934), consistente en la oxidación de la muestra con dicromato potásico en medio ácido, y posterior valoración del exceso de dicromato con sal de Mohr (disolución 0,5 N de sulfato ferroso-amónico). El P disponible se determinó por el método de Olsen et al. (1954), extrayendo el P con una disolución de bicarbonato sódico a pH 8,5 y determinando el P en autoanalizador y el K disponible se realizó según el método de Bower et al. (1952), extrayendo el K con una disolución de acetato amónico a pH 7 y determinando el K en autoanalizador.

Los resultados obtenidos mostraron que se trata de un suelo pobre en materia orgánica (0,6 %), y presenta contenidos de fósforo (10 mg kg⁻¹) y potasio (185 mg kg⁻¹) normales para la zona.

3.3 DESCRIPCIÓN DE LA PARCELA EXPERIMENTAL.

Dentro de esta finca se eligió una parcela de olivar de la variedad 'Manzanilla de Sevilla' de 0,5 ha, con árboles de 42 años de edad. El marco de plantación es de 7 x 5 m y los árboles están formados a un pie con dos ramas principales a 0,8-1,5 m de la superficie del suelo. La plantación ha sido habitualmente regada por goteo.

El agua que se emplea para el riego procede de un pozo situado en la misma finca, y tiene una conductividad eléctrica de 2,45 dS m⁻¹, por lo que presenta un problema de salinidad moderado; el contenido medio de cloruro es de 468 g m⁻³ lo cual provocaría problemas de toxicidad en caso de riego superficial o por aspersión, aunque si permite su uso para el riego por goteo.

El agua de riego es bombeada desde el pozo a 8 depósitos de 2000 litros cada uno situados junto al cabezal de riego, el cual se encuentra en una caseta. Dicho cabezal consta de los siguientes elementos:

- Un equipo de bombeo formado por una bomba de 1,5 CV de potencia.

-
-
- Un equipo de fertirrigación compuesto por un depósito de 1500 L de capacidad, con bomba agitadora y bomba inyectora.
 - Un depósito de 4000 L para el almacenamiento del fertilizante líquido.
 - Un equipo de filtrado compuesto por un filtro de anillas, un manómetro antes y después del filtro, y un sistema de tuberías y válvulas de accionamiento manual para el lavado por inversión de flujo.
 - Un regulador de presión, ajustado a 3 kg cm^{-2} .
 - Un programador de riego (Progres S.A., mod. Agronic 4000), que permite el control automático de los sectores de riego.

Del cabezal de riego parten las tuberías que riegan los sectores de riego. Al principio de cada una de ellas encontramos un contador y una electroválvula, gobernada por el programador de riego Agronic modelo 4000 (Progress, Lérida, España). El programador está conectado a un ordenador al que se puede acceder mediante Internet para programar el riego en remoto. Con esta disposición y mediante la lectura de los contadores, se puede verificar el correcto funcionamiento del sistema en cada sector.

La parcela se ha tratado de manejar con las prácticas habituales que se utilizan en plantaciones de olivar 'Manzanilla' de la comarca de El Aljarafe, de modo que nuestra parcela experimental resultase representativa de las parcelas comerciales de la zona.

3.4 CLIMA.

La temperatura media anual es de $17,5^{\circ} \text{ C}$. Según la clasificación climática de Thornthwaite el clima se denomina Mesotérmico-seco-subhúmedo. Según la Soil Taxonomy, el régimen de humedad del suelo es Xérico, y el régimen de temperaturas es Térmico.

Los datos pluviométricos indican que, para la zona, el periodo más seco es de junio a septiembre, recogándose las precipitaciones más bajas en julio y agosto. La época húmeda se extiende de mediados-finales de septiembre hasta abril-mayo; el resto del año es cálido y seco. El valor medio de evapotranspiración potencial (E_{To} , mm) calculado con medidas hechas en "La Hampa" es de $1161,9 \text{ mm año}^{-1}$ y una pluviometría media de $499,6 \text{ mm}$ (media de 1971-2012).

3.5 VARIABLES METEOROLÓGICAS.

La finca dispone de una estación meteorológica estándar del Instituto Nacional de Meteorología y de una estación agroclimática automática modelo Campbell (Campbell Scientific Ltd, UK), a unos 50 m del olivar experimental. Ambas estaciones se encuentran sobre una superficie de unos 350 m² metros cuadrados de grama (*Cynodon dactylon*). La estación estándar dispone de un termohigrógrafo, un termómetro de bulbo seco y otro de bulbo húmedo, un evaporímetro Piché y un pluviómetro. Para este trabajo se han empleado principalmente los datos de la estación agroclimática automática, que registra cada 30 minutos, los valores medios, máximos y mínimos de las siguientes variables: temperatura (T, °C) y humedad relativa del aire (HR, %), radiación solar global (Rsg, W·m⁻²), radiación fotosintéticamente activa (PAR, μmol·m⁻²·s⁻¹), radiación difusa (PARdif, μmol m⁻² s⁻¹), radiación neta (Rn, W·m⁻²), velocidad (u, m s⁻¹) y dirección (d, grados) del viento y precipitación (P, mm). De esta última variable se registran los valores cada 10 minutos. Además de medir estas variables, la estación calcula las siguientes: presión de vapor a saturación (P_{sat}, kPa) y déficit de presión de vapor del aire (DPV o D_a, kPa), temperatura de punto de rocío (T_d, °C) y radiación acumulada total (R_{acum}, MJ m⁻² día).

3.6 TRATAMIENTOS DE RIEGO

El diseño experimental fue en bloques completos al azar, con tres bloques por tratamiento. Los bloques se realizaron en el sentido de la pendiente del terreno, sorteando la disposición de los tratamientos dentro de cada bloque. El periodo de riego comenzó el 20 de marzo de 2012 y se prolongó hasta el 12 de septiembre, aunque el estudio en cuestión comenzó con el inicio del endurecimiento masivo del hueso, como se indica en el apartado siguiente. La aplicación de agua se llevó a cabo mediante una línea portagoteros por fila de árboles, con cinco goteros de 8 L h⁻¹ por árbol, con 1 m de separación entre ellos, quedando el gotero central junto al tronco del árbol.

Tratamiento Control. Olivos regados al 100% de la evapotranspiración del cultivo (ETc) con el fin de no tener condiciones limitantes de agua. La programación del riego y la aplicación de agua en este tratamiento fueron diarias sin tener en cuenta el agua del suelo. El cálculo de la ETc se realizó con el producto de la ETo (calculada según Penman-Montheith

con los datos de la estación meteorológica) y los coeficientes de cultivo estimados para las condiciones de la finca por Fernández et al. (2006):

$$ET_c = ET_0 \cdot K_c \cdot K_r$$

Donde ET_0 es la evapotranspiración potencial, calculada según Penman-Montheith con los datos de la estación meteorológica, K_c y K_r , son el coeficiente de cultivo y coeficiente de reducción respectivamente, estimados para las condiciones de la finca por Fernández et al. (2006). K_c expresa la relación entre la evapotranspiración de un cultivo determinado y la del cultivo de referencia en la estación meteorológica, y K_r es un coeficiente de reducción que depende del porcentaje de cobertura del suelo de la parcela por parte del cultivo, de modo que varía entre un poco más de 0 para un olivar recién plantado, y 1 para un olivar adulto que cubre más del 80 % del suelo.

Tratamiento de riego deficitario controlado (RDC) Estuvo dividido en tres fases: una primera fase (Fase I) en la que la dosis aplicada fue igual a la del tratamiento control con el fin de evitar unas condiciones limitantes del agua en el suelo durante la floración-cuajado, donde el olivo es más sensible al estrés hídrico; una segunda fase (Fase II), endurecimiento masivo del hueso, donde no se realizó ningún riego. Ésta fase es la más resistente al estrés moderado y se determinó que su inicio fue el día 172 (21 de Junio, ver apartado 3.8.2). Una tercera fase (Fase III), donde se inició la rehidratación para evitar las posibles pérdidas en la cosecha. Esta fase comenzó el día 226 (14 de Agosto). La fecha seleccionada fue arbitraria estimando que hubiese alrededor de 20 días antes de cosecha para asegurar una rehidratación completa.

3.7 MEDIDAS DEL AGUA EN EL SUELO.

Para determinar el contenido volumétrico de agua (θ , $m^3 m^{-3}$) en el perfil de suelo de 0 a 1 m de profundidad, se utilizó el método de “reflectometría en el dominio de frecuencia” (FDR), más conocido como método capacitivo, para lo cual se empleó una sonda capacitiva portátil, modelo Profile Probe de la casa Delta-T Devices Ltd., UK, con tres tubos para su acceso, colocados en tres árboles de cada tratamiento instrumentados con dendrómetros. Los tubos estaban instalados a 1,5 m del tronco en la línea de riego entre dos goteros.

El método FDR, se basa en la relación existente entre el contenido volumétrico de agua y la constante dieléctrica aparente del medio. Dicha constante se determina a partir del tiempo de tránsito de una señal electromagnética a lo largo de una sonda metálica introducida en el suelo (Ferre y Topp, 2002).

Este tipo de sondas permiten la obtención de un registro de datos en continuo a lo largo de todo el perfil del suelo, ofreciendo medidas más o menos precisas pero que necesitan de una calibración previa, realizada en la misma parcela en años anteriores.

3.8 MEDIDAS EN PLANTA.

Con objeto de realizar las distintas medidas en planta durante el período experimental, se seleccionaron y marcaron seis árboles en cada uno de los dos tratamientos hídricos. Además estos árboles fueron monitorizados con medidas en continuo de la variación del diámetro del tronco.

3.8.1 MEDIDAS DEL CRECIMIENTO DE RAMOS.

Se seleccionaron diez ramos al azar, en orientación sur-este, a una altura entre 1,4 y 1,8 m, en cada uno de los 6 árboles seleccionados de cada tratamiento; se marcaron de manera que pudiesen ser identificados y se midió el crecimiento medio del ramo del año (l , cm) periódicamente a lo largo del período experimental. Los datos de crecimiento se obtuvieron midiendo desde el lugar de inicio del crecimiento en el año del estudio (indicando por una marca de referencia), hasta el ápice del ramo.

3.8.2 CRECIMIENTO DEL FRUTO Y COSECHA

Se realizó un seguimiento del crecimiento del fruto durante todo el período experimental mediante la relación que existe entre los dos diámetros característicos y el volumen de un ovoide, para ello se midió el diámetro longitudinal y transversal en diez frutos elegidos al azar, de cada uno de los seis árboles seleccionados para realizar las medidas en cada tratamiento. La medida del diámetro longitudinal fue utilizada para determinar el momento del comienzo del endurecimiento masivo del hueso según Rapoport et al. (2013).

Rapoport et al (2013) compara diversos parámetros del crecimiento del fruto durante su desarrollo. Uno de estos parámetros es la presión de rotura del hueso en el que se

distinguen tres periodos bien diferenciados. El primero y el último con variaciones en la presión de rotura muy pequeños y un periodo intermedio en el que se incrementa esta presión de forma muy rápida. Es este periodo el que se considera el de endurecimiento masivo del hueso. Su inicio coincide con un cambio en el crecimiento del diámetro longitudinal de la aceituna (Rapoport et al., 2013). En la Figura 2 se representa el crecimiento longitudinal de la aceituna medido en diez frutos elegidos al azar, en cada uno de los seis árboles instrumentados, durante todo el período experimental, de los dos tratamientos. Antes del día 172 el crecimiento es prácticamente lineal en los dos tratamientos con una tasa de crecimiento constante. A partir de esta fecha, el crecimiento en longitud se ralentiza de manera drástica iniciándose la fase de endurecimiento masivo del hueso (Fase II). No hubo diferencias en el inicio de esta fase entre los tratamientos.

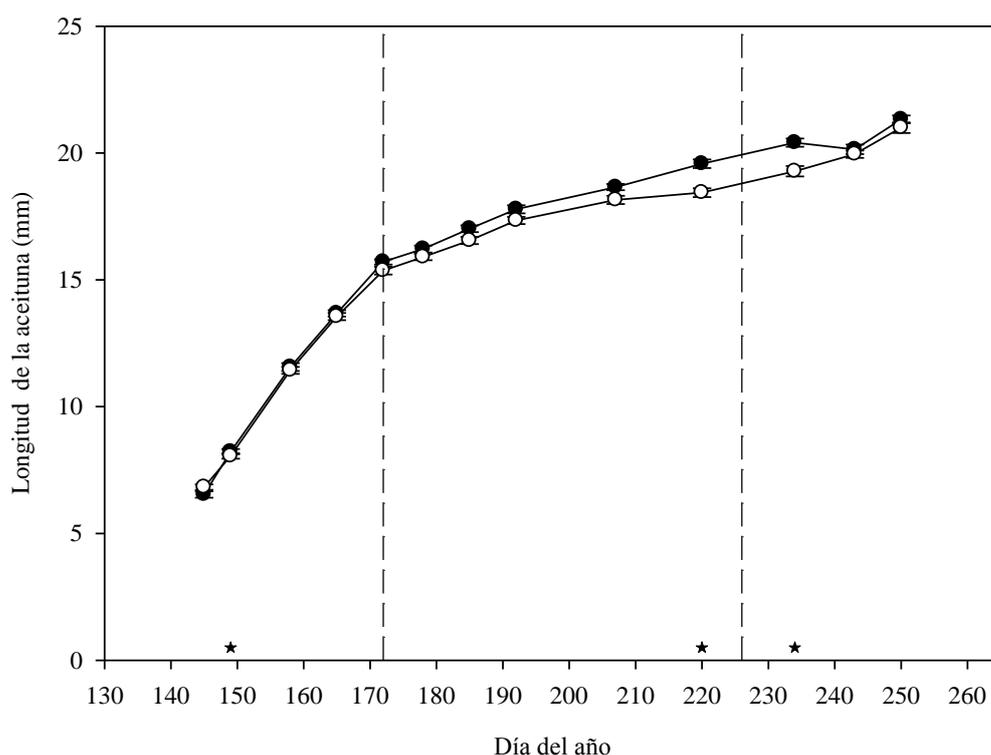


Figura 2. Evolución de la longitud de la aceituna medida durante el período experimental en el tratamiento control (círculos negros) y tratamiento RDC (círculos blancos). Las barras verticales representan el error estándar y las estrellas las diferencias significativas ($p < 0.05$, test de Tukey). La línea discontinua vertical señala el cambio a la fase del endurecimiento masivo del hueso.

La cosecha de toda la parcela experimental se realizó el día 18 de septiembre, se pesó individualmente la producción de cada árbol instrumentado, y de cada uno se tomaron

muestras para determinar el escandallo, número de frutos en 1 Kg de aceitunas, y la relación pulpa hueso, que son algunos de los parámetros de calidad por los que se rigen los almacenes para valorar el precio de la aceituna de mesa. La relación pulpa/hueso se determinó deshuesando 100 frutos por árbol instrumentado, y se pesaron en fresco de forma separada, fruto y el hueso.

3.9 MEDIDAS DEL ESTADO HÍDRICO DE LA PLANTA

3.9.1 POTENCIAL HÍDRICO

Tradicionalmente, el indicador más ampliamente utilizado para evaluar el estado hídrico de las plantas ha sido el potencial hídrico foliar (Ψ) (Améglio et al., 1999; Hsiao, 1990), empleándose en algunos casos para programar el riego (Martin et al., 1991; Moriana et al., 2012).

El potencial hídrico no es siempre sensible al régimen de riego aplicado debido a la regulación estomática (Jones y Cumming, 1984). En este sentido, diversos autores han demostrado que el potencial hídrico de hojas no transpirantes (potencial hídrico del xilema o tallo, Ψ_{tallo}) es un indicador más sensible al estrés hídrico y por lo tanto, su medida es más fiable y adecuada para la programación del riego en cultivos leñosos (McCutchan y Shackel, 1992; Shackel et al., 1997; Naor, 2000; Choné et al., 2001).

Para la determinación del potencial hídrico de tronco (Ψ_{tallo} , MPa) se usó una cámara o bomba de presión (Model 1000, PMS, USA) (Foto 2) teniendo en cuenta las recomendaciones de Turner (1981).



Foto 2. Izquierda: cámara de presión. Derecha: detalle de medida del potencial hídrico.

La medida del potencial hídrico se llevó a cabo en hojas basales de ramos que crecían en el tronco y ramas principales, en 1 hoja por árbol y 6 árboles por tratamiento, los mismos en los que se tenían instalados los sensores. Se envolvieron 2 hojas por árbol con papel de aluminio para evitar la transpiración (Foto 3), unas 2 horas antes de la medida, tiempo suficiente para que su potencial se igualase con el del tronco. Las hojas seleccionadas estaban situadas en la cara interior y sombreadas para evitar la incidencia directa de la radiación. Las medidas se realizaron semanalmente durante la época de riego, midiéndose al mediodía.



Foto 3: Hojas envueltas en papel de aluminio.

Con objeto de describir el efecto de los diferentes tratamientos hídricos se calculó la integral de estrés hídrico S_ψ a partir del potencial hídrico del tallo, mediante la ecuación definida por Myers, (1988):

$$S_\psi = |\sum(\psi_{tallo} - c)n|$$

Donde ψ_{tallo} es el potencial hídrico del tallo medio para un intervalo determinado, c es un valor de referencia, y n es el número de días del intervalo seleccionado. Tradicionalmente c ha sido el máximo valor medido en el periodo experimental. Sin embargo, la intención del cálculo de este parámetro era, también, su comparación con datos obtenidos anteriormente (los publicados en Dell'Amico et al, 2012). Por esta razón se dio a c el valor de -1.4 MPa que

es la referencia sugerida por Moriana et al (2012) para olivos en ausencia de estrés hídrico durante la fase de endurecimiento del hueso. Aquellos valores superiores a -1.4 se consideraron como iguales a este valor y atribuibles a demandas evaporativas anormalmente bajas.

3.9.2 CONDUCTANCIA ESTOMÁTICA EN HOJA

Para la medida de la conductancia estomática (g_s , $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) se utilizó un porómetro de equilibrio estable, también llamado continuo o balance nulo, modelo LiCor 1600 (Li-Cor, Inc., Lincoln, NE, USA). Éste mide y controla el flujo de aire seco hacia la cámara de medida, de forma que contrarresta el flujo de vapor de agua desde la superficie de la hoja, manteniendo así un valor estable de humedad relativa en el interior de la cámara, y próximo al ambiental. Las medidas se realizaron en hojas del año plenamente desarrolladas, sanas, orientadas al sol y localizadas a una altura entre 1,4-1,8 m.

La conductancia estomática de la hoja en olivo tiene un ciclo diario característico, con un máximo a primera hora de la mañana para ir disminuyendo hasta alcanzar el mínimo diario que ocurre a partir de mediodía (Fernández y Moreno, 1999; Moriana et al., 2002). En nuestras condiciones hemos estimado que el máximo corresponde aproximadamente a medidas realizadas alrededor de las 10:00 (hora local). Se realizaron dos medidas por árbol y 6 árboles por cada tratamiento.

3.10 RELACIONES HÍDRICAS DE LAS HOJAS Y DEL FRUTO.

Para la determinación de las relaciones hídricas de la hoja y el fruto, se midió el potencial hídrico foliar y del fruto (Ψ_{foliar} y Ψ_{fruto}), el potencial osmótico foliar y del fruto ($\Psi_{\pi_{\text{foliar}}}$ y $\Psi_{\pi_{\text{fruto}}}$) y el potencial osmótico a saturación en la hoja ($^{100}\Psi_{\pi_{\text{foliar}}}$), además se determinó el potencial de turgencia tanto de la hoja como del fruto ($\Psi_{p_{\text{foliar}}}$ y $\Psi_{p_{\text{fruto}}}$). Estas determinaciones se realizaron a la vez que las medidas de conductancia estomática máxima.

Se seleccionaron dos hojas totalmente desarrolladas, bien iluminadas, a una altura de 1,4 a 1,8 m del suelo, en cada uno de los seis árboles en los que se realizaron las medidas de cada tratamiento. Una de las dos hojas tomadas de cada árbol se utilizó para

determinar el potencial hídrico foliar (Ψ_{foliar}) con la cámara de presión (Model 1000, PMS, USA), el valor obtenido de Ψ_{foliar} se utilizó para calcular el potencial de turgencia de la hoja. Una vez medido el potencial hídrico, la hoja se envolvió en papel de aluminio e inmediatamente después se introdujo en nitrógeno líquido y se guardó a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, para la determinación de su potencial osmótico foliar ($\Psi_{\pi\text{ foliar}}$). La segunda hoja se introdujo en un tubo con agua destilada, en el que sólo estaba en contacto con el agua el peciolo. El tubo de ensayo se envolvió en papel de aluminio y se introdujo en una nevera portátil hasta llegar al laboratorio donde se mantuvieron en oscuridad y entre $6\text{-}8\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante unas 24 horas. El tiempo de rehidratación utilizado fue el necesario para conseguir que Ψ_{foliar} fuera prácticamente cero. Una vez pasado ese tiempo se sumergieron en nitrógeno líquido, se envolvieron individualmente en papel de aluminio y se almacenaron en un congelador a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta el momento de la medida. Estas muestras sirvieron para determinar el potencial osmótico de la hoja a plena turgencia ($^{100}\Psi_{\pi\text{ foliar}}$). A la misma hora, en un fruto del mismo brote donde se habían tomado las hojas se midió el potencial hídrico (Ψ_{fruto}) con la cámara de presión (Model 1000, PMS, USA). Una vez determinado el Ψ_{fruto} se envolvieron en papel de aluminio y se sumergieron en nitrógeno líquido almacenándose a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Estas muestras se utilizaron para la determinación del potencial osmótico del fruto ($\Psi_{\pi\text{ fruto}}$).

Todas las muestras congeladas, tanto de hojas como de frutos, se sacaron, descongelaron y se equilibraron a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 15 minutos antes de la determinación del potencial osmótico. En las muestras de hojas, antes de medir se eliminó el nervio central, inmediatamente después se utilizaron los tejidos par la determinación de $\Psi_{\pi\text{ foliar}}$. En los frutos se extrajo el contenido celular por centrifugación a 10.000 rpm durante 3 minutos, para la determinación del $\Psi_{\pi\text{ fruto}}$. La medida del potencial osmótico tanto de hojas como de fruto se realizó con un psicrómetro TRU PSI modelo WP3 calibrado frente a una solución salina.

Los valores del potencial de presión de turgencia (Ψ_p), del fruto y de la hoja se calcularon mediante la ecuación:

$$\Psi_p = \Psi - \Psi_{\pi}$$

Donde Ψ_p es el potencial o presión de turgencia, Ψ es el potencial hídrico y Ψ_{π} es el potencial osmótico.

3.11 MEDIDA DE LAS VARIACIONES DEL DIÁMETRO DEL TRONCO MEDIANTE DENDRÓMETROS

Las variaciones del diámetro del tronco permiten una monitorización continua del estado hídrico del árbol. Esta medida se realizó con sensores de desplazamiento variable y respuesta lineal, de alta precisión (siglas inglesas LVDT, Solartron Metrology, Bognor Regis, UK, modelo DF $\pm 2.5 \mu\text{m}$, precisión ± 10 micrómetros). Estos sensores son transductores de desplazamiento lineal (Foto 4). El LVDT pertenece a una familia de transductores que convierte el desplazamiento en un cambio de tensión continua, gracias a la alteración de las líneas de campo magnético entre dos o más arrollamientos, originadas por una tensión continua aplicada a uno de los devanados. En el modelo descrito, el transductor consta de tres arrollamientos coaxiales, de los cuales el del centro es el primario y los situados en los extremos son los secundarios. Las amplitudes de las señales dependen del acoplamiento entre cada secundario y el primario y, por consiguiente, dependen de la posición del núcleo de hierro. En resumen, a una frecuencia dada, la tensión de salida es proporcional a la diferencia de acoplamiento mutuo entre el primario y cada uno de los secundarios. Como el acoplamiento es proporcional a la posición del vástago, también lo será la tensión de salida. Los tres arrollamientos se encuentran en un cilindro hueco de material no ferromagnético y aislado eléctricamente. El núcleo ferromagnético puede acoplarse a una amplia gama de vástagos. La carcasa es de metal ferromagnético con el fin de actuar de barrera frente a las interferencias electromagnéticas.



Foto 4: Bobina del dendrómetro y aguja colocado en un árbol experimental. El dendrómetro está sujeto por el portasensor que abraza el tronco. La aguja está pegada al tronco por una sustancia adherente inocua para el árbol.

Estos sensores deben estar provistos de anclajes al órgano a medir, evitando dañarlo e interferir en su desarrollo normal, aportando firmeza a la célula de medida (Foto 4 y 5). El portasensor (Foto 5) está construido con Invar (aleación de Ni y Fe), de coeficiente de dilatación térmica cercano a cero (Katerji et al., 1994), y aluminio (Requena Co., España, modelo R-150 mm). El contacto entre el extremo de la aguja y el órgano debe ser prácticamente perfecto, para lo que se puede usar una gran variedad de sustancias adherentes. (Foto 4). Los sensores fueron colocados en todos los árboles en el tronco principal (Foto 5).

La señal que produce este sensor es recibida y almacenada en un almacenador de datos programable (datalogger CR1000, Campbell Sci, Reino Unido) que se encuentra en el centro de la parcela. Se realizan medidas cada 15 segundos con medias cada 15 minutos. Este almacenador de datos está conectado al mismo ordenador que el programador de riegos. Se puede acceder, por lo tanto, de forma remota a través de internet y descargarlos de forma diaria para comprobar si hay algún problema en la colocación.



Foto 5: Portasensor colocado en un árbol experimental.

Estos sensores dan lugar a ciclos diarios de contracción y expansión ya descritos anteriormente en el apartado de “Estado de la cuestión”. Brevemente, a partir de estos

ciclos diarios se calculan, normalmente, dos indicadores la máxima contracción diaria y la tasa de crecimiento del tronco (TCT). Como ya se comentó en el apartado anterior (1.2.2.3.) la máxima contracción diaria es un parámetro que presenta dificultades en olivo asumiendo que sólo tiene interés en condiciones de estrés hídrico muy severo. Por esta razón los datos de este parámetro no han sido incluidos en este trabajo. La TCT sí se ha considerado un indicador de gran sensibilidad al déficit hídrico en olivo (Moriana y Fereres, 2002) y es el parámetro utilizado para este estudio.



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RESULTADOS

El período experimental considerado en este trabajo se desarrolló desde el inicio de la fase II, fase de endurecimiento masivo del hueso, día 172, hasta la recolección de la aceituna, día 256. Como ya se indicó en materiales y métodos durante la fase II se realizó un Riego Deficitario Controlado (RDC) en uno de los tratamientos. Este periodo de déficit concluyó el día 226 comenzando lo que hemos denominado fase III o fase de rehidratación hasta cosecha. Durante el ensayo, las temperaturas medias diarias oscilaron desde los 20,5 °C del mes de junio a los 33,2 °C del mes de agosto (Figura 3A); registrándose en este último mes las temperaturas máximas más altas, con media de las máximas de 35,5 °C. El valor máximo de temperatura se alcanzó el día 224 con una temperatura de 44,6 °C (Figura 3A). La evapotranspiración de referencia (ET_o) media durante los meses de junio y julio fue de 6,1 y 6,3 mm·día⁻¹ respectivamente, que fueron los períodos de mayor demanda evaporativa de la atmósfera, alcanzando un valor máximo de 8 mm·día⁻¹, el día 200. En los meses siguientes comenzó a disminuir ligeramente, registrándose medias de 5,5 y 4,9 mm·día⁻¹ en los meses de agosto y septiembre, respectivamente (Figura 3B). La ET_o acumulada durante el período experimental fue de 495 mm y hubo un solo registro pluviométrico de 0,5 mm, el día 232. El contenido volumétrico medio de agua en el perfil de suelo (0-1 m) a lo largo del período experimental se muestra en la Figura 3C, donde se puede observar como ambos tratamientos iniciaron dicho período con valores próximos a la capacidad de campo (0,23 m³·m⁻³). En el caso del tratamiento Control, estos valores se mantuvieron prácticamente constantes durante todo el período experimental; mientras que en el tratamiento de Riego Deficitario Controlado (RDC) se produjo un claro descenso, encontrándose diferencias significativas desde el día 192, y llegándose a alcanzar valores en torno a 0,15 m³·m⁻³ (día 215), registrados antes de la fase de recuperación hídrica, en la cual vuelven a aproximarse a los valores iniciales.

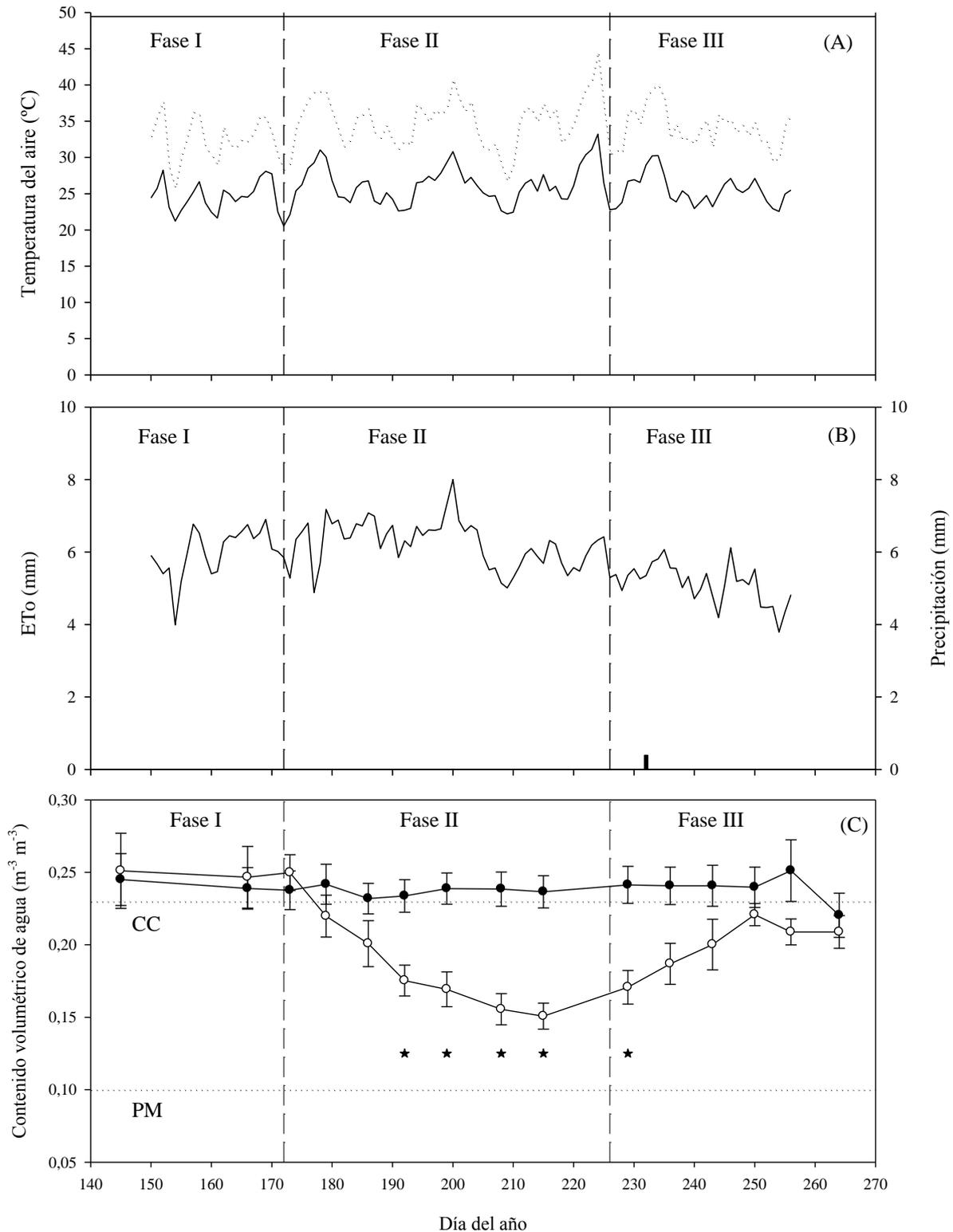


Figura 3. (A) Temperatura media (T_m , línea continua) y máxima (T_{max} , línea de puntos) del aire, (B) la evapotranspiración de referencia (ETo , línea sólida) y precipitación diaria (barra) y (C) el contenido volumétrico medio de agua en el suelo (0-1) metro de profundidad, en el tratamiento control (círculos negros) y RDC (círculos blancos). Las barras verticales representan el error estándar y las estrellas las diferencias significativas ($p < 0.05$, test de Tukey). Las líneas verticales discontinuas delimitan el principio y fin del período de déficit y las líneas de puntos horizontales los valores de capacidad de campo (CC), y punto de marchitez (PM) del suelo en la parcela experimental.

La figura 4 muestra la evolución del potencial hídrico del tallo al mediodía (Ψ_{tallo}) (A) y la conductancia máxima foliar (g_{max}) (B) durante el período experimental. Los valores medios del Ψ_{tallo} en el tratamiento Control disminuyeron desde -1,12 MPa, al inicio de la fase II, hasta llegar a -1,77 MPa el día 200, a partir del cual, permaneció prácticamente constante hasta la recolección. La evolución de Ψ_{tallo} en el tratamiento RDC siguió un patrón similar al del tratamiento Control hasta el día 200, pero con descensos más acentuados lo que dio lugar a diferencias significativas desde el día 193, alcanzando valores mínimos alrededor de -2,6 MPa, el día 220 justo antes de la recuperación. La recuperación hídrica se manifestó rápidamente con un aumento del valor medio de Ψ_{tallo} del tratamiento RDC y continuó aumentando hasta igualarse a los valores del tratamiento Control el día 255, 28 días después del inicio de la fase de rehidratación.

Durante toda la fase del endurecimiento masivo del hueso, los valores medios de g_{max} (Figura 4B) medidos en el tratamiento Control, permanecieron constantes en torno a 275 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; a partir de la fase III se observó una rápida subida hasta alcanzar valores medios de 692,5 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, registrados el día 232, y un posterior descenso hasta llegar a 400 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ antes de la recolección. Los valores de g_{max} para el tratamiento RDC fueron más bajos que los del Control durante todo el período experimental, siendo esta disminución significativa desde el día 186 hasta el 248, con una tendencia descendente desde el inicio, 275 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, hasta justo antes de la fase de recuperación hídrica, 185 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Tras el inicio de la recuperación hídrica, los valores de g_{max} en el tratamiento RDC estuvieron en torno a 320 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, permaneciendo las diferencias entre tratamientos hasta justo antes del final de la recuperación.

La evolución del potencial hídrico foliar (Ψ_{foliar}) (A), del fruto (Ψ_{fruto}) (B) y la diferencia entre ellos (C), medidos a la hora de la conductancia máxima, están representados en la Figura 5. En el tratamiento Control, los valores de Ψ_{foliar} se mantuvieron en torno a -1,0 y -2,0 MPa, excepto el día 200 que se alcanzó un valor medio de -2,6 MPa, coincidiendo con una subida de la demanda evaporativa ($E_{\text{To}}= 8\text{mm}$) y un registro de la temperatura máxima de 40,8 °C. Los valores de Ψ_{foliar} para el tratamiento RDC fueron en todo momento más bajos que los del tratamiento Control durante el período experimental; encontrándose la primera diferencia significativa el día 178, 12 días después del inicio del endurecimiento masivo del hueso.

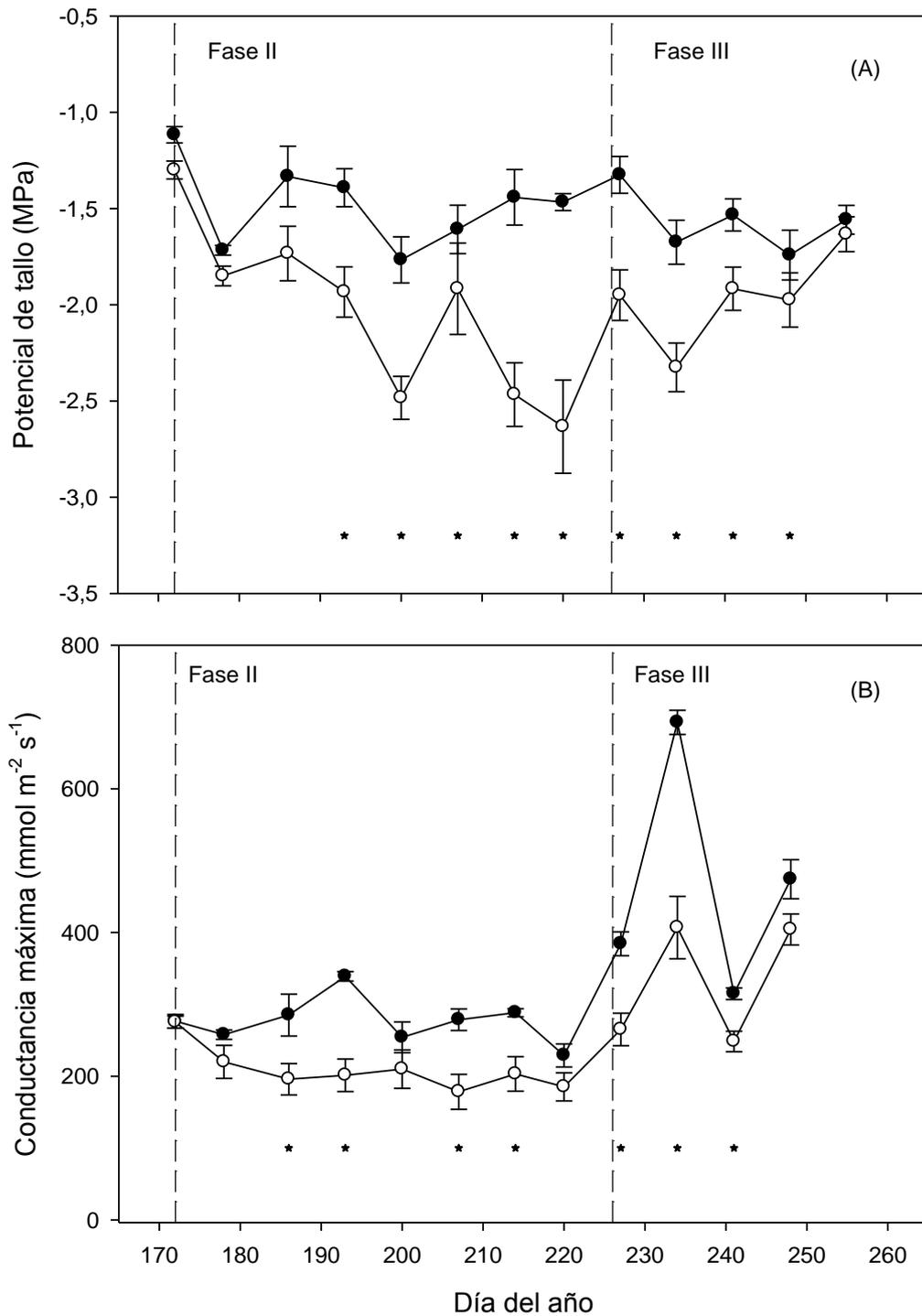


Figura 4. Evolución del potencial hídrico del tallo al mediodía (A) y conductancia estomática máxima (B), en el tratamiento control (círculos negros) y tratamiento RDC (círculos blancos). Las barras verticales representan el error estándar y las estrellas las diferencias significativas ($p < 0.05$, test de Tukey). Las líneas verticales discontinuas delimitan las distintas fases del período experimental. Cada punto es la media de 6 (A) o 12 (B) datos.

También se encontraron diferencias significativas desde el día 207 hasta la rehidratación, momento a partir del cual el potencial hídrico foliar no mostró diferencias significativas entre tratamientos, lo cual indicó la rápida respuesta de este indicador al aporte de agua tras un período de estrés. Durante la recuperación el tratamiento RDC tuvo la misma tendencia que el Control en este parámetro, pero con valores ligeramente más bajos. En cuanto al potencial hídrico del fruto, los valores de Ψ_{fruto} en el tratamiento Control estuvieron en torno a los -1,5 MPa, excepto el día 200 que se alcanzó un valor medio de -2,4 MPa debido a las condiciones ambientales en ese momento al igual que ocurrió con el potencial hídrico foliar. El tratamiento RDC presentó una clara tendencia descendente, encontrándose la máxima diferencia entre tratamientos el día 220, justo antes de la fase de rehidratación. Las diferencias significativas tuvieron lugar durante toda la fase II y parte del periodo de recuperación (desde el día 193 hasta el 234) salvo el día 200. Hay que señalar que la recuperación hídrica, en los árboles estresados, a nivel de fruto fue más lenta que a nivel de hoja.

La diferencia entre Ψ_{foliar} y Ψ_{fruto} ($\Delta\Psi$) presentó un patrón semejante entre ambos tratamientos en la primera parte de la fase II, manteniéndose así hasta el día 214 (Figura 5C). A partir de esta fecha hubo un aumento drástico del valor de $\Delta\Psi$ en el tratamiento RDC, pasando de -0,22 MPa a +0,22 MPa y dando lugar a las primeras diferencias significativas entre tratamientos. A partir de ese día, los valores de $\Delta\Psi$ en el tratamiento RDC continuaron aumentando paulatinamente hasta el día 234, en el que se alcanzó el valor más alto de $\Delta\Psi$ (0,43 MPa) frente a los 0,00 MPa encontrados ese mismo día en los árboles Control, y siendo estas diferencias estadísticamente significativas. Los valores de $\Delta\Psi$ en tratamiento RDC volvieron a descender 15 días después de la rehidratación, igualándose ambos tratamientos.

Los valores del potencial osmótico ($\Psi_{\pi \text{ foliar}}$), presión de turgencia ($\Psi_p \text{ foliar}$) y el potencial osmótico a saturación ($^{100}\Psi_{\pi \text{ foliar}}$) de la hoja están representados en la Figura 6 A, B y C, respectivamente. En la primera fase del endurecimiento masivo del hueso, los valores del $\Psi_{\pi \text{ foliar}}$ fueron muy similares en ambos tratamientos; sin embargo, a partir del día 193, se observó una disminución del potencial osmótico foliar en los árboles RDC encontrándose diferencias significativas con respecto al Control el día 207 (Figura 4A). A partir de este día se observó un aumento de los valores de $\Psi_{\pi \text{ foliar}}$ en el tratamiento RDC hasta igualarse a los del tratamiento Control. En cuanto a la presión de turgencia de la hoja, $\Psi_p \text{ foliar}$, (Figura 6B), los valores oscilaron entre 0,4 y 2,0 MPa durante el período experimental en ambos tratamientos.

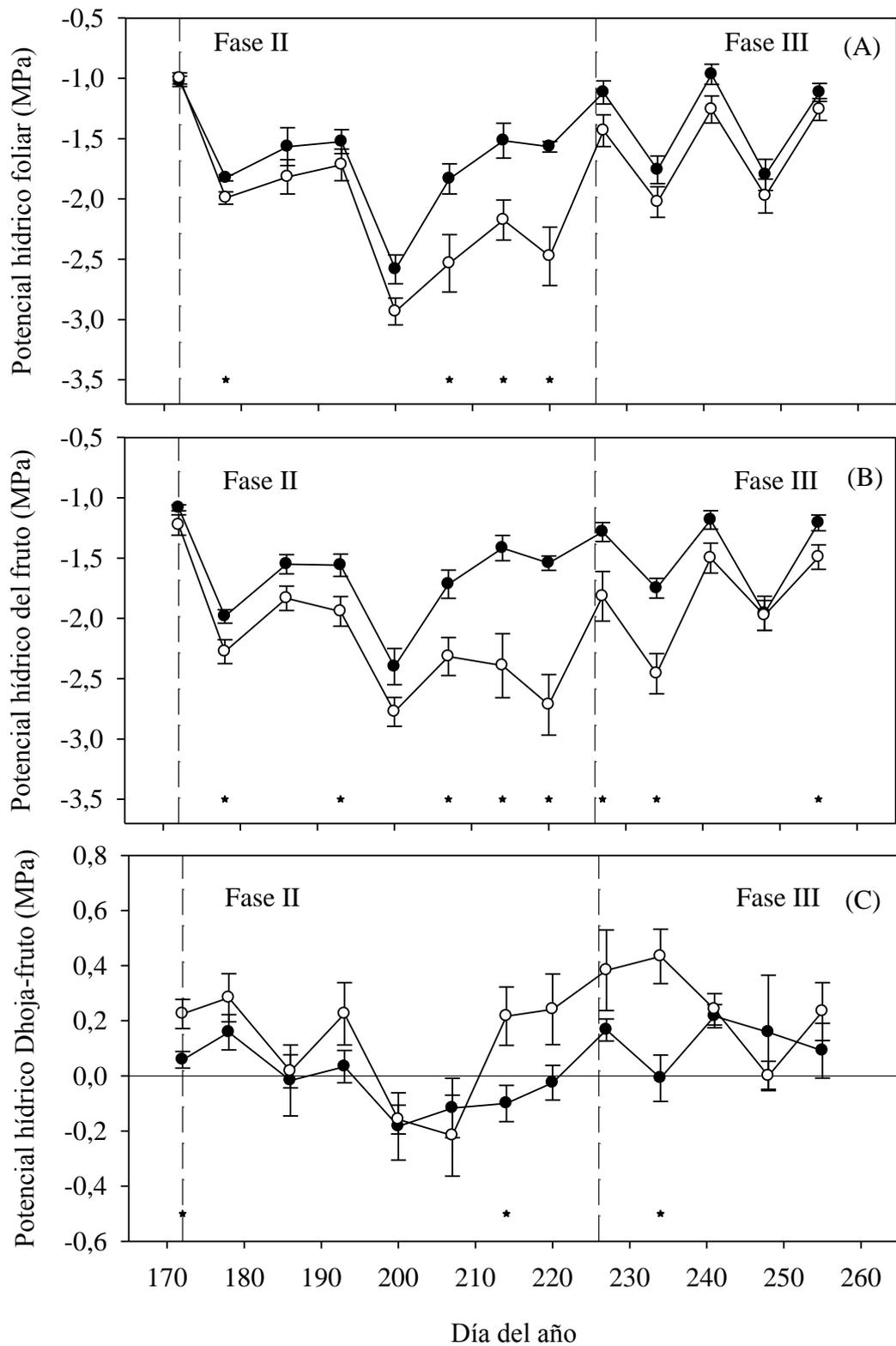


Figura 5. Evolución del potencial hídrico foliar (A), potencial hídrico del fruto (B) y la diferencia entre el potencial hídrico del fruto y foliar ($\Delta\Psi$) (C) en el tratamiento control (círculos negros) y tratamiento RDC (círculos blancos). El potencial hídrico foliar y de fruto fue medido a la misma hora que la conductancia estomática máxima. Las barras verticales representan el error estándar y las estrellas las diferencias significativas ($p < 0.05$, test de Tukey). Las líneas verticales discontinuas delimitan las distintas fases del período experimental. Cada punto representa la media de 6 datos.

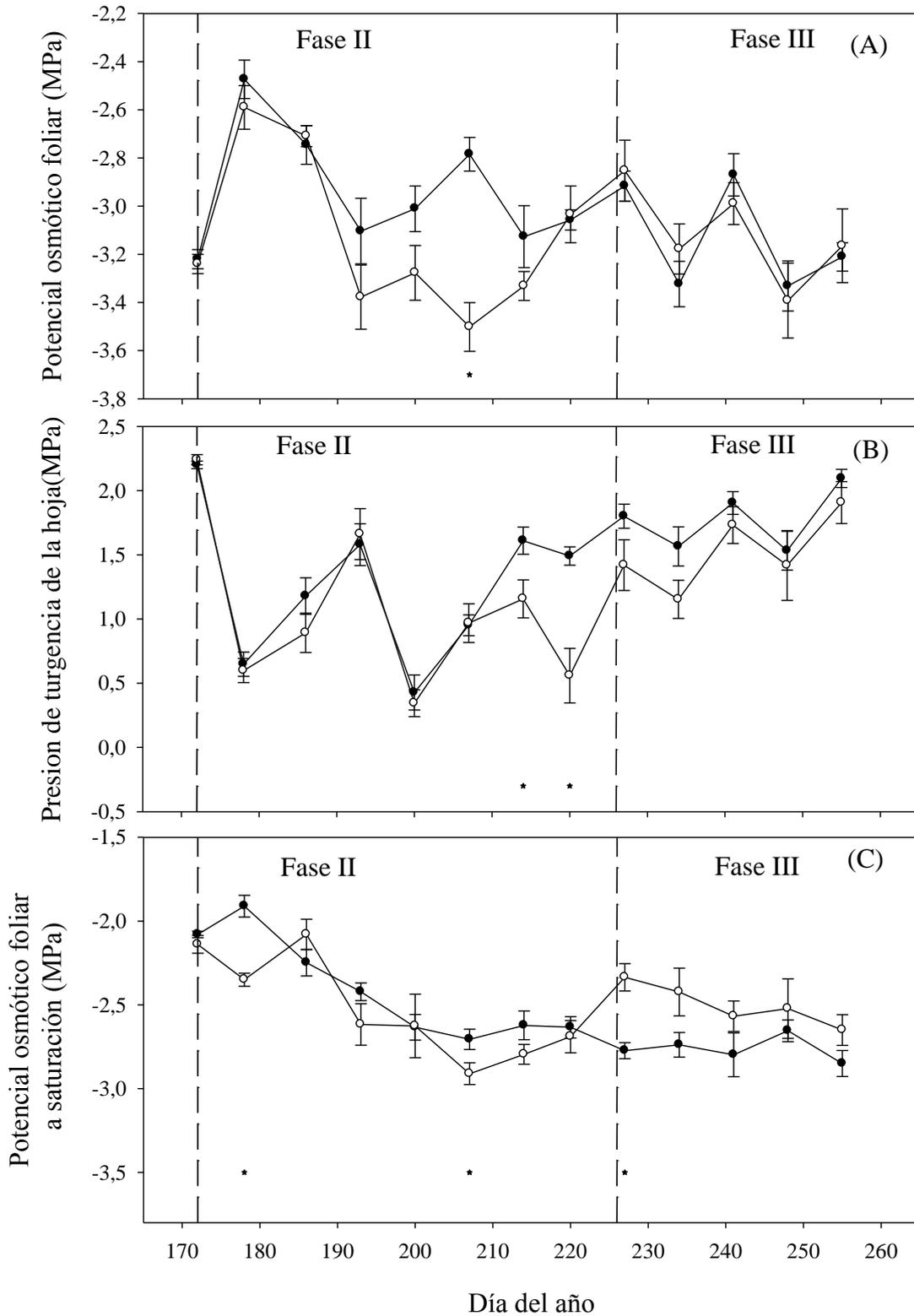


Figura 6. Evolución del potencial osmótico foliar (A), presión de turgencia de la hoja (B) y potencial osmótico foliar a saturación (C) en el tratamiento control (círculos negros) y tratamiento RDC (círculos blancos). Las medidas se realizaron a la hora de medida de la conductancia foliar máxima. Las barras verticales representan el error estándar y las estrellas las diferencias significativas ($p < 0.05$, test de Tukey). Las líneas verticales discontinuas delimitan las distintas fases del período experimental. Cada punto es la media de 6 valores.

El valor más bajo de este parámetro se registró el día 200, coincidiendo con los valores de mayor demanda evaporativa como ya se indicó anteriormente. El valor máximo de $\Psi_{p \text{ foliar}}$, se alcanzó al final de la fase de rehidratación, día 255, cuando las condiciones hídricas fueron más favorables. Los dos tratamientos presentaron el mismo patrón de comportamiento hasta el final de la fase II, días 214 y 220, en los que se produjo un descenso estadísticamente significativo del $\Psi_{p \text{ foliar}}$ en los árboles del tratamiento RDC con valores de 0,46 y 0,93 MPa, respectivamente. Con el comienzo de la rehidratación el $\Psi_{\pi \text{ foliar}}$ de RDC siguió la misma tendencia ascendente que los árboles Control, aunque con valores ligeramente más bajos, no encontrándose diferencias significativas entre los tratamientos. El potencial osmótico a saturación, $^{100}\Psi_{\pi \text{ foliar}}$, del tratamiento Control tendió a decrecer a lo largo de todo el período experimental (Figura 4C). Desde el inicio hasta la primera mitad de la fase II, la caída del $^{100}\Psi_{\pi \text{ foliar}}$ para el tratamiento Control fue de unos 0.8 MPa, estabilizándose posteriormente con una ligera tendencia descendente hasta el final de la experiencia. El potencial osmótico a saturación, $^{100}\Psi_{\pi \text{ foliar}}$ del tratamiento RDC siguió un comportamiento similar al del tratamiento Control hasta la primera mitad de la fase II. El día 207, $^{100}\Psi_{\pi \text{ foliar}}$ en el tratamiento RDC fue significativamente más bajos que en el tratamiento Control, produciéndose, a partir de ese día, una tendencia a incrementarse progresivamente. Este incremento finalizó al comienzo del periodo de rehidratación teniendo los árboles RDC valores significativamente superiores a los del tratamiento Control aproximadamente en 0,44 MPa. Durante la fase de rehidratación los valores del $^{100}\Psi_{\pi \text{ foliar}}$ del tratamiento RDC tendieron a descender progresivamente hasta llegar a valores similares al Control en torno a -2,65 MPa (Figura 6C).

La evolución del potencial osmótico del fruto ($\Psi_{\pi \text{ fruto}}$), se muestra en la Figura 7(A). El tratamiento Control presentó valores estables alrededor de -2MPa a lo largo de todo el período experimental, mientras que los valores del tratamiento RDC tendieron a descender; especialmente en la fase de endurecimiento masivo del hueso, fase II, desde valores próximos a -2 MPa medidos los días 172, 178 y 193 hasta llegar a -3 MPa el día 220, justo antes de la fase de rehidratación. Las diferencias entre ambos tratamientos fueron más marcadas a medida que se fue agotando la reserva hídrica del suelo, final de la fase II, siendo significativas desde el comienzo del periodo. Durante la fase de rehidratación, fase III, los valores del $\Psi_{\pi \text{ fruto}}$ en el tratamiento RDC tendieron a aumentar rápidamente, aunque los valores continuaron significativamente por debajo del Control, los días 227, 234 y 255. A pesar de todo, el tratamiento RDC alcanzó los mismos $\Psi_{\pi \text{ fruto}}$ que al inicio del período de estrés. Los valores de presión de turgencia del fruto fueron muy similares entre tratamientos

solo con una diferencia significativa en el periodo de rehidratación, fase III (Figura 7 B). Durante la fase II, los valores en ambos tratamientos oscilaron entre cercanos a 0 hasta 0.6 MPa. Los valores cercanos a 0 pudieron estar relacionados con días de temperaturas muy elevadas día 186 (36.75 °C), día 200 (40.83 °C) pero no el día 207 (31.92 °C) para el tratamiento RDC. Aunque no hubo diferencias significativas en la fase II, los valores RDC tendieron a ser menores que los del Control desde el día 186.

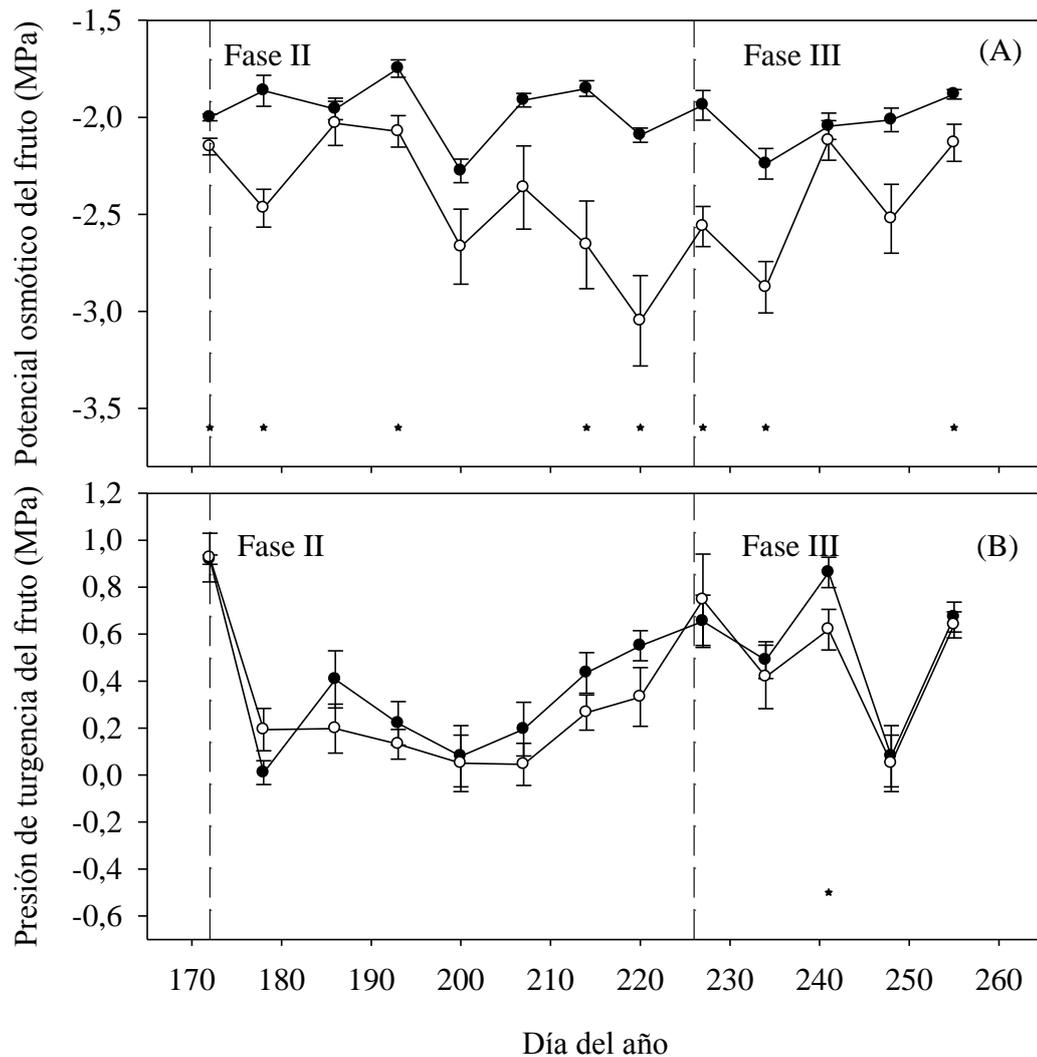


Figura 7. Evolución del potencial osmótico del fruto (A) y presión de turgencia del fruto (B) medidos a la hora de la conductancia estomática máxima, en el tratamiento control (círculos negros) y tratamiento RDC (círculos blancos). Las barras verticales representan el error estándar y las estrellas las diferencias significativas ($p < 0.05$, test de Tukey). Las líneas verticales discontinuas delimitan las distintas fases del período experimental. Cada punto es la media de 6 datos.

Al comienzo de la fase III hay un claro cambio de tendencia con valores de presión de turgencia similares o incluso mayores en el tratamiento RDC que en el Control. Solamente el día 241 el tratamiento RDC presentó valores significativamente menores.

Los sensores de variación del diámetro del tronco dan varios parámetros que permiten establecer el estado hídrico de la planta (Goldhamer et al., 1999). En olivo el más útil es la tasa de crecimiento del tronco (TCT, Moriana y Fereres, 2002). Sin embargo, la TCT es muy variable diariamente por lo que para una mayor claridad en los datos se presenta el crecimiento del tronco (Figura 8). El parámetro a considerar (la TCT) es la pendiente de esta figura y las estrellas indican las fechas en las que hubo diferencia significativas en este parámetro. En la Tabla 2 se presentan las medias de la TCT por estados fenológicos. El crecimiento del tronco durante la fase I fue nulo, siendo la media del periodo en los dos tratamientos ligeramente negativa. Estos valores pudieron estar relacionados con unos niveles de nitrógeno en hoja ligeramente inferiores a los adecuados. Durante la fase II el tratamiento RDC tuvo unas TCT claramente negativas e inferiores a las obtenidas en el Control (Figura 8 y Tabla 2). Esto supuso una contracción neta del tronco hasta el final de la fase II. La TCT en el tratamiento RDC fue muy similar en todo el periodo (Tabla 3), sólo hubo una breve recuperación a partir del día 200 (Figura 8) y que pudo estar relacionada con una disminución brusca de la temperatura (Figura 3). A partir de la fase de rehidratación, la TCT del tratamiento RDC fue positiva y la media del periodo mayor que la obtenida en los árboles Control (Figura 8 y Tabla 3).

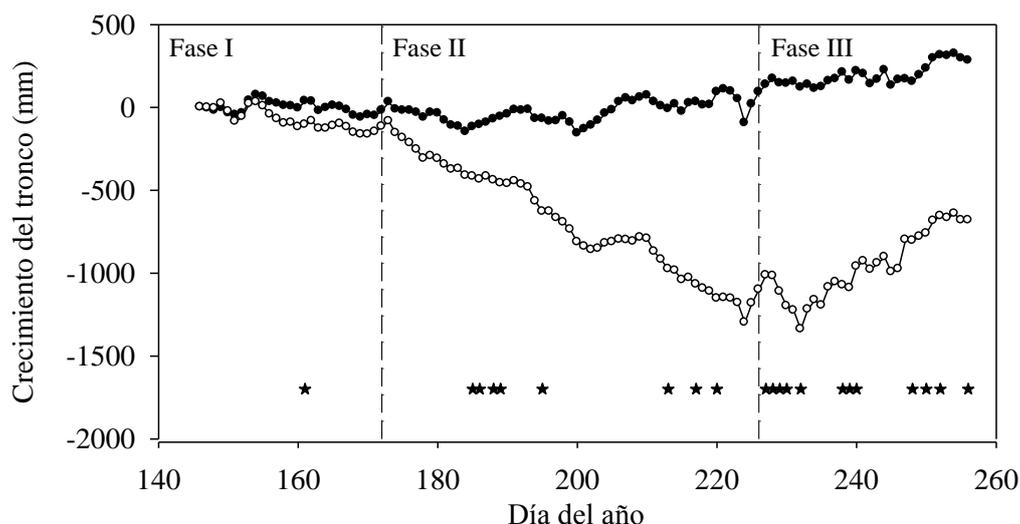


Figura 8. Evolución del crecimiento del tronco en el tratamiento control (círculos negros) y tratamiento RDC (círculos blancos) durante todas las fases del cultivo. Las estrellas indican el momento en el que la tasa de crecimiento del tronco fue significativamente diferente ($p < 0.05$, test de Tukey). Las líneas verticales discontinuas delimitan las distintas fases del período experimental. Cada punto es la media de 6 datos.

Tabla 3. Promedio de la tasa de crecimiento del diámetro del tronco (TCT) en los tres periodos fenológicos diferenciados durante el cultivo. El estado fenológico de endurecimiento de hueso se ha subdividido en dos fases por los cambios detectados en las relaciones hídricas entorno al día 214.

	Control ($\mu\text{m día}^{-1}$)	RDC ($\mu\text{m día}^{-1}$)
Fase I (DDA 155-172).	-5.4 \pm 3.7	-7.8 \pm 3.7
Fase II (DDA 173-231).	3.2 \pm 2.6	-20.8 \pm 3.1
Fase III (DDA 232-256).	4.5 \pm 3.8	22.2 \pm 7.4
Fase IIa (DDA 173-214)	1.4 \pm 2.5	-20.1 \pm 2.7
Fase IIb (DDA 214-231)	5.6 \pm 2.3	-22.9 \pm 8.7

El volumen de fruto presentó un crecimiento continuo a lo largo de todo el experimento para ambos tratamientos, Figura 9 (A). Al final de la fase de endurecimiento masivo del hueso, el volumen de fruto en el tratamiento Control fue significativamente mayor que el encontrado en el tratamiento deficitario; sin embargo, estas diferencias desaparecieron a lo largo de la fase de rehidratación. En ningún tratamiento, ni siquiera en el deficitario, hubo una parada en el crecimiento del fruto, solamente una ralentización en la velocidad de crecimiento, concretamente a partir del día 200. El periodo de rehidratación aunque fue breve, en torno a 2 semanas, fue suficiente para recuperar un tamaño de fruto similar al del Control.

La longitud de brotes se presenta en la Figura 9 B. No hubo diferencias significativas entre tratamientos en ninguna de las fases estudiadas. En ambos tratamientos el crecimiento ocurrió especialmente durante la fase I de cultivo, en el resto la longitud obtenida fue prácticamente constante. Este tipo de evolución es el característico de olivar en años con una cantidad significativa de fruto. A partir de la fase de endurecimiento el fruto se convierte en un sumidero muy importante de nutrientes lo que produce la parada del crecimiento vegetativo (Rallo y Suárez, 1989) independientemente de su estado hídrico.

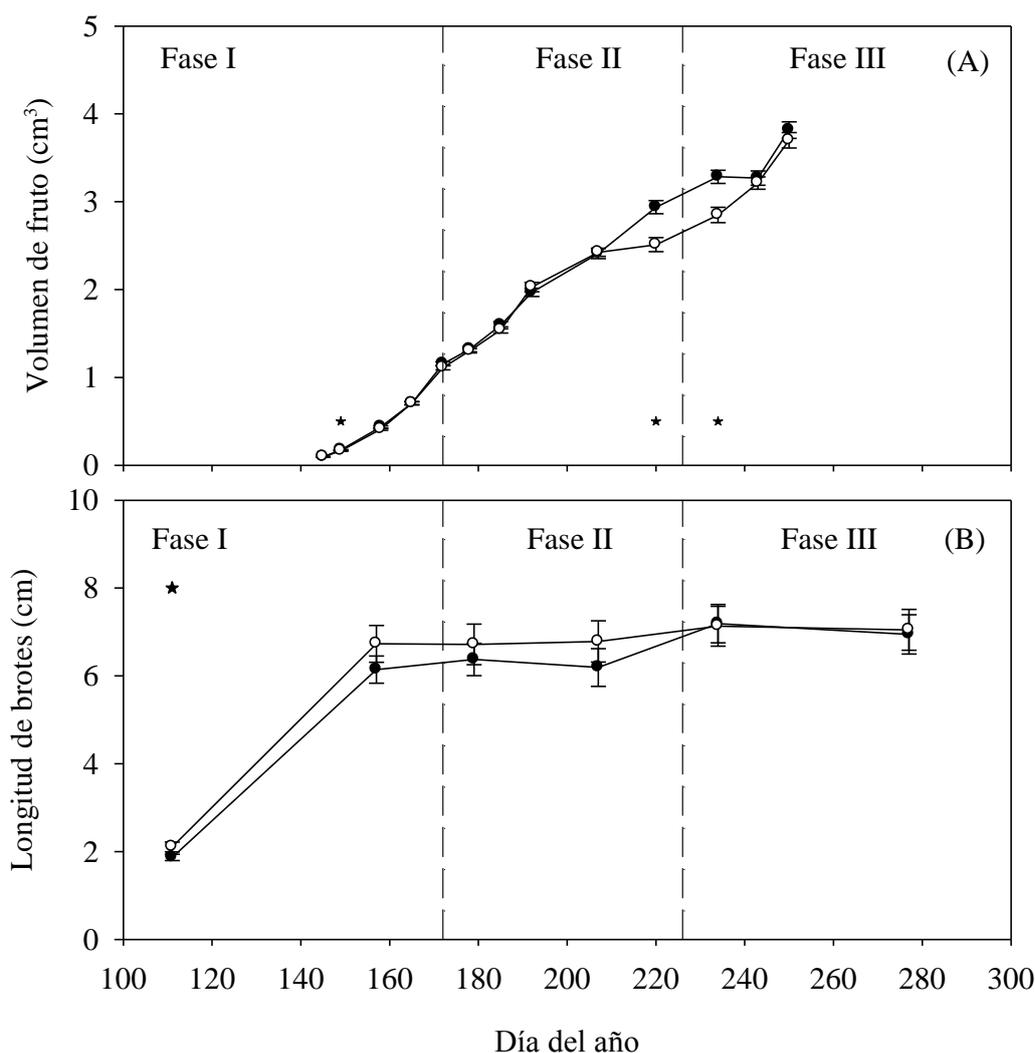


Figura 9. Evolución del volumen de fruto (A) y longitud brotes (B) en el tratamiento control (círculos negros) y tratamiento RDC (círculos blancos) durante todas las fases del cultivo. Las barras verticales representan el error estándar y las estrellas indican el momento en el que la tasa de crecimiento del tronco fue significativamente diferentes ($p < 0.05$, test de Tukey). Las líneas verticales discontinuas delimitan las distintas fases del período experimental.

La disminución de la velocidad de crecimiento del fruto, como otros parámetros de relaciones hídricas, tuvo lugar al final de la fase II. Sin embargo, el estado hídrico de los árboles RDC llegó a su valor mínimo de potencial, alrededor de 2 semanas antes de que se afectase el fruto. Esto sugiere un efecto acumulativo del déficit hídrico que no ha sido evaluado con ninguno de los parámetros anteriores. La Figura 10 presenta los datos de integral de estrés durante toda la fase II y hasta la fecha del último dato de crecimiento del fruto en el que no hubo diferencias significativas (DDA 214, Figura 9). La integral de estrés hídrico antes del día 214 fue significativamente diferente entre los tratamientos Control y

RDC. Los valores obtenidos en este periodo de tiempo tuvieron como máximo valores alrededor de 31 MPa * día para el tratamiento RDC y en torno a 6,6 MPa * día para el control. Cuando se considera el total del período experimental, las diferencias siguieron siendo significativas entre tratamientos. Los valores totales del Control estuvieron en torno a 7,6MPa * día mientras que los de los árboles RDC, continuaron aumentando hasta valores superiores a 42MPa * día.

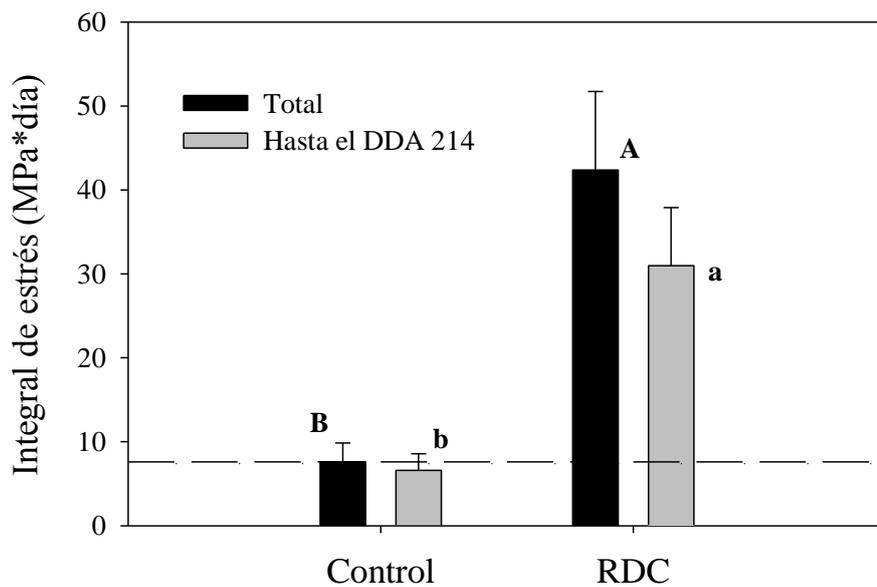


Figura 10. Integral de estrés hídrico durante todo el periodo de endurecimiento masivo del hueso (negro) o hasta el día del año 214 (gris) tomando como referencia el valor -1.4 MPa. Cada columna es la media de 6 datos. Las líneas verticales indican el error estándar. La línea horizontal indica el valor de la integral de estrés en el mismo periodo de tiempo del trabajo de Dell'Amico et al. (2012)(75 MPa*día). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$, Test de Duncan).

La Tabla 4, resume el efecto del manejo del riego en los diferentes factores de la producción de aceituna de mesa. La cantidad de agua aplicada fue muy diferente entre los dos tratamientos: el agua en el tratamiento deficitario fue aproximadamente un 30% de la aplicada en el tratamiento Control. No hubo diferencias significativas entre ninguno de los parámetros productivos. El nivel productivo obtenido se puede considerar como de media cosecha y aunque el Control tendió a valores algo superiores de cosecha, las diferencias fueron sólo de alrededor de un 10%. No obstante cualquier conclusión a cerca de la cosecha requiere al menos de 3 años de datos. Los datos de calidad indicaron aceitunas de tamaño similar,

ligeramente mayores en el Control con un color adecuado en cosecha y una relación pulpa hueso buena.

Tabla 4. Resultados de producción. Cada cifra va acompañada de su error estándar

	Cosecha (Tm/ha)	Escandallo (frutos/kg)	Pulpa:hueso Fresco	Pulpa:hueso Seco	Índice Madurez	Agua Aplic. (mm)
Control	6,6 ± 0,7	233 ± 13	4,1 ± 0,1	1,9 ± 0,1	0,8 ± 0,2	412
RDC	5,9 ± 0,7	240 ± 10	4,4 ± 0,2	2,3 ± 0,1	0,9 ± 0,1	111

4.2 DISCUSIÓN

El inicio del período de estrés estuvo marcado por un descenso constante de las reservas hídricas del suelo para el tratamiento RDC, provocado tanto por la alta demanda evapotranspirativa como por la falta de agua en el suelo, haciendo que este período estuviese dominado por las diferencias en el potencial hídrico del tronco (Ψ_{tallo}) que abarcaron casi todo el periodo de endurecimiento del hueso (Figuras. 3 C y 4 A). Sin embargo, este estrés estuvo diferenciado según la evolución del crecimiento del fruto, en dos partes: una moderada, en la que no hubo diferencias significativas entre tratamientos en relación al crecimiento del fruto, aproximadamente hasta el día del año 214, y otra más severa en la que sí se vio afectado (Figura 9 A).

La primera parte del periodo de déficit hídrico, antes del día 214, afectó de forma significativa a la conductancia estomática foliar, al potencial de tallo medido al mediodía y a la tasa de crecimiento del tronco (TCT) prácticamente en la misma fecha aunque sensiblemente antes en el caso de la conductancia estomática y la TCT (Figuras 4 y 8). Esta mayor precocidad del intercambio gaseoso por efecto del estrés no es la respuesta habitual. Hsiao (1990) indica que el crecimiento es el proceso más sensible en condiciones de sequía. Pérez-López et al., (2007) en olivares jóvenes encontraron diferencias en crecimiento en ausencia de diferencias de potencial hídrico y conductancia estomática. No obstante, en olivares adultos durante el endurecimiento del hueso el crecimiento vegetativo es prácticamente nulo (Figura 9 B) por lo que es muy difícil identificar una afección de este proceso. Tampoco todos los trabajos están de acuerdo en una afección más precoz del intercambio gaseoso que el potencial de tallo (Moriani y Fereres, 2002) aunque sí se ha descrito en otros (Fernández et al., 1997; Díaz-Espejo et al., 2007). Los árboles RDC del presente trabajo llevan en condiciones de riego deficitario controlado varios años lo que podría repercutir en una respuesta más rápida de lo habitual del intercambio gaseoso al estrés hídrico. Fereres y Goldhamer (1990) sugieren que el riego deficitario afecta al largo plazo a los valores de conductancia estomática en frutales, incluso cuando se vuelven a regar de forma no limitante. También puede estar relacionada con un incremento del volumen de raíces en zonas secas lo que daría lugar al efecto de la señal de raíz ya descrita en olivo (Wahbi et al., 2005; Fernández et al., 2006).

Esta respuesta inicial probablemente dio lugar a una reducción en la transpiración, producida por el significativo cierre estomático (Fernández et al., 1997; Tognetti et al., 2009;

Boughalled and Hajlaoui, 2011), pero dicho cierre estomático no llega a afectar al potencial hídrico de la hoja medido a la misma hora (Ψ_{foliar}), ya que no muestran diferencias durante esos días (Figura 5 A). La ausencia de afección en el Ψ_{foliar} podría estar relacionada, además de con el control estomático, con el proceso de rápida deshidratación del tronco que podría compensar la deshidratación del árbol (Figura 8) y un cierto nivel de ajuste osmótico (Figura 6 C). Cermak et al. (2007) trabajando en *Pseudotsuga menziesii* (Mird.) Franco sugiere que el agua almacenada en el tronco puede jugar un papel de gran importancia durante la primera semana del periodo de estrés hídrico. El ajuste osmótico ha sido escrito como una respuesta típica en olivar en diferentes niveles de déficit hídrico (Dichio et al., 1997; 2003) aunque una imposición rápida del estrés podría evitar su identificación (Turner y Jones, 1980). Posiblemente esta es la razón por la que solamente un dato de potencial osmótico a saturación (que nos indicaría el ajuste osmótico) fue significativamente menor al inicio del estrés (Figura 6 C). Dell'Amico et al (2012), en una parcela de olivar vecina a la del presente trabajo, observó ajuste osmótico foliar al final de un periodo de estrés hídrico mucho menos severo que el presentado en la Figura 4.

El potencial hídrico del fruto, en cambio, sí tiene una caída significativa en este periodo (Figura 4 B) que sin embargo no afecta al potencial de turgencia (Figura 7C) ni al crecimiento del fruto (Figura 9) del tratamiento RDC. En este caso, el descenso del potencial hídrico del fruto (Ψ_{fruto}) probablemente se compensó por el ajuste osmótico derivado de la acumulación de solutos en sus células o con otro mecanismo de adaptación. Las diferencias en potencial osmótico en el fruto entre tratamientos sugieren que el proceso de ajuste osmótico pudo ser importante pero al no tener datos de potencial osmótico a saturación en fruto no podemos tener certeza. En brote se han descrito también variaciones en módulo de elasticidad o el contenido de agua del simplasto como mecanismos para atenuar el efecto del estrés (Dichio et al., 1997). Dell'Amico et al (2012) en condiciones de estrés hídrico mucho menores en la misma parcela también sugieren procesos de ajuste osmótico en el fruto que evita la disminución del potencial de turgencia del fruto.

En la siguiente fase del periodo de estrés hídrico durante el endurecimiento del hueso, la respuesta fisiológica de la planta comenzó a cambiar. La manifestación más evidente fue la ralentización en la velocidad de crecimiento del fruto, llegándose a producir diferencias a partir del día 220 (Figura 9). Esta disminución coincide con una caída significativa de la presión de turgencia en hoja (Figura 6 B) y una tendencia a valores menores en la presión de turgencia del fruto, aunque sin diferencias significativas (Figura 7 B). Además en este periodo

los brotes RDC presentaron una mayor diferencia entre el potencial hídrico foliar y el de fruto que los árboles Control (Figura 5 C). La pérdida de turgencia en hoja podría suponer el comienzo de una disminución de la asimilación. Mientras que esa tendencia a una disminución de la turgencia en fruto es la que podría estar relacionada con la disminución en la velocidad de crecimiento del fruto. Los cambios en el diferencial de potencial hídrico foliar y de fruto ($\Delta\Psi$) indican cambios en el flujo de agua hacia el fruto. El incremento del valor de $\Delta\Psi$ sugieren un mayor aporte de agua al fruto vía xilema que vía floema. Los trabajos en otras especies indican que este diferencial suele disminuir por efecto del estrés hídrico (vid, Greenspan et al., 1996; fresón, Pomper and Breen, 1997). Dell'Amico et al (2012) en olivar describen al comienzo de un estrés hídrico muy poco severo una disminución de $\Delta\Psi$. Estas desavenencias con los resultados del presente trabajo podrían estar relacionados con un nivel de deshidratación mayor en este (Figura 4 A) que en otros experimentos.

Estos cambios fisiológicos detectados a partir del día 214 no están claramente relacionados con un incremento en el nivel de estrés hídrico del árbol. Los valores de Ψ_{tallo} y g_{max} permanecieron prácticamente constantes respecto al periodo anterior (Figura 4) aunque se mantuvo la caída del diámetro del tronco (Figura 8). Algo parecido es lo que ocurre en el perfil hídrico del suelo que se encuentra con valores que tienden a ser muy similares, al ir aproximándose al punto de marchitez permanente (Figura 3 C). El nivel de estrés hídrico obtenido en el presente trabajo se puede considerar de moderado. Moriana et al. (2012) ha sugerido en olivar en esta fase de cultivo que un nivel adecuado de potencial hídrico para un riego cercano al óptimo sería de -1.4 MPa. Los trabajos de la bibliografía en riego en olivar obtienen valores muy por debajo de los aquí presentados (p ej., -6 MPa, Moriana et al. (2003); -3 MPa, Whabi et al. (2005); -3.9 MPa, Iniesta et al. (2009)). Hsiao (1990) indica que el efecto del estrés hídrico en un mismo estado fenológico es la suma del nivel y de la duración de éste, lo que podría dificultar el uso de estos indicadores en la programación del riego. Dell'Amico et al (2012) sugieren el umbral de -1.8 MPa como indicador de manejo para la no afeción del tamaño del fruto. Sin embargo, a tenor de los resultados obtenidos, sería preciso, además, el uso de una medida como la integral de estrés que permite considerar los efectos de duración y nivel. En este aspecto, un valor de 31 MPa*día podría ser el umbral a partir del cual el tamaño de fruto se ve afectado. No obstante sería preciso estudios posteriores que pudiesen verificar este valor. Los valores de la integral de estrés se han relacionado con las características organolépticas (Moriana et al 2007) y el contenido de aceite (Moriana et al.,

2012). Incluso este último trabajo incluyendo datos de localidades y variedades diferentes (Moriana et al., 2012).

El periodo de rehidratación permitió una recuperación progresiva de la fisiología del árbol de forma que el volumen de fruto y el tamaño medido en cosecha no fue significativamente diferente entre los tratamientos. Los parámetros estudiados indican que hubo una jerarquización en la recuperación de los árboles. Los valores de potencial de tallo y conductancia estomática no se recuperaron completamente hasta el final del experimento, mientras que otros parámetros como el volumen de fruto, potencial hídrico foliar y de fruto y su diferencial y el potencial de turgencia lo hicieron unas dos semanas antes. Esto supone que aparentemente el árbol recuperó preferentemente antes el crecimiento del fruto que el estado hídrico del brote. La capacidad de rehidratación es una cuestión clave para la aplicación de riego deficitario (Behboudian y Mills, 1997). El intercambio gaseoso en olivo se ha descrito como el parámetro más tardío en la recuperación de los árboles (Larcher et al., 1981), aunque no todos los trabajos coinciden con esta conclusión (Fernández et al., 1997; Giorio et al., 1999). Estas discrepancias se han sugerido que pueden estar asociadas con el nivel de estrés hídrico y el volumen de suelo humedecido durante el periodo de rehidratación (Pérez-López et al., 2008). Los resultados del presente trabajo podrían sugerir que el nivel de carga en los árboles también podría ser un factor a considerar.

5. *CONCLUSIONES*

La respuesta del árbol durante la fase de endurecimiento del hueso a un periodo de déficit hídrico estuvo relacionada con el nivel y la duración del estrés impuesto. La cuantificación mediante la integral de estrés permite diferenciar dos fases con un valor umbral de 31 MPa*día que indicarían el comienzo de un periodo más severo. Al inicio del periodo de estrés, con valores inferiores a 31 MPa*día, la deshidratación del árbol y el cierre estomático provocados por la disminución de agua del suelo fueron atenuados en la hoja por ajuste osmótico y, posiblemente, por la deshidratación parcial del tronco. La disminución del potencial hídrico del fruto no repercutió en su potencial de turgencia ni en el crecimiento lo que podría estar relacionado con diferentes adaptaciones que no pudieron ser evaluadas. Cuando el estrés hídrico fue superior a los 31 MPa*día hubo un cambio significativo en la fisiología de los árboles. El incremento del diferencial entre potenciales de hoja y fruto sugiere una mayor entrada de agua al fruto vía xilema lo que podría estar asociado a una pérdida de turgencia de la hoja. Estos cambios no evitaron una desaceleración del crecimiento del fruto posiblemente ligada a una bajada en el potencial de turgencia, aunque las diferencias no fueron significativas. La rehidratación de los árboles fue completa al final del experimento. Sin embargo, la mayor velocidad en la recuperación del volumen de fruto, potencial hídrico de fruto y hoja y el diferencial entre ambos respecto a la conductancia estomática y el potencial de tallo sugieren que el fruto actuó como sumidero preferente respecto al resto del árbol.



6. BIBLIOGRAFÍA

- Angelopoulos K., Dichio B. & Xiloyannis, C. (1996) Inhibition of photosynthesis in olive trees (*Olea europaea* L.) during water stress and rewatering. *Journal of Experimental Botany*, **47**, 1093–1100.
- Behboudian M.H. & Mills T.M. (1997) Deficit irrigation in deciduous orchards. *Horticultural Reviews*, **21**, 105–131.
- Behboudian M.H. Marsal J. Girona J. & López G. (2011) Quality and yield responses of deciduous fruits to reduced irrigation. *Horticultural reviews*, **38**, 149–189.
- Bongi G. & Long S.P. (1987) Light-dependent damage to photosynthesis in olive leaves during chilling and high temperature stress. *Plant, Cell & Environment*, **10**, 241–249.
- Bowen C.A. Reitemeier R.F. & Fireman M. (1952) Exchangable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil Science*, **73**, 251–261.
- Boughalleb F. & Hajlaoui H. (2011) Physiological and anatomical changes induced by drought in two olive cultivars (cv Zalmati and Chemlali). *Acta Physiologiae Plantarum*, **33**, 53–65.
- Bray E. (1993) Molecular response to water deficit. *Plant Physiology*, **103**, 1035–1040.
- Brought D.W., Jones H.G. & Grace J. (1986) Diurnal changes in water content of the stems of apple trees, as influenced by irrigation. *Plant, Cell & Environment*, **9**, 1–7.
- Caruso G., Rapoport H.F. & Gucci R. (2013) Long-term evaluation of yield components of young olive trees during the onset of fruit production under different irrigation regimes. *Irrigation Science*, **31**, 37–47.
- Castel J.R. & Fereres E. (1982) Responses of olive woody angiosperms to light intensity and humidity. *Canadian Journal of Botany*, **52**, 525–534.
- Čermák J., Kučera J., Bauerle W.L., Phillips N. and Hinckley T. M. (2007) Tree water storage and its diurnal dynamics related to sap flow and changes in stem volume in old-growth Douglas-fir trees. *Tree Physiol*, **27**(2), 181–198.
- Chaves M.M., Maroco J.P. & Pereira J.S. (2003). Understanding plant responses to drought: from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology*, **30**, 239–264.

-
-
- Choat B., Jansen S., Brodribb T.J., Cochard H. & Delzon S. (2012) Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature*, **491**, 752–755.
- Choné X., Van Leeuwen C., Dubourdieu D. & Gaudillère J.P. (2001) Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status. *Annals of Botany*, **87**, 477–483.
- Chalmers D.J., Mitchell P.D. & Jerie P.H. (1985) The relation between irrigation, growth and productivity of peach trees. *Acta Horticulturae*, **173**, 283–288.
- Cohen M. (1992) Optimización del riego a través de la utilización de indicadores de stress hídrico en el árbol. *Fruticultura Profesional*, **45**, 31–42.
- Connor D.J. (2005) Adaptation of olive (*Olea europaea* L.) to water-limited environments. *Australian Journal of Agricultural Research*, **56**, 1181–1189.
- Dell'Amico J., Moriana A., Corell M., Girón I.F., Morales D., Torrecillas A., Moreno F. (2012) Low water stress conditions in table olive trees (*Olea europaea* L) during pit hardening produced a different response of fruit and leaf water relations. *Agricultural Water Management*, **114**, 11–17.
- Dichio B., Nuzzo V., Xiloyannis C. & Angelopoulos K. (1997) Drought stress induced variation of pressure volume relationship in *Olea europea* L. cv Coratina. *Acta Horticulturae*, **449**, 401–409.
- Dichio B., Xiloyannis C., Angelopoulos K., Nuzzo V., Bufo S.A. & Celano G. (2003) Drought induced variations of water relations parameters in *Olea europaea*. *Plant and Soil*, **254**, 381–389.
- Dichio B., Xiloyannis C., Sofo A. & Montarano G. (2006) Osmotic regulation in leaves and roots of olive trees during water deficit and rewatering. *Tree Physiology*, **26**, 179–185.
- ESYRCE (2012). Encuesta sobre superficies y rendimientos. Análisis de las plantaciones de olivar en España. 30pp. Subdirección General de Estadística, SGT. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente
- FAOSTAT (2012). <http://www.faostat.fao.org/corp/statistics/es>
- Fereres E. & Goldhamer D.A. (1990) Deciduous Fruit and Nut Trees Chap. 33. Pp. 987–1017 in: *Irrigation of Agricultural Crops*. (B.A. Stewart & D.R. Nielsen, editors). American Society of Agronomy, Madison.

-
-
- Fernández J.E., Moreno F., Cabrera F., Arrue J.L. & Martín-Aranda J. (1991) Drip irrigation, soil characteristics and the root distribution and root activity of olive trees. *Plant and Soil*, **133**, 239–251.
- Fernández J.E., Moreno F., Girón I.F. & Blázquez O.M. (1997) Stomatal control of water use in olive tree leaves. *Plant and Soil*, **190**, 179–192.
- Fernández J.E. & Moreno F. (1999) Water use by olive tree. *Journal of Crop Production*, **2**, 101–162.
- Fernández J.E., Palomo M.J., Díaz-Espejo A., Clothier B.E., Green S.R., Girón I.F. & Moreno F. (2001) Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnostics of water stress. *Agricultural Water Management*, **51**, 99–123.
- Fernández J.E., Díaz-Espejo A., Infante J.M., Duran P., Palomo M.J., Chamorro V., Girón I.F. & Villagarcía L. (2006) Water relations and gas exchange in olive trees under regulated deficit irrigation and partial rootzone drying. *Plant and Soil*, **284**, 273–291.
- Ferré P.A. & Topp G.C. (2002). Time domain reflectometry. Pp.434–446 in: *Methods of soil Analysis, Part 4-Physical Methods* (J.H. Dana & G.C. Topp, editors). American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
- Gee G.W. & Bauder J.W. (1986) Particle size analysis in: *Methods of soil analysis. Part I. Physical and Mineralogical Methods*. Agronomy n° 9, 2nd edition, ASAk.
- Giorio P., Sorrentino G. & d'Andria R. (1999) Stomatal behaviour, leaf water status and photosynthetic response in field-grown olive trees under water deficit. *Environmental and Experimental Botany*, **42**, 95–104.
- Girma F.S. & Krieg D.R. (1992) Osmotic adjustment in Sorghum. I. Mechanisms of diurnal osmotic potential changes. *Plant Physiology*, **99(2)**, 577–582.
- Goldhamer D.A. (1999) Regulated deficit irrigation for California canning olives. *Acta Horticulturae*, **474**, 369–372.
- Goldhamer D.A., Fereres E., Mata M., Girona J. & Cohen, M. (1999) Sensitivity of continuous and discrete plant and soil water status monitoring in peach trees subjected to deficit irrigation. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, **124**, 437–444.

-
-
- Goldhamer D.A. & Fereres E. (2001) Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. *Irrigation Science*, **20**, 115–125.
- Halevy A.H. (1972) Water stress and the timing of irrigation. *HortScience*, **7**, 113–114.
- Hanan J.J. (1972) Repercussions from water stress. *HortScience*, **7**, 108–112
- Henin S., Gras R. & Monnier G. (1972) El perfil cultural in: C. Roquero de Laburu & J. García Caral (eds.). Mundi-Prensa, Madrid.
- Hsiao T.C. (1990) Measurements of plant water status Chap. 9. Pp. 243–279 in: *Irrigation of agricultural crops* (B.A. Steward & D.R. Nielsen, editors). Agronomy Monograph, 30. American Society of Agronomy, Madison.
- Ingram J. & Bartels D. (1996) The molecular basis of dehydration tolerance in plants. *Annual review of plant physiology and plant molecular biology*, **47**, 377–403.
- Jones H.G. & Cumming I.G. (1984) Variation of leaf conductance and leaf water potential in apple orchards. *The Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, **59**, 329–336.
- Katerji N., Tardieu F., Bethenod O. & Quetin P. (1994) Behavior of Maize stem diameter during drying cycles: comparison of two methods for detecting water stress. *Crop Science*, **34**, 165–169.
- Kaufmann M. R. & Hall A.E. (1974) Plant water balance and its relationship to atmospheric and edaphic conditions. *Agricultural Meteorology*, **14**, 85–98.
- Klepper B., Browing V.D. & Taylor H.M. (1971) Stem diameter in relation to plant water status. *Plant Physiology*, **48**, 683–685.
- Klepper B. (1968) Diurnal pattern of water potential in woody plants. *Plant Physiology*, **43**, 1931–1934.
- Lakso A.N., Geyer A.S. & Carpenter S.C. (1984) Seasonal osmotic relations in apple leaves of different ages. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, **109(4)**, 544–547.
- Larcher W., De Moraes J.A.P.V. & Bauer H. (1981) Adaptive responses of leaf water potential, CO₂-gas and water use efficiency of *olea europeae* during drying and rewatering. Pp. 77–84 in: *Components of productivity of Mediterranean climate regions-Basic and*

-
-
- applied aspects*. (N.S.Margari & H.A. Mooney, editors). Dr W Junk Publishers, The Hague.
- Lavee S. & Wodner M. (1991) Factors affecting the nature of oil accumulation in fruit of olive (*Olea europea L.*) cultivars. *The Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, **66**, 583–591.
- Lavee S., Hanoch E., Wodner M. & Abramowitch H. (2007) The effect of predetermined deficit irrigation on the performance of the cv. Muhasan olive (*Olea europaea L.*) in the eastern coastal plain of Israel. *Scientia Horticulturae*, **112**, 156–163.
- Lo Gullo M.A. & Salleo S. (1988) Different strategies of drought resistance in three Mediterranean sclerophyllous trees growing in the same environmental conditions. *New Phytologist*, **108**, 267–276.
- Loreto F. & Sharkey T.D. (1990) Low humidity can cause uneven photosynthesis in olive (*Olea europaea L.*) leaves. *Tree Physiology*, **6**, 409–415.
- Mariscal M.J. Orgaz F. & Villalobos F.J. (2000) Modelling and measurement of radiation interception by olive canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, **100**, 183–197.
- Martin D.L., Stegman E.C. & Fereres E. (1991) Irrigation Scheduling Principles. Pp. 155–203 in: *Management of Farm Irrigation Systems*. (G.J. Hoffman, T.A. Howell, & K.H. Solomon, editors). American Society of Agricultural Engineers, Madison.
- McCutchan H. & Shackel K.A. (1992) Stem water potential as a sensitive indicator of water stress in prune trees (*Prunus domestica L* cv French). *Journal of the American Society for Horticultural Science*, **117**, 607–611.
- Moreno F., Vachaud G. & Martín-Aranda J. (1983) Caracterización hidrodinámica de un suelo de olivo. Fundamentos teóricos y métodos experimentales. *Anales de Edafología y Agrobiología*, **42**, 695–721.
- Moriana A., Fereres E., Orgaz F., Castro J., Humanes M.D. & Pastor M. (2000) The relations between trunk diameter fluctuations and tree water status in olive tree (*Olea europea L.*). *Acta Horticulturae*, **537**, 293–297.
- Moriana A. & Fereres E. (2002) Plant Indicators for Scheduling Irrigation for Young Olive Trees. *Irrigation Science*, **21**, 83–90.

-
-
- Moriana A. & Fereres E. (2004) Establishing reference values of trunk diameter fluctuations and stem water potential for irrigation scheduling of olive trees. *Acta Horticulturae*, **664**, 407–412.
- Moriana A., Orgaz F., Pastor M. & Fereres E. (2003) Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, **128**, 425–431.
- Moriana A., Girón I.F., Martín-Palomo M.J., Conejero W., Ortuño M.F., Torrecillas A. & Moreno F. (2010) New approach for olive trees irrigation schedulings using trunk diameter sensors. *Agricultural Water Management*, **97**, 1822–1828.
- Moriana A., Moreno F., Girón, I.F., Conejero W., Ortuño M.F., Morales D., Corell M. & Torrecillas A. (2011) Seasonal changes of maximum daily shrinkage reference equations for irrigation scheduling in olive trees: influence of fruit load. *Agricultural Water Management*, **99**, 121–127
- Naor A., Peres M., Greenblat Y., Doron I., Gal Y. & Stern R.A. (2000) Irrigation and crop load interactions in relation to pear yield and fruit size distribution. *The Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, **75**, 555–561.
- Natali S., Bignami C., Cammilli C. & Muganu M. (1999) Effect of water stress on leaf movement in olive cultivars. *Acta Horticulturae*, **474**, 445–448.
- Olsen S.R., Cole C.V., Watanabe F.S. & Dean L.A. (1954) *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate*. U.S. Department of Agriculture. Report 939.
- Orgaz F. & Fereres E. (1997) Riego. Pp. 251–271 in: *El cultivo del olivo*. (D. Barranco, R. Fernández Escobar & L. Rallo, editores). Mundiprensa, Madrid.
- Orgaz F., Testi L., Villalobos F.J. & Fereres E. (2006) Water requirements of olive orchard-II: determination of crop coefficients for irrigation scheduling. *Irrigation Science*, **24**, 77–84.
- Ortuño M.F., Conejero W., Moreno F., Moriana A., Intrigliolo D.S., Biel C., Mellisho C.D., Pérez-Pastor A., Domingo R., Ruiz-Sánchez M.C., Casadesus J., Bonany J. & Torrecillas A. (2010) Could trunk diameter sensors be used in woody crops for irrigation scheduling?.

-
-
- A review of current knowledge and future perspectives. *Agricultural Water Management*, **97**, 1–11.
- Palomo M.J., Díaz-Espejo A., Fernández J.E., Moreno F. & Girón I.F. (1999) Water balance in an olive orchard. Pp. 91. Proc. of the Third International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops. Estoril, Portugal, 28 junio - 2 julio.
- Pérez-López D., Ribas F., Moriana A., Olmedilla N. & De Juan A. (2007) The effect of irrigation schedules on the water relations and growth of a young olive (*Olea europaea* L.) orchard. *Agricultural Water Management*, **89**, 297–304.
- Pérez-López D., Gijón M.C., Moriana A. (2008) Influence of irrigation rate on the rehydration of olive tree plantlets. *Agricultural Water Management*, **95**, 1161–1166.
- Pérez-López D., Pérez-Rodríguez J.M., Moreno M.M., Prieto M.H., Ramírez-Santa-Pau M., Gijón M.C., Guerrero J., Moriana A. (2013) Influence of different cultivars-locations on maximum daily shrinkage indicators: Limits to the reference baseline approach. *Agricultural Water Management*, **127**, 31–39.
- Rapoport H. (1997). Botánica y Morfología Capítulo 2. Pp. 33–58 in: *El cultivo del olivo* (D. Barranco, R. Fernández-Escobar & L. Rallo, editors). MundiPrensa, Madrid.
- Rallo L. & Suárez, M.P. (1989) Seasonal distribution of dry matter within the olive fruit-bearing limb. *Advances in Horticultural Science*, **3**, 55–59.
- Rallo L. (1997) Fructificación y producción. Pp. 104–136 in: *El cultivo del olivo* (D. Barranco, R. Fernández-Escobar & L. Rallo, editors). MundiPrensa, Madrid.
- Shackel K.A., Ahmadi H., Biasi W., Buchner R., Goldhamer D., Gurusinge 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. *HortTechnology*, **7**, 23–29.
- Shackel K.A., Lampinen B., Southwick S., Olson W., Sibbett S., Krueger, W., Yeager J. & Goldhamer D. (2000). Deficit irrigation in prunes:maintaining productivity with less water. *HortScience*, **35**, 30–33.

-
-
- Tenhunen J.D., Pearcy R.W. & Lange O.L. (1987). Diurnal Variances in leaf conductance and gas exchange in natural environments. Pp. 323–351 in: *Stomatal function* (E. Zeiger, G.D. Farquhar & T.R. Cowan editors). Stanford University Press, Stanford.
- Tognetti R., Giovannelli A., Lavini A., Morelli G., Fragnito F. & d'Andria R- (2009) Assessing environmental controls over conductances through the soil-plant-atmosphere continuum in an experimental olive tree plantation of southern Italy. *Agricultural and Forest Meteorology*, **149**, 1229–1243.
- Tyree M.T. & Jarvis P.G. (1982) Water in tissues and cells. Pp. 35–77 in: *Physiological Plant Ecology II: Water Relations and Carbon Assimilation* (O.L. Lange, P.S. Nobel, C.B. Osmond & H. Ziegler, editors). Springer-Verlag, Berlin.
- Tyree M.T. & Zimmerman M.H. (2002) Xylem structure and the ascent of sap.(T. E. Timell Editor) Springer Series in Wood Science, New York.
- Walkley A. & Black I.A. (1934) An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed determination of the chormic acid tritiation method. *Soil Science*, **37**, 29–38.

