

Respuestas ecofisiológicas del olivo (*Olea europaea* L.) al riego deficitario controlado en pre y poscosecha

*Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires, Área
Ciencias Agropecuarias*

Agüero Alcaras, Luis Martín

Ingeniero Agrónomo - Universidad Nacional de Catamarca - 2007

Lugar de Trabajo: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)
Estación Experimental Agropecuaria Chilecito – La Rioja



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis

Peter S. Searles

B.S. in Biology (University of Maryland)

Ph.D, Magister Scientiae (Utah State University)

Consejero de Estudios

Pedro Insausti

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Magister Scientiae en Recursos Naturales (Universidad de Buenos Aires)

Doctor en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

JURADO DE TESIS

JURADO

Sánchez, Enrique Eduardo

Ing. Agr. - Universidad Nacional del Sur

Ph.D. - Oregon State University

JURADO

Scholz, Fabián Gustavo

Lic. en Física - Universidad de Buenos Aires

Doctor en Ciencias Biológicas- Universidad de Buenos Aires

JURADO

Trentacoste, Eduardo Rafael

Ing. Agr. - Universidad Nacional de Cuyo

Doctor - Universidad Politécnica de Madrid

Fecha de defensa de la tesis: 31 de Agosto de 2017

DEDICATORIAS

A mis amores Luciana y Pilar, por el apoyo y la paciencia que me brindaron en estos años.

*A mi mamá Rosita, por demostrarme que el sacrificio y la constancia son la gran fuerza
motriz para concretar los proyectos.*

A mi hermana Lorena, y mis sobrinos, Octaviano y Martina.

A mis tías Rita y Yoli, y mi primo Ignacio.

A la memoria de mi papá Lucho.

AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis, el Dr. Peter Searles, por haberme dado la oportunidad de formarme a su lado, en el grupo de ecofisiología del olivo. Brindándome su tiempo, conocimiento científico y apoyo incondicional desde mis inicios cuando tome la beca, hasta estos días en la escritura de la tesis. Muchas gracias además por enseñarme una conducta profesional equilibrada y sostenida en todas las instancias de la concreción de este proyecto.

A la Dra. Cecilia Rousseaux, por participar permanentemente en la ejecución de este proyecto, y en mi formación. Por comprender la necesidad que tiene la región del Noroeste en la formación de recursos humanos en Agronomía, y haber tomado un grupo de estudiantes egresados de la UNCA, del que forme parte, para introducirlos en el camino de la ciencia.

A mi Consejero de Estudios, el Dr. Pedro Insausti, por los valiosos aportes brindados en la escritura del proyecto y capítulos de esta tesis doctoral; así como su colaboración en las gestiones académicas en la EPG.

A mis compañeros de la formación de posgrado: Silvana Hoffmann, Fabricio Fernández, Guillermo Correa, Valeria Albarracín y Georgina García, por haber conformado un grupo sólido de trabajo y colaboración, con un continuo intercambio de ideas que aun mantengo en la actualidad.

Al Tec. Eduardo Barbero, por ayudarme en las mediciones en el campo, conservando gran voluntad de trabajo, inclusive en esas siestas de calor agobiante en Aimogasta. Además por su amistad, dentro y fuera del ámbito laboral.

Al Ing. Diego Castro por su trabajo minucioso en el laboratorio, enseñándome las técnicas de análisis de calidad de aceite. También por transmitirme su compromiso genuino en mejorar el destino de los pobladores de Casto Barros.

Al Dr. David Gorla por brindarme las instalaciones del CRILAR-CONICET, como los laboratorios y vehículos, y asignarme una casa tan comfortable durante mis años de becario, con vista panorámica a las montañas del Velasco.

Al equipo de Mantenimiento del CRILAR-CONICET (“Charly”, José Luís y Valente) por conservar las instalaciones en perfecto estado y facilitarme las herramientas necesarias para mi trabajo. También al equipo de Secretaría del instituto (Stella, Natalia y Fernando) por orientarme en los trámites académicos y contribuir al funcionamiento diario del instituto.

A los Ings. Matías Cincotta, Javier Gómez y al Lic. Alan Fillmore por cederme el “lote 6” de Agro Aceitunera S.A., para hacer los experimentos. También a sus empleados, Miguel Quinteros, Segundo Alcoba y Ceferino Peralta por ayudarme en los turnos de riego de manera desinteresada y responsable.

Al director de la E.E.A. del I.N.T.A. Chilecito, el Ing. José Luis Ladux por autorizarme a mantener frecuentes reuniones con mi director de tesis, luego de la culminación de mi beca;

así como a mis compañeros de trabajo, por acompañarme en estos últimos años de escritura. Especialmente a José Carrizo y Gustavo Dávila, por la colaboración en el uso del software.

Finalmente, un agradecimiento especial a Mabel Bressán y Romina Profumo, por su eficiente trabajo en la EPG Ing. Alberto Soriano, respondiendo con mucha amabilidad a todas mis consultas.

DECLARACIÓN

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original, producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros) y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución.

Luis Martín Agüero Alcaras

ÍNDICE GENERAL

COMITÉ CONSEJERO.....	ii
JURADO DE TESIS.....	ii
DEDICATORIAS.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
DECLARACIÓN.....	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ABREVIATURAS.....	xvi
PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS.....	xviii
RESUMEN.....	xix
ABSTRACT.....	xxi
Capítulo 1. Introducción General.....	1
1.1. El uso del agua por el sector agrícola.....	2
1.2. El olivo y su expansión en Argentina.....	3
1.3. Estrategias de Riego Deficitario Controlado.....	7
1.4. Respuestas de variables fisiológicas al riego deficitario.....	9
1.4.1. Potencial hídrico xilemático y comportamiento estomático.....	9
1.4.2. Variaciones en el diámetro de troncos.....	12
1.4.3. Flujo de savia.....	14
1.5. Humedad del suelo.....	16
1.6. Crecimiento vegetativo y floración bajo condiciones de estrés hídrico.....	16
1.7. Cantidad y calidad del aceite.....	20
1.8. Objetivos e hipótesis.....	22
1.9. Originalidad y significancia de la tesis.....	24
Capítulo 2. Respuestas de varios indicadores de suelo y planta al riego deficitario controlado en poscosecha en olivares. Su potencial para la programación del riego.....	26
2.1. Introducción.....	27
2.2. Materiales y métodos:.....	30
2.2.1. Sitio experimental.....	30
2.2.2. Tratamientos de riego y diseño experimental.....	32
2.2.3. Humedad de suelo.....	34
2.2.4. Potencial hídrico xilemático, conductancia foliar y flujo de savia.....	35
2.2.5. Variaciones en el diámetro del tronco.....	37
2.2.6. Intensidad de señal, coeficiente de variación y sensibilidad.....	38
2.2.7. Análisis estadístico.....	39

2.3. Resultados	39
2.3.1. Datos meteorológicos y riegos aplicados.....	39
2.3.2. Humedad del suelo, potencial hídrico xilemático y conductancia foliar	41
2.3.3. Variaciones en el diámetro del tronco y flujo de savia	44
2.3.4. Relaciones entre la humedad de suelo y las variables fisiológicas.....	46
2.3.5. Intensidad de señal, coeficiente de variación y sensibilidad	49
2.4. Discusión.....	51
2.5. Conclusión	58
Capítulo 3. Respuestas vegetativas y reproductivas del olivo a diferentes niveles de riego deficitario en poscosecha	60
3.1. Introducción	61
3.2. Materiales y métodos:	65
3.2.1. Crecimiento vegetativo.....	66
3.2.2. Cantidad y calidad floral	66
3.2.3. Cuaje y tamaño de los frutos	67
3.2.4. Rendimiento de fruta y productividad del agua	68
3.2.5. Análisis estadístico	68
3.3. Resultados	69
3.3.1. Datos meteorológicos y riego aplicado.....	69
3.3.2. Humedad del suelo y potencial hídrico xilemático	71
3.3.3. Cantidad y calidad floral	72
3.3.4. Número de frutos y rendimiento.....	73
3.3.5. Variables de frutos individuales	75
3.3.6. Productividad del agua	76
3.3.7. Crecimiento de ramas y tronco	77
3.4. Discusión.....	80
3.5. Conclusión	86
Capítulo 4. Efectos del Riego Deficitario Controlado durante la precosecha sobre la calidad y cantidad de los frutos y del aceite (<i>Olea europaea</i> L. cv. Manzanilla fina) en una región árida de Argentina	88
4.1. Introducción:	89
4.2. Materiales y métodos:	93
4.2.1. Tamaño, peso e índice de madurez de los frutos	94
4.2.2. Humedad de la pasta de los frutos y concentración de aceite	94

4.2.3. Rendimiento del aceite	95
4.2.4. Calidad del aceite	95
4.2.5. Análisis estadístico	97
4.3. Resultados	97
4.3.1. Humedad del suelo y potencial hídrico xilemático	97
4.3.2. Peso y tamaño de los frutos	98
4.3.3. Dinámica de humedad de la pasta, índice de madurez y concentración de aceite	100
4.3.4. Rendimiento de aceite	102
4.3.5. Calidad de aceite	104
4.4. Discusión.....	107
4.5. Conclusión:	112
Capítulo 5. Discusión general	113
5.1. Abordaje del problema	114
5.2. Validación de hipótesis	117
5.3. Relevancia para el estado actual del conocimiento y aplicaciones	125
5.4. Conclusiones finales.....	128
Bibliografía	130

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1. Evapotranspiración de referencia (ET _o), riego en el período de riego deficitario controlado en poscosecha (RDC) y riego anual durante los años 2009 y 2010.	41
Cuadro 2.2. Coeficiente de variación (%) y sensibilidad (intensidad de señal/CV) del potencial hídrico xilemático (Ψ_x), conductancia foliar (g_l), humedad volumétrica del suelo (HV), incremento del diámetro máximo del tronco (MXTD) y contracción diaria del tronco durante el período de riego deficitario en poscosecha en los años 2009 y 2010.	51
Capítulo 3. Respuestas vegetativas y reproductivas del olivo a diferentes niveles de riego deficitario en poscosecha	60
Cuadro 3.1. Evapotranspiración de referencia (ET _o), riego en el período de riego deficitario controlado en poscosecha (RDC), riego anual, contenido relativo de agua extraíble del suelo (REW) y potencial hídrico xilemático (Ψ_x) durante las temporadas 2008-09, 2009-10 y 2010-11.	71
Cuadro 3.2. Número de flores perfectas e imperfectas, total de flores por inflorescencia y el porcentaje de frutos cuajados medido en brindillas en el control (T100) y los tratamientos de riego deficitario controlado en poscosecha (T66, T33 y T0) durante las temporadas 2009-10 y 2010-11. Los valores mostrados representan promedios \pm error estándar (n= 5 parcelas por tratamiento). La letra “a” indica que no hay diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tratamientos en una temporada.	73
Cuadro 3.3. Peso fresco por fruto, relación de peso fresco de pulpa: carozo (P/C) y porcentaje de humedad de frutos en la cosecha durante las temporadas, después de la aplicación de RDC (2009-10, 2010-11, 2011-12). Los valores mostrados representan promedios \pm error estándar (n= 5 parcelas por tratamiento). La letra “a” indica que no hay diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tratamientos en una temporada.	76
Cuadro 3.4. Crecimiento longitudinal de ramas vegetativas y área seccional del tronco para el control (T100) y los tratamientos de RDC en poscosecha (T66, T33 y T0) durante las temporadas 2008-09, 2009-10 y 2010-11. Los datos mostrados representan promedios \pm error estándar de 5 parcelas por cada tratamiento. Las diferentes letras indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tratamientos en una temporada.	79
Cuadro 4.1. Contenido relativo de agua extraíble del suelo (REW) y potencial hídrico xilemático (Ψ_x) para el control (T100) y los tratamientos de riego deficitario controlado en precosecha (T66, T33 y T0) medido en abril en las temporadas 2008-09 y 2010-11. Los valores mostrados representan promedios \pm error estándar (n= 5 parcelas por tratamiento). Las diferentes letras indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tratamientos en una temporada o fecha.	97
Cuadro 4.2. Peso fresco y seco, largo y ancho de frutos individuales para el control (T100) y los tratamientos de riego deficitario controlado en precosecha (T66, T33 y T0). Las variables fueron medidas en mayo en 2008-09 y en abril y mayo en 2010-11. Los valores mostrados representan promedios \pm error estándar (n= 5 parcelas por tratamiento). Las diferentes letras indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tratamientos en una temporada o fecha.	99
Cuadro 4.3. Acidez, índice de peróxidos, coeficientes de extinción (K232 y 270) y polifenoles totales para el control (T100) y los tratamientos de riego deficitario controlado en precosecha (T66, T33 y T0). Los muestreos fueron realizados en mayo de 2008-09 y en abril y mayo de 2010-11. Los	

valores mostrados representan promedios \pm error estándar (n= 5 parcelas por tratamiento). Las diferentes letras indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tratamientos en una temporada o fecha..... 105

Cuadro 4.4. Porcentaje (%) de los ácidos grasos principales del aceite para el control (T100) y para los tratamientos de riego deficitario controlado en precosecha (T66, T33 y T0). Los muestreos fueron realizados en mayo de 2008-09, y en abril y mayo de 2010-11. Los valores mostrados representan promedios \pm error estándar (n= 5 parcelas por tratamiento). Las diferentes letras indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tratamientos en una temporada o fecha. 106

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 2.1.** Precipitación y temperatura máxima (T max), promedio (T prom) y mínima (T min) durante los años 2009 (A) y 2010 (B). Evapotranspiración de referencia (ET_o) y déficit de presión de vapor (DPV) durante los años 2009 (C) y 2010 (D). Las líneas verticales punteadas indican el inicio y fin de la aplicación de los tratamientos de riego deficitario controlado en poscosecha.40
- Figura 2.2.** Contenido relativo de agua extraíble del suelo (REW; A, B) potencial hídrico xilemático (Ψ_x ; C, D) y conductancia foliar (g_l ; E, F) para el control (T100) y los tratamientos de riego deficitario controlado en poscosecha (T66, T33 y T0) durante los años 2009 y 2010. Los puntos de datos mostrados representan promedios \pm error estándar (n= 5 parcelas por tratamiento). Las líneas verticales indican el inicio y fin de la aplicación de los tratamientos.43
- Figura 2.3.** Incremento del máximo diámetro del tronco (MXTD; A, B), tasa de crecimiento relativa (TGR; C, D) y contracción diaria del tronco (MDS; E, F) para el control (T100) y los tratamientos de riego deficitario controlado en poscosecha (T66, T33 y T0) durante los años 2009 y 2010. Los puntos de datos mostrados representan promedios de 3 árboles por cada tratamiento. Las líneas punteadas verticales indican el inicio y fin de la aplicación de los tratamientos.45
- Figura 2.4.** Transpiración del canopeo (A, B) expresada por unidad de área foliar para el control (T100) y los tratamientos de riego deficitario controlado en poscosecha (T33 y T0) durante los años 2009 y 2010. Los datos mostrados representan promedios \pm error estándar de 2 árboles por cada tratamiento.46
- Figura 2.5.** Relaciones no-lineales entre contenido relativo de agua extraíble (REW%) con el potencial hídrico xilemático (Ψ_x) y la conductancia foliar (g_l) para el control (T100) y los tratamientos de riego deficitario controlado en poscosecha (T66, T33 y T0) durante los años 2009 y 2010. Los puntos de datos mostrados representan promedios de 5 parcelas por cada tratamiento. ..47
- Figura 2.6.** Relaciones entre el incremento del diámetro máximo del tronco (MXTD; A-C), tasa de crecimiento relativa (TGR; D-F) y contracción diaria del tronco (MDS; G-I) con el contenido relativo de agua extraíble (REW), potencial hídrico xilemático (Ψ_x) y conductancia foliar (g_l) para el control (T100) y los tratamientos de riego deficitario controlado en poscosecha (T66, T33 y T0) durante los años 2009 y 2010. Los datos mostrados representan promedios \pm error estándar por cada tratamiento. En el MDS y la TGR no se consideró la primera ni la última fecha, luego de reiniciado el riego normal. En el incremento del MXTD tampoco se consideraron las fechas antes y después de aplicar los tratamientos.48
- Figura 2.7.** Intensidad de señal (IS) de la humedad volumétrica, potencial hídrico xilemático (Ψ_x), conductancia foliar (g_l), incremento del máximo diámetro del tronco (MXTD) y contracción diaria del tronco (MDS) para los tratamientos de riego deficitario controlado en poscosecha de T0 (A, B) y T33 (C, D) durante los años 2009 y 2010. Las líneas verticales indican el inicio y fin de la aplicación de los tratamientos, mientras las líneas horizontales indican que los valores del tratamiento de RDC y el control (T100) son iguales (i.e., IS=1).50
- Figura 3.1.** Temperatura máxima diaria y mínima diaria mensual (A) y evapotranspiración de referencia media mensual (ET_o) (B) entre las temporadas 2008-09 y 2011-12. Las letras F y H representan las fechas de plena floración y cosecha, respectivamente. Las líneas verticales indican el inicio y fin de la aplicación de los tratamientos de riego deficitario controlado en poscosecha. ..70

Figura 3.2. Número de inflorescencias ($\# \text{ m}^{-3}$) para el control (T100) y los tratamientos de riego deficitario controlado en poscosecha (T66, T33 y T0) durante las temporadas 2009-10 y 2010-11. Los datos mostrados representan promedios + error estándar de 5 parcelas por cada tratamiento. ..72

Figura 3.3. Número de frutos por árbol (A) y el rendimiento por hectárea (B) durante las temporadas 2008-09, 2009-10, 2010-11 y 2011-12 para el control (T100) y los tratamientos de riego deficitario controlado en poscosecha (T66, T33 y T0). Los puntos y barras de los datos mostrados representan promedios \pm error estándar ($n= 5$ parcelas por tratamiento).74

Figura 3.4. Rendimiento total acumulado durante las tres temporadas (2009-10, 2010-11, 2011-2012) después de las aplicaciones de riego deficitario controlado en poscosecha (T66, T33 y T0) y el control (T100). Las barras de datos mostrados representan promedios \pm error estándar ($n= 5$ parcelas por tratamiento).75

Figura 3.5. Productividad del agua expresada en kg de fruta por mm de agua aplicada en una hectárea durante las temporadas 2009-10, 2010-11 y 2011-12 para el control (T100) y los tratamientos de riego deficitario controlado en poscosecha (T66, T33 y T0). Los puntos y barras de datos mostrados representan promedios \pm error estándar ($n= 5$ parcelas por tratamiento).77

Figura 4.1. Humedad de pasta (%) para el control (T100) y los tratamientos de riego deficitario controlado en precosecha (T66, T33 y T0) en las temporadas 2008-09 (A) y 2010-11 (B). Los puntos de datos mostrados representan promedios \pm error estándar ($n= 5$ parcelas por tratamiento). Las líneas verticales indican el inicio y fin de la aplicación de los tratamientos. Las diferentes letras indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tratamientos en una fecha.100

Figura 4.2. Índice de madurez (A, B) y concentración (%) de aceite en base seca (C, D) para el control (T100) y los tratamientos de riego deficitario controlado en precosecha (T66, T33 y T0) en las temporadas 2008-09 y 2010-11. Los datos mostrados representan promedios \pm error estándar ($n= 5$ parcelas por tratamiento). Las líneas verticales indican el inicio y fin de la aplicación de los tratamientos. Las diferentes letras indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tratamientos en una fecha.102

Figura 4.3. Rendimiento de aceite (A) por cada temporada y el rendimiento acumulado de aceite durante las temporadas 2008-09, 2009-10 y 2010-11 (B) para el control (T100) y los tratamientos de riego deficitario controlado en precosecha (T66, T33 y T0). Los datos representan promedios \pm error estándar ($n= 5$ parcelas por tratamiento). Las diferentes letras indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tratamientos en una temporada.103

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 2.1. La imagen muestra la finca comercial de olivos donde se realizó el experimento, ubicada a 15 km de la ciudad de Aimogasta, provincia de La Rioja. Los árboles adultos de 10 años de edad tenían una altura promedio de 3.7 m, plantados a 4 m dentro de la fila y 8 m entre filas.34

Foto 2.1. Las medidas de potencial hídrico xilemático fueron realizadas al mediodía solar, en condiciones de cielo despejado, con una cámara de presión con un rango de 0-8 MPa.....36

ÍNDICE DE APÉNDICES

Apéndice 1. Patrones diarios de transpiración en árboles de olivo antes y durante la aplicación de tratamientos de RDC, durante los años 2009 y 2010.....	158
--	-----

ABREVIATURAS

ANOVA: (analysis of variance) análisis de la varianza

CV: coeficiente de variación

COI: Consejo Oleícola Internacional

DMXTD: (difference of maximum trunk diameter) diferencia diaria del máximo diámetro del tronco

DTGR: diferencia en la TGR de dos árboles

DPV: déficit de presión de vapor

ETc: evapotranspiración del cultivo

ETo: evapotranspiración de referencia

FAO: (Food and Agriculture Organization of the United Nations) Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

g_l: conductancia foliar

HV: humedad volumétrica del suelo

INA-CRAS: Instituto Nacional de Agua-Centro Regional de Aguas Subterráneas

IS: intensidad de señal

Kc: coeficiente de cultivo

Kr: coeficiente de reducción

K232: coeficiente de extinción doscientos treinta y dos

K270: coeficiente de extinción doscientos setenta

meq: miliequivalente

mmol: millimol

MPa: megapascal

MDS: (maximum daily shrinkage) máxima contracción diaria

MNTD: (minimum trunk diameter) mínimo diámetro del tronco diario

MXTD: (maximum trunk diameter) máximo diámetro del tronco diario

n: tamaño de la muestra

nm: nanómetro

NOA: Noroeste Argentino

P/C: relación pulpa carozo

PF: peso fresco de los frutos

PS: peso seco de los frutos

R: es la humedad volumétrica actual del suelo

RDC: riego deficitario controlado

RDI: (regulated deficit irrigation) riego deficitario controlado

REW: (relative extractable water) contenido relativo de agua extraíble

R_{max}: humedad volumétrica del suelo a capacidad de campo

R_{min}: humedad mínima del suelo

S: sensibilidad

TGR: (trunk growth rate) tasa de crecimiento del tronco

VDT: variaciones en el diámetro del tronco

Ψ_{pd} : potencial hídrico antes del amanecer

ψ_x : potencial hídrico xilemático

μm : micrómetro

PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS

El contenido del Capítulo 2 fue publicado como Agüero Alcaras, M. L., Rousseaux, M. C., Searles, P. S. 2015. Responses of several soil and plant indicators to post-harvest regulated deficit irrigation in olive trees and their potential for irrigation scheduling. *Agricultural Water Management* 171, 10-20.

Además, algunos datos de este Capítulo 2 fueron publicados como Searles, P.S., Agüero Alcarás, M., Rousseaux, M.C., 2011. Consumo de agua por el cultivo del olivo (*Olea europaea* L.) en el noroeste de Argentina: una comparación con la Cuenca Mediterránea. *Ecología Austral* 21, 15-28.

RESUMEN

Respuestas ecofisiológicas del olivo (*Olea europaea* L.) al riego deficitario controlado en pre y poscosecha

El uso del agua en zonas áridas y semiáridas en el Noroeste Argentino ha aumentado debido a la expansión agrícola de las últimas décadas. El olivo es uno de los cultivos más plantados en fincas intensivas, regado con sistemas de goteo, con agua proveniente del subsuelo por la falta de cursos superficiales. El riego deficitario controlado (RDC), aplicado en momentos de elevada evapotranspiración, reduciría potencialmente el uso del agua y otorgaría sostenibilidad a estas fincas a largo plazo. El objetivo general de esta tesis fue evaluar las respuestas ecofisiológicas del olivo con RDC en pre y poscosecha (i.e., fin de verano y otoño) durante tres años en la variedad ‘Manzanilla fina’. Se utilizó esta variedad por ser de cosecha temprana y además por ser la más plantada en el mundo para la producción de aceitunas de mesa. En la Cuenca Mediterránea, donde el olivo es el principal cultivo, el RDC ha sido escasamente evaluado en esta época, debido a que las precipitaciones ocurren desde el otoño. Se aplicaron tres tratamientos de riego deficitario (66, 33 y 0% de la evapotranspiración del cultivo, ETc) y un control regado al 100% de la ETc por 75 días entre fines del verano y mediados del otoño, en una finca comercial en Aimogasta, La Rioja. Para evaluar el efecto del RDC en pos y precosecha, un grupo de árboles fueron cosechados temprano para aceituna de “mesa”, y otro al final de la temporada para elaborar aceite de oliva. El efecto del RDC se determinó en poscosecha midiendo la dinámica de las respuestas del potencial hídrico xilemático, la conductancia foliar, la contracción diaria del tronco y la transpiración (capítulo 2); y también los efectos posteriores del RDC en poscosecha sobre los componentes del rendimiento y en el crecimiento vegetativo (capítulo 3). Además en la precosecha bajo RDC se evaluó la

acumulación y la calidad del aceite (capítulo 4). Los tratamientos del RDC en poscosecha generaron una amplia gama de valores de humedad del suelo, reflejados de manera consistente en descensos de los valores de las variables fisiológicas evaluadas. El potencial hídrico xilemático mostró relaciones altamente significativas con algunos parámetros derivados de las variaciones del diámetro del tronco, como el incremento en el máximo diámetro del tronco, aunque no con la contracción diaria del tronco. Estos resultados contribuyen a avanzar en la comprensión de la fisiología del olivo con diversos grados de estrés hídrico, y establecer valores umbrales relacionados al manejo del riego. Por otro lado, el crecimiento de ramas no fue marcadamente afectado por el RDC en poscosecha, debido a que en esta época la tasa de crecimiento fue baja en todos los árboles; inclusive en los árboles regados al 100% de ETc. Además, no hubo reducciones en el rendimiento de la fruta luego de tres temporadas de aplicación de RDC en poscosecha. La cantidad de aceite no disminuyó en los tratamientos de RDC en precosecha al sumar las tres temporadas, aunque con la suspensión de riego (0% ETc), la calidad fue disminuida. Estos resultados indican que las estrategias de riego alternativas son factibles en regiones con climas no-mediterráneos como el Noroeste Argentino.

Palabras Claves: Calidad del aceite de oliva, Crecimiento vegetativo, Potencial hídrico xilemático, Rendimiento, Riego deficitario controlado, Variaciones en el diámetro del tronco.

ABSTRACT**Ecophysiological responses of olive trees (*Olea europaea* L.) to regulated deficit irrigation in pre- and post-harvest**

Water use in the arid and semi-arid zones of Northwest Argentina has increased due to the agricultural expansion of the last several decades. Olive is one of the most planted crops in intensively managed orchards with deep groundwater being used for irrigation due to the lack of surface water and drip irrigation being common to improve efficiency. Regulated deficit irrigation (RDI), applied at times of high evapotranspiration, would potentially allow the use of less water and lead to the sustainability of these orchards over the long term. The general objective of this thesis was to evaluate the ecophysiological responses of olive trees to RDI in pre- and post-harvest (i.e. late summer and autumn) for three years in the 'Manzanilla fina' variety. This variety was used to be of early harvest and also to be the most planted in the world for the production of table olives. In the Mediterranean Basin where most olive is cultivated, RDI has been little evaluated at this time of the season because precipitation is common in the autumn. Three deficit irrigation treatments (66, 33 and 0% of the crop evapotranspiration, ET_c) and a control irrigated with 100% of the ET_c were applied for 75 days between late summer and mid-autumn in a commercial orchard in Aimogasta, La Rioja. Trees harvested early for table olives and trees harvested at the end of the season for olive oil were used for post-harvest and pre-harvest RDI evaluations, respectively. The effect of post-harvest RDI on the dynamics of stem water potential, foliar conductance, maximum daily trunk shrinkage and sap flow was determined (Chapter 2), as were the subsequent effects of post-harvest RDI on yield components and vegetative growth (Chapter 3). Additionally, the responses of oil accumulation and quality to pre-harvest RDI were evaluated (Chapter 4). The post-harvest RDI treatments generated a wide range of soil moisture values, which were consistently

reflected in decreases in the physiological variables evaluated. Stem water potential showed highly significant relationships with some parameters derived from trunk diameter variations such as the increase in maximum trunk diameter, but not with maximum daily trunk shrinkage. These results contribute to advancing our understanding of the physiology of olive trees under different degrees of water stress, and to establish threshold values related to irrigation management. Branch growth was not significantly affected by post-harvest RDI because the growth rate was low in all trees at this time of the season, including in the trees receiving irrigation equivalent to 100% ET_c, and there were no reductions in fruit yield after three seasons of post-harvest RDI application. The cumulative oil yield was not diminished in the pre-harvest RDI treatments over the three years, but the suspension of irrigation (0% ET_c) resulted in lower oil quality. These results indicate that alternative irrigation strategies are feasible in regions with non-Mediterranean climates such as the Argentine Northwest.

Key Words: Olive oil quality, Vegetative growth, Stem water potential, Yield, Regulated deficit irrigation, Trunk diameter variations.

Capítulo 1. Introducción General

1.1. El uso del agua por el sector agrícola

La agricultura es la actividad que genera mayor demanda de agua dulce con la práctica del riego, en relación a otros sectores de consumo (United Nations Environmental Programme, 2008; Perry et al., 2009). Se estima en la actualidad que hay 250-280 millones de hectáreas regadas a nivel mundial (Fereres, 2008), representando el 70% del uso total (Garces-Restrepo et al., 2008), mientras que la cantidad usada por otros sectores es sustancialmente menor, con el 20% para la industria y el 10% en el uso domiciliario (Fereres y Evans, 2006). Antiguamente la utilización del agua por la agricultura no fue tan marcada. En 1950, la superficie regada en el mundo era de 100 millones de hectáreas, pero avances tecnológicos como el riego por goteo y el desarrollo de bombas para extraer el agua subterránea, han permitido una expansión de los cultivos a zonas áridas y semiáridas, donde tradicionalmente la agricultura era una actividad marginal (Venot et al., 2014; Venot, 2016). Además, se puede prever para los próximos años que la agricultura seguirá siendo el mayor consumidor del agua, principalmente en países con gran dependencia del riego, como Argentina (Paz et al., 2000; Assouline et al., 2015). Sin embargo, la competencia de este recurso con otras actividades de la sociedad podría aumentar fuertemente (Fereres y Evans, 2006; Fereres, 2008; Vörösmarty et al., 2010; Bonsch et al., 2015).

El riego en Argentina representa aproximadamente 1,4 millones de hectáreas, regadas con agua proveniente de embalses, ríos y del subsuelo mediante perforaciones para sistemas de riego por goteo (FAO; <http://www.fao.org>). En algunas zonas pampeanas, el riego con pivot central se ha expandido en cultivos extensivos en los últimos años, mientras que el riego por goteo tuvo mayor impulso en cultivos de árboles frutales, como el olivo, en el centro-oeste y noroeste del país (INA-CRAS, Instituto Nacional de Agua-Centro Regional de Aguas Subterráneas, 2005). En el noroeste, las condiciones de aridez son

prevalentes, con altas temperaturas y precipitaciones escasas. Por lo tanto, en el NOA son necesarios 1200 mm anuales en fincas con plantaciones maduras de olivo para mantener el cultivo en una buena condición hídrica. Este volumen de agua es reemplazado generalmente por riego por goteo, con agua extraída de acuíferos subterráneos entre 200 y 400 m de profundidad (Correa-Tedesco et al., 2010; Searles et al., 2011), ya que las fuentes de agua superficial son reducidas y utilizadas prioritariamente para consumo humano. Sin embargo, el uso de las cuencas subterráneas no está controlado adecuadamente, y hay indicios que la extracción anual de los acuíferos es mayor que las recargas (Carignano et al., 2008). Recientes estudios midieron disminuciones de hasta 1 m, comparando niveles entre los años 2006 y 2015, en acuíferos de zonas olivícolas de La Rioja (Gonzalez-Rivot et al., 2016). Además, actualmente no siempre hay suficiente energía eléctrica para cubrir el consumo de las áreas urbanas y el sector olivícola en los meses más cálidos. Por estos motivos, las estrategias de riego en olivo que reduzcan el total de agua aplicada podrían contribuir en mantener la sustentabilidad del sistema en el corto y largo plazo (Khan et al., 2006; Connors et al., 2014).

1.2. El olivo y su expansión en Argentina

El olivo (*Olea europaea* L.) es un árbol de tamaño mediano, con hojas persistentes y copa globosa (Rapoport, 1998) que habita exitosamente en zonas áridas y semiáridas. El olivo es la única especie con frutos comestibles de la familia Oleaceae (Morettini, 1972). Es cultivado desde 3000-4000 años a. de C., tolerando veranos cálidos y secos en la parte oriental de la Cuenca Mediterránea (Zohary y Spiegel-Roy, 1975). Los frutos del olivo (aceitunas) son utilizados para consumo, aunque siempre necesitan una elaboración previa (Fiorino, 1996). Para el consumo de aceituna de “mesa”, las mismas se procesan utilizando

salmuera para disminuir el sabor amargo (Maldonado y Zuritz, 2003), y para la obtención del aceite los frutos deben ser molidos, separando luego el aceite del resto de la molienda por diversos métodos (Cucurachi et al., 1975; Kiritsakis y Markakis, 1988). Si bien existen variedades con aptitudes para “mesa” y otras para aceite, algunas como ‘Manzanilla fina’ pueden ser utilizadas para ambos destinos.

Los países del Mediterráneo, son los principales productores olivícolas, aunque Argentina tuvo importantes impulsos en las últimas décadas. En la actualidad se estima que existen 10 millones de ha plantadas con olivo en el mundo, concentrándose el 98% de la producción en la Cuenca Mediterránea (Civantos, 2008). En Argentina, hasta los años 90 había 30.000 ha plantadas con olivo, en sistemas de cultivo tradicionales caracterizados por la escasa tecnificación, incluyendo riego por superficie y amplios marcos de plantación (i.e., 100 plantas/ha). Sin embargo en los últimos 20 años, las provincias de Catamarca, La Rioja, San Juan y Mendoza, incrementaron su superficie plantada con olivos a más de 100.000 ha (<http://www.alimentosargentinos.gov.ar>), debido principalmente a la formulación de leyes de promoción agrícola. Estas nuevas plantaciones fueron instaladas bajo un proceso de intensificación con 300-500 plantas/ha, sistemas de riego por goteo de alta frecuencia y gran consumo de agua. De esta manera, aunque el cultivo es introducido, en la actualidad constituye una de las principales cadenas agroindustriales del NOA (Noroeste Argentino), siendo Argentina uno de los principales exportadores de aceituna de “mesa” en el mundo (<http://www.internationaloliveoil.org>).

Una diferencia notable entre el Noroeste Argentino y la Cuenca Mediterránea es el clima (Gómez-del-Campo et al., 2010). En el Noroeste Argentino, las precipitaciones anuales son reducidas (100-400 mm) y concentradas durante el verano. Mientras que en la Cuenca Mediterránea, donde el olivo es tradicionalmente cultivado, las precipitaciones son

mayores (300 - 700 mm) y principalmente otoño-invernales. Además, la ETo anual es superior a 1600 mm en el Noroeste Argentino (Correa-Tedesco et al., 2010) en comparación a 1000-1400 mm en el área de cultivo Mediterráneo (Connor, 2005).

Por la gran expansión del cultivo y las diferencias del clima, se realizaron algunas investigaciones en los últimos años sobre el riego del olivo en fincas comerciales de alto nivel de tecnificación en el Centro-oeste y del Noroeste Argentino. Searles et al. (2009) estudiaron la distribución y densidad de raíces en olivo bajo riego por goteo en La Rioja. Ellos observaron que el 70% de las raíces se concentraban en los primeros 50 cm de profundidad del suelo debajo de la línea de riego y encontraron una relación lineal positiva entre el contenido de humedad del suelo y la densidad de raíces. Rousseaux et al. (2008) estudiaron las respuestas de algunas variables ecofisiológicas de árboles de olivo en La Rioja a la suspensión del riego por seis semanas durante el invierno, un período sin precipitaciones. La suspensión del riego generó un estrés hídrico leve o moderado basado en la reducción en el potencial hídrico xilemático, pero no encontraron diferencias significativas al evaluar el rendimiento de fruta en la siguiente temporada. También en invierno y principios de primavera en Córdoba, Pierantozzi et al. (2013a,b), generaron diferentes niveles de estrés en plantas de olivo para medir algunas variables bioquímicas y fisiológicas, además de floración y otros componentes del rendimiento. Las plantas estresadas fueron asociadas con aumentos de sustancias osmóticamente activas y endurecimiento de la cutícula como un mecanismo de aclimatación al déficit. En estos experimentos, el tratamiento sin riego generó estrés severo, a -4 MPa de potencial hídrico xilemático y retrasó la floración con disminución del rendimiento. En Mendoza, Puertas et al. (2011) encontraron que el estrés hídrico muy leve, como resultado del riego deficitario durante la fase de expansión de las células de los frutos (i.e., fin del verano y otoño), no

resultó en una reducción en el rendimiento de frutos y aceite en la variedad ‘Arbequina’. Sin embargo, este estudio no evaluó los efectos de estrés hídrico moderado o severo sobre la fisiología y producción del cultivo.

Correa-Tedesco et al. (2010) evaluaron la respuesta del crecimiento vegetativo, rendimiento y algunos parámetros fisiológicos al riego deficitario continuo, a lo largo de la temporada en La Rioja utilizando cinco niveles de riego sub y supra óptimos. Midiendo el crecimiento en ramas y el diámetro de troncos, encontraron mayor crecimiento cuando los árboles eran regados con más agua, pero no obtuvieron diferencias significativas en rendimiento de aceitunas de “mesa” entre los tres tratamientos con mayor riego. Los autores concluyeron que un nivel de riego intermedio sería adecuado para satisfacer las demandas hídricas del cultivo. Este riego correspondía a un coeficiente de cultivo (K_c) de aproximadamente 0.7 a 0.8 utilizando la metodología de FAO (Allen et al., 1998). En el mismo experimento, Rousseaux et al. (2009) evaluaron los componentes de la evaporación del suelo y la transpiración en árboles, utilizando microlisímetros y sensores de flujo de savia, respectivamente. Sus estimaciones del uso de agua total por el cultivo (i.e., evaporación + transpiración) coincidieron con la aproximación de Correa-Tedesco et al. (2010). Además, la transpiración diaria de la planta concordó con el modelo de transpiración propuesto por Orgaz et al. (2007), y pudieron determinar el coeficiente del cultivo (K_c) en el invierno ($K_c = 0.4$), el cual es menor que el usado en la temporada de crecimiento, porque hay muy poca transpiración cuando la temperatura del aire es inferior a 15 °C. En Mendoza, Trentacoste et al. (2015) estudiaron las relaciones de tres diferentes densidades de plantación (200-500 plantas ha^{-1}) con el uso del agua y la luz. Los autores observaron que con alta densidad, la eficiencia en el uso de la radiación fue mayor en

combinación con el riego deficitario, sin disminuciones significativas en el rendimiento de aceite.

Basada en investigaciones realizadas previamente, esta tesis se enfocó en algunas respuestas ecofisiológicas del olivo bajo riego deficitario controlado (RDC) durante fines del verano y mediados de otoño, un momento que ha sido poco considerado a nivel mundial porque las precipitaciones generalmente empiezan a ocurrir en esta época en la Cuenca Mediterránea donde está la gran mayoría de la producción olivícola. Además en este periodo, en algunos cultivares, ocurre una importante acumulación de aceite en los frutos.

1.3. Estrategias de Riego Deficitario Controlado

Existen varias especies como la vid (*Vitis vinífera* L.) y el olivo, que expresan características de adaptación al estrés hídrico, cuando se implementan riegos deficitarios (revisiones por Cifre et al., 2005; Connor y Fereres, 2005; Naor, 2006; Costa et al., 2007; Pérez-Pastor et al., 2016). El riego deficitario controlado (RDC) es una estrategia basada en la aplicación de agua en volúmenes inferiores al 100% de la evapotranspiración del cultivo (ETc) durante una etapa en la que el cultivo es poco sensible al estrés hídrico. Tradicionalmente, el éxito del RDC es evaluado por el rendimiento del cultivo el mismo año o el siguiente. Los dos periodos más comunes para el uso del RDC en frutales de carozo son: 1) la primera fase del crecimiento del fruto y el endurecimiento del endocarpo ó 2) postcosecha. La primera estrategia está orientada a la reducción de crecimiento vegetativo en fincas de alta densidad (e.g., Chalmers et al., 1981; Mitchell y Chalmers, 1982; Rufat et al., 2014; Marra et al., 2016). La segunda estrategia reduce principalmente la cantidad de agua usada por el cultivo y, en algunas especies a diferentes niveles de estrés,

puede aumentar la floración del próximo año (e.g., Larson et al., 1988; Johnson et al., 1992; Girona et al., 2005; Cuevas et al., 2012).

Los experimentos de riego deficitario realizados en olivo responden principalmente a la Cuenca Mediterránea, y la mayoría de ellos fueron realizados en variedades destinadas a la producción de aceite (e.g., Gucci et al., 2007; Lavee et al., 2007; Caruso et al., 2014). Por lo tanto, en variedades de aceitunas para “mesa” la bibliografía es muy reducida hasta el momento. Entre los trabajos que se pueden citar, Goldhamer et al. (1993) estudiaron diferentes niveles de riego en el largo de la temporada para determinar el coeficiente de cultivo (Kc) para la región de California en la variedad ‘Manzanilla’. También, Goldhamer (1999) aplicó tratamientos de diferentes niveles de riego en el verano en ‘Manzanilla’, antes de la cosecha. Correa-Tedesco et al. (2010) evaluaron respuestas sobre el crecimiento y rendimiento en diferentes niveles de riego, y estimaron un Kc similar al de Goldhamer et al. (1993) en la misma variedad. Cano-Lamadrid et al. (2015) evaluaron algunos atributos de calidad en aceituna de “mesa” con dos niveles de riego deficitario, regulados en referencia a la tasa de crecimiento del tronco en dos momentos fenológicos. Ambos tratamientos tuvieron un estrés leve en endurecimiento de carozo, aunque uno de ellos fue iniciado con una ligera suspensión del riego desde la etapa I del crecimiento del fruto. Ellos observaron que cuando el RDC fue iniciado en endurecimiento de carozo no se afectó el rendimiento o la calidad de las aceitunas. En la actualidad únicamente existe un trabajo preliminar de un año realizado en México que evaluó las respuestas productivas al RDC en poscosecha para una variedad de aceituna de “mesa” (Grijalva-Contreras et al., 2013). Ellos encontraron que un RDC en poscosecha con el 50% del riego en relación al total necesario para satisfacer la demanda hídrica del cultivo, redujo el cuaje de los frutos (%) y el rendimiento en la

temporada siguiente, pero no determinaron el nivel de estrés hídrico y el experimento no fue continuado en más temporadas.

1.4. Respuestas de variables fisiológicas al riego deficitario

Cuando el riego es reducido, en olivo u otros frutales utilizando RDC, existen varias respuestas fisiológicas que ocurren en el corto (i.e., días) y mediano plazo (semanas) dependiendo de la especie, el clima y de las características del suelo (revisado por Fernández y Moreno, 1999; Fernández 2014a,b). La reducción en la conductancia foliar (g_l), el potencial hídrico xilemático (ψ_x) y el flujo de savia son respuestas encontradas frecuentemente en la literatura. Además, pueden ocurrir cambios en parámetros relacionados con las variaciones en el diámetro del tronco como en la máxima contracción diaria.

1.4.1. Potencial hídrico xilemático y comportamiento estomático

Cuando se hicieron mediciones de potencial hídrico xilemático (ψ_x) en olivo, con el objetivo de utilizarlo en la programación del riego en la Cuenca Mediterránea, mostró gran tolerancia a las condiciones de riego deficitario (Giorio et al., 1999; Iniesta et al., 2009; Corell et al., 2016). En algunos experimentos con riegos deficitarios en el verano, el olivo toleró potenciales hídricos xilemáticos (ψ_x) al mediodía menores que en otros frutales (Angelopoulos et al., 1996). Aunque no está estrictamente definido en la literatura, algunos experimentos de RDC en olivo consideraron sus árboles en estrés hídrico leve cuando sus valores estuvieron entre -1,5 y -3 MPa (Pierantozzi et al., 2013; Trentacoste et al., 2015). Dependiendo de la duración del estrés, valores en un rango aproximado de -3 y -5 MPa se interpretan como un estrés moderado (Iniesta et al., 2009; Marra et al., 2016), donde

algunas variables, como la conductancia foliar y la fotosíntesis son notablemente disminuidas según lo encontrado por Giorio et al. (1999). Con riegos deficitarios prolongados en combinación con altas temperaturas, el olivo alcanza un estrés hídrico extremadamente severo con un ψ_x de -8 MPa (Moriana et al., 2003), aunque puede mantener una leve actividad fotosintética y sobrevivir al estrés (Xiloyannis et al., 1999; Sofo et al., 2007). Con estos potenciales tan bajos, establece gradientes entre la raíz y el suelo que le permiten absorber agua en suelos secos con menos de -1.5 MPa (Vitagliano y Sebastián, 2002). Dicho potencial es considerado como el punto de marchitez permanente para la mayoría de las plantas de cultivo. Al reestablecerse el riego, puede recuperar su estado hídrico normal en menos de dos semanas (Fernández et al., 1997; Moriana et al., 2003; Greven et al., 2009; Gómez-del-Campo 2013a; Ibañez et al., 2016). En esta rápida recuperación, características estructurales de la madera tienen un rol importante, ya que el pequeño diámetro de los vasos de conducción (50 micrones), con alta cantidad de fibras y poco parénquima, permiten una efectiva protección contra las cavitaciones en el xilema (Fernández y Moreno, 1999).

Según Giorio et al. (1999), el control estomático en olivo es el factor fisiológico más importante que optimiza el uso del agua en condiciones de sequía parcial en el suelo producida por el riego deficitario. También, la conductancia foliar disminuye con el aumento del déficit de presión de vapor (DPV) en el aire, pero hasta un umbral de ψ_x de -4 MPa (Moriana et al., 2002; Rousseaux et al., 2008). En relación con esto, Fernández et al. (1997) obtuvieron los máximos valores de la g_l a media mañana. Cerca del mediodía, la g_l disminuye por el cierre estomático debido a un elevado DPV, reduciendo de esta manera significativamente la pérdida de agua. En este mismo trabajo se observó que hojas jóvenes perdieron la mitad del agua con respecto a las viejas. Así mismo, en plantas estresadas

Dichio et al. (2005) observaron un comportamiento similar en la dinámica de la g_1 durante el día. Aunque los valores de la g_1 pueden ser tan bajos como $20 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Moriana et al., 2003), al término de una sequía extrema, el árbol recobra valores normales en pocas semanas, de manera similar con lo que ocurre en el ψ_x . Además del control estomático, el reducido tamaño de las hojas, la alta reflexibilidad, la presencia de tricomas aparasolados y el pequeño tamaño de los estomas (apertura de 5-11 micrones) contribuyen indirectamente a disminuir las pérdidas de agua (Connor, 2005) y aun así, atenúan el calentamiento de la hoja.

Si bien, se conoce que en el olivo se produce un cierre parcial de estomas cuando hay estrés hídrico, todavía no está caracterizado como una especie isohídrica (cierre estomático estricto que no resulta en una disminución del ψ_x) o anisohídrica (control estomático menos estricto que conduce a una disminución del ψ_x) (Maseda y Fernández 2006; Chaves et al., 2010). En la bibliografía, algunos experimentos en los que se aplicaron RDC parecen indicar que tiene un comportamiento intermedio (Moriana et al., 2012, Rosecrance et al., 2015). Sin embargo, Cuevas et al. (2010) encontraron en condiciones de estrés hídrico leve que los estomas se cierran parcialmente manteniendo de esta manera el ψ_x estable (i.e., isohídrica). Por lo tanto, nuevos experimentos donde se evalúen el ψ_x y la g_1 serán de importancia para caracterizar al olivo en estas categorías. En vid, donde este aspecto ha sido más estudiado, Chaves et al. (2010) sostienen que el comportamiento de los estomas y el ψ_x como respuesta al déficit hídrico es dependiente de la variedad y de una combinación de factores externos como el momento en que se provoca el déficit hídrico.

1.4.2. Variaciones en el diámetro de troncos

En adición al ψ_x , mediciones de variables asociadas con variaciones en el diámetro de troncos (VDT) pueden ser realizadas con microdendrómetros, para ayudar a comprender las relaciones hídricas del cultivo y determinar el grado de estrés (Moriani y Fereres, 2002; Fernández et al., 2014b). Un balance hídrico positivo, que implica almacenamiento de agua nocturno, el cual se extiende hasta las primeras horas en la mañana, hace que el tronco se encuentre en sus máximos contenido hídrico y potencial de presión en las células antes del amanecer y por lo tanto tenga el diámetro máximo. La recuperación nocturna depende primordialmente del suministro del agua del suelo e indirectamente de la demanda evapotranspirativa del día anterior. Esta recuperación juega un rol importante en las variaciones diarias del diámetro ya que actúa como reservorio temporal de agua durante períodos de sequía (Ortuño et al., 2010). Al iniciarse la transpiración, cuando sale el sol, la tensión creada en el xilema desde la superficie transpirante de las hojas se transmite a través de todos los tejidos de la planta (Fernández y Cuevas, 2010), generando una contracción en el tronco, con un diámetro mínimo pasado el mediodía. Entonces a partir de estos ciclos diarios de encogimiento y ensanchamiento del tronco que realiza el olivo y otros árboles frutales se pueden obtener valores diarios del máximo diámetro del tronco (maximum trunk diameter, MXTD) y los valores diarios mínimos (minimum trunk diameter, MNTD) (revisado por Ortuño et al., 2010). Luego, con estos valores se pueden calcular diversos indicadores para cada árbol, los más utilizados son: 1) el incremento en MXTD desde el inicio de la temporada o desde el inicio de un RDC; 2) la tasa de crecimiento del tronco (trunk growth rate, TGR) obtenida como la diferencia entre los diámetros máximos en dos días consecutivos (el $MXTD_{\text{día}+1} - MXTD_{\text{día}}$); y 3) la máxima contracción diaria (maximum daily shrinkage, MDS) que se obtiene como la diferencia

entre el máximo diámetro y el mínimo diámetro del mismo día ($MXTD_{\text{día}} - MNTD_{\text{día}}$) (Goldhamer y Fereres, 2001). Estos indicadores derivados de las VDT, así como el ψ_x mostraron respuestas rápidas al déficit hídrico en algunos casos (Goldhamer y Fereres, 2004; Fernández et al., 2008; Coccozza et al., 2012). Motivados por estas respuestas, en fruticultura existe un creciente interés en utilizar estas variables en la programación de riegos en plantaciones comerciales de olivo (Michelakis, 1997; Moriana et al., 2000; Cuevas et al., 2010).

En árboles regados al 100% de la ET_c durante todo el ciclo de cultivo y sin carga de frutos, Moriana y Fereres (2004) y Moreno et al. (2006) obtuvieron altas correlaciones entre el MDS y el déficit de presión de vapor, una de las principales variables que determina la ET_o y los requerimientos de riego de los cultivos. Bajo esas condiciones experimentales, cuando las plantas estuvieron bien hidratadas, el MDS mostró potencial para la programación de los riegos de alta frecuencia (Moriana et al., 2011). Sin embargo, en otros casos, cuando los árboles tuvieron algún grado de estrés las correlaciones entre el MDS y el DPV no fueron significativas (Moriana y Fereres, 2004). Además; Moriana et al. (2000) observaron que el MDS aumentó hasta un valor de ψ_x de -1.5 MPa, aunque bajó con valores de ψ_x menores. Los autores sugirieron que la reducción en el MDS con valores muy negativos de ψ_x ocurrió porque la transpiración del árbol fue severamente limitada y eso generó una menor contracción del diámetro del tronco. Esta respuesta también fue observada en limonero, mandarina, y vid, aunque la disminución en la MDS fue a valores mayores de ψ_x que en olivo (Ortuño et al., 2006a; Intrigliolo y Castel, 2007b). Utilizando la TGR, Michelakis (1997) observó una gran respuesta de este indicador ante variaciones en la disponibilidad de agua en el suelo debido a sucesivos riegos aplicados. Implementando el RDC en el verano, la TGR fue reducida tanto en árboles jóvenes (Moriana y Fereres, 2002)

como en árboles maduros (Moriana et al., 2010; Moriana et al., 2013) cuando la carga de frutos fue baja. Sin embargo, Cuevas et al., (2010) encontraron que no hubo diferencias en la TGR entre un tratamiento regado y el estresado que solo recibía agua de lluvia de manera insuficiente. En este estudio, la TGR no fue un indicador sensible del estrés hídrico, con un crecimiento reducido en todos los tratamientos. Posiblemente la carga de frutos en combinación con la elevada edad de los árboles motivó a que la TGR no mostrara una respuesta. Seguramente, estos últimos factores también intervienen en el uso de MXTD como indicador de riego, aunque en frutales en general, no se conoce la influencia del RDC en diferentes etapas fenológicas. Aplicando RDC en el verano, Fernández et al. (2011b,c) encontraron en el MXTD un indicador de gran confiabilidad en la detección del estrés en olivo. En la misma época, Goldhamer et al. (1999) en duraznero (*Prunus pérsica L.*) encontraron respuestas anticipadas en detectar el estrés con el MXTD en relación a una variada serie de indicadores fisiológicos, incluyendo el potencial hídrico foliar y la g. Aunque en otoño durante la poscosecha, Ballester et al., 2014 no encontraron grandes respuestas con el MXTD y otros indicadores derivados de las VDT con RDC en árboles de níspero (*Eriobotrya japonica*). En olivo, Girón et al. (2015) remarcó que el período fenológico de poscosecha permanece con escasa información sobre la respuesta de los indicadores de las VDT, como el MXTD.

1.4.3. Flujo de savia

Una variable que está relacionada con las VDT es el flujo de savia (Ortuño et al., 2010). Durante la noche, el flujo de savia es mínimo porque, si bien los estomas están cerrados, hay varios tejidos (i.e., el cámbium, el floema y otros tejidos vivos de la corteza) del tronco que se rehidratan. En el amanecer, el diámetro del tronco es máximo y la planta

empieza a utilizar primero el agua almacenada en el tronco cuando comienza a transpirar. Durante la mañana y el mediodía, cuando la demanda evapotranspirativa es creciente, el flujo de savia aumenta y el tronco llega a su diámetro mínimo en la tarde (Fernández y Cuevas, 2010). Fernández et al. (2008) evaluaron en España, con clima mediterráneo, la velocidad del flujo de savia en olivos maduros (40 años) bien hidratados y con estrés moderado a distintas profundidades por detrás del cámbium (5-34 mm). Realizaron esta determinación a diferentes horas del día, denominándolo perfil de velocidad del flujo de savia y expusieron su utilidad para determinar alguna condición de estrés. Ellos observaron, en sus dos tratamientos (con y sin déficit hídrico), una mayor velocidad de flujo, dos horas después del mediodía con mayor transporte en los tejidos próximos al cámbium (5 mm). Sin embargo, aunque los valores absolutos de flujo fueron reducidos en las plantas estresadas, el perfil (i.e, patrón) de flujo entre las varias profundidades no cambió con respecto a las plantas bien regadas. Tognetti et al. (2004), en Italia con clima mediterráneo, también encontraron los máximos valores de flujo cerca del mediodía que se correlacionaron fuertemente con ψ_x y la evapotranspiración de referencia. Así mismo, Greven et al. (2009) en Nueva Zelanda encontraron fuertes correlaciones entre la variable en cuestión con el ψ_x y la g_l .

La radiación solar, la temperatura del aire y el déficit de presión de vapor son tres factores ambientales de gran influencia sobre la transpiración en los árboles. Rousseaux et al. (2009) encontraron correlaciones significativas entre estas variables meteorológicas y los valores de transpiración del canopy de árboles enteros en medidas conducidas a lo largo de un año en olivo en La Rioja, Argentina. La temperatura diaria promedio fue la variable que mejor correlacionó con la transpiración del canopy. En este estudio

encontraron que la transpiración diaria fue de 1.5 a 2 litros por m² de área foliar por día durante el verano, y de 0.17 en el invierno.

1.5. Humedad del suelo

En el Capítulo 2 de esta tesis, el mayor enfoque está en las respuestas fisiológicas del árbol al RDC. Sin embargo, es reconocido que medidas de la humedad del suelo son fundamentales para evaluar las respuestas al RDC. En la Cuenca Mediterránea, es común encontrar el olivo en suelos salinos, pedregosos o en terrenos con pendientes pronunciadas donde el suelo no retiene grandes cantidades de agua por la presencia de escorrentía (Pastor, 2004; Melgar et al., 2009; Cimato et al., 2010; Soda et al., 2016). En Argentina, las fincas de olivo están ubicadas generalmente en zonas con suelos arenosos con poca retención de agua, un bajo porcentaje de materia orgánica, escasos nutrientes y un alto pH (Gómez-del-Campo et al., 2010). Utilizando la humedad del suelo y variables fisiológicas como el ψ_x se pudieron determinar una serie de relaciones. Varios trabajos han estimado que el ψ_x no baja significativamente hasta llegar al 30-50% del agua disponible en el suelo (Tognetti et al., 2009; Rallo y Provenzano, 2012). Sin embargo, hay escasa información para el cultivo de olivo sobre las respuestas de los indicadores de VDT con la humedad en el suelo (Gómez-del-Campo et al., 2013a,b).

1.6. Crecimiento vegetativo y floración bajo condiciones de estrés hídrico

El olivo potencialmente puede crecer desde comienzos de la primavera hasta fines del otoño incluyendo la elongación de los brotes y la expansión de las hojas (Lavee et al., 2007). La intensidad y duración del crecimiento varían a lo largo de la temporada y están modulados por varios factores, incluyendo el clima de la región, la carga de frutos, y el

agua total aplicada sumadas las precipitaciones y el riego (Rallo et al., 1994; Pastor Muñoz-Cobos, 2005; Fernández et al., 2015). En la Cuenca Mediterránea, donde tradicionalmente se cultiva el olivo a secano, la presencia de lluvias otoño-invernales recarga el perfil con humedad y permite el crecimiento hasta mediados del verano. En esa región, las altas temperaturas estivales y el progresivo secado del perfil detienen el crecimiento. Sin embargo, en olivares regados con el equivalente de 100% de la ETc como sucede en muchas fincas modernas de la Cuenca Mediterránea y el Noroeste Argentino, la posibilidad de humedecer el suelo puede generar un segundo pico de crecimiento en el otoño, luego de la cosecha (Proietti y Antognozzi, 1996; Rallo et al., 1994; Greven et al., 2009). Aunque varios estudios evaluaron la dinámica de crecimiento estacional, el periodo otoñal no ha sido cuantificado en relación al RDC en esta época. Si el RDC reduce la elongación de ramas al final del verano o en el otoño, el árbol podría tener menos potenciales sitios reproductivos (yemas) para la siguiente temporada. En olivo, es conocido que las inflorescencias se diferencian a partir de las yemas que se desarrollaron en la estación de crecimiento de la temporada anterior (Lavee, 1996). Cuando se suprimió el riego en varios niveles, durante toda la temporada de crecimiento del olivo en California, disminuyó la elongación de ramas (Goldhamer et al., 1993). Correa-Tedesco et al. (2010) observaron mayor crecimiento en primavera que en otros momentos en el Noroeste Argentino, y notaron que el estrés hídrico afectó en mayor medida a la elongación de las ramas en comparación con el crecimiento de los frutos. Similarmente, Grattan et al., 2006 encontraron que la longitud de ramas fue significativamente menor en árboles recibiendo riego deficitario desde mediados de primavera hasta el inicio del invierno. En estos estudios, el rendimiento del próximo año fue reducido por el déficit hídrico en parte porque

el número de yemas potencialmente reproductivas disminuyó con la reducción del crecimiento de las ramas.

Durante el crecimiento vegetativo, se forman en cada nudo de las ramas dos hojas opuestas, con una yema en sus axilas. El destino de las yemas puede ser vegetativo o reproductivo el próximo año, dependiendo si ocurre inducción floral en el verano y el otoño (Gómez-del-Campo y Rapoport, 2008). También, las yemas requieren bajas temperaturas como señal de inducción para que en la primavera siguiente se diferencien y formen inflorescencias (Hartmann, 1953; Aybar et al., 2015). Se sabe que el estrés hídrico en las semanas antes de floración reduce el número de flores por inflorescencia o incrementan el aborto ovárico (Hartmann y Panetsos, 1962; Rallo, 1995). También una carencia de agua antes de la floración puede reducir la presencia de flores hermafroditas en la inflorescencia, un indicador de la calidad de la floración (Gómez-del-Campo y Rapoport, 2008; Rapoport et al., 2012). Como ya se mencionó anteriormente, en olivo y la mayor parte de los árboles frutales, la inducción y la diferenciación floral ocurren durante la estación de crecimiento previa a la floración. En este sentido, el nivel de estrés hídrico que ocurre con el RDC en poscosecha puede generar cambios en la floración para la siguiente primavera (Johnson et al., 1992; Naor et al., 2005). Estos cambios pueden incluir reducciones o aumentos en la floración dependiendo en la especie, el momento y la intensidad de estrés hídrico, entre otros factores. Restricciones muy severas en el riego resultan en disminuciones de la floración, pero en otros casos, la floración puede aumentar, si el estrés hídrico generado es menor. En duraznero, Larson et al. (1988) notaron un aumento en el retorno de floración de 30-40% en la primavera después de un RDC en poscosecha que indujo un estrés hídrico moderado, mientras un RDC que solo indujo un estrés leve no afectó la floración. En olivo, existe una falta de conocimiento sobre la respuesta de la floración de retorno al RDC en

poscosecha, tanto en cantidad como en calidad. Además, como los momentos exactos de estos procesos (inducción y diferenciación) son diferentes al del duraznero, los resultados podrían ser muy contrastantes.

En frutales, los efectos del RDC sobre los componentes del rendimiento (i.e., floración, cuaje, número de frutos, tamaño del fruto) son críticos para evaluar el funcionamiento del cultivo. Como se mencionó arriba, en la primavera el crecimiento vegetativo puede ser reducido por el RDC, y con un estrés hídrico severo también puede reducirse el número o tamaño de las células en los frutos y limitar el tamaño potencial de los mismos (Rapoport et al., 2001; Costagli et al., 2003; Gómez-del-Campo et al., 2014). Sorprendentemente, Torrecillas et al. (2000) encontraron que los frutos fueron más pequeños después de aplicar tratamientos de RDC en primavera en damasco, pero que recuperaron su tamaño con respecto al testigo luego de 14 días desde que se restituyera el riego a los niveles del testigo (i.e., 100% de la evapotranspiración del cultivo). Chalmers et al. (1986) reportaron en peral que el ajuste osmótico en los frutos durante el RDC podría generar una mayor tasa de crecimiento del fruto después de la restauración del riego a niveles del testigo. En almendro, Esparza et al. (2001a) encontraron que el rendimiento, bajó 7,7 kg por árbol por cada 1 MPa de reducción en el potencial hídrico del xilema al mediodía, al año después de inducir un estrés severo en el otoño. Además, si el estrés hídrico en poscosecha es intenso y coincide con el momento de diferenciación de las yemas reproductivas en otoño, puede generar malformaciones de los frutos en la siguiente temporada. Por ejemplo, en duraznero, luego de un RDC en poscosecha, se observó que el estrés generó mayor rendimiento, aunque gran parte de esos frutos eran defectuosos con una hendidura longitudinal (Johnson et al., 1992). En olivo, se desconoce si existe alguna posibilidad de que el RDC genere mayor cantidad de frutos al año siguiente, y como sería

la calidad de los mismos, aunque esas malformaciones mencionadas no son comunes en este cultivo.

1.7. Cantidad y calidad del aceite

Luego del endurecimiento del carozo, al final de la primavera o al principio del verano, la acumulación de aceite en el fruto se inicia alcanzando un máximo antes de la madurez fisiológica del fruto en el otoño (Sofo et al., 2007). Existen antecedentes de que la acumulación de aceite puede ser moderada en algunos casos por el largo del período de acumulación de aceite (Trentacoste et al., 2012) y en otros, la acumulación parece depender de la tasa (Rondanini et al., 2014). Además, factores abióticos como temperatura y radiación solar pueden afectar la acumulación de aceite considerablemente. Elevadas temperaturas, así como disminuciones de la radiación fotosintéticamente activa, generaron reducciones en la concentración de aceite (%) en experimentos manipulativos (Cherbiy-Hoffmann et al., 2013; Garcia-Inza et al., 2014; Garcia-Inza et al., 2016).

A pesar de que el período de acumulación de aceite es considerado como un momento de sensibilidad al estrés hídrico intenso (Inglese et al., 1996), la mayoría de los trabajos de RDC de la Cuenca Mediterránea inciden en la primera etapa de acumulación que ocurre en el verano, porque en este momento la evapotranspiración del cultivo es muy alta y se puede ahorrar gran cantidad de agua de riego (e.g., Alegre et al., 1999; Gómez-del-Campo et al., 2013a,b; Rosecrance et al., 2015). En términos generales, un RDC en verano reduce la tasa de acumulación si el estrés hídrico es suficientemente severo. Sin embargo, Grattan et al. (2006) encontraron que un riego equivalente a 100% ETc no fue necesario para maximizar la concentración de aceite. Los autores observaron que la curva de

concentración fue creciente al aumentar el agua aplicada, aunque se alcanzó el máximo con riegos del 75% de la ETc.

En el Noroeste Argentino, la acumulación de aceite es más temprana que en la Cuenca Mediterránea por el adelantamiento de la fenología que ocurre con las altas temperaturas durante la primavera (Gómez-del-Campo et al., 2010). Mientras una parte significativa de la acumulación ocurre en el otoño en el Mediterráneo, la mayoría del aceite se acumula durante el verano en el NOA (Rondanini et al., 2014). Por lo tanto, un estrés hídrico podría ser iniciado potencialmente desde fines del verano o a principios del otoño antes la cosecha, sin posibles pérdidas en el rendimiento de aceite.

Cuando se aplican riegos deficitarios durante el crecimiento del fruto, normalmente las respuestas están reflejadas en el peso fresco del fruto (Cano-Lamadrid et al., 2015). Sin embargo, el peso seco no siempre es disminuido, dependiendo de la intensidad y el momento del estrés. En definitiva, el peso seco del fruto que es mayormente del mesocarpo, resulta de gran importancia por su estrecha relación con la concentración de aceite (Conde et al., 2008). El peso seco del mesocarpo generalmente baja en condiciones de estrés hídrico moderado o severo (Lavee et al., 2007), como por ejemplo cuando el riego deficitario es aplicado durante la primavera, cuando se producen la mayoría de las células del mesocarpo.

Por otro lado, los parámetros utilizados para evaluar la calidad del producto varían según el destino sea aceituna de “mesa” o aceite de oliva. En el aceite, uno de los parámetros más comúnmente evaluados es el perfil de ácidos grasos. Según normas del Consejo Oleícola Internacional (COI, 2013), el ácido oleico debe ser elevado (55-83%) para ser considerado un aceite genuino de oliva. El consumo de aceites con altos contenidos de ácido oleico está asociado a beneficios para la salud humana (Stark y Madar, 2002;

Covas et al., 2015). En el Noroeste Argentino, el contenido de ácido oleico (%) en los aceites normalmente es bajo, y algunas variedades no tienen suficiente ácido oleico para cumplir los requerimientos del Consejo Oleícola Internacional (Rondanini et al., 2011). En algunos casos, con RDC se reportaron aumentos en la relación oleico/linoleico (Berenguer et al., 2006; Dubou et al., 2010), algo que podría ser beneficioso para el Noroeste Argentino, pero en otros trabajos no se percibieron cambios (Patumi et al., 2002; Caruso et al., 2014).

Los polifenoles, responsables de prolongar la conservación del aceite, por su acción antioxidante (Rámirez-Anaya et al., 2015), son unos de los más afectados con el riego, aumentando su concentración con moderados niveles de estrés (Gómez-Rico et al., 2007; Stefanoudaki et al., 2009; Caruso et al., 2014; Dabbou et al., 2015; Rosecrance et al., 2015). Sin embargo, este efecto tampoco fue observado en todos los casos, encontrando respuestas contradictorias (Patumi et al., 2002; Dabbou et al., 2010). En este sentido, en esta tesis se evalúa la composición de ácidos grasos y otras variables de calidad en el aceite de oliva obtenido a partir de frutos que crecen bajo diferentes niveles de RDC en la precosecha, desde envero a madurez (fin del verano y otoño).

1.8. Objetivos e hipótesis

El **objetivo general** de esta tesis es evaluar algunas respuestas ecofisiológicas del olivo relacionadas con el riego deficitario controlado en pre y poscosecha (i.e, fin de verano y otoño) durante tres años, en una variedad doble propósito ('Manzanilla fina') que puede ser destinada a aceituna de "mesa" o para aceite de oliva.

La **hipótesis general** es que las reducciones del riego durante la pre y poscosecha generarán desde un estrés hídrico leve hasta un estrés severo dependiendo de los

tratamientos. Sin embargo, sólo el tratamiento más severo (i.e, sin regar por 2,5 meses por año) generaría reducciones en el rendimiento. Así, se propone que el RDC en pre o poscosecha podría ser utilizado en olivo como una estrategia para reducir el uso de agua en regiones áridas y semiáridas, donde éste es un recurso escaso.

Los objetivos específicos y sus hipótesis respectivas son:

1) Objetivo 1: Determinar la dinámica en el tiempo de las respuestas del potencial hídrico xilemático, la conductancia foliar, la contracción diaria del tronco y la transpiración del canopeo al RDC en poscosecha.

Hipótesis 1 (H1): *Tanto la conductancia foliar (g_l) como el potencial hídrico xilemático (ψ_x) disminuirán significativamente en árboles no regados y en árboles regados con el 33% de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) con respecto al control (i.e., 100 % ET_c). No se observarán reducciones con un riego de 66% de la ET_c durante el período del experimento.*

H2: *A diferencia de las respuestas de la g_l y el ψ_x que serán reducidas a partir de riegos al 33% de la ET_c , la contracción diaria del tronco (maximum daily shrinkage, MDS) solo será reducida bajo condiciones de estrés severo en árboles sin riego.*

2) Objetivo 2: Determinar el efecto del RDC en poscosecha sobre los componentes del rendimiento y el crecimiento vegetativo en olivo.

H3: *En respuesta a las reducciones de la g_l y el ψ_x , la elongación de las ramas y el crecimiento del tronco en poscosecha serán menores en árboles no regados en relación a los otros tratamientos. Este comportamiento resultará en menos sitios potenciales para floración y consecuentemente menor número de frutos y un menor rendimiento en la próxima temporada.*

H4: *El retorno de floración será menor en árboles no regado, con respecto a los otros tratamientos, resultando en menos rendimiento en la próxima primavera. Esto corroborará que la inducción e iniciación floral se extienden más allá del período coincidente con el endurecimiento del endocarpo (i.e., inicio del verano). En el tratamiento de 33% ETc, la duración y severidad del estrés no serán suficientemente largas o intensas como para disminuir la floración en la próxima primavera.*

3) Objetivo 3: Determinar el efecto del RDC en la acumulación de aceite y la calidad (composición de ácidos grasos, fenoles y otros parámetros) durante la precosecha desde fines del verano hasta mediados del otoño, durante tres años.

H5: *la concentración de aceite en los frutos será menor cuanto menores sean los volúmenes de riego (sin que se observen diferencias entre el tratamiento 66% y el control). Por este motivo, el rendimiento de aceite al final de las tres temporadas experimentales será menor en los tratamientos 33 y 0% de ETc.*

H6: *El estrés hídrico no afectará la composición de ácidos grasos mientras que el contenido de polifenoles será mayor, cuanto menor sea la dosis de riego aplicada, en las cosechas tempranas y tardías.*

1.9. Originalidad y significancia de la tesis

El Noroeste Argentino se encuentra inmerso en condiciones de aridez extrema. El avance de la frontera agropecuaria debida a nuevas plantaciones de olivo y otros cultivos como jojoba, vid y nogal aumentó el uso del agua superficial y ha resultado en la necesidad de extraer agua de profundidad (>100 m) de los acuíferos en muchos de los valles productivos. Los descensos actuales de los niveles de los acuíferos ponen en peligro la sustentabilidad y permanencia de las plantaciones. La presente tesis propone abordar el

problema reduciendo el riego, en precosecha cuando el destino final de los frutos es para elaborar aceite de oliva y en poscosecha cuando las aceitunas son destinadas a “mesa”. El trabajo consta de originalidad debido a que el estudio de las respuestas de varios indicadores de suelo y planta al riego deficitario controlado en poscosecha y su potencial para la programación del riego (Capítulo 2) no fue realizado con anterioridad. Conocer las respuestas vegetativas y reproductivas del olivo a diferentes niveles de riego deficitario en poscosecha (Capítulo 3), permitiría evaluar la posibilidad de encontrar una ventana fenológica para reducir el volumen de riego. Y, finalmente, estudiar el efecto del riego deficitario controlado en la precosecha sobre la cantidad y calidad de aceite (Capítulo 4), nos permitiría cubrir la falta de conocimiento en olivo sobre en los efectos de RDC en los dos meses antes la cosecha. En la Cuenca Mediterránea, el uso de RDC en los dos meses antes la cosecha (i.e., fin del verano y el otoño) no ha sido evaluado, porque las precipitaciones del otoño generalmente no permiten el uso de RDC como una herramienta de manejo en este período. El conjunto de resultados obtenidos representa una contribución a los conocimientos ecofisiológicos del olivo y son pertinentes además para mejorar la programación y cantidad de riego en las fincas comerciales modernas de olivo en Argentina y otras regiones del mundo.

Capítulo 2. Respuestas de varios indicadores de suelo y planta al riego deficitario controlado en poscosecha en olivares. Su potencial para la programación del riego (*)

- (*) El contenido de este capítulo fue publicado en Agüero Alcaras, M. L., Rousseaux, M. C., Searles, P. S. 2015. Responses of several soil and plant indicators to post-harvest regulated deficit irrigation in olive trees and their potential for irrigation scheduling. *Agricultural Water Management* 171, 10-20.
- (*) Además, algunos datos de este Capítulo 2 fueron publicados como Searles, P.S., Agüero Alcarás, M., Rousseaux, M.C., 2011. Consumo de agua por el cultivo del olivo (*Olea europaea* L.) en el noroeste de Argentina: una comparación con la Cuenca Mediterránea. *Ecología Austral* 21, 15-28.

2.1. Introducción

El riego ha sido una herramienta clave en la obtención de altos rendimientos en los nuevos olivares de Argentina, especialmente en las zonas donde la lluvia es a menudo escasa (Gómez-del-Campo et al., 2010; Searles et al., 2011). Las grandes plantaciones comerciales establecidas en las últimas dos décadas, normalmente estiman los requerimientos de agua utilizando el método de la FAO (Allen et al., 1998); y aplican el riego por goteo, para satisfacer el 100% de la evapotranspiración del cultivo (ETc). Correa-Tedesco et al. (2010) llevaron a cabo un experimento a campo durante dos años en el Noroeste Argentino, con una amplia gama de niveles de riego. Los autores encontraron que el rendimiento se maximiza con cantidades de riego correspondientes a un coeficiente de cultivo estacional (Kc) de aproximadamente 0.7 – 0.8. Utilizando equipos de flujo de savia y microlisímetros, Rousseaux et al. (2009) y Figuerola et al. (2013) respectivamente, con valores de transpiración y evaporación del suelo, obtuvieron también un Kc similar. Adicionalmente, los valores de transpiración registrados fueron consistentes con los valores calculados a partir del modelo de simulación de Orgaz et al. (2007).

Debido a algunas presiones externas, tales como el aumento de la población y la industria, que compiten directa e indirectamente por el recurso hídrico, es necesaria una precisa programación del riego en relación al momento de aplicación y las cantidades requeridas (Fernández y Torrecillas, 2012). En este sentido, los indicadores de medición en plantas se sugirieron en una serie de revisiones recientes, por ser una alternativa potencialmente viable al método de la FAO, en árboles frutales de oliva y otros (Fernández y Cuevas, 2010; Ortuño et al., 2010; Fernández, 2014a). Para realizar la programación de los riegos, tanto las variables tradicionales, medidas de forma discontinua, como el potencial hídrico xilemático y la conductancia foliar (por ejemplo, Moriana et al., 2010,

2012.); y además las variables de medición continua, incluyendo el flujo de savia y variaciones del diámetro del tronco (por ejemplo, Moriana y Fereres, 2002; Fernández et al., 2008, 2011a; Tognetti et al., 2009; Cuevas et al., 2013) mostraron tener capacidad para programar el riego en olivares, mostrando una variable performance. En menor medida se ha puesto énfasis en indicadores del suelo, posiblemente porque los valores de la humedad que se obtienen en las plantaciones de riego por goteo incluyen tanto zonas húmedas como zonas secas, las cuales pueden ser difíciles de integrar en la programación del riego. Sin embargo, se ha demostrado que la transpiración disminuye drásticamente por debajo de un umbral crítico de humedad del suelo en plantaciones con riego por goteo (Rallo y Provenzano, 2013).

Los indicadores continuos, pueden ofrecer una mayor ventaja sobre los indicadores discontinuos debido a que los primeros están automatizados, y esto puede ser de particular importancia para detectar el inicio del estrés hídrico y realizar la programación de riegos deficitarios; ya sea utilizando riego deficitario sostenido o controlado (RDC). El riego deficitario es cada vez más común en muchas regiones de la Cuenca Mediterránea, debido a la competencia por el agua, mencionada anteriormente, y también por la necesidad de limitar el tamaño del árbol con el objetivo de reducir el crecimiento vegetativo en las plantaciones con alta y muy alta densidad (Gómez-del-Campo, 2013a; Connor et al., 2014). Las variaciones del diámetro del tronco, que incluyen una serie de índices derivados, basados en el diámetro mínimo y máximo diarios del tronco, pueden ser combinados con el flujo de la savia para detectar el estrés hídrico en plantaciones moderadamente densas, cuando se aplica RDC en árboles maduros, con extenso sistema radical (Fernández et al., 2011a). Pero el flujo de savia utilizado individualmente, puede ser preferible en plantaciones densas, con sistemas radicales restringidos (Cuevas et al., 2013). Moriana et

al. (2013) y Girón et al. (2015) han informado recientemente que diferentes índices derivados de las variaciones en el diámetro del tronco (VDT) podrían ser utilizados para la programación del riego en diferentes etapas fenológicas, aunque todavía es muy baja la cantidad de umbrales establecidos de las VDT, por lo tanto, más estudios se deberían realizar en este tema.

Aunque varios experimentos han evaluado las fortalezas y debilidades de los diferentes indicadores de la planta en la detección del estrés hídrico, se ha hecho mucho menos hincapié en relacionar las variables fisiológicas entre sí. En última instancia, la comprensión de estas relaciones proporciona una herramienta importante en el manejo de las fincas, tendiente a aumentar el rendimiento del cultivo (Fernández et al., 2014b). Los antecedentes disponibles indican que muchas de las relaciones son complejas. Por ejemplo, la relación entre el potencial hídrico xilemático medido al mediodía (Ψ_x) y la contracción diaria máxima (maximum daily shrinkage, MDS) parece ser cóncava, lo que significa que el mismo valor de MDS puede ocurrir tanto a altos como a bajos valores de Ψ_x dependiendo del grado de estrés hídrico (Moriana et al., 2000; Ortuño et al., 2010; Pérez-López et al., 2013). En contraste, en olivos con tratamientos de RDC se reportaron algunas relaciones lineales negativas entre el Ψ_x y la diferencia diaria del máximo diámetro del tronco (difference of maximum trunk diameter, DMXTD), otro índice de las VDT frecuentemente usado (Fernández et al., 2011b; Cuevas et al., 2013). Con la conductancia foliar y el contenido relativo de agua extraíble del suelo (%), se observó una relación débil o no lineal entre estas variables y el DMXTD.

Hasta el momento, la mayoría de los estudios de RDC evaluaron las respuestas de los indicadores continuos en un grupo de fincas en condiciones de clima mediterráneo en el centro y el sur de España. En esas condiciones de clima, el RDC se empleó mayormente

durante los meses de verano, cuando la evapotranspiración es alta, en cultivares de olivo para aceite (Alegre et al., 1999; Gómez-del-Campo et al., 2013a,b), aunque estrategias alternativas de RDC también han sido sugeridas para cultivares de ‘mesa’ (Fernández, 2014b). En las zonas productoras de Argentina, la baja latitud y el clima continental implican que las temperaturas sean cálidas en primavera, y esto acelere la maduración de los frutos. Por esto, las aceitunas verdes de “mesa” son cosechadas temprano, a mediados de verano, con nulas o mínimas precipitaciones que ocurren únicamente en la etapa estival, ya que la región presenta marcada aridez. En la actualidad, existe escasa información disponible sobre la respuesta del olivo al RDC en el período fenológico inmediatamente después de la cosecha (Girón et al., 2015). Este período de poscosecha puede representar hasta el 20% del riego anual en la región de estudio, y aplicar agua de manera insuficiente se podría traducir en reducciones de producción en la siguiente temporada.

Por lo tanto, nosotros realizamos un experimento de RDC en poscosecha, para evaluar las respuestas de la humedad del suelo y varios indicadores de planta en dos estaciones de crecimiento. Los objetivos específicos de este estudio son: 1) determinar las respuestas de los distintos indicadores en una gama de tratamientos de riego (100, 66, 33 y 0% de ETc); 2) avanzar en el conocimiento de las relaciones entre las diferentes variables del suelo y de la planta; y 3) evaluar la pertinencia de los indicadores para la programación del riego.

2.2. Materiales y métodos:

2.2.1. Sitio experimental

El experimento de RDC en poscosecha fue realizado en una finca comercial de olivos (*Olea europaea* L. cv. ‘Manzanilla Fina’), ubicada a 15 km de la ciudad de

Aimogasta, provincia de La Rioja al noroeste de Argentina (lat. 28°35'S, long. 66°42'W; 790 m s.n.d.m.), durante los años 2009 y 2010. Los árboles utilizados tenían 10 años de edad al inicio del experimento. Las filas de cultivo estaban orientadas norte-sur, con árboles espaciados a 4 m dentro de la fila y 8 m entre filas (i.e., 312 árboles ha⁻¹). El clima es árido con una evapotranspiración anual cercana a 1600 mm y con precipitaciones aproximadas de 100 mm concentradas entre fines de primavera e inicios del otoño (Searles et al., 2011). El suelo es de textura arenoso franco (arena 78%, limo 17% y arcilla 5%) con presencia de grava (<10%) a 1.25m y menos de 1% de materia orgánica. El contenido de humedad volumétrica en el suelo, a capacidad de campo, fue de 0.16 cm³ cm⁻³ y el punto de marchitez permanente fue estimado en 0.06 cm³ cm⁻³, basado en medidas realizadas en el campo, por arriba de 1.25m de profundidad. Saxton y Rawls (2006) han presentado valores normales de agua disponible en suelos de textura arenosa, entre 0.10 y 0.07 (cm³ cm⁻³) dependiendo de la distribución y tamaño de las partículas del suelo. Aunque es posible que las raíces del olivo puedan absorber agua cuando el suelo tenga valores inferiores al presentado en el punto de marchitez permanente.

La canopia de los árboles tenía forma de vaso libre con un volumen promedio de 38 m³, y no se podaron durante el período experimental. Los árboles fueron fertilizados por el productor con el objetivo de mantener sus requerimientos nutricionales en la primavera y el verano del primer año, antes del inicio de la aplicación de los tratamientos de RDC de poscosecha. En base a análisis químicos foliares antes de la segunda temporada, aplicamos 500g de N, 90g de P (como P₂O₅) y 400g de K (como K₂O) previo al inicio de los tratamientos del segundo año. No se hicieron aplicaciones de fertilizantes durante el período en que se aplicaron los tratamientos.

2.2.2. Tratamientos de riego y diseño experimental

Después de la cosecha de los frutos durante mediados del verano (15 de febrero) de cada año, se aplicaron tres tratamientos de RDC y un control (100% de la evapotranspiración del cultivo, ETc), por 75 días aproximadamente (22 de febrero hasta el 5 de mayo) en 2009 y 2010. Evaluamos el RDC en este período debido a que la cosecha de aceitunas de mesa es temprana en esta región, y como la precipitación en otoño es escasa se aplica riego inmediatamente después de la cosecha. Estos riegos son utilizados para mantener la humedad del suelo a capacidad de campo a través de los meses de otoño e invierno, cuando las precipitaciones son bajas. Para realizar los riegos se utilizó agua extraída a 200 metros de profundidad a partir de una bomba eléctrica. Un análisis físico-químico de calidad determinó que tenía una conductividad eléctrica de 0.5 dS m⁻¹ (sin riesgo de salinidad), un pH de 7.3 y un valor de relación de absorción de sodio (RAS) de 2.6.

Los tratamientos de RDC fueron: 1) 66% de la ETc (T66), 2) 33% de la ETc (T33) y 3) sin riego (T0). Para poder implementar los tratamientos se utilizaron en cada fila dos líneas de manguera dispuestas de manera paralela a cada lado del tronco, separadas a un metro entre ellas, con 8 goteros por planta. A su vez, en la línea de manguera, los goteros estaban separados a 1 m aproximadamente. El caudal de los goteros fue de 6, 4 y 2 L h⁻¹ utilizados para el control, el T66 y T33 respectivamente. Para el T0 se utilizaron mangueras sin goteros. La frecuencia de riego fue de 3-4 en cada semana en el período experimental, y no se registraron precipitaciones efectivas (> 7 mm) para ser descontadas del volumen a aplicar. Antes y después de los tratamientos, todos los árboles fueron regados con el 100%

de la ETc, como es común en la región árida del cultivo. El rendimiento de frutos fue alto en 2009 (20,000 kg ha⁻¹) y mediano en 2010 (10,000 kg ha⁻¹).

El requerimiento de riego del cultivo fue calculado cada dos semanas a partir de la fórmula de FAO 56 ($ET_c = ETo \times Kc \times Kr$) donde la evapotranspiración de referencia (ETo) es estimada usando la ecuación de Penman-Montieth (Allen et al., 1998) sobre una superficie de referencia de pasto. Los datos climáticos para determinar la ETo fueron tomados de una estación meteorológica automática (Davis Instruments, California, USA) ubicada a 1 km del experimento. La estación meteorológica utilizada disponía de sensores de temperatura y humedad, un piranómetro de onda corta para medir la radiación solar (rango espectral: 400 a 1.100 nm) y un anemómetro para evaluar la velocidad del viento. Los valores de ET sobre el suelo desnudo se ajustaron a las condiciones de referencia sobre pasto, utilizando el Anexo 6 de Allen et al. (1998). Utilizamos un coeficiente de cultivo (Kc) de 0.7 durante la temporada de crecimiento (desde primavera hasta el otoño) para estimar la demanda hídrica del cultivo (100% ETc) basado en un estudio previo en la misma finca (Correa-Tedesco et al., 2010). Durante el invierno, después la aplicación de los tratamientos, se aplicó un Kc de 0.4, para determinar el riego de todos los árboles (Rousseaux et al., 2008, 2009). Además, se agregó a los cálculos del riego un coeficiente de reducción (Kr), relacionado con el porcentaje de cobertura del cultivo (Fereres y Castel, 1981). El Kr fue 0.76 en 2009 y 0.82 en 2010.

Se hizo un diseño en bloques completamente aleatorizados con cinco repeticiones, con un total de 20 parcelas experimentales (5 repeticiones y 4 niveles de riego). Cada una de éstas estaba integrada por siete árboles en la misma fila, se dejó uno de cada extremo como bordura. Un estudio previo en esta finca determinó que no había evaporación del

suelo en el punto medio entre las filas en los meses en que nuestro experimento fue efectuado (Rousseaux et al., 2009).



Foto 2.1. La imagen muestra la finca comercial de olivos donde se realizó el experimento, ubicada a 15 km de la ciudad de Aimogasta, provincia de La Rioja. Los árboles adultos de 10 años de edad tenían una altura promedio de 3.7 m, plantados a 4 m dentro de la fila y 8 m entre filas.

2.2.3. Humedad de suelo

El contenido de agua en el suelo fue determinado: antes de aplicar los tratamientos, cada 15 días durante el experimento y finalmente cuando se reinició el riego al 100% de la ETc. Se tomó una muestra por parcela desde 0 – 1,25 m de profundidad del suelo a una distancia de 0.3 m del gotero a los dos días posteriores a un riego, con un barreno de tipo Edelman (Eijkelkamp Agri search Equipment, EM Giesbeek, Países Bajos). Las muestras fueron subdivididas cada 0.25 m de profundidad, luego se separaron submuestras de 200 g pesándolas en una balanza analítica en el laboratorio, luego de ser secadas a 105°C en una

estufa hasta obtener el peso constante. La humedad gravimétrica (%) se convirtió a volumétrica (%) multiplicando por la densidad del suelo (1.2 g cm^{-3}). A partir de la humedad volumétrica, se calculó el contenido relativo de agua extraíble (relative extractable water, REW) utilizando la fórmula, $REW=(R-R_{min})/(R_{max}-R_{min})$, donde R es la humedad volumétrica actual en el suelo, R_{min} es la humedad mínima del suelo medido durante el experimento y R_{max} es la humedad volumétrica a capacidad de campo (Fernández et al., 1997; Gómez-del-Campo y Fernández, 2007). Los valores de humedad volumétrica utilizados en los cálculos de REW fueron integrados sobre toda la profundidad de suelo medido (0 – 1,25 m).

2.2.4. Potencial hídrico xilemático, conductancia foliar y transpiración del canopeo

Similarmente a la humedad del suelo, las medidas de potencial hídrico xilemático (Ψ_x) y g_l fueron tomadas cada 15 días durante el período de RDC con una medida adicional antes, y otra después de aplicar los tratamientos. Se midió el Ψ_x al mediodía solar, en condiciones de cielo despejado, en una rama por parcela con una cámara de presión (Bio-control, modelo 0-8 MPa, Buenos Aires, Argentina). Las ramas utilizadas fueron cortas, no lignificadas, del interior del canopeo y próximas al tronco principal. Se utilizaron ramas cortas (10-15 cm) para que puedan ingresar a la cavidad de medición del equipo (17cm) sin torsiones ni daños. Las mismas fueron cubiertas con bolsas de polietileno y una lámina de aluminio durante una hora antes de medirlas (Fulton et al. (2001) para generar un equilibrio de potencial entre el tronco principal y la rama a medir. Luego se separaron del tronco aplicando con cutter un corte neto en su base, se eliminaron las hojas inferiores y se dejaron solo 2 pares de hojas totalmente expandidas de la zona superior o apical.

La g_l fue medida en cada parcela, en tres hojas ubicadas en la parte media de la rama que creció en esa temporada, y que estuvieron expuestas al sol durante el mediodía. Para ellos se seleccionaron ramas ubicadas en las partes externas del árbol, al lado oeste. Se utilizó un porómetro de difusión (Delta-T Devices Ltd, modelo AP4, Cambridge, UK). Considerando la orientación N-S de las filas, estas ramas estuvieron soleadas por un mínimo de 30 minutos antes las mediciones. Las mediciones de g_l fueron realizadas al medio día para facilitar una comparación más estricta entre Ψ_x vs. g_l , aunque en algunos casos, los valores máximos de g_l ocurren más temprano, a media mañana (Moriana et al., 2002).



Foto 2.2. Las medidas de potencial hídrico xilemático fueron realizadas al mediodía solar, en condiciones de cielo despejado, con una cámara de presión con un rango de 0-8 MPa.

El flujo de savia fue medido por un período de 5 días antes de aplicar los tratamientos de RDC y por otro período de seis semanas después del inicio de RDC. Se

midió el flujo en un total de seis árboles con sensores que utilizan el método de balance de calor (Dynamax Inc., modelo Flow 32, Texas, USA). Los seis árboles incluyeron dos árboles del control, del T33 y del T0. Los sensores se colocaron en el tronco principal de los árboles después de que fueron limpiados y cubiertos con una fina capa de lubricante siliconado. Los troncos tenían un diámetro de aproximadamente 17 cm, y los datos fueron guardados en un registrador (Campbell Scientific, modelo CR10X, Logan, Utah, USA) que tomó valores cada 60 segundos e hizo un promedio cada 15 minutos. No se utilizaron períodos de mediciones más largos a seis días debido a que en un experimento previo realizado por Rousseaux et al. (2009) determinaron que el tronco del olivo es sensible al sobrecalentamiento, formándose grietas cuando el calor es aplicado prolongadamente. Por lo tanto, no fue posible utilizar flujo de savia como un indicador continuo de estrés hídrico en nuestras condiciones.

2.2.5. Variaciones en el diámetro del tronco

Las variaciones en el diámetro del tronco fueron medidas en forma continua desde un mes antes el inicio de los tratamientos de RDC hasta un mes posterior a los tratamientos con micro dendrómetros de punto (Phytech, modelo DE-1M, Rehovat, Israel). Cada dendrómetro consistía de un transductor de desplazamiento lineal variable y una varilla con resorte, (resolución de 5 μm). Los dendrómetros fueron instalados en el tronco principal a 40 cm de altura en 3 árboles de cada nivel de riego (3 árboles x 4 tratamientos = 12 árboles en total). Los canopeos de los árboles sombrearon los dendrómetros y redujeron la incidencia de la radiación solar en los sensores. Además, cada dendrómetro fue cubierto por papel de aluminio para eliminar la entrada de tierra. Las variaciones de los diámetros fueron obtenidas una vez por hora, usando un registrador de datos por dendrómetro, y

transmisión de los mismos de manera remota a una computadora. A partir de los registros de datos, se obtuvieron los valores diarios del diámetro máximo (MXTD) y mínimo del tronco (MNTD). Posteriormente se calcularon tres indicadores, desde un mes antes del inicio de los tratamientos, hasta el inicio del riego normal, los cuales fueron: 1) el incremento en el MXTD de cada árbol; 2) la tasa de crecimiento del tronco (trunk growth rate, TGR) de cada árbol, como el promedio del $\text{MXTD}_{\text{día}+1} - \text{MXTD}_{\text{día}}$ en 5 días consecutivos; y 3) la máxima contracción diaria (MDS), como el $\text{MXTD}_{\text{día}} - \text{MNTD}_{\text{día}}$. Otros índices alternativos no fueron considerados, tales como la diferencia diaria del MXTD entre árboles de RDC y el control (D_{mxtD} ; Cuevas et al, 2012) o la diferencia de la TGR entre árboles de RDC y el control (DTGR; Moriana et al., 2010), ya que un análisis preliminar indicó que el uso de estos índices no cambió fundamentalmente las interpretaciones del experimento.

2.2.6. Intensidad de señal, coeficiente de variación y sensibilidad

Para comparar el potencial de la humedad volumétrica del suelo y de las variables fisiológicas para programar el riego se calcularon la intensidad de señal (IS), el coeficiente de variación (CV%) y la sensibilidad. La IS fue determinada como el cociente entre el valor del control y el valor del tratamiento, o la inversa para obtener una IS comparable en todas las variables. El CV% es un indicador de la variabilidad o ruido entre medidas, calculado como el cociente entre la desviación estándar y el promedio del tratamiento. La sensibilidad (S) fue calculada como el cociente entre la intensidad de señal y el coeficiente de variación (IS/CV) (Fernández y Cuevas, 2010). Para poder calcular estos indicadores utilizamos la humedad volumétrica, pero debido a los valores negativos registrados en el incremento del MXTD del T0, la IS, el CV y S no se pudieron calcular.

2.2.7. Análisis estadístico

Para las variables de suelo y fisiológicas, se hizo un análisis de la varianza (ANOVA) para cada año y fecha en forma separada con el programa INFOSTAT (Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Arg). Se utilizó el test de Tukey para detectar las diferencias entre medias con un nivel de significancia de $P < 0,05$. Las regresiones lineales y no lineales entre variables fueron calculadas con Graph Pad Prism5 (Graph Pad Software, San Diego, USA).

2.3. Resultados

2.3.1. Datos meteorológicos y riegos aplicados

La temperatura máxima diaria disminuyó desde 32°C hasta 26°C aproximadamente y la mínima disminuyó de 20°C a 9°C, durante el período de RDC en el 2009 y 2010 (Fig. 2.1A, B). La ETo promedio fue 4.3 mm, con valores próximos a 5.3 al inicio del experimento, y disminuyeron a 2.5 mm al final del mismo (Fig. 2.1C, D). El déficit de presión de vapor se mantuvo más estable que la ETo, con un promedio de 1.7 KPa en el 2009 y 2010. Las precipitaciones fueron muy escasas durante el período de RDC con un total de 10 mm y 16 mm en 2009 y 2010 respectivamente, y no fueron incluidas en los cálculos de requerimiento de agua de los cultivos.

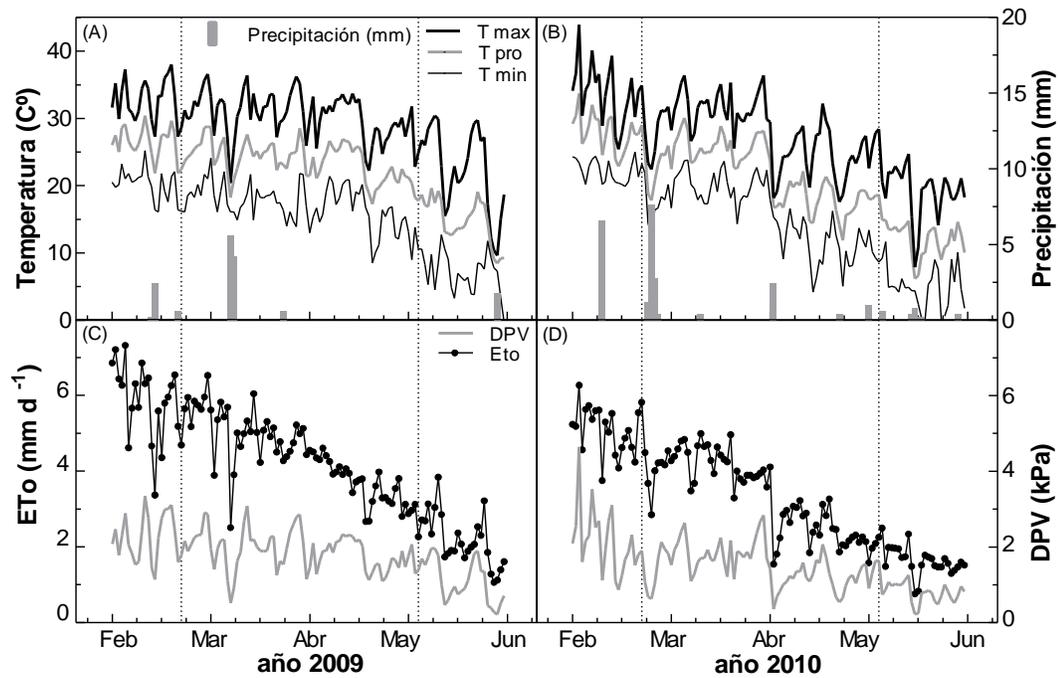


Figura 2.1. Precipitación y temperatura máxima (T max), promedio (T prom) y mínima (T min) durante los años 2009 (A) y 2010 (B). Evapotranspiración de referencia (ETo) y déficit de presión de vapor (DPV) durante los años 2009 (C) y 2010 (D). Las líneas verticales punteadas indican el inicio y fin de la aplicación de los tratamientos de riego deficitario controlado en poscosecha.

Dependiendo del tratamiento aplicado, el riego fue de 0 – 178 mm en 2009 y de 0 – 192 mm en 2010, durante el período de RDC (Cuadro 2.1). La reducción en el riego anual fue de 6%, 13% y 19% en el T66, T33 y T0, respectivamente.

Cuadro 2.1. Evapotranspiración de referencia (ET_o), riego en el período de riego deficitario controlado en poscosecha (RDC) y riego anual durante los años 2009 y 2010.

Período	ET _o ^a (mm)	Tratamiento (ET _c %)	Riego durante RDC (mm)	Riego anual (mm)
2009	323	100	178	897
		66	119	838
		33	59	778
		0	0	719
2010	313	100	192	954
		66	128	890
		33	64	826
		0	0	762

^aLa evapotranspiración de referencia en el período de aplicación de los tratamientos.

2.3.2. Humedad del suelo, potencial hídrico xilemático y conductancia foliar

El REW (%) fue similar en todas las parcelas cuando eran regadas con 100% de la ET_c antes del inicio del RDC (Fig. 2.2A, B). En los dos años del experimento, durante el período en que se aplicó RDC, el control estuvo entre 70 y 125% del REW, y el T66 no mostró diferencias significativas con el control. En contraste en el T0, el REW disminuyó rápidamente en ambos años con diferencias marcadas luego de la segunda semana de RDC, y los valores se mantuvieron en todos los casos inferiores a 25%. El T33 tuvo disminuciones moderadas en los valores de REW en relación al control. Después de cinco semanas de reirrigar al 100% de la ET_c, los REW de los tratamientos se aproximaron al control.

En forma consistente con la alta humedad del suelo, el Ψ_x del T100 se mantuvo superior a -1.9MPa durante el período de RDC en los dos años, y el T66 presentó valores muy similares al control (Fig. 2.2C, D). El Ψ_x del T0 descendió abruptamente en las primeras 2-4 semanas desde el inicio del RDC y después se mantuvo entre -2.7 a -3.8 MPa.

El Ψ_x de T33 no mostró diferencias significativas con el control en el 2009, pero el Ψ_x disminuyó gradualmente a valores inferiores a -3.0 MPa, de forma similar al T0 al final del período de RDC en 2010. Al reiniciar el riego, los valores de Ψ_x de los tratamientos no mostraron diferencias con el control.

Los valores de g_l del control estuvieron cercanos a los $200 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en los dos años (Fig. 2.2E, F). El T66 fue similar al control en 2009, mientras que en el 2010 mostró algunas reducciones leves. De la misma manera que el Ψ_x , la g_l del T0 disminuyó después del inicio del RDC y se mantuvo cerca de $100 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. La g_l del T33 presentó valores inferiores al control en 2010, pero no en 2009. El control y todos los tratamientos mostraron valores similares después del reinicio del riego.

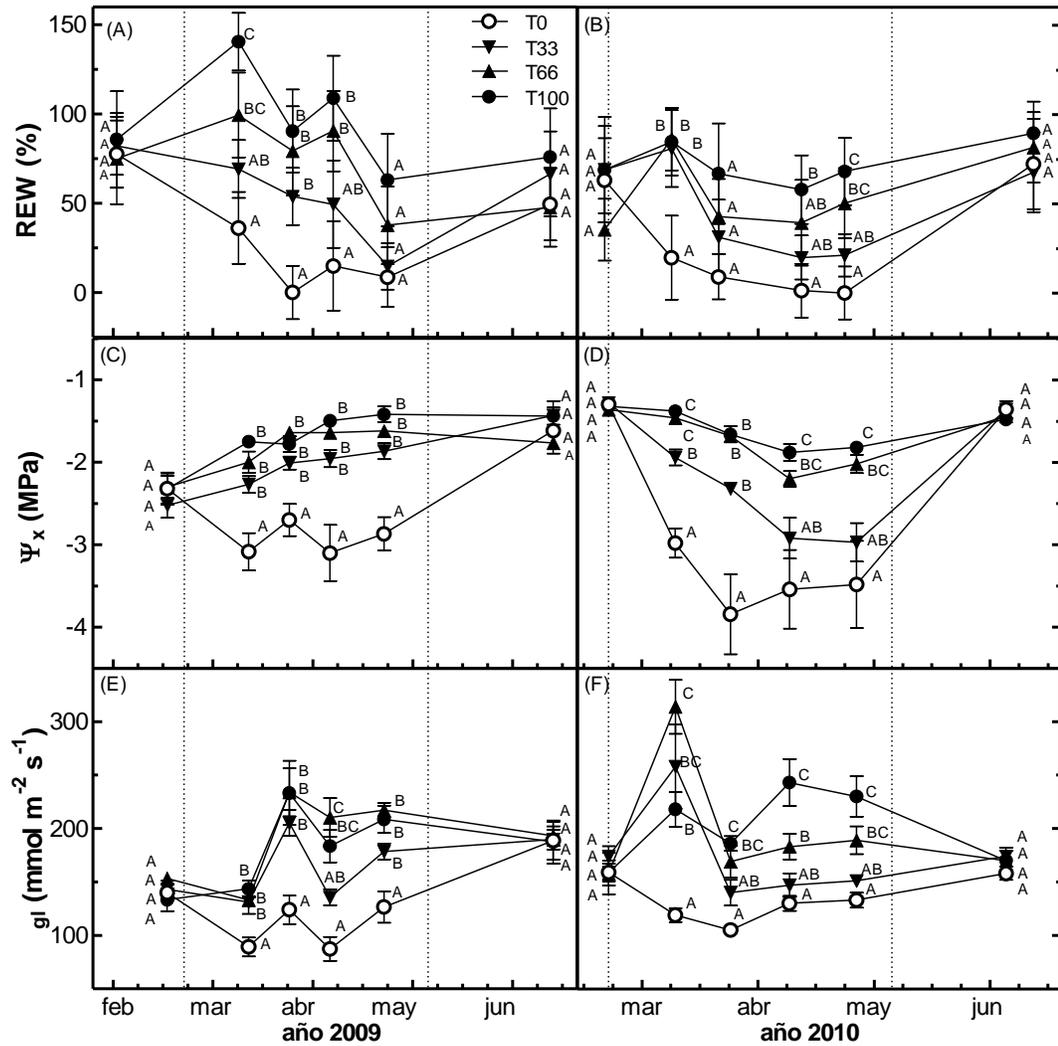


Figura 2.2. Contenido relativo de agua extraíble del suelo (REW; A, B) potencial hídrico xilemático (Ψ_x ; C, D) y conductancia foliar (g_l ; E, F) para el control (T100) y los tratamientos de riego deficitario controlado en poscosecha (T66, T33 y T0) durante los años 2009 y 2010. Los puntos de datos mostrados representan promedios \pm error estándar ($n=5$ parcelas por tratamiento). Las líneas verticales indican el inicio y el final de la aplicación de los tratamientos.

2.3.3. Variaciones en el diámetro del tronco y flujo de savia

Los troncos del T100 mostraron un crecimiento lineal aproximado de 2000 μm en ambos años, usando los valores diarios del MXTD, mientras que los troncos del T0 no crecieron (Fig. 2.3A, B). El crecimiento de los troncos de los T33 y 66 fue intermedio a los valores del T0 y 100. Diferencias significativas entre tratamientos fueron encontradas a partir de la tercera y quinta semana para el 2009 y 2010, respectivamente.

La TGR del T100, calculada como un promedio de 5 días, mostró una media de 16.5 $\mu\text{m día}^{-1}$ y fue numéricamente superior que las TGR de los tratamientos de RDC en la mayoría de las fechas en ambos años (Fig. 2.3C, D). La TGR del T0 fue cerca de cero, y se detectaron diferencias significativas entre este tratamiento y el control luego de la primera semana de RDC. Por otro lado, las diferencias estadísticas tempranas de la TGR entre los tratamientos de RDC y el control, se observaron de manera más tardía en el incremento del MXTD. Aunque las lluvias fueron escasas, estas tuvieron una marcada influencia, con fluctuaciones en los valores de la TGR, dos semanas después del inicio del RDC en el 2009 y en algunas otras fechas en el 2010.

Similarmente al descenso de la ETo (Fig. 2.1A, B), la MDS disminuyó aproximadamente 100 μm durante el período de RDC en cada año (Fig. 2.3E, F). En el 2009, no se observaron diferencias significativas entre tratamientos en la MDS, aunque en algunas fechas cerca del final del período de RDC en el 2010 los valores de MDS del T0 y T33 fueron mayores que el T66 y el control.

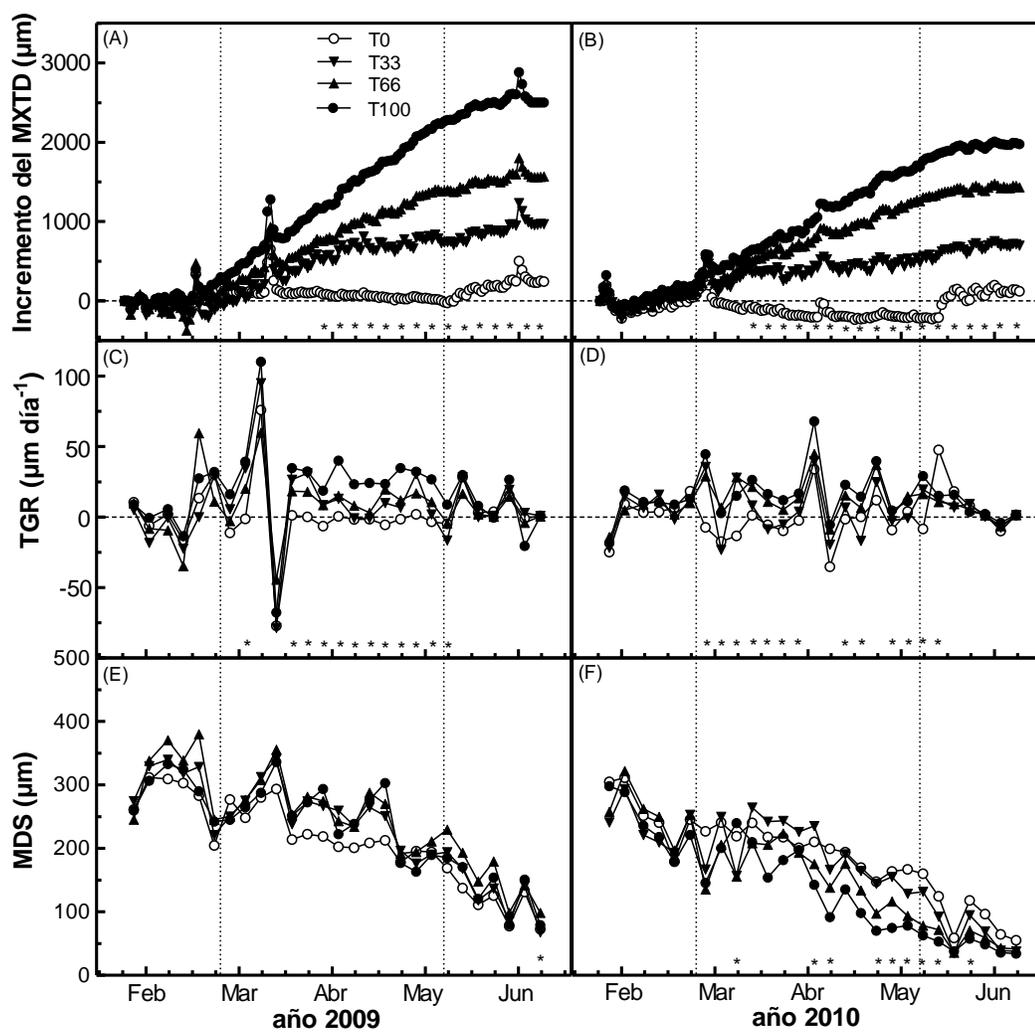


Figura 2.3. Incremento del máximo diámetro del tronco (MXTD; A, B), tasa de crecimiento relativa (TGR; C, D) y contracción diaria del tronco (MDS; E, F) para el control (T100) y los tratamientos de riego deficitario controlado en poscosecha (T66, T33 y T0) durante los años 2009 y 2010. Los puntos de datos mostrados representan promedios de 3 árboles por cada tratamiento. Las líneas punteadas verticales indican el inicio y el final de la aplicación de los tratamientos.

En el verano del 2009 y 2010, antes del inicio del RDC, los valores de transpiración del canopeo del control fueron similares a los tratamientos medidos (T33 y T0) (Fig. 2.4A, B). En el otoño, los valores en todos los árboles fueron menores que los del verano debido al descenso de la ET_o . Luego de 7 semanas de RDC, se encontró una reducción significativa del 57% en la transpiración del canopeo del T0 en relación al T100 en 2009. En abril de 2010, el flujo en el T0 fue 63% menor que en el T100 ($P=0.06$).

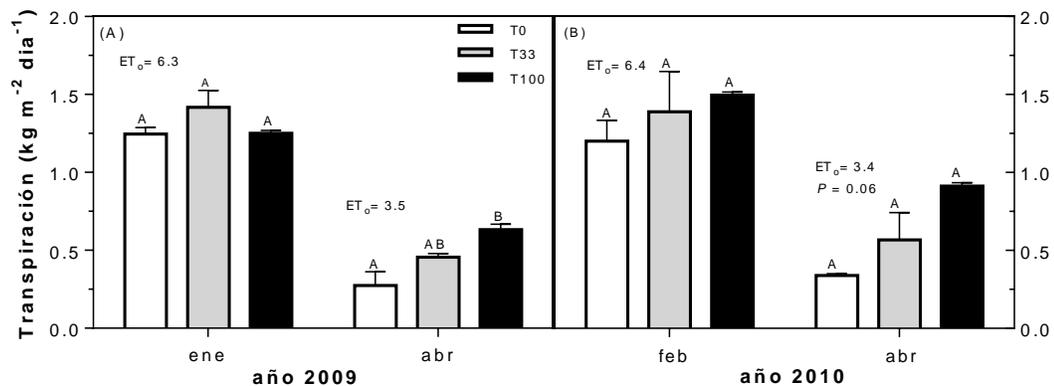


Figura 2.4. Transpiración del canopeo (A, B) expresada por unidad de área foliar para el control (T100) y los tratamientos de riego deficitario controlado en poscosecha (T33 y T0) durante los años 2009 y 2010. Los datos mostrados representan promedios \pm error estándar de 2 árboles por cada tratamiento.

2.3.4. Relaciones entre la humedad de suelo y las variables fisiológicas

Se registró una relación bilineal entre el REW y el Ψ_x utilizando los datos de los dos años del control y de los tres tratamientos de RDC ($r^2 = 0.62$; Fig. 2.5A). Existió un ascenso lineal de los valores de Ψ_x hasta llegar al 48% de REW, donde el Ψ_x alcanzó su valor máximo de -1.8 MPa. Se detectó una relación de forma curvilínea, menos pronunciada entre el REW y la g_l , con valores máximos de g_l de $196 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ cercanos al 50% del REW ($r^2 = 0.24$).

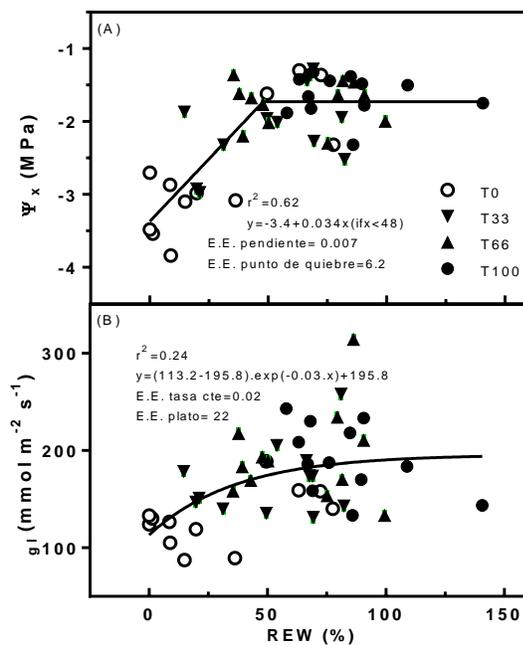


Figura 2.5. Relaciones no-lineales entre el contenido relativo de agua extraíble (REW%) con el potencial hídrico xilemático (Ψ_x) y la conductancia foliar (g_1) para el control (T100) y los tratamientos de riego deficitario controlado en poscosecha (T66, T33 y T0) durante los años 2009 y 2010. Los puntos de datos mostrados representan promedios de 5 parcelas por cada tratamiento.

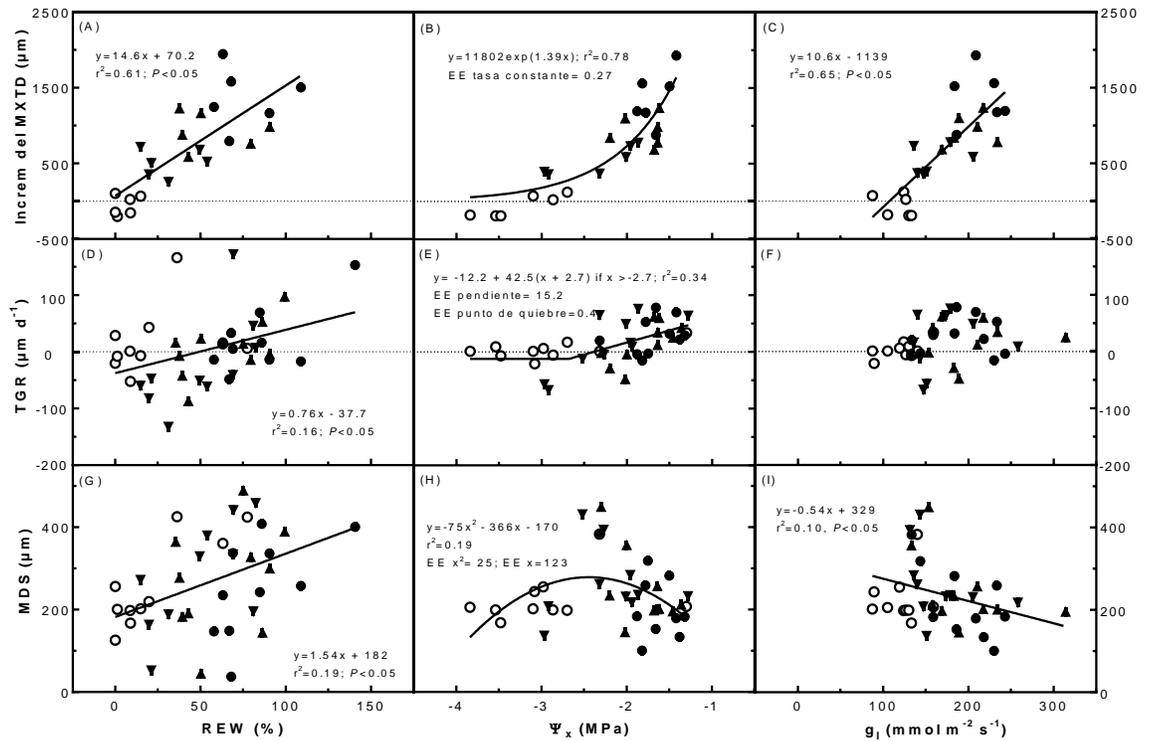


Figura 2.6. Relaciones entre el incremento del diámetro máximo del tronco (MXTD; A-C), tasa de crecimiento relativa (TGR; D-F) y contracción diaria del tronco (MDS; G-I) con el contenido relativo de agua extraíble (REW), potencial hídrico xilemático (Ψ_x) y conductancia foliar (g_l) para el control (T100) y los tratamientos de riego deficitario controlado en poscosecha (T66, T33 y T0) durante los años 2009 y 2010. Los datos mostrados representan promedios \pm error estándar por cada tratamiento. En el MDS y la TGR no se consideró la primera ni la última fecha, luego de reiniciado el riego normal. En el incremento del MXTD tampoco se consideraron las fechas antes y después de aplicar los tratamientos.

El incremento del MXTD mostró una relación más fuerte con el REW, el Ψ_x y la g_l que la TGR o MDS, con coeficientes de regresión entre 0.61 y 0.75 (Fig. 2.6). Las relaciones entre el incremento del MXTD con REW y g_l fueron lineales, mientras que se encontró una relación exponencial con el Ψ_x (Fig. 2.6A-C). Esta relación exponencial indica que el crecimiento del tronco fue mínimo en el período de RDC, cuando el ψ_x fue menor a -2.5 MPa. De manera similar al incremento del MXTD, la TGR mostró una relación lineal con REW y una relación no-lineal con Ψ_x (Fig. 2.6D, E). En contraste al

incremento del MXTD, no se encontró una relación significativa entre TGR y g_1 (Fig. 2.6F). La MDS mostró una relación lineal positiva, polinomial (cuadrática) y lineal negativa con el REW, el Ψ_x y la g_1 ; respectivamente, aunque los datos mostraron una alta variabilidad (Fig. 2.6G-I).

2.3.5. Intensidad de señal, coeficiente de variación y sensibilidad

Las IS calculadas para el T0 mostraron diferencias significativas entre las variables medidas en algunas fechas en los dos años (fig. 2.7A, B). En 2009, la humedad volumétrica del suelo mostró algunas IS mayores que las del Ψ_x y la g_1 , mientras los valores de IS de MDS fueron cercanos a 1, debido a que no existió una respuesta de la MDS al RDC. En 2010, hubo diferencias similares al 2009 en la primera parte del período de RDC. En el T33 (Fig. 2.7C y D), las IS del incremento del MXTD fueron mayores al resto de las variables durante el período de RDC en los dos años, aunque solo existieron diferencias significativas en algunas fechas (Fig. 2.7C, D).

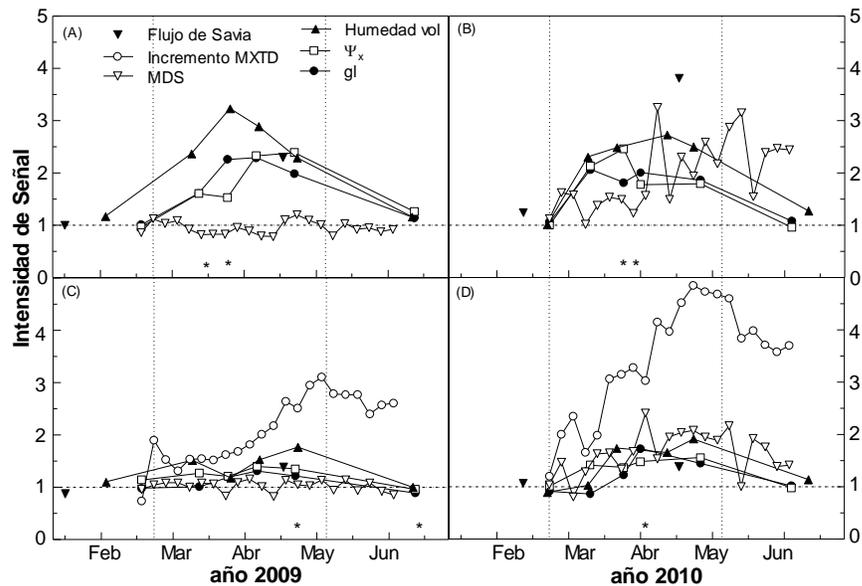


Figura 2.7. Intensidad de señal (IS) de la humedad volumétrica, potencial hídrico xilemático (Ψ_x), conductancia foliar (g_l), incremento del máximo diámetro del tronco (MXTD) y contracción diaria del tronco (MDS) para los tratamientos de riego deficitario controlado en poscosecha del T0 (A, B) y T33 (C, D) durante los años 2009 y 2010. Las líneas verticales indican el inicio y el final de la aplicación de los tratamientos, mientras las líneas horizontales indican que los valores del tratamiento de RDC y el control (T100) son iguales (i.e., IS=1).

La humedad volumétrica del suelo mostró una IS alta para el T0 y moderada para el T33 (Fig. 2.7), pero se observó baja sensibilidad porque su CV (%) fue alto tanto en los dos tratamientos como en los dos años. Similarmente a la humedad del suelo, el incremento del MXTD mostró una baja sensibilidad porque el CV (%) fue alto. En contraste, el Ψ_x marcó una alta sensibilidad en todos los casos evaluados.

Cuadro 2.2. Coeficiente de variación (%) y sensibilidad (intensidad de señal/CV) del potencial hídrico xilemático (Ψ_x), conductancia foliar (g_l), humedad volumétrica del suelo (HV), incremento del diámetro máximo del tronco (MXTD) y contracción diaria del tronco durante el período de riego deficitario en poscosecha en los años 2009 y 2010.

Indicador	Tratamientos	Año	HV	Ψ_x	g_l	MXTD	MDS
CV (%)	0	2009	39.7	12.4	20.5	nd	19.3
		2010	28.0	14.9	11.7	nd	17.5
	33	2009	26.6	10.4	14.3	21.1	14.9
		2010	36.6	10.2	21.6	58.1	17.3
Sensibilidad	0	2009	6.9	18.6	10.3	nd	6.1
		2010	10.6	16.2	20.0	nd	5.6
	33	2009	7.6	18.0	11.2	7.9	12.2
		2010	5.0	16.8	11.0	6.2	6.1

nd = no disponible. Debido a los valores negativos registrados para el MXTD en el T0 no se pueden calcular el CV y S.

2.4. Discusión

Durante el período de poscosecha, que comienza a mediados del verano para cultivares de mesa como ‘Manzanilla’ en el Noroeste de Argentina, la evapotranspiración es alta y la lluvia no es frecuente (Searles et al., 2011). Las condiciones climáticas y la cosecha temprana proporcionaron la oportunidad de evaluar los efectos del RDC en una serie de indicadores de planta y del suelo durante la poscosecha. En las investigaciones referidas al olivo, el riego recibió poca atención durante esta fase fenológica de poscosecha, debido a que la presencia de lluvias en este momento, en la Cuenca Mediterránea (donde son cultivados la mayoría de los olivos) anulan la necesidad de regar (Girón et al., 2015).

El control bien irrigado y los tratamientos de RDC fueron aplicados de manera exitosa, ya que generaron una amplia gama de REW de 0 a 125%. Los altos niveles de humedad del suelo mantuvieron el potencial hídrico xilemático de los árboles del control entre -1,3 y -1,8 MPa. Dell' Amico et al. (2012) reportó valores similares de Ψ_x en árboles

de baja carga de frutos, sin disminuciones en el rendimiento, con un umbral de Ψ_x probablemente superior a -1,8 MPa. En el T66 no se observaron disminuciones en el Ψ_x , y el REW del suelo, medido hasta una profundidad de 1.25 m. y casi nunca fue inferior al 50%. Los valores de Ψ_x disminuyeron en ambos años durante el primer mes de RDC cuando el agua fue completamente suprimida (i.e, T0). Durante las siguientes 6 semanas los valores de Ψ_x aunque fueron muy bajos, permanecieron bastante constantes hasta el final del período de RDC. Como el REW en el T0 estuvo próximo a cero, desde la superficie hasta 1,25 m de profundidad después del primer mes, probablemente las raíces absorbieron un poco de agua en las capas más profundas del perfil del suelo, de tal manera que el Ψ_x no descendió por debajo de -4 MPa. Medidas exploratorias realizadas con un barreno durante la segunda temporada de crecimiento encontraron un leve porcentaje de humedad en el suelo por debajo de 2 m de profundidad. Además, el volumen de suelo explorado por estos árboles adultos probablemente era bastante grande (18-24 m³ por árbol). En un estudio anterior en esta misma finca, cuando los árboles tenían 5 años de edad, se encontró que la mayoría de las raíces (90%) estaba entre 0 y 1.0 m de profundidad del suelo (Searles et al., 2009). La disminución de la temperatura en las últimas 6 semanas del experimento, probablemente contribuyó también a que el Ψ_x no tenga mayores disminuciones en el T0. En árboles de muchos años, con sistemas de raíces más grandes (32 m³ de suelo explorado por árbol), y áreas foliares menores que la del presente experimento, Fernández et al. (2008) encontraron que el Ψ_x y la transpiración comenzaron a disminuir varios días después de aplicar los tratamientos de RDC, comparado con nuestro experimento (i.e., 50 días después de la retención de agua). En contraste, un modelo de simulación basado en los mecanismos del uso del agua en olivo mostró que una baja relación entre el área de la raíz y el área de la

hoja conduce a una reducción muy rápida en la transpiración, como suele ocurrir en plantaciones de altas densidades, en suelos poco profundos (Díaz-Espejo et al., 2012).

Dependiendo de la magnitud del Ψ_x en respuesta al riego deficitario, las plantas pueden clasificarse como isohídricas (control estomático estricto) o anisohídricas (reducido control estomático) (Tardieu y Simeonneau, 1998; Chaves et al., 2010). Sin embargo, es probable que esta clasificación sea gradual, ya que la mayoría de las especies vegetales son capaces de mantener un amplio rango de Ψ_x (Maseda y Fernández, 2006). En el T33 el Ψ_x no se redujo significativamente en ninguna de las fechas de medición en comparación con el control durante el primer año de nuestro experimento (Fig. 2.2C), pero la g_l se redujo significativamente a principios de abril después de 6 semanas de RDC (Fig. 2.2E). Esto indicaría un estricto control estomático bajo condiciones de estrés hídrico leve en olivo. Cuevas et al. (2010) también encontró algunas evidencias de comportamiento isohídrico bajo estrés hídrico leve en árboles de mayor tamaño a los nuestros. En el T0 con mayor estrés hídrico, incluso en las primeras semanas después del inicio de la RDC, el Ψ_x disminuyó marcadamente junto con la g_l , lo que indica un comportamiento anisohídrico como ha sido observado en otros estudios de olivo, con niveles de estrés hídrico entre moderados y severos (e.g., Moriana et al., 2012, Rosecrance et al., 2015). Dicho comportamiento anisohídrico puede ser necesario para asegurar concentraciones internas adecuadas de CO_2 en las hojas y consecuentemente proporcionar suficientes fotoasimilados a los diferentes órganos de la planta.

Las respuestas de las variaciones del diámetro del tronco (VDT), tales como el MXTD y la TGR, son reconocidas hace varios años en árboles de olivo (Michelakis et al., 1997; Moriana y Fereres, 2002; Moriana et al., 2003). En nuestro experimento en poscosecha, el MXTD aumentó linealmente durante todo el período de RDC en los árboles

control bien regados en ambos años. Aumentos lineales similares se han encontrado en otros estudios a lo largo de la temporada de crecimiento para árboles con baja carga de frutos (Moriana et al., 2003; López-Bernal et al., 2015). Las diferencias significativas del incremento en el MXTD entre los árboles del control y los del T0 se encontraron después de cinco semanas en 2009 y luego de tres semanas en 2010, mientras que las diferencias con el T66 y 33 se desarrollaron sobre un período de tiempo mayor. Fernández et al. (2011a,b) con RDC en árboles adultos también fundamentaron que las diferencias en el incremento del MXTD se desarrollaron durante períodos largos de tiempo, empleando tratamientos de irrigación de baja frecuencia equivalentes a 60 y 30% de la ETc. El incremento del MXTD durante un período dado en cualquier experimento es básicamente la suma de los valores de la TGR diarios o semanales. Nosotros detectamos diferencias en la TGR entre los tratamientos de riego de manera temprana, en la primera semana del experimento en ambos años, utilizando promedios de 5 días de TGR. Esto es debido en parte a la baja humedad, los reducidos mm de lluvia de la región, así como a la falta de carga de frutos en el período de poscosecha. La lluvia y el consecuente mojado y secado de todo el árbol en general, ocasionan a menudo grandes variaciones en el diámetro del tronco, de tal manera que los valores de la TGR no son representativos del estrés hídrico (Girón et al., 2015). Por ejemplo, un solo evento de precipitación a principios de marzo de 2009 anuló la posibilidad de detectar diferencias en la TGR durante varios días. Por último, se observan pocas diferencias en la MDS entre los diferentes tratamientos, este efecto fue encontrado también por muchos autores (e.g., Moriana y Fereres, 2002; Cuevas et al., 2010, 2013; Moriana et al., 2010). La única excepción fue al final del segundo período de RDC cuando el MDS fue más alto en los tratamientos de menos riego en relación al control y el T66.

Aunque en el experimento se contó con pocas repeticiones en las mediciones del flujo de savia, se observaron disminuciones aproximadamente entre 30 y 60% para el T0 y T33, respectivamente. Estas mediciones fueron luego de 6-7 semanas después del inicio del RDC de poscosecha, realizada en base al área foliar del tronco principal, en estos árboles de gran tamaño. En el segundo año de estudio de riego con déficit sostenido, Rousseaux et al. (2009) encontraron una disminución del 30% en el flujo de savia al aplicar el 66% de la E_{Tc} en una finca adyacente utilizando el mismo cultivar ('Manzanilla'). Pero esta disminución solo fue observada cuando se expresaron los valores de flujo por árbol, luego de que este hizo un autoajuste en su área foliar, debido al crecimiento reducido y la caída de hojas, en respuesta a un estrés hídrico leve y prolongado. Los autores no observaron respuestas en el flujo cuando fue expresado por unidad de área foliar. En el presente experimento de RDC en poscosecha, no se afectaron ni el crecimiento de las ramas, ni tampoco la acumulación del área foliar (datos no mostrados). Las disminuciones en el flujo de savia, en base al área foliar, podrían responder a las disminuciones encontradas en la g_1 . Estas reducciones encontradas en la g_1 fueron de aprox. 30 y 45% para el T0 y T33, respectivamente, durante el mismo período de tiempo en que se registró el flujo de la savia. Por último, disminuciones del flujo de savia de magnitud similar a las nuestras, han sido encontradas por Cuevas et al. (2013) en el sur de España, al evaluar tratamientos de RDC de baja frecuencia que imitan parcialmente el T0 utilizado en esta tesis.

Si bien es importante documentar las respuestas fisiológicas de las plantas y del suelo a tratamientos de riego específicos, además es de suma importancia obtener las relaciones entre el suelo y los indicadores de plantas, y a su vez, entre los indicadores de las plantas. El conocimiento de este tema, permitiría fortalecer la comprensión de su funcionamiento, y de esta manera poder mejorar la programación del riego.

En los últimos 20 años, varios estudios graficaron las relaciones entre el REW y el potencial hídrico en olivo. Fernández et al. (1997) concluyeron que el potencial hídrico antes del amanecer (Ψ_{pd}) mantuvo valores relativamente altos en el suelo húmedo, pero decreció drásticamente cuando los valores de REW fueron inferiores al 40%. Similares relaciones curvilíneas fueron descritas utilizando tanto el Ψ_{pd} (Tognetti et al., 2006, 2009) como el Ψ_x (Moriani et al., 2002; Gómez-del-Campo, 2013a). En nuestro experimento, evidenciamos una relación bilineal con decrecimiento marcado del Ψ_x , cuando el REW se encontraba por debajo del 48% (Fig. 2.5A). Con mayores contenidos de REW, el Ψ_x se mantuvo constante con un valor de -1.75 MPa. Similarmente, Rallo y Provenzano (2012) recientemente informaron que el Ψ_x disminuyó marcadamente de un Plateau entre -1,5 y -2,0 MPa cuando se alcanzó un determinado umbral de contenido de agua en el suelo. Tomando de manera conjunta los resultados expuestos arriba, sugerimos que un umbral de 50% de REW podría usarse de manera conservadora para programar el riego, si se desea mínima o nula reducción del Ψ_x . Además se sugiere que los valores menores de REW podrían usarse para regular un estrés hídrico moderado. Mientras que la instalación de los sistemas automatizados de medición de la humedad del suelo en grandes fincas comerciales (> 100 ha) puede ser costosas, y las mediciones no siempre son completamente exactas, debido a las limitaciones tecnológicas (Evetts et al., 2012), muchas fincas comerciales de esta región monitorean regularmente la humedad del suelo con barrenos, para tener una herramienta de diagnóstico inmediato y así evaluar sus requerimientos de riego.

Muy pocos estudios en olivo han investigado las relaciones entre las variables más tradicionales, tales como el REW y el Ψ_x con mediciones continuas de las VDT. Bajo nuestras condiciones de poscosecha, los coeficientes de correlación más altos ($r^2 = 0.61-$

0.78) se observaron relacionando el incremento del MXTD con el REW, el Ψ_x , y la g_1 (Fig. 2.6A-C). En otros experimentos fuertes relaciones se encontraron entre el incremento del MXTD y el potencial hídrico en árboles mauros de cv. 'Arbequina' (Fernández et al., 2011b) y pequeños plantados en condiciones de alta densidad conducidos como seto (Cuevas et al., 2013). En nuestro experimento, encontramos que la relación fue curvilínea, con una marcada caída en el crecimiento del tronco hasta $-2,5$ MPa aproximadamente. Por debajo de este valor, el crecimiento del tronco fue mínimo. La relación bilínea entre la TGR y el Ψ_x también mostro un patrón similar (Fig. 2.6E); con la TGR se observó una tasa de crecimiento negativa constante de $-12\mu\text{m d}^{-1}$ por debajo de $-2,7$ MPa. Girón et al. (2015) recientemente han encontrado relaciones no lineales entre varios parámetros fisiológicos y la caída de frutos (%). Ellos observaron que la caída de frutos incrementa significativamente por debajo de valores de Ψ_x de $-2,2$ MPa y de valores de TGR de $-10\mu\text{m d}^{-1}$. Una comparación estricta de los resultados entre estos dos estudios no es factible debido a que existen diferencias en la carga de los cultivos y los períodos fenológicos evaluados, pero la similitud en algunos de los resultados indicaría que las medidas continuas del tronco tienen potencial para programar el riego, y justifican una mayor investigación en el olivo.

La intensidad de la señal (IS) puede ser una herramienta útil para evaluar la respuesta relativa de diferentes parámetros del suelo y de la planta (Fernández y Cuevas, 2010), aunque los cálculos de esta herramienta para algunos parámetros como la TGR no siempre son directos (Moriani et al., 2010). En nuestro estudio, el incremento del MXTD, la humedad del suelo, y el Ψ_x tienen mayor señal que la g_1 y el MDS. Estos resultados coinciden con otros encontrados anteriormente por Moriana y Fereres (2002). Sin embargo, en nuestro experimento el incremento del MXTD y la humedad del suelo mostraron un alto

grado de variabilidad (CV%), con lo cual se requerirían más mediciones y mayores equipamientos, los cuales son costosos, para las fincas comerciales. En contraste, las mediciones del Ψ_x fueron mucho menos variables entre árboles.

2.5. Conclusión

Nuestros resultados muestran que el riego al 100% de la evapotranspiración del cultivo, durante el período de poscosecha desde mediados de verano, cuando las aceitunas de “mesa” verdes se cosechan a mediados de otoño, representa hasta un 20% de la cantidad anual aplicada en la región cálida y seca del Noroeste Argentino. Además, el riego deficitario durante este período ocasionó reducciones en el REW (%) del suelo. A su vez, estas reducciones produjeron disminuciones en indicadores de medidas discontinuas de la planta, como son el Ψ_x y la g_l ; además de las disminuciones en las medidas continuas de variaciones en el diámetro de los troncos, incluyendo el incremento del MXTD y TGR. Esta información permitió determinar las relaciones entre el suelo y los indicadores de planta. Dada la fuerte relación no lineal entre el suelo REW (%) y el Ψ_x de este estudio y el de muchos otros, la definición de umbrales para la programación de riego a diferentes niveles de estrés de agua basados en el REW (%) del suelo, parece factible, si se puede medir la humedad del suelo con precisión. En fincas olivícolas con bajo nivel de tecnificación es factible programar y monitorear el riego con el cálculo del REW. Dependiendo del tipo de textura se podría reponer la lámina de riego cuando el REW es igual o menor al 50%. Este valor representaría un umbral práctico de referencia para evitar condiciones de estrés al humedecer el perfil, o generarlo al suprimir el riego. En nuestro experimento el potencial hídrico xilemático fue un indicador confiable del estrés hídrico, aunque las mediciones no pueden ser automatizadas usando las cámaras de presión

tradicionales. Sin embargo, se están desarrollando tecnologías alternativas, como “leaf patch clamp pressure probes”, que miden continuamente la turgencia de las hojas (Padilla-Díaz et al., 2016). En los últimos años, la comprensión de las mediciones de los troncos ha aumentado mayormente, y en nuestro estudio se obtuvieron buenas relaciones entre el REW y el Ψ_x con las variaciones del diámetro del tronco. Por lo tanto, los indicadores derivados de las VDT presentan buenas condiciones para la programación de riego durante la poscosecha en la región árida de estudio. Otros experimentos deberían enfocarse en probar estas relaciones utilizando variaciones del diámetro del tronco en otro tipo de condiciones ambientales.

Capítulo 3. Respuestas vegetativas y reproductivas del olivo a diferentes niveles de riego deficitario en poscosecha

3.1. Introducción

A nivel mundial existe competencia por el uso del agua entre los sectores agrícola, industrial y urbano (Fererer et al., 2003; Perry et al., 2009). El sector agrícola es el principal consumidor en el mundo, el cual utiliza aproximadamente el 70% del agua dulce para el riego de los cultivos (Garces-Restrepo et al., 2008). En zonas áridas y semiáridas con bajos niveles de poblaciones humanas, y una gran expansión de la agricultura, el porcentaje del uso agrícola puede ser mayor, con estimaciones próximas al 90% en el Noroeste Argentino (Searles et al., 2011). En esta región, el olivo se ha expandido en los últimos 20 años en algunos valles que previamente no fueron cultivados (Ayerza and Sibbett et al., 2001; Gómez-del-Campo et al., 2010). Para mantener producciones económicamente rentables, estas plantaciones son irrigadas mayormente con agua proveniente del subsuelo (extraída a más de 100 m de profundidad), mediante bombas eléctricas, debido a que las precipitaciones son escasas, entre 100 a 400 mm anuales, y las fuentes de agua superficial también son reducidas. Aunque algunos estudios regionales de estos acuíferos indican descensos progresivos de los niveles (Poblete y Guimaraes, 2006), las extracciones se mantienen de manera sostenida.

El olivo es un árbol siempreverde, en la Cuenca Mediterránea, donde tradicionalmente es cultivado, inicia el crecimiento de las ramas vegetativas en primavera, extendiéndose potencialmente hasta mediados de otoño (Vitagliano y Sebastiani, 2002; Connor y Fereres, 2005). En el Noroeste Argentino, el crecimiento de las ramas comienza antes de finalizar el invierno, por las temperaturas relativamente cálidas de la región (Fernández et al., 2015), con un pico pronunciado de crecimiento en la primavera y otro pico menor después de la cosecha a fines del verano u otoño. El vigor vegetativo en el olivo

está altamente relacionado con el desarrollo reproductivo (Gómez-del-Campo y Rapoport, 2008), debido a que la carga de frutos de la temporada actual afecta significativamente el crecimiento de ramas, las cuales generarán flores en la siguiente temporada (Lavee, 1996). Aunque para que estas ramas generen flores, se deben completar dos procesos, la inducción durante el verano y otoño y luego la diferenciación a fines del invierno (Rallo et al., 1994; Rallo y Cuevas, 2008). A mediados de primavera ocurre la plena floración, y si bien, este cultivo produce un gran número de inflorescencias en temporadas de alta producción, solo fructifican algunas de las flores pistiladas o perfectas. Posteriormente, a fines de la primavera o durante el verano (entre siete a nueve semanas después de plena floración) los frutos formados que permanecieron en el árbol, inician la esclerificación del endocarpo, la cual es una etapa fenológica conocida como endurecimiento del carozo (Rallo et al., 1997; Rapoport et al., 2013). Cuando el número de frutos de un árbol es elevado, el año productivo es llamado “on”, el cual generalmente es seguido de un año con baja carga de frutos llamado “off” (Lavee, 2007). Es ampliamente conocida la relación inversa entre el crecimiento vegetativo y el desarrollo reproductivo, donde en los años “on” hay poco crecimiento de ramas y en los años “off” se produce lo inverso (Gómez-del-Campo, 2010; Fernández et al., 2015). La cosecha de aceitunas en la Cuenca Mediterránea ocurre en el otoño (Rallo et al., 1997). Sin embargo, en Argentina, algunas variedades de aceituna de “mesa” son cosechadas desde el verano, debido al adelantamiento de la floración y la fenología en general por las temperaturas cálidas en el Noroeste Argentino (Searles et al., 2011; Rondanini et al., 2014).

El riego suplementario en olivo es una herramienta que posibilita mejoras en el crecimiento vegetativo y rendimiento de frutos en zonas de bajas precipitaciones (Pastor Muñoz-Cobo, 2005). Por otro lado, diversos trabajos han planteado que se pueden generar

altos rendimientos en fincas comerciales de olivo sin la necesidad de regar al 100% de la ETc (revisado por Connor y Fereres, 2005; Fernández, 2014a). Una estrategia utilizada para esto es el riego deficitario sostenido (RDS) que consiste en aplicar menos del 100% de la ETc durante toda la temporada (Goldhamer et al., 1993; Girona et al., 2002; Iniesta et al., 2009; Correa-Tedesco et al., 2010). En el Noroeste Argentino, Correa-Tedesco et al. (2010) encontraron que un nivel de riego, el cual generó un estrés hídrico leve durante toda la temporada, resultó en la reducción del 50% en el crecimiento de las ramas. No obstante, el rendimiento de los frutos solo disminuyó el 25%. Una reducción en el crecimiento vegetativo puede ser beneficioso para mejorar el ingreso de luz al canopeo, formar yemas florales y disminuir la frecuencia de poda (Cherbiy-Hoffmann et al., 2012).

Otra estrategia utilizada en frutales como el olivo es el riego deficitario controlado (RDC), cuando la disminución del agua ocurre en etapas fenológicas puntuales de la temporada, las cuales son consideradas de baja sensibilidad al déficit hídrico (revisado por Naor et al., 2006; Pérez-Pastor et al., 2016). La etapa más investigada en RDC en olivo en la Cuenca Mediterránea es luego del endurecimiento del carozo, durante el inicio de la acumulación de aceite en el verano, utilizando variedades aceiteras (e.g., Alegre et al., 2002; Tognetti et al., 2006; Lavee et al., 2007; Gómez-del-Campo et al., 2013a,b; Fernández et al., 2013). Aunque el RDC en esta etapa puede generar menos rendimiento de aceite (aprox. 10-20%) cuando la reducción en el riego es muy pronunciada (< 50% de ETc), se puede ahorrar una considerable cantidad de agua, porque la ETo es muy alta en el verano.

El riego deficitario también ha sido investigado en otros momentos del año, como en el invierno en el Centro-Oeste y en el Noroeste Argentino. En estas regiones, la precipitación es muy escasa durante el invierno y el uso del riego es frecuente, al contrario

de lo que ocurre en la Cuenca Mediterránea. En un trabajo en el que se suspendió el riego por seis semanas durante el invierno, se generó un estrés hídrico leve y no mostró una reducción significativa en el rendimiento de los frutos en la siguiente temporada (Rousseaux et al., 2008). Sin embargo, la aplicación de tratamientos de RDC en un período de tiempo más largo, durante el invierno e inicio de la primavera generaron un estrés hídrico más severo que ocasionó menor rendimiento de frutos y aceite (Pierantozzi et al., 2013a,b). Rapoport et al. (2012) no encontraron un efecto en la floración o en los componentes del rendimiento, cuando el estrés hídrico fue aplicado en árboles jóvenes dispuestos en macetas, durante la dormancia invernal. Mientras que el rendimiento fue menor cuando el estrés fue aplicado durante el desarrollo de las inflorescencias y en las etapas posteriores a la floración.

Girón et al. (2015) mencionaron que la poscosecha es una etapa fenológica que fue poco explorada en el uso del RDC en olivo. El adelanto del momento de floración que ocurre por los inviernos templados y cortos en algunas regiones que no incluyen la Cuenca Mediterránea, generan una cosecha temprana, especialmente para variedades de aceituna de “mesa”. En el desierto de Sonora en México, la aplicación del RDC con 50% de la ETc durante tres meses después la cosecha, no redujo el crecimiento vegetativo, ni la floración de retorno, mientras se aplicaron los tratamientos. Sin embargo, el cuaje y el rendimiento de los frutos fueron menores en la temporada siguiente (Grijalva-Contreras et al., 2013). En contraste, el RDC de 75% de la ETc no afectó el rendimiento. Aunque en ese trabajo el RDC de poscosecha fue aplicado en sola una temporada, y no se informó el nivel de estrés hídrico de los árboles. Así, hasta el momento, no existen investigaciones en poscosecha relacionadas con los efectos del RDC, y también se desconoce el nivel en que este tipo de riego podría ser aplicado en varias temporadas consecutivas.

En otros frutales como el níspero de los subtrópicos y el duraznero de regiones templadas, el RDC en poscosecha ha sido exitoso; en muchos casos para ahorrar riego sin pérdidas considerables en rendimiento. En níspero, el RDC en poscosecha durante 10 años consecutivos permitió ahorrar un 20% del riego anual en una zona semiárida, adelantando la floración y mejorando la rentabilidad del cultivo (Hueso y Cuevas, 2010; Cuevas et al., 2012). En una variedad de nectarina de cosecha temprana, el RDC de 66% de ETC en poscosecha en tres temporadas disminuyó el crecimiento del tronco y aumentó el peso de las ramas podadas, sin reducción en el rendimiento de los frutos (De la Rosa et al., 2016). En duraznero, con tratamientos de RDC de poscosecha en tres temporadas disminuyó el crecimiento vegetativo y aumentó la floración, sin generar diferencias en el rendimiento en la cosecha (Larson et al., 1988; Johnson et al., 1992). Un trabajo más reciente confirmó la falta de sensibilidad del rendimiento del duraznero al RDC durante la poscosecha (Wang y Gartung, 2010).

El objetivo del presente capítulo de la tesis fue evaluar las respuestas del crecimiento vegetativo y reproductivo del olivo a tres niveles de RDC (66% ETc, 33% ETc y sin riego) aplicados en la poscosecha, durante tres temporadas en una región árida. Adicionalmente se determinaron los efectos de los tratamientos de riego en la productividad del agua ($\text{kg de frutos mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$) y en el potencial de ahorro anual de la misma.

3.2. Materiales y métodos:

El sitio (sección 2.2.1) y diseño experimental (sección 2.2.2), las mediciones de humedad del suelo (sección 2.2.3) y del potencial hídrico xilemático (sección 2.2.4) fueron mencionados y explicados en el capítulo 2. Los tratamientos de riego también fueron los

mismos, que se explicaron en el capítulo 2, a saber: 1) 66% de la ETc (T66), 2) 33% de la ETc (T33), 3) sin riego (T0) y 100% de la ETc (control).

En el presente capítulo se evaluaron variables de respuesta, relacionadas con el crecimiento vegetativo y reproductivo, rendimiento y productividad del agua, las cuales se detallan a continuación.

3.2.1. Crecimiento vegetativo

La longitud de las ramas vegetativas (i.e., sin frutos) y el perímetro de los troncos fueron evaluados en cuatro árboles por parcela, al inicio de la temporada, desde septiembre, con una frecuencia de 30 días, hasta el final del experimento en las temporadas 2008-09, 2009-10 y 2010-11. Para medir el crecimiento de las ramas, se marcaron ocho por árbol en cada temporada, cuatro en el lado este de la fila y cuatro en el lado oeste. Las ramas marcadas al inicio de la temporada, presentaron entre 5.0 -7.5 cm de largo. La longitud se midió con una regla graduada colocada al lado de cada rama. El perímetro de los troncos fue medido a 30 cm de altura desde la base del suelo, con una cinta graduada flexible extendida alrededor de los troncos. A partir del perímetro, se calculó el área (A) con la fórmula, $A = P^2/4\pi$.

3.2.2. Cantidad y calidad floral

El número de inflorescencias, flores perfectas e imperfectas y flores totales por inflorescencia fueron contabilizadas en los mismos árboles en que se midieron las variables de crecimiento vegetativo. Las flores perfectas son flores hermafroditas con un ovario bilocular y presencia de estambres, mientras que las flores imperfectas son estaminadas con un pistilo abortado. Las determinaciones se realizaron en el momento de plena floración,

entre el 13 al 15 de octubre en las primaveras de 2010 y 2011. El conteo de flores perfectas e imperfectas (i.e., calidad floral) se realizó con una lupa de aumento 10x, en 4 brindillas por árbol que tenían entre 10 y 15 cm de longitud; contabilizando la totalidad de las inflorescencias que se encontraron, y en cada una de estas, la totalidad de flores para ser identificadas como perfectas o imperfectas. En total se analizaron 2200 inflorescencias, con más de 30000 flores en cada temporada de medición. Las brindillas son ramas que se formaron y crecieron en la temporada pasada. Para determinar la cantidad floral, se utilizó el método descrito por Villalobos et al. (1995) para el conteo foliar, contabilizando el número de inflorescencias que se encontraban incluidas dentro de un cubo hueco. Dicho cubo estaba constituido por bordes metálicos de 0,08 m³ (20 x 20 x 20 cm) colocado a 2 metros de altura, en los cuatro cuadrantes (norte, sur, este y oeste) de la canopia de los árboles.

3.2.3. Cuaje y tamaño de los frutos

El porcentaje de cuaje, el número de frutos por árbol, el porcentaje de humedad, así como el tamaño (peso y diámetros) de los frutos, fueron determinados en los mismos cuatro árboles, en las tres temporadas. El cuaje (%) se midió en 4 ramas por árbol marcadas con cinta, dos en el lado este de la fila y dos en el oeste. A éstas ramas se les contabilizó el número de inflorescencias a principios de primavera y el número de frutos a principios del verano, después de la caída de los mismos que ocurre en los primeros 30-45 días luego del momento de plena floración. El número de frutos por árbol fue estimado en función del rendimiento individual de cada árbol y del peso fresco de una submuestra de 100 frutos de ese mismo árbol, tomada en el momento de la cosecha. De esta misma submuestra se obtuvo el peso fresco por fruto con una balanza de alta precisión y los frutos fueron secados

en una estufa (Bio-control, Buenos Aires, Arg) a 80°C hasta obtener peso constante para obtener el peso seco por fruto. Posteriormente se calculó el porcentaje de humedad de los frutos (% H), utilizando la fórmula de $\% H = (PF - PS) / PF * 100$, donde PF es el peso fresco y PS es el peso seco de los frutos. Con otra submuestra de 20 frutos se determinó el diámetro ecuatorial y longitudinal con un calibre digital. La relación pulpa-carozo se llevó a cabo por diferencia de peso, luego de retirar la pulpa con un cúter, y pesar los carozos por separado.

3.2.4. Rendimiento de fruta y productividad del agua

Se realizó una cosecha manual a mediados de febrero de cada temporada para determinar el rendimiento por árbol de aceitunas verdes, como es frecuente en las fincas comerciales de la ciudad de Aimogasta, La Rioja. La primera cosecha ocurrió en febrero de 2009 aproximadamente una semana antes de la primera aplicación del RDC en poscosecha. En las siguientes cosechas, realizadas en febrero de 2010, 2011 y 2012, se evaluaron los efectos potenciales de los tratamientos del RDC. Cada árbol fue cosechado en forma individual y su fruta se colocó en cajones para ser pesada en el campo con una balanza digital. La productividad del agua se calculó como el valor del rendimiento (kg árbol^{-1}) dividido por la lámina de riego (mm) anual. Para calcular productividad de agua, se utilizó un período de 12 meses, entre marzo y febrero, debido a que en este momento se encontró el período de aplicación de RDC y los meses subsecuentes antes la cosecha.

3.2.5. Análisis estadístico

Se realizó el análisis de la varianza (ANOVA) en cada temporada para determinar las respuestas de las variables de crecimiento vegetativo y reproductivo al RDC en

poscosecha utilizando el programa INFOSTAT (Universidad de Córdoba, Córdoba, Argentina). Se utilizó el test de Tukey para detectar las diferencias entre medias con un nivel de significancia de $P < 0.05$. El número de inflorescencias fue analizado con un ANOVA de dos factores (tratamiento y temporada), porque un análisis preliminar indicó una posible interacción entre esos dos factores.

3.3. Resultados

3.3.1. Datos meteorológicos y riego aplicado

Durante el período del RDC, la temperatura máxima diaria mensual disminuyó desde aproximadamente 32°C hasta 27°C y la mínima diaria mensual bajó de 18°C a 14°C (Fig. 3.1A). La ETo promedio mensual fue de 4.3 mm y disminuyó desde valores diarios de 5.5 mm al final de febrero hasta 2.5 mm a principio de mayo (Fig. 3.1B). Las precipitaciones efectivas (eventos con más de 7 mm) durante el período de RDC fueron muy escasas con un total de 10, 16 y 26 mm en las temporadas 2009-10, 2010-11 y 2011-12, respectivamente.

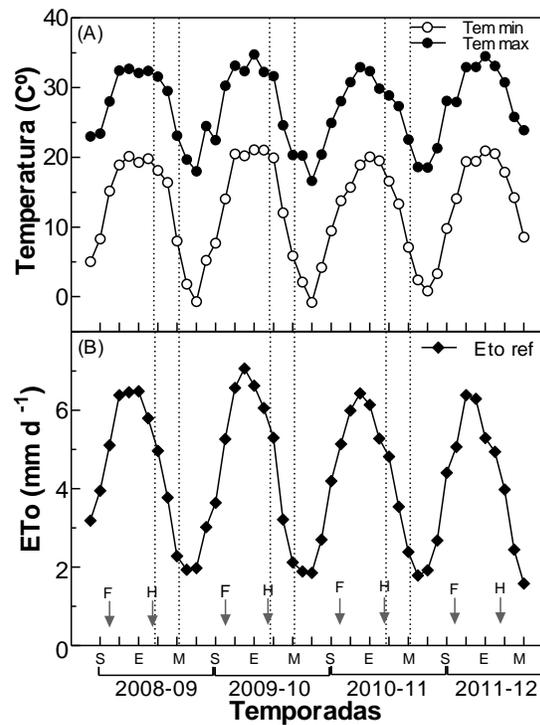


Figura 3.1. Temperatura máxima diaria y mínima diaria mensual (A) y evapotranspiración de referencia media mensual (ETo) (B) entre las temporadas 2008-09 y 2011-12. Las letras F y H representan las fechas de plena floración y cosecha, respectivamente. Las líneas verticales indican el inicio y el final de la aplicación de los tratamientos de riego deficitario controlado en poscosecha.

Teniendo en cuenta el aumento que ocurrió en el tamaño de los árboles, el riego aplicado en el control aumentó levemente en cada temporada (100 % ETc) desde 178 mm en 2009 hasta 208 mm en 2011, mientras que la ETo fue similar en las tres temporadas (Cuadro 3.1). Con respecto a los tratamientos de RDC, el T66 recibió un máximo de 139 mm de riego en 2010-11, y el T33 recibió 69 mm en 2010-11. El T0 no recibió riego en las tres temporadas durante el RDC, y los eventos de precipitación efectiva (> 7 mm) fueron muy escasos, como fue indicado en el párrafo anterior. La reducción en el riego anual fue de aproximadamente 6%, 13% y 19% en los tratamientos T66, T33 y T0, respectivamente, en cada temporada.

3.3.2. Humedad del suelo y potencial hídrico xilemático

El promedio del REW en el control durante el período de RDC fue 100% en la primera temporada y aproximadamente 70% en las dos temporadas posteriores (Cuadro 3.1). En el T0, los valores promedios estuvieron entre 7.5 y 20.2% durante el período de RDC. Similarmente, el promedio de Ψ_x fue aproximadamente -1.6 MPa en el control, y el Ψ_x en el T0 fue el más negativo con valores promedios de -2.9 y -3.5 MPa en la primera y segunda temporada, respectivamente. El Ψ_x no fue medido en la tercera temporada. La dinámica del REW y el Ψ_x durante el período de RDC están en el Capítulo 2 (Fig. 2.2).

Cuadro 3.1. Evapotranspiración de referencia (ET_o), riego en el período de riego deficitario controlado en poscosecha (RDC), riego anual, contenido relativo de agua extraíble del suelo (REW) y potencial hídrico xilemático (Ψ_x) durante las temporadas 2008-09, 2009-10 y 2010-11.

Temporada	ET _o ^a (mm)	Tratamiento (ET _c %)	Riego durante RDC (mm)	Riego anual (mm)	REW promedio (%)	Ψ_x promedio
2008-09	323	100	178	897	100.8	-1.6
		66	119	838	76.8	-1.7
		33	59	778	46.8	-2.0
		0	0	719	14.9	-2.9
2009-10	313	100	192	954	69.4	-1.7
		66	128	890	54.6	-1.8
		33	64	826	38.2	-2.5
		0	0	762	7.5	-3.5
2010-11	304	100	208	1027	70.7	S/D
		66	139	958	77.6	S/D
		33	69	888	56.2	S/D
		0	0	819	20.2	S/D

^aLa evapotranspiración de referencia en el período de aplicación de los tratamientos.

3.3.3. Cantidad y calidad floral

En el número de inflorescencias se encontró una interacción significativa entre tratamiento y temporada ($P < 0.01$) (Fig. 3.2). Luego de la primera temporada de RDC, se contaron casi 3900 inflorescencias por metro cúbico en el T0 y solo alrededor de 2800 en el control, T66 y T33. En la temporada 2010-11 el número de inflorescencias fue marcadamente mayor en el control, T66 y T33 (aprox. 5000 m^{-3}), pero en el T0 se mantuvo similar a la temporada anterior.

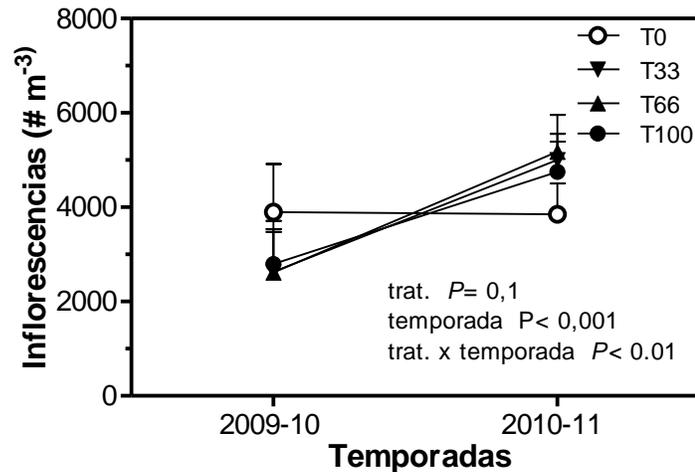


Figura 3.2. Número de inflorescencias ($\# m^{-3}$) para el control (T100) y los tratamientos de riego deficitario controlado en poscosecha (T66, T33 y T0) durante las temporadas 2009-10 y 2010-11. Los datos mostrados representan promedios + error estándar de 5 parcelas por cada tratamiento.

En relación a las inflorescencias, no hubo diferencias significativas entre el control y los tratamientos de RDC en el número de flores perfectas e imperfectas, ni tampoco en el número de flores totales (Cuadro 3.2). Solo se observó una tendencia de tener mayor cantidad de flores perfectas y de flores totales en 2009-10 en relación al 2010-11. El cuaje de frutos (%), tampoco mostró diferencias entre el control y los tratamientos.

Cuadro 3.2. Número de flores perfectas e imperfectas, total de flores por inflorescencia y el porcentaje de frutos cuajados medido en brindillas en el control (T100) y los tratamientos de riego deficitario controlado en poscosecha (T66, T33 y T0) durante las temporadas 2009-10 y 2010-11. Los valores mostrados representan promedios \pm error estándar ($n= 5$ parcelas por tratamiento). La letra “a” indica que no hay diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tratamientos en una temporada.

Temporada	Tratamiento (ETc %)	Perfecta (#)	Imperfecta (#)	Total (#)	Cuaje (%)
2009-10	100	1.3 \pm 0.8a	11.0 \pm 1.8a	12.3 \pm 1.7a	29.5 \pm 11.5a
	66	1.7 \pm 1.2a	10.6 \pm 1.9a	12.3 \pm 1.8a	21.4 \pm 9.6a
	33	0.8 \pm 0.6a	10.9 \pm 1.7a	11.8 \pm 1.7a	21.9 \pm 10.7a
	0	1.3 \pm 0.9a	11.7 \pm 2.0a	13.0 \pm 1.8a	19.8 \pm 9.0a
2010-11	100	3.0 \pm 1.4a	10.8 \pm 2.3a	13.8 \pm 2.2a	41.7 \pm 15.2a
	66	2.3 \pm 1.2a	12.2 \pm 2.3a	14.4 \pm 2.2a	27.6 \pm 8.9a
	33	3.5 \pm 1.6a	11.1 \pm 3.2a	14.6 \pm 2.9a	35.5 \pm 12.0a
	0	3.4 \pm 1.6a	9.5 \pm 2.6a	12.9 \pm 2.2a	36.3 \pm 13.0a

3.3.4. Número de frutos y rendimiento

Como era esperado, no hubo diferencias en el número de frutos y el rendimiento en la cosecha (2008-09) antes de la aplicación de los tratamientos de RDC (Fig. 3.3A, B). En la primera temporada después del RDC (2009-10), el número de frutos y el rendimiento mostraron un aumento significativo ($P < 0.05$) de aproximadamente 45% en el T0 en comparación con el control y los otros tratamientos de RDC. En las temporadas 2010-11 y 2011-12, el número de frutos no fue diferente estadísticamente ($P=0.22$ y 0.26 , respectivamente). Durante las cuatro temporadas, el control y todos los tratamientos presentaron alternancia entre una temporada de alta carga, seguida por una temporada de baja carga como es típico en árboles adultos en este cultivo.

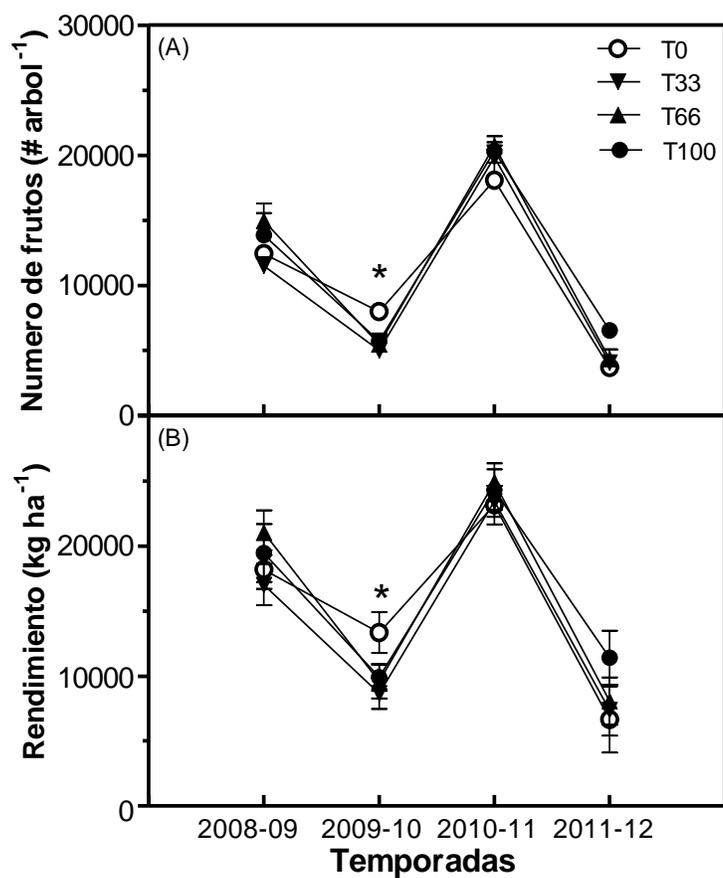


Figura 3.3. Número de frutos por árbol (A) y el rendimiento por hectárea (B) durante las temporadas 2008-09, 2009-10, 2010-11 y 2011-12 para el control (T100) y los tratamientos de riego deficitario controlado en poscosecha (T66, T33 y T0). Los puntos y barras de los datos mostrados representan promedios \pm error estándar ($n=5$ parcelas por tratamiento).

No se observaron diferencias significativas entre el control y los tratamientos en el rendimiento total acumulado, después de tres temporadas consecutivas de aplicar RDC en poscosecha ($P=0.23$) (Fig. 3.4). El rendimiento total fue aproximadamente de 45,600 kg ha⁻¹ en el control y el menor valor fue para el T33 con 39,500 kg ha⁻¹, el T0 y T66 mostraron valores numéricamente intermedios.

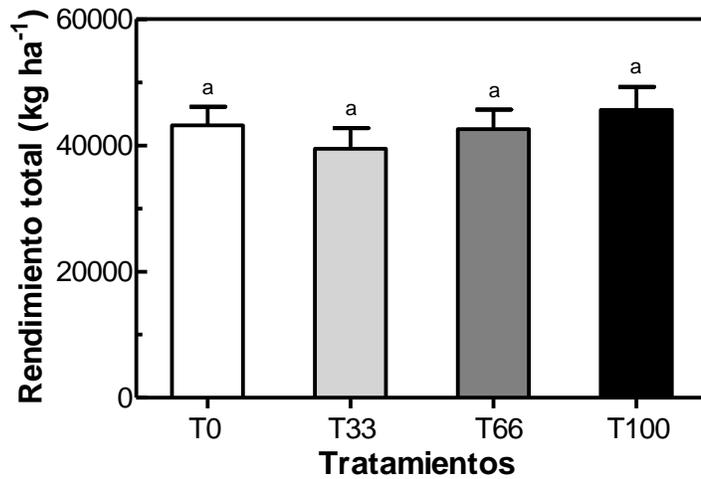


Figura 3.4. Rendimiento total acumulado durante las tres temporadas (2009-10, 2010-11, 2011-2012) después de las aplicaciones de riego deficitario controlado en poscosecha (T66, T33 y T0) y el control (T100). Las barras de datos mostrados representan promedios \pm error estándar (n= 5 parcelas por tratamiento).

3.3.5. Variables de frutos individuales

En el peso fresco del fruto, la relación pulpa:carozo (P/C) y el porcentaje de humedad de los frutos, no se encontraron diferencias significativas entre el control y los tratamientos de RDC (Cuadro 3.3). El peso del fruto fue menor en 2010-11, la cual fue una temporada con alta carga de frutos, en relación a las dos temporadas de baja carga (2009-10, 2011-12).

Cuadro 3.3. Peso fresco por fruto, relación de peso fresco de pulpa: carozo (P/C) y porcentaje de humedad de frutos en la cosecha durante las temporadas, después de la aplicación de RDC (2009-10, 2010-11, 2011-12). Los valores mostrados representan promedios \pm error estándar ($n=5$ parcelas por tratamiento). La letra “a” indica que no hay diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tratamientos en una temporada.

Temporada	Tratamiento (ETc %)	Peso Fresco (g fruto ⁻¹)	Relación P/C (g/g)	Humedad (%)
2009-10	100	5.6 \pm 0.1a	7.3 \pm 0.5a	62.9 \pm 0.3a
	66	5.7 \pm 0.1a	7.2 \pm 0.3a	63.0 \pm 0.3a
	33	5.5 \pm 0.1a	7.8 \pm 0.1a	63.0 \pm 0.4a
	0	5.4 \pm 0.1a	7.5 \pm 0.1a	63.3 \pm 0.4a
2010-11	100	3.8 \pm 0.1a	6.8 \pm 0.1a	67.6 \pm 0.4a
	66	3.9 \pm 0.1a	6.5 \pm 0.1a	67.1 \pm 0.6a
	33	3.8 \pm 0.2a	7.0 \pm 0.3a	67.1 \pm 0.6a
	0	4.2 \pm 0.2a	6.8 \pm 0.3a	67.2 \pm 0.5a
2011-12	100	5.6 \pm 0.1a	6.6 \pm 0.2a	66.2 \pm 1.1a
	66	6.0 \pm 0.1a	6.6 \pm 0.2a	67.1 \pm 1.1a
	33	5.9 \pm 0.1a	6.2 \pm 0.2a	67.8 \pm 0.7a
	0	6.0 \pm 0.2a	6.5 \pm 0.1a	66.7 \pm 0.7a

3.3.6. Productividad del agua

En la primera (2009-10) y segunda (2010-11) temporada después del RDC de poscosecha la productividad del agua fue significativamente mayor en el T0 que en el control (Fig. 3.5). La diferencia fue de 40% en 2009-10 y de 15% en 2010-11. La mayor productividad en 2009-10 fue debida a una combinación entre el mayor rendimiento de fruta fresca observada en el T0 y el menor riego anual, mientras que en 2010-11 la diferencia reflejó el menor riego en el T0 por el mismo rendimiento (Fig. 3.3B). Luego del tercer período de aplicar tratamientos de RDC, la productividad del agua no mostró diferencias significativas con el control.

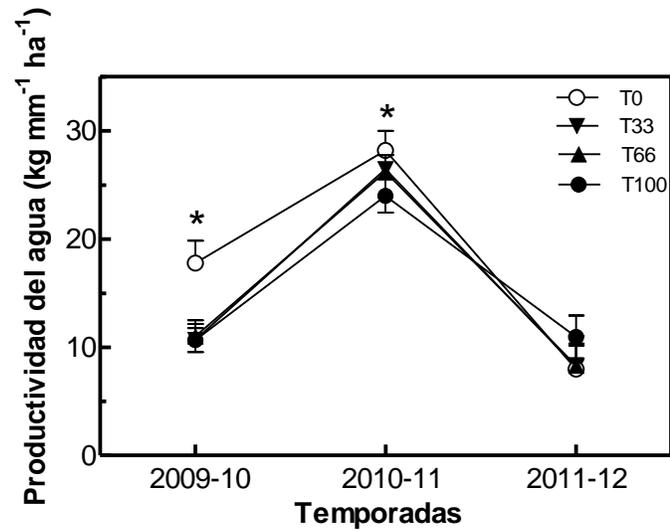


Figura 3.5. Productividad del agua expresada en kg de fruta por mm de agua aplicada en una hectárea durante las temporadas 2009-10, 2010-11 y 2011-12 para el control (T100) y los tratamientos de riego deficitario controlado en poscosecha (T66, T33 y T0). Los puntos y barras de datos mostrados representan promedios \pm error estándar ($n=5$ parcelas por tratamiento).

3.3.7. Crecimiento de ramas y tronco

El crecimiento de las ramas y del tronco fue similar entre los árboles del control y los tratamientos antes de la primera aplicación de RDC en poscosecha, que comenzó a mediados de febrero de 2009 (Cuadro 3.4). Durante el primer período de RDC, el crecimiento del área seccional del tronco fue menor en el T33 en comparación con el control y el T66, mientras que el tronco del T0 mostró una contracción en su área. Luego del período de RDC, el control, el T66 y el T33 crecieron hasta la última medición al principio del invierno. El tronco del T0 se recuperó en febrero 2009 después del reinicio del riego. Al final de la temporada, no hubo diferencias significativas en el crecimiento del tronco entre el control, el T66 y el T33, pero el crecimiento en el T0 fue menor. En las ramas, el crecimiento fue muy bajo (<1 cm) durante el período de RDC, y no se encontró una reducción significativa en el crecimiento del T33 y T0 en comparación con el control, y

tampoco con el T66 ($P=0.06$). Por este motivo, no hubo una diferencia en el crecimiento longitudinal de las ramas al final de la temporada. En la segunda temporada (2009-10) de tratamientos, los efectos del RDC en el crecimiento del tronco y las ramas fueron muy semejantes a la primera temporada (2008-09).

La respuesta del crecimiento fue diferente en las ramas y el tronco en la tercera temporada (2010-11). El crecimiento del tronco fue bajo en general en 2010-11 con un crecimiento mínimo antes de la cosecha debido a la alta carga de frutos. Durante la aplicación del RDC en poscosecha, el crecimiento aumentó en el control y en el T66, pero no en el T33 y T0. Al final de la temporada, no hubo diferencias significativas ($P=0.37$) entre el control y los tratamientos, al contrario de lo observado en las primeras dos temporadas (2008-09, 2009-10). En las ramas, el mayor crecimiento ocurrió en el T0, en comparación con el control antes de la aplicación del RDC y menor crecimiento de este tratamiento ocurrió durante el RDC. Esta combinación de respuestas generó un crecimiento semejante entre el control y el T0 al final de esta última temporada.

Cuadro 3.4. Crecimiento longitudinal de ramas vegetativas y área seccional del tronco para el control (T100) y los tratamientos de RDC en poscosecha (T66, T33 y T0) durante las temporadas 2008-09, 2009-10 y 2010-11. Los datos mostrados representan promedios \pm error estándar de 5 parcelas por cada tratamiento. Las diferentes letras indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tratamientos en una temporada.

Temporada	Tratamiento (ETc %)	Longitud de ramas vegetativas (cm)			Área seccional del tronco (cm ²)		
		Antes del RDC	Durante el RDC	Toda la Temporada	Antes del RDC	Durante el RDC	Toda la Temporada
2008-09	100	4.7 \pm 0.7a	0.5 \pm 0.3a	5.5 \pm 0.8a	18.4 \pm 3.9a	12.2 \pm 2.4c	37.0 \pm 5.7b
	66	4.9 \pm 0.7a	0.6 \pm 0.1a	5.6 \pm 0.8a	20.5 \pm 2.3a	11.0 \pm 1.5c	38.7 \pm 3.3b
	33	5.1 \pm 0.5a	0.1 \pm 0.03a	5.6 \pm 0.7a	18.2 \pm 2.0a	4.9 \pm 2.0b	29.5 \pm 3.6b
	0	5.2 \pm 0.5a	0.1 \pm 0.05a	5.3 \pm 0.6a	17.2 \pm 3.4a	-2.0 \pm 2.1a	17.5 \pm 4a
2009-10	100	7.0 \pm 1.0a	1.4 \pm 0.3a	8.4 \pm 1.2a	9.2 \pm 3.1a	18.6 \pm 3.3c	28.0 \pm 4.9b
	66	10.3 \pm 1.4a	1.5 \pm 0.4a	11.9 \pm 1.8a	10.9 \pm 1.5a	18.4 \pm 1.7c	29.3 \pm 2.8b
	33	10.3 \pm 1.6a	0.6 \pm 0.1a	11.1 \pm 1.7a	8.4 \pm 2.6a	11.7 \pm 2.7b	20.1 \pm 4.2b
	0	11.0 \pm 2.2a	0.5 \pm 0.2a	11.5 \pm 2.4a	8.2 \pm 3.3a	-1.2 \pm 3.7a	7.1 \pm 4.5a
2010-11	100	3.9 \pm 0.4ab	1.3 \pm 0.3c	5.3 \pm 0.8a	1.2 \pm 2.6a	8.0 \pm 2.3c	9.1 \pm 3.5a
	66	3.0 \pm 0.2a	1.0 \pm 0.1bc	4.1 \pm 0.3a	-0.01 \pm 2.9a	7.9 \pm 1.5c	7.9 \pm 3.4a
	33	4.1 \pm 0.3ab	0.6 \pm 0.1ab	4.6 \pm 0.3a	1.9 \pm 2.6a	3.1 \pm 1.4b	5.0 \pm 3.1a
	0	4.8 \pm 0.5b	0.04 \pm 0.04a	4.8 \pm 0.5a	3.0 \pm 3.7a	-1.5 \pm 1.3a	1.1 \pm 3.9a

3.4. Discusión

En las nuevas regiones de producción olivícola, con clima no Mediterráneo existe un desafío en el manejo del cultivo (Connor, 2005), ya que requieren de un conocimiento muy amplio de su funcionamiento. En estas nuevas regiones, que incluyen valles productivos del Noroeste Argentino, la cosecha de aceitunas para “mesa” se inicia muy temprano (a mediados del verano), debido al adelantamiento en la fenología del cultivo en respuesta a la acumulación de tiempo térmico. Por lo tanto, con este capítulo es importante el avance en el conocimiento que se obtuvo sobre el efecto de la aplicación de RDC, durante la poscosecha, en el crecimiento vegetativo y los componentes del rendimiento, a través de temporadas consecutivas en el cultivo del olivo.

Una de las variables más críticas, que debe ser consideradas si se quiere aplicar RDC en olivo durante la poscosecha, es el retorno de floración. En este trabajo, la floración mostró una interacción significativa entre los tratamientos de RDC y la temporada (2009-10, 2010-11). El tratamiento sin riego (T0) presentó una tendencia a tener más floración de retorno que el control y los tratamientos de RDC (T66, T33) después de la primera aplicación de RDC y una menor cantidad después de la segunda aplicación (Fig. 3.2). El uso de RDC en poscosecha en una temporada en México, no generó cambios en la floración, pero los autores no midieron algunas variables necesarias para estimar el estrés hídrico (Grijalva-Contreras et al., 2013). Gucci et al. (2007) observaron en la variedad ‘Leccino’ que el número de inflorescencias por rama fértil fue 46% mayor con respecto al control en la floración de retorno luego de una temporada de RDC en verano, cuando aplicaron un tratamiento de déficit hídrico severo ($\Psi_{\text{hoja}} = -4$ MPa). En contraste, un tratamiento que indujo un déficit más suave ($\Psi_{\text{hoja}} = -2.5$ MPa) no afectó la floración. Similarmente, Grattan et al. (2006) encontraron que la densidad floral de retorno fue cinco

veces más alta en árboles de 'Arbequina' luego de la segunda temporada de riego deficitario en la que se aplicó menos del 33% de la ETc desde fines de primavera, llegando a valores de Ψ_x entre -3 y -4 MPa en otoño. En otras especies frutales como níspero y duraznero, varios estudios han mostrado que el estrés hídrico severo mejora la respuesta del retorno de floración durante varias temporadas (Larson et al., 1988; Johnson et al., 1992; Cuevas et al., 2012). En el presente experimento, el T0 mostró la tendencia de tener menor floración después de la segunda aplicación de RDC de poscosecha, posiblemente debido a que el mayor número de frutos y el rendimiento de la temporada anterior afectó la floración de retorno substancialmente, como fue frecuentemente observado en olivo (Lavee et al. 2007).

Para florecer durante la primavera, la acumulación de una suficiente cantidad de horas de frío durante el otoño y el invierno es requerida para romper la dormición de las yemas en árboles de olivo (Rallo et al., 1994). En el Noroeste Argentino, existen muchas variedades introducidas de la Cuenca Mediterránea que no florecen la mayoría de los años por la falta de acumulación de horas de frío (Aybar et al., 2015). La variedad 'Manzanilla fina' fue utilizada en este trabajo explícitamente debido a que tiene un requerimiento de horas de frío relativamente bajo. En algunos frutales subtropicales y tropicales, existen evidencias de que el estrés hídrico puede reducir el crecimiento vegetativo e inducir una mayor floración (Southwick y Davenport, 1986; Chaikiattiyos et al., 1994). Además, existen observaciones en Perú donde el estrés hídrico después de la cosecha durante el otoño, puede mejorar la floración de variedades con altos requerimientos de frío (Castillo-Llanque et al., 2014). Nuevos estudios serían necesarios donde evalúen la respuesta de la floración al RDC en poscosecha en una variedad que no florece habitualmente por la falta de horas de frío.

Con la excepción del período de RDC en poscosecha, todos los tratamientos recibieron riego del 100% de la ETc en el resto del año. Por lo tanto, varios momentos fenológicos, como el desarrollo de las inflorescencias, la plena floración, el cuaje y el crecimiento de los frutos ocurrieron con suficiente humedad en el suelo. Posiblemente por este motivo, las variables asociadas al desarrollo de las inflorescencias, como el número de flores perfectas y flores totales por inflorescencia, no fueron afectadas por el RDC. El porcentaje de flores perfectas (número de flores perfectas/ número de flores totales) fue bajo (<25%; Cuadro 3.2) comparado con estimaciones anteriores en ‘Manzanilla’ (Lavee et al., 1996). Sin embargo, Lavee et al. (1996) encontraron que el porcentaje de flores perfectas puede ser bajo (<35%) sin reducciones en el rendimiento. El cuaje tampoco fue afectado por los tratamientos del RDC en poscosecha. En duraznero, Larson et al. (1988) mostraron un aumento de floración así como un aumento en el cuaje. Aunque (Johnson et al., 1994) en el mismo cultivo, si bien registraron un aumento de la floración, no encontraron un aumento en el cuaje. Además, Naor et al. (2005) demostraron que el porcentaje de cuaje disminuye a medida que se intensifica el estrés, en los tratamientos de RDC aplicados en poscosecha. De todas formas, los efectos del RDC en poscosecha en el cuaje de la siguiente temporada no representan gran importancia en muchos frutales como duraznero, debido a que el raleo de frutos es una herramienta de manejo común para obtener un alto porcentaje de frutos de un tamaño comercial aceptable (De la Rosa et al., 2016).

La tendencia observada de mayor floración (Fig. 3.2) luego de la primera temporada de RDC, y la falta de diferencias entre tratamientos mencionadas en el cuaje, generaron un aumento del 31% en el número de frutos del T0 en relación al control (Fig. 3.3A). En olivo como en otros frutales, una diferencia en el número de frutos entre árboles puede afectar el

tamaño del fruto (Trentacoste et al., 2010; Fernández et al., 2015). Sin embargo, en la temporada después de la primera aplicación de RDC fue en un año de baja producción (i.e., año de “off”), y subsecuentemente la diferencia en el número de frutos no afectó significativamente su peso fresco. Similarmente al trabajo actual, algunos reportes indican que el RDC en poscosecha aumenta el número de frutos en duraznero (Johnson et al., 1992; Larson et al., 1988), aunque el estrés producía flores con doble carpelo, generando posteriormente frutos dobles y defectuosos. Esto ocurrió debido a que durante el período de RDC aplicado en poscosecha en duraznero, también ocurren algunos procesos como la diferenciación floral. En olivo, la diferenciación floral ocurre más tarde (i.e., fin del invierno) que en duraznero y esas deformaciones de los frutos no fueron observadas. En la segunda (2010-11) y tercera (2011-12) temporada después del RDC, no se observaron diferencias en el número o peso de los frutos entre tratamientos, aunque la temporada 2010-11 fue de alta producción con frutos pequeños y la 2011-12 fue de baja producción, con frutos grandes.

El aumento en el número de frutos generó un 35% más de rendimiento en el T0 en comparación con el control y con los otros tratamientos de RDC en la siguiente temporada (2009-10) (Fig. 3.3). La mayor producción del T0 en esta temporada de baja producción significó una contribución potencial para reducir la alternancia productiva en estos árboles. Sin embargo, el rendimiento del T0 fue igual que los otros árboles después de la segunda temporada de RDC, aunque se podría haber esperado un rendimiento menor si el RDC hubiera tenido un efecto más marcado en la alternancia. En cerezo (*Prunus avium* L.), la utilización del RDC en poscosecha fue propuesta por Marsal et al. (2010) basado en la disminución del crecimiento vegetativo que puede ocasionar un RDC de poscosecha, especialmente luego de una temporada de baja producción.

El rendimiento total de frutos después de tres temporadas de RDC en poscosecha no mostró diferencias significativas entre el control y los tratamientos (Fig. 3.4). Los estudios de RDC en etapas específicas en variedades de olivo destinadas para “mesa” son pocos. Goldhamer et al., (1999) aplicaron RDC luego del endurecimiento del carozo en ‘Manzanilla’ en cuatro temporadas y encontraron que una disminución del riego que correspondía a un ahorro del 25% del riego anual no afectó el rendimiento, pero una disminución más severa (44%) del riego anual bajó el rendimiento aproximadamente en un 10%. Cano-Lamadrid et al. (2015) también observaron que la aplicación de un RDC moderado, durante la etapa del endurecimiento del carozo en una temporada, no afectó el rendimiento o la calidad de las aceitunas. Aunque no existió una reducción estadísticamente significativa en el presente experimento, el T66 tuvo 7% menos producción que el control después tres temporadas y el T33 14% menos. Esta observación sugiere que los estudios de tiempo más prolongados, entre 6 y 10 temporadas, serían necesarios en olivo, para determinar si los efectos de la reducción del riego se acumulan en el largo plazo. Algunos de estos estudios sugeridos se realizaron en otros frutales como por ejemplo: en ciruela (Intrigliolo y Castel, 2010; Intrigliolo et al., 2013), en cítrico (Ballester et al., 2014) y en níspero (Hueso y Cuevas, 2012).

En regiones con escasez de agua, se requiere conocer el balance entre rendimiento y productividad del agua (WP) (Feres et al., 2014). La productividad del agua está definida en muchos estudios de olivo como los kg de fruta fresca obtenidos por mm de riego aplicado (revisado por Fernández, 2014a). Esto es básicamente un indicador de la eficiencia del uso del agua en las fincas. En el presente experimento, la WP en el T0 fue mayor que la calculada para el control y para los otros tratamientos en las primeras dos temporadas (2009-10, 2010-11) después de la aplicación de RDC en poscosecha (Fig. 3.5). En 2009-10,

en el T0, la mayor WP fue debida a la combinación de la suspensión del riego por 75 días y el mayor rendimiento en esta temporada, mientras que la suspensión del riego explica la mayor WP en 2010-11. Un aumento lineal en la WP con el riego fue encontrado en un estudio donde se examinaron los efectos del riego deficitario sostenido en la misma variedad y región (Correa-Tedesco et al., 2010). Además, una recopilación de las funciones involucradas en respuesta del rendimiento al agua aplicada en varios árboles frutales de clima templado y vides, sugiere fuertemente que el riego deficitario tiene un efecto positivo en numerosos cultivos leñosos (Ferreira et al., 2012). En la tercera temporada luego del RDC la WP fue la menor registrada en el experimento, esto fue debido a una disminución en general del rendimiento creada por la alternancia productiva, una característica muy común en los olivares, mencionada en este capítulo.

El crecimiento de las ramas del olivo es importante debido a que la elongación de estas en una temporada determina el número de yemas, que potencialmente pueden producir inflorescencias la próxima temporada (Rallo et al., 1994). En este trabajo, la mayoría del crecimiento de las ramas ocurrió en la primavera y principios del verano cuando todos los árboles eran regados al 100% de la ETc (Cuadro 3.4). El crecimiento del control siempre fue menor a 2 cm durante el período de RDC, y solo existió una reducción durante el RDC en la tercera temporada. La falta de diferencias entre tratamientos en el crecimiento de las ramas contribuyó a que el rendimiento de los frutos sea igual en todos los niveles de riego, luego de tres temporadas de RDC. Otros trabajos en la misma región, en aceitunas de “mesa”, también reportaron que el crecimiento del otoño es bastante menor que en la primavera (Correa-Tedesco et al., 2010; Fernández et al., 2015).

En forma contraria al crecimiento de las ramas, el crecimiento del área seccional del tronco mostró diferencias entre el control y los tratamientos, durante la aplicación del RDC

en cada una de las tres temporadas. Además, el T0 mostró menor crecimiento al final de toda la temporada después de las primeras dos aplicaciones de RDC. No hubo una diferencia estadísticamente significativa después de la tercera temporada, probablemente porque el crecimiento fue muy bajo en esta temporada debido a la alta carga de frutos (24.000 kg ha⁻¹ en promedio). En olivares adultos de ‘Manzanilla’ con alta carga, Cuevas et al. (2010) también encontraron que el crecimiento en el tronco medido con microdendrómetros era mínimo, con varios días de contracciones, a pesar de que eran regados al 100% de la ETc. En las tres temporadas de RDC, el crecimiento del tronco en el T0 y T33 fue 65 y 26% menores que el control, respectivamente. Es posible que una reducción en el crecimiento del tronco a largo plazo genere cambios significativos en su área xilemática y en su conductividad hidráulica. Esto podría llevar a una reducción en el crecimiento de las ramas y el canopeo, inclusive cuando los árboles estuvieran bien regados. En duraznero, De la Rosa et al. (2016) también encontraron que el RDC en poscosecha, durante tres temporadas, redujo más el crecimiento del tronco que el crecimiento de ramas o el peso generado por los restos de poda del canopeo.

3.5. Conclusión

Los resultados de este capítulo indican que luego de dos temporadas experimentales, estrategias de riego alternativas pueden ser factibles en climas no-mediterráneos, ya que el olivo mostró un comportamiento de gran tolerancia al estrés hídrico. En olivos de cosecha temprana para aceituna de “mesa”, la aplicación de RDC en poscosecha durante el verano y el otoño en tres temporadas, resultó en un ahorro de riego entre 7 y 19% anual, sin pérdidas significativas en el rendimiento. La suspensión completa del riego (T0) en poscosecha, solo sería recomendable en fincas maduras con árboles que

tengan sistemas radicales extensos y profundos, y exploren un gran volumen de suelo en búsqueda de humedad; aunque los efectos de RDC tendrían que ser evaluados en el largo plazo (i.e. más de tres temporadas). En árboles productivos de menor edad o en sistemas de plantación más densos, la suspensión total del riego por 2,5 meses podría provocar un estrés más intenso con efectos negativos en el rendimiento. Posiblemente en estos sistemas una estrategia de riego similar al T33 utilizado en este experimento sería más adecuada.

Capítulo 4. Efectos del Riego Deficitario Controlado durante la precosecha sobre la calidad y cantidad de los frutos y el aceite (*Olea europaea* L. cv. Manzanilla fina) en una región árida de Argentina

4.1. Introducción:

En Argentina, la producción de las plantaciones de los pequeños productores de aceitunas, estuvo tradicionalmente orientada a la industria de variedades de “mesa”. Este es el caso de la variedad argentina ‘Arauco’ (Gómez-del-Campo et al., 2010; Searles et al., 2012). Estos cultivos tuvieron marcos de plantación de grandes dimensiones, y por lo tanto de baja densidad (i.e., 100 plantas ha⁻¹). El riego se realizaba por superficie para cubrir una parte de las necesidades hídricas del cultivo. En los últimos 20-30 años, hubo un incremento de las plantaciones comerciales, con una mayor extensión de las superficies de cultivo (>500 ha) y se plantaron variedades comerciales de la Cuenca Mediterránea. Estas variedades, en gran proporción, son de doble propósito, debido a que pueden ser cosechadas para aceitunas de ‘mesa’ o para elaborar aceite de oliva. El desarrollo generado aumentó la producción de aceite en Argentina, el cual coincidió con la mayor demanda de aceite de oliva a nivel mundial, debido a los múltiples beneficios que causa su consumo en la salud humana (Stark et al., 2002). Las nuevas plantaciones comerciales se desarrollaron incorporando una mayor densidad de plantas por superficie (200 – 600 plantas ha⁻¹) y nuevas tecnologías como el riego por goteo (Ayerza y Sibbett, 2001). Algunos cultivares introducidos, como ‘Manzanilla fina’ (sinónima de ‘Manzanilla de Sevilla’) han mostrado buenas características en calidad de aceite en Argentina (Bodoira et al., 2016). Por ejemplo, ‘Manzanilla fina’ muestra un alto contenido de ácido oleico (>70%) en la región cálida del Noroeste Argentino, mientras que algunas variedades aceiteras como ‘Arbequina’ (otra variedad española) presentan valores menores del 55%, el cual representa el valor mínimo aceptado por el Consejo Oleícola Internacional, cuando están cultivadas en zonas cálidas (Rondanini et al., 2011; Rondanini et al., 2014).

El olivo tiene muchas características adaptativas que le permiten reducir el uso de agua, como hojas pequeñas con alta reflectividad, orientación vertical, alta densidad de tricomas, y estomas en la cara abaxial de la hoja (Connor, 2005) en pequeñas depresiones donde se genera un microclima (Fernández y Moreno, 1999). Por otro lado, el riego aumenta el crecimiento vegetativo, el número de frutos y el rendimiento de aceite en zonas donde las precipitaciones son bajas (Lavee et al., 2007; Caruso et al., 2013). Diversas investigaciones han evaluado el requerimiento de agua en olivo, para obtener rendimientos máximos de frutos y aceite (revisados por Connor y Fereres, 2005; Fernández, 2014a). En el Noroeste Argentino, Correa et al. (2010) mostraron que el rendimiento máximo de fruta coincidió con un riego equivalente a un coeficiente de cultivo (K_c) de 0.7. En otras palabras, fue necesario regar el cultivo con un 70 % de la evapotranspiración de referencia para obtener rendimientos altos, sin hacer sobrierigos.

Debido a que el agua es un recurso muy limitado en zonas áridas y semiáridas, la utilización del riego deficitario en olivo puede ser una herramienta de manejo sustentable que reduce el uso de agua por el sector agrícola (Connor et al., 2014). El riego deficitario controlado (RDC) consiste en regar con menos del 100% de los requerimientos de evapotranspiración del cultivo, en momentos de baja sensibilidad al estrés hídrico, sin afectar significativamente los rendimientos (Costa et al., 2007; Pérez-Pastor et al., 2016). Inicialmente, el RDC fue utilizado en fincas de duraznero y peral plantadas en muy alta densidad, para reducir el crecimiento vegetativo durante la primavera (Chalmers et al., 1981; Mitchell y Chalmers, 1982). Estos autores encontraron que el RDC podría ser implementado exitosamente sin reducir el rendimiento. En olivo, las investigaciones de RDC empezaron como respuesta al aumento de plantaciones con altas densidades de árboles, durante los años 90' en la Cuenca Mediterránea y además, por la competencia, con

otros sectores productivos en el uso del agua. La mayoría de los trabajos de RDC para variedades aceiteras de olivo, en la Cuenca Mediterránea, han sido conducidos durante el verano, en la etapa del endurecimiento del carozo (e.g., Patumi et al., 1999; Alegre et al., 2001; Tognetti et al., 2006; Gómez-del-Campo, 2013; Caruso et al., 2014). En ese momento se pueden hacer grandes ahorros de agua al reducir el riego en el verano, cuando la evapotranspiración de referencia es máxima, con efectos relativamente pequeños en la producción de aceite. En estos casos, la mayoría de la acumulación de aceite ocurre después del período de RDC, coincidiendo con las lluvias que son comunes durante el otoño e invierno en la Cuenca Mediterránea. Por ejemplo, Gómez-del-Campo (2013a) encontró que un RDC del 30% ETc al inicio del verano (Julio, en el hemisferio Norte) en tres temporadas, solo redujo la producción de aceite en 8%, mientras un RDC de 50% de la ETc en Julio-Agosto redujo la producción un 15%. Los tratamientos en Julio y Julio-Agosto mostraron un ahorro anual de riego de 16 y 27%, respectivamente.

En la región productiva árida de Argentina, la dinámica de acumulación de aceite y de ácidos grasos ha sido ampliamente investigada, en diversas variedades, durante varias temporadas (Trentacoste et al., 2012; Rondanini et al., 2014; Bodoira et al., 2015; Bodoira et al., 2016). Sin embargo, existen escasas investigaciones sobre los efectos del RDC en la cantidad y calidad de aceite a largo plazo (Vita Serman et al., 2011; Puertas et al., 2012). Potencialmente, la concentración de los eventos de lluvias durante los meses de verano (hasta 400 mm), en valles de mayor superficie de cultivo con variedades aceiteras, explicaría la falta de investigaciones en RDC. En Argentina, deberían ser considerados otros momentos en la temporada para la aplicación de RDC. Puertas et al. (2012) aplicaron RDC en la etapa III del crecimiento del fruto (mediados del verano hasta el otoño), durante dos temporadas en la variedad 'Arbequina'. La etapa III representa la etapa en que ocurre la

mayor parte de la expansión de las células de los frutos, y la acumulación de aceite. Puertas et al. (2012) no encontraron diferencias en el rendimiento de aceite, ni en su calidad, probablemente debido a que el RDC más severo (33% ETC) solo generó un estrés hídrico muy leve (i.e., un potencial hídrico xilemático de -1.8 MPa medido al mediodía) bajo sus condiciones experimentales.

Diversas variables relacionadas a la calidad del fruto y del aceite pueden ser modificadas, cuando se aplica RDC. El RDC puede afectar el tamaño del fruto, la concentración (%) de aceite, el índice de madurez y la humedad (%) del fruto. Altos contenidos de humedad en los frutos al inicio de la extracción de aceite están asociados a la producción de una pasta emulsionada con baja extractabilidad y rendimiento (Grattan et al., 2006; Dag et al., 2011; Zeleke y Ayton, 2014). En la región del Noroeste Argentino llueve poco durante la etapa III del crecimiento del fruto, y potencialmente su humedad, podría disminuirse y optimizarse mediante el uso del RDC antes la cosecha.

Hasta el momento, las investigaciones se enfocaron, en su mayor parte, a las respuestas fisicoquímicas de la calidad del aceite al RDC. Por ejemplo, los polifenoles, compuestos que intervienen en la estabilidad oxidativa del aceite, y aumentan el tiempo de conservación, también producen una contribución importante sobre las características organolépticas del aceite. En muchos casos, los polifenoles aumentan ante niveles de estrés hídrico leves y moderados (Motilva et al., 2000; Caruso et al., 2014; Rosecrance et al., 2015; García et al., 2016). Otros parámetros comúnmente analizados en la calidad de aceite, como el índice de peróxidos y acidez muestran una respuesta más variable al RDC (Berenguer et al., 2006; Dobbou et al., 2015; García et al., 2016). Por otro lado, el perfil de ácidos grasos es importante para la nutrición humana, particularmente el contenido de ácido oleico, el cual es deseado en altos niveles, debido a que es un ácido graso monoinsaturado

(Covas et al., 2006). Diversos estudios han demostrado que la variedad 'Manzanilla' tiene un alto contenido de ácido oleico (>70%) en la región de estudio (Rondanini et al., 2011; Rondanini et al., 2014). Sin embargo, es posible que un RDC pudiera aumentar su contenido. Recientemente, Caruso et al. (2014) sugirieron que riegos abundantes en regiones cálidas como el Noroeste Argentino, pueden aumentar en algunas variedades el porcentaje de ácido linoleico y disminuir el oleico.

El objetivo de este trabajo fue determinar la influencia de diferentes niveles de RDC durante la precosecha en tres temporadas, sobre la calidad y cantidad de los frutos del olivo y del aceite de oliva obtenido. En general, los efectos del estrés hídrico sobre la etapa III del crecimiento del fruto han sido escasamente investigados en olivo.

4.2. Materiales y métodos:

En el capítulo II se explicaron las metodologías para una serie de variables que son comunes a este capítulo, como es el sitio experimental (sección 2.2.1), los tratamientos de riego, el diseño experimental (sección 2.2.2), las mediciones de humedad de suelo (sección 2.2.3), y el potencial hídrico xilemático (sección 2.2.4). En este capítulo, la evaluación del RDC se realizó en precosecha, durante tres temporadas (2008-09, 2009-10, 2011-12). El experimento fue conducido en las mismas parcelas, y en el mismo momento que las aplicaciones del RDC en poscosecha (desde mediados de Febrero hasta Mayo). Sin embargo, para este experimento se utilizó un árbol por parcela experimental, los cuales no fueron cosechados hasta el final de la temporada, en mayo. En el presente capítulo, la metodología de las mediciones de los frutos, rendimiento, y calidad de aceite son explicadas a continuación.

4.2.1. Tamaño, peso e índice de madurez de los frutos

Las determinaciones del tamaño de los frutos fueron realizadas en la primera (2008-09) y tercera (2010-11) temporada de RDC en precosecha. En 2008-09, las determinaciones fueron a principios de mayo durante la cosecha, mientras que el tamaño de los frutos fue evaluado a principios de abril y mayo en la temporada 2010-11. En la segunda temporada, las variables medidas en los frutos no fueron realizadas debido a que el número de frutos en todos los árboles fue muy bajo. A partir de una muestra de 100 frutos se obtuvo el peso fresco por fruto con una balanza de alta precisión; y se midió el diámetro ecuatorial y longitudinal con un calibre digital, en una submuestra de 20 frutos. Los 100 frutos fueron secados en una estufa (Bio-control, Buenos Aires, Argentina) a 80°C hasta obtener el peso constante y determinar el peso seco por fruto.

Con una muestra de 100 frutos se midió el índice de madurez de los frutos (IM) en las mismas temporadas que el tamaño de los frutos, con una frecuencia de 30 días antes de aplicar los tratamientos, y cada 15 días durante el período de RDC. Las determinaciones se realizaron utilizando el método de Uceda y Frías (1975) basado en el color de la piel y la pulpa del fruto con una escala de 0 a 7.

4.2.2. Humedad de la pasta de los frutos y concentración de aceite

Las mismas muestras que fueron tomadas para determinar el IM también se utilizaron para obtener la humedad de la pasta de los frutos y la concentración del aceite. Para la concentración del aceite, los frutos fueron molidos en un molinillo de martillos y se obtuvo una pasta simulando el proceso industrial; el peso fresco fue determinado con una balanza de alta precisión; y luego secada en la estufa hasta obtener peso constante. A continuación se calculó el porcentaje de la humedad de la pasta (% *H*) utilizando la fórmula

de % $H = (PF - PS) / PF * 100$, donde PF es el peso fresco de la pasta y PS es el peso seco de la pasta. Luego, para determinar la concentración de aceite en base seca (%) se utilizó la técnica Soxhlet (IUPAC, 1992), donde la pasta fue refinada con otra molienda, y se utilizaron 10 g con 150 ml de hexano durante 6 hs en un Soxhlet (Método IUPAC 1.122) para extraer el aceite.

4.2.3. Rendimiento del aceite

Cada árbol fue cosechado manualmente como es común en las zonas olivícolas del Noroeste, a principios de mayo en las tres temporadas. En la segunda temporada (2009-10) los árboles fueron cosechados, aunque el rendimiento de fruta fue mínimo en todos los tratamientos. El rendimiento de aceite fue calculado como el producto entre el rendimiento de fruta y la concentración de aceite (%).

4.2.4. Calidad del aceite

Se realizaron determinaciones de la calidad de aceite a partir de frutos obtenidos de las cosechas manuales en Mayo de la primera temporada (2008-09) y en Abril y Mayo, de la tercera temporada (2010-11). La calidad de aceite no fue determinada en la segunda temporada debido a que el número de frutos en los árboles fue muy bajo. En 2008-09, se realizó la extracción de aceite de una muestra de 1kg por árbol utilizando el sistema de extracción de laboratorio “Abencor”, que simula el proceso industrial (Martínez et al., 1975). Mediante este sistema, los frutos fueron triturados con un molino de martillos; la pasta de aceituna resultante fue mezclada durante 30 minutos con una termobatidora a 28°C; la pasta fue centrifugada para separar la fase líquida (aceite y aguas residuales) de los residuos sólidos; a continuación el aceite fue decantado, filtrado y almacenado a -15°C

hasta ser analizado. En 2010-11, un proceso similar fue utilizado con una muestra 10 kg de fruto por árbol (Spremoliva, Toscana Enológica Mori, Florencia, Italia) para la obtención del aceite.

De dicho aceite se evaluó la acidez (%), el índice de peróxidos, los coeficientes de extinción (K232 y K270) y el contenido de polifenoles. La acidez se determinó mediante la neutralización con hidróxido de potasio por titulación (IUPAC, 1992). El índice de peróxidos se analizó sobre una solución de aceite y cloroformo: acético (1:1) a la que se agregó ioduro de potasio en oscuridad, valorando el yodo liberado con una solución de tiosulfato de sodio (IUPAC, 1992). Los coeficientes de extinción, los cuales se utilizan para estimar compuestos de oxidación, se determinaron mediante lectura de absorbancia a 232 y 270 nm (K232 y K270 respectivamente) de una solución de aceite en isoctano. Los polifenoles, expresados como mg de ácido cafeico por kg de aceite, se midieron mediante absorbancia a 735 nm utilizando el reactivo Folin-Ciocalteu.

Los porcentajes de ácidos grasos se determinaron por cromatografía gaseosa. Se prepararon por transesterificación en frío en medio básico de ésteres metílicos, de acuerdo al método oficial COI (COI, 2013), y se separaron mediante cromatografía gaseosa (PerkinElmer Pregisely Claurus 500, EE.UU) con columna capilar (ZB-WAX , Zebron USA) de 30 m con 0.25 mm de diámetro interno y 0.25 μ m de espesor de membrana. Cada uno de los ácidos grasos se identificaron por comparación con los tiempos de retención de un estándar conocido (OACS-1, Sigma Aldrich, St. Louis, MO), y fueron expresados como porcentaje del total.

4.2.5. Análisis estadístico

Las variables se analizaron mediante el análisis de la varianza (ANOVA) para cada temporada y fecha en forma separada, con el programa INFOSTAT (Universidad de Córdoba, Córdoba, Argentina). Se utilizó el test de Tukey para detectar las diferencias entre medias con un nivel de significancia de $P < 0.05$.

4.3. Resultados

4.3.1. Humedad del suelo y potencial hídrico xilemático

En la primera (2008-09) y tercera temporada (200910-11) de RDC en precosecha, cuando los árboles tenían un rendimiento alto, no hubo diferencias significativas entre el REW y el Ψ_x entre el testigo y el T66 (Cuadro 4.1). El REW fue superior a 78% para el control y para el T66, y el Ψ_x estuvo entre -2.1 MPa a -2.6 MPa con la excepción del T66 en 2008-09. El Ψ_x del T33 fue significativamente menor ($P < 0.05$) que el control en las dos temporadas medidas, y mucho mayor que los valores de T0.

Cuadro 4.1. Contenido relativo de agua extraíble del suelo (REW) y potencial hídrico xilemático (Ψ_x) para el control (T100) y los tratamientos de riego deficitario controlado en precosecha (T66, T33 y T0) medido en abril en las temporadas 2008-09 y 2010-11. Los valores mostrados representan promedios \pm error estándar ($n = 5$ parcelas por tratamiento). Las diferentes letras indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tratamientos en una temporada o fecha.

Temporada	Tratamiento (ETc %)	REW (%)	Ψ_x (MPa)
2008-09 (abril)	100	108.9 \pm 23.9 b	-2.6 \pm 0.23 c
	66	90.6 \pm 22.6 b	-3.1 \pm 0.12 bc
	33	49.5 \pm 24.5 ab	-3.7 \pm 0.05 b
	0	14.9 \pm 25.0 a	-5.9 \pm 0.25 a
2010-11 (abril)	100	83.9 \pm 18.8 c	-2.3 \pm 0.20 c
	66	78.3 \pm 20.3 bc	-2.1 \pm 0.25 c
	33	41.6 \pm 18.1 ab	-3.7 \pm 0.36 b
	0	23.1 \pm 17.1 a	-5.2 \pm 0.25 a

4.3.2. Peso y tamaño de los frutos

De manera similar al REW y al Ψ_x , el peso fresco del fruto individual no mostró diferencias significativas entre el control y el T66, mientras que los tratamientos de T33 y T0 mostraron pesos bastante menores (Cuadro 4.2). En las dos temporadas, los pesos frescos de T33 y T0 fueron 26% y 47% menores que el control respectivamente. Al contrario del peso fresco, el peso seco de los frutos no mostró diferencias significativas en las dos temporadas examinadas. Comparando los dos momentos de muestreo (temprano y tardío) en la temporada 2010-11, tanto el peso fresco como el peso seco solo mostraron aumentos mínimos en el peso entre abril y mayo. El tamaño del fruto (i.e., largo y ancho) fue levemente reducido en los tratamientos de T33 y T0, en relación al control.

Cuadro 4.2. Peso fresco y seco, largo y ancho de frutos individuales para el control (T100) y los tratamientos de riego deficitario controlado en precosecha (T66, T33 y T0). Las variables fueron medidas en mayo en 2008-09 y en abril y mayo en 2010-11. Los valores mostrados representan promedios \pm error estándar (n= 5 parcelas por tratamiento). Las diferentes letras indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tratamientos en una temporada o fecha.

Temporada	Tratamiento (ETc %)	Peso fresco (g)	Peso seco (g)	Largo (mm)	Ancho (mm)
2008-09 (mayo)	100	5.6 \pm 0.4 b	2.35 \pm 0.17 a	23.8 \pm 0.8 b	19.7 \pm 0.7 c
	66	4.5 \pm 0.3 ab	1.86 \pm 0.09 a	23.3 \pm 0.8 ab	18.5 \pm 0.7 b
	33	4.2 \pm 0.3 a	2.07 \pm 0.17 a	22.3 \pm 0.7 a	18.1 \pm 0.6 ab
	0	3.5 \pm 0.1 a	2.25 \pm 0.05 a	22.5 \pm 0.6 a	17.4 \pm 0.5 a
2010-11 (abril)	100	4.5 \pm 0.2 c	1.70 \pm 0.04 a	23.2 \pm 0.8 ab	18.7 \pm 0.6 bc
	66	4.5 \pm 0.2 bc	1.71 \pm 0.02 a	24.3 \pm 0.7 b	19.3 \pm 0.5 c
	33	3.3 \pm 0.4 ab	1.52 \pm 0.12 a	22.7 \pm 0.6 ab	17.4 \pm 0.6 ab
	0	2.8 \pm 0.2 a	1.54 \pm 0.06 a	22.2 \pm 0.6 a	16.6 \pm 0.6 a
2010-11 (mayo)	100	4.4 \pm 0.1 b	1.90 \pm 0.03 a	23.1 \pm 0.9 bc	18.6 \pm 0.8 b
	66	4.8 \pm 0.2 b	1.98 \pm 0.06 a	23.6 \pm 1.3 c	18.6 \pm 0.6 b
	33	3.4 \pm 0.2 a	1.75 \pm 0.09 a	21.4 \pm 0.8 ab	16.6 \pm 0.8 ab
	0	2.8 \pm 0.2 a	1.71 \pm 0.08 a	20.5 \pm 0.8 a	15.1 \pm 1.0 a

4.3.3. Dinámica de humedad de la pasta, índice de madurez y concentración de aceite

La humedad de la pasta antes de aplicar los tratamientos de RDC estuvo entre 60 y 70% en los frutos de todos los árboles medidos en las dos temporadas, aunque la humedad fue 80% en la primavera de 2010-11 antes del endurecimiento del carozo (Fig. 4.1A, B). Luego de aplicar los tratamientos de RDC, el control presentó una leve disminución de la humedad de 60 a 55% entre abril y mayo. El T66 tuvo una dinámica parecida al control. En contraste, el T33 tuvo una disminución moderada del 60 % a 50 % aproximadamente antes de la cosecha en mayo. El T0 mostró una disminución muy marcada de la humedad de la pasta durante el otoño, con valores apenas superiores al 40% en abril y menores de 40% en la cosecha de mayo.

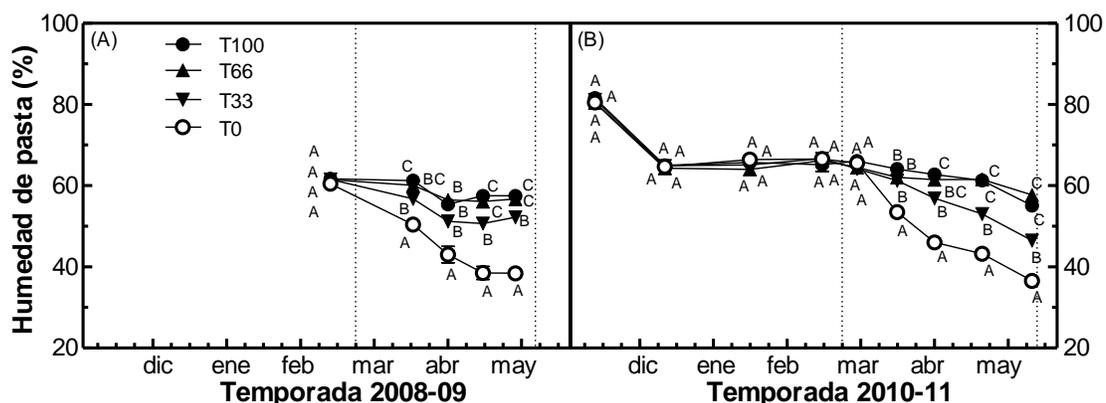


Figura 4.1. Humedad de pasta (%) para el control (T100) y los tratamientos de riego deficitario controlado en precosecha (T66, T33 y T0) en las temporadas 2008-09 (A) y 2010-11 (B). Los puntos de datos mostrados representan promedios \pm error estándar ($n=5$ parcelas por tratamiento). Las líneas verticales indican el inicio y el final de la aplicación de los tratamientos. Las diferentes letras indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tratamientos en una fecha.

El índice de madurez fue similar en los frutos de todos los árboles antes de aplicar los tratamientos de RDC (Fig. 4.2A, B). En el T0 se observó una maduración acelerada en relación al control con diferencias significativas desde las primeras fechas de medición,

aunque en abril los valores de IM se estabilizaron en un valor de 4 aproximadamente (i.e., piel púrpura o negra con pulpa blanca o verde), hasta la cosecha de mayo en las temporadas 2008-09 y 2010-11. En el T33, las diferencias con el control se registraron a mediados de marzo e inicios de abril. En la cosecha, los valores del T33 fueron levemente menores al T0 en 2008-09 y similares en 2010-11. Los valores del control y T66 fueron similares entre ellos durante toda la temporada, y fueron considerablemente menores que los valores de T33 y T0 al fin de la temporada (IM= 3; más de 50% de piel roja, púrpura, o negra).

El aceite en base seca no mostró diferencias entre tratamientos en todas las fechas de medición en ambas temporadas (Fig. 4.2C, D). La concentración de aceite (%) estuvo alrededor de 30% al inicio del período de RDC en ambas temporadas y aumentó hasta 37% en 2008-09 y 41% en 2010-11 al final de la temporada. No se obtuvieron diferencias significativas entre el control y los tratamientos en ninguna de las temporadas.

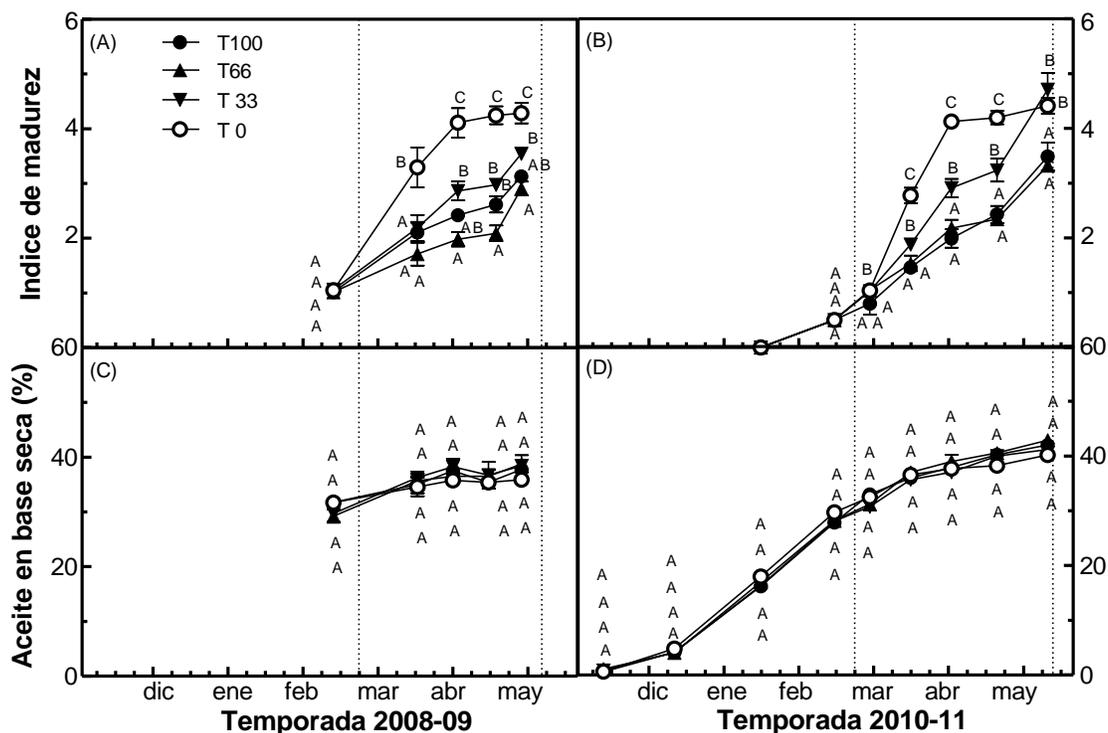


Figura 4.2. Índice de madurez (A, B) y concentración (%) de aceite en base seca (C, D) para el control (T100) y los tratamientos de riego deficitario controlado en precosecha (T66, T33 y T0) en las temporadas 2008-09 y 2010-11. Los datos mostrados representan promedios \pm error estándar ($n=5$ parcelas por tratamiento). Las líneas verticales indican el inicio y el final de la aplicación de los tratamientos. Las diferentes letras indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tratamientos en una fecha.

4.3.4. Rendimiento de aceite

Se registraron altos rendimientos de aceite en la primera y tercera temporada, y rendimientos mínimos o bajos en la segunda temporada (Fig. 4.3A). En la primera y tercera temporadas, el rendimiento del control o del T66 fue mayor que el T0, mientras que en la segunda temporada, el rendimiento del T0 fue mayor que el control y que los otros tratamientos. Se observó en las parcelas experimentales del T0 que el estrés hídrico severo

ocasionó caída de frutos, especialmente en la primera y tercera temporada, cuando el rendimiento fue más alto. El rendimiento acumulado de aceite en las tres temporadas de RDC no registró diferencias significativas entre el control y los tratamientos (Fig. 4.3B).

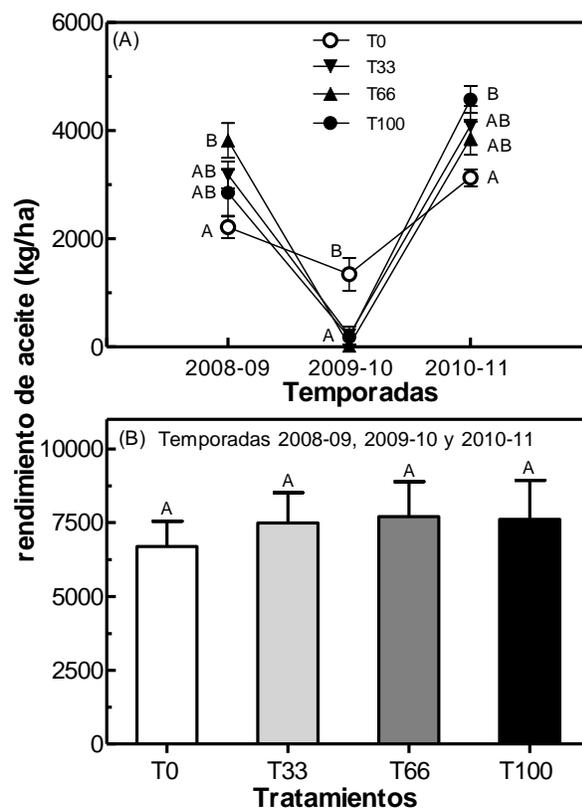


Figura 4.3. Rendimiento de aceite (A) por cada temporada y el rendimiento acumulado de aceite durante las temporadas 2008-09, 2009-10 y 2010-11 (B) para el control (T100) y los tratamientos de riego deficitario controlado en precosecha (T66, T33 y T0). Los datos representan promedios \pm error estándar ($n= 5$ parcelas por tratamiento). Las diferentes letras indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tratamientos en una temporada.

4.3.5. Calidad de aceite

En las cosechas de mayo se registró en el T0 mayor acidez que en el control y que en los otros tratamientos de RDC (Cuadro 4.3). Sin embargo, en el muestreo de abril de la segunda temporada, no hubo diferencias significativas entre el control y los tratamientos; además los valores fueron más bajos (<0.16 %) en este muestreo anticipado que los encontrados en mayo de la misma temporada. El coeficiente de extinción K270 también fue mayor en el T0 que en el control en los dos muestreos de mayo de las dos temporadas examinadas, pero el T0 mostró un K270 menor que el control y que en los otros tratamientos en abril. Adicionalmente, el índice de peróxidos fue mayor en este tratamiento sin regar, que el control y los otros tratamientos de RDC de mayo de la tercera temporada. El contenido de polifenoles no mostró diferencias significativas entre el control y los tratamientos en ninguna temporada.

El principal ácido graso, el oleico, que integra el aceite de oliva, no fue afectado por las aplicaciones de RDC en precosecha (Cuadro 4.4). En cambio, el ácido palmítico disminuyó levemente con el riego deficitario en abril y mayo de 2010-11, mientras que el ácido linoleico aumentó en la misma temporada. En 2008-09, el ácido palmitoleico fue significativamente menor en el T0 que en el control.

Cuadro 4.3. Acidez, índice de peróxidos, coeficientes de extinción (K232 y 270) y polifenoles totales para el control (T100) y los tratamientos de riego deficitario controlado en precosecha (T66, T33 y T0). Los muestreos fueron realizados en mayo de 2008-09 y en abril y mayo de 2010-11. Los valores mostrados representan promedios \pm error estándar (n= 5 parcelas por tratamiento). Las diferentes letras indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tratamientos en una temporada o fecha.

Temporada	Tratamiento (ETc %)	Acidez (% oleico)	Peróxidos (meq O ₂ Kg ⁻¹)	K 232	K270	Polifenoles (mg cafeico kg aceite ⁻¹)
2008-09 (mayo)	100	0.81 \pm 0.20 a	3.76 \pm 0.57 a	2.75 \pm 0.23 a	0.19 \pm 0.01 ab	541 \pm 31 a
	66	0.60 \pm 0.13 a	3.11 \pm 0.42 a	2.63 \pm 0.05 a	0.21 \pm 0.01 ab	678 \pm 95 a
	33	0.99 \pm 0.17 a	2.72 \pm 0.40 a	2.66 \pm 0.22 a	0.19 \pm 0.01 a	643 \pm 58 a
	0	2.81 \pm 0.39 b	4.07 \pm 0.48 a	2.52 \pm 0.06 a	0.23 \pm 0.00 b	503 \pm 94 a
2010-11 (abril)	100	0.11 \pm 0.02 a	1.95 \pm 0.38 a	1.43 \pm 0.16 a	0.10 \pm 0.01 b	267 \pm 36 a
	66	0.12 \pm 0.02 a	2.35 \pm 0.30 a	1.56 \pm 0.13 a	0.11 \pm 0.01 b	443 \pm 58 a
	33	0.09 \pm 0.01 a	3.35 \pm 0.44 a	1.67 \pm 0.29 a	0.10 \pm 0.01 ab	348 \pm 78 a
	0	0.16 \pm 0.03 a	3.47 \pm 0.44 a	1.41 \pm 0.18 a	0.07 \pm 0.01 a	165 \pm 27 a
2010-11 (mayo)	100	0.23 \pm 0.07 a	2.09 \pm 0.34 a	1.60 \pm 0.07 a	0.08 \pm 0.01 a	310 \pm 36 a
	66	0.36 \pm 0.06 a	2.25 \pm 0.57 a	1.49 \pm 0.09 a	0.09 \pm 0.00 a	387 \pm 17 a
	33	0.51 \pm 0.10 a	2.72 \pm 0.52 a	1.56 \pm 0.11 a	0.10 \pm 0.00 b	278 \pm 52 a
	0	2.46 \pm 0.47 b	5.43 \pm 1.49 b	1.84 \pm 0.05 a	0.14 \pm 0.01 b	185 \pm 361 a

Cuadro 4.4. Porcentaje (%) de los ácidos grasos principales del aceite para el control (T100) y para los tratamientos de riego deficitario controlado en precosecha (T66, T33 y T0). Los muestreos fueron realizados en mayo de 2008-09, y en abril y mayo de 2010-11. Los valores mostrados representan promedios \pm error estándar (n= 5 parcelas por tratamiento). Las diferentes letras indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tratamientos en una temporada o fecha.

Temporada	Tratamiento (ETc %)	Palmítico (%)	Palmitoleico (%)	Esteárico (%)	Oleico (%)	Linoléico (%)	Linolénico (%)
2008-09 (mayo)	100	14.97 \pm 0.14a	1.54 \pm 0.12b	3.17 \pm 0.05a	64.47 \pm 0.48a	13.47 \pm 0.39a	0.91 \pm 0.03a
	66	14.95 \pm 0.13a	1.44 \pm 0.14ab	3.13 \pm 0.06a	65.88 \pm 0.30a	12.27 \pm 0.33a	0.87 \pm 0.01a
	33	14.79 \pm 0.14a	1.44 \pm 0.13ab	3.24 \pm 0.06a	65.44 \pm 0.46a	12.73 \pm 0.41a	0.89 \pm 0.02a
	0	14.35 \pm 0.12a	1.43 \pm 0.14a	3.27 \pm 0.06a	65.89 \pm 0.65a	12.64 \pm 0.48a	0.94 \pm 0.01a
2010-10 (abril)	100	16.04 \pm 0.12b	1.66 \pm 0.02a	2.86 \pm 0.05a	70.04 \pm 0.37a	7.48 \pm 0.34a	0.80 \pm 0.00a
	66	15.90 \pm 0.21ab	1.58 \pm 0.06a	3.05 \pm 0.05ab	70.13 \pm 0.55a	7.50 \pm 0.33a	0.73 \pm 0.02a
	33	15.66 \pm 0.04ab	1.56 \pm 0.05a	3.00 \pm 0.05ab	70.02 \pm 0.35a	7.78 \pm 0.38a	0.78 \pm 0.02a
	0	15.30 \pm 0.20a	1.54 \pm 0.04a	3.12 \pm 0.07b	69.48 \pm 0.31a	8.74 \pm 0.45b	0.66 \pm 0.17a
2010-11 (mayo)	100	15.54 \pm 0.42ab	1.58 \pm 0.02a	3.40 \pm 0.07a	67.10 \pm 0.41a	10.34 \pm 0.34a	0.78 \pm 0.02ab
	66	16.23 \pm 0.09b	1.53 \pm 0.05a	3.38 \pm 0.06a	66.73 \pm 0.47a	10.20 \pm 0.21a	0.75 \pm 0.00a
	33	14.66 \pm 0.31a	1.52 \pm 0.04a	3.54 \pm 0.05a	67.40 \pm 0.47a	10.88 \pm 0.40ab	0.80 \pm 0.02ab
	0	15.20 \pm 0.24ab	1.52 \pm 0.04a	3.20 \pm 0.14a	66.36 \pm 0.32a	11.64 \pm 0.42b	0.86 \pm 0.02b

4.4. Discusión

Existen muy pocos antecedentes en el mundo relacionados con la cantidad de agua que es necesaria para aplicar durante el período III del crecimiento del fruto del olivo, antes de la cosecha. Este requerimiento normalmente es cubierto con las precipitaciones que ocurren en la Cuenca Mediterránea, durante este período (Girón et al., 2015). Según los resultados de este capítulo, luego de aplicar los tratamientos de RDC, el peso fresco del fruto individual fue menor en el T33 y T0 en relación al control (Cuadro 4.1). Sin embargo, no se encontraron cambios en el peso seco de los frutos en ninguno de los muestreos. En olivo, en varios trabajos con riego deficitario iniciados entre la etapa I y II del crecimiento del fruto (Alegre et al., 2002; Patumi et al., 2002; Gucci et al., 2007; Lavee et al., 2007; Morales Sillero et al., 2013) se observaron menores valores de peso fresco, aunque solo en algunos casos se obtuvo el mismo efecto en el peso seco (Gucci et al., 2007; Stefanoudaki et al., 2009; Gómez-del-Campo, 2011). La respuesta de estas variables está en función de la severidad, el momento fenológico en que ocurre el estrés y de la capacidad de recuperación de los árboles (Gómez-del-Campo et al., 2014). Los riegos deficitarios severos en ausencia de lluvias, iniciados a comienzos del crecimiento del fruto, tendrían más influencia en el peso seco, debido a que la división celular en su mayoría ocurre en este período (Rapoport et al., 2004; Rapoport et al., 2013). En este trabajo, el RDC fue aplicado desde fines del verano, en la etapa III del crecimiento del fruto, luego de 20 semanas de plena floración, cuando la mayor parte del crecimiento del fruto había ocurrido. Hammami et al. (2011) reportaron que el crecimiento del mesocarpo ocurre hasta la semana 28 luego de plena floración, en un experimento realizado con algunas variedades, entre ellas ‘Manzanilla de Sevilla’. Estos resultados explicarían la falta de efecto en el peso seco de los tratamientos y el escaso aumento de peso en el control en la cosecha de abril.

Se observó que la humedad de la pasta fue alta (60%) en el control y en el T66 durante la mayor parte del período de RDC. El T33 presentó valores intermedios (50-55%) y el T0 mostró los valores más bajos (menos de 40% de humedad), en la cosecha de mayo (Fig. 4.1). Se conoce que valores extremadamente altos o bajos de humedad dificultan la extractabilidad del aceite (Grattan et al., 2006; De la Rosa et al., 2008). En el cv. 'Arbequina' las disminuciones del riego hasta dos tercios del control, durante el verano (Gómez-del-Campo, 2011) y en verano-otoño (García et al., 2016), redujeron la humedad de la pasta de manera significativa, entre un 45 a 60% comparado con el control, aunque las extractabilidades fueron superiores al 75 %. Estableciendo una referencia de niveles de riego en 'Arbequina', Grattan et al. (2006) surgieron que la cantidad de aceite extraído puede ser maximizado en un rango amplio de agua aplicada, entre 40 y 89% de ETc, con la aplicación del riego deficitario sostenido en el largo de la temporada. Considerando la dinámica de la humedad de la pasta en el trabajo actual y los antecedentes mencionados, el RDC de 33% de ETc permitiría una humedad de pasta óptima para la extracción de aceite durante el mes de abril y una reducción en el riego anual.

Un aumento muy marcado en el índice de madurez fue observado en el primer mes después de la aplicación del RDC en el T0, mientras que un aumento más moderado fue notado en el T33 en relación al control y el T66 (Fig. 2A, B). Aunque los IM fueron diferentes en los distintos grupos experimentales, la concentración de aceite (%) no fue afectada por el RDC. Similarmente, otros experimentos de RDC observaron aumentos en la madurez de los frutos en árboles con estrés hídrico, sin demasiados cambios en la concentración de aceite (Motilva et al., 2000; Trentacoste et al., 2015). Además, Dag et al. (2011) han encontrado que la dinámica del IM a largo de la temporada es muy sensible a otros factores como la carga de los frutos. Por lo tanto, el IM no parece ser un buen

indicador del momento óptimo para realizar la cosecha. En el trabajo actual, la curva de la concentración de aceite llegó a valores máximos a principios de abril, con valores máximos de 37% y 41% en las temporadas 2008-09 y 2010-11, respectivamente (Fig. 4.3C, D). Estos valores máximos son similares a los encontrados en ‘Manzanilla Fina’ en varias zonas de la región cálida de producción de olivo en Argentina (Rondanini et al., 2014).

El rendimiento de aceite mostró un patrón de alternancia de producción que es típico del olivo (Lavee et al., 2007). En la primera y tercera temporada, el rendimiento fue muy elevado (2000 - 4500 kg ha⁻¹), mientras que en la segunda temporada fue mínimo en la mayoría de los árboles (Fig. 4.3). En las temporadas de alta producción, el rendimiento del T0 fue menor (-30%) que en el control, y que en el T66, principalmente debido a la caída de los frutos generada por el adelantamiento del IM en los árboles sin regar. En cambio, el rendimiento del T0 fue considerablemente mayor que el control y que los otros tratamientos, en la segunda temporada. En otras palabras, la suspensión del riego en poscosecha redujo la alternancia de producción. Aunque no hubo una diferencia significativa en el retorno de floración entre tratamientos (datos no mostrados), hubo cierta tendencia del T0 a tener una mayor densidad de inflorescencias. El T33 no mostró diferencias significativas en rendimiento de aceite en ninguna de las tres temporadas experimentales. Otro trabajo conducido sobre dos temporadas en la etapa III del crecimiento de fruto en Mendoza (Argentina) tampoco encontró diferencias en el rendimiento de frutos o aceite en la variedad aceitera ‘Arbequina’ comparando un control bien regado con un tratamiento de 33 % de ETc (Puertas et al., 2012). Este resultado no es sorprendente debido a que el estrés hídrico generado durante el experimento fue muy leve (i.e., un potencial hídrico xilemático de -1.8 MPa). El estrés hídrico en este capítulo fue mayor ($\Psi_x = -3.7$ MPa), pero no duró lo suficiente como para reducir el rendimiento de

aceite. Considerando que los dos trabajos tenían rendimientos de frutos muy altos en algunas temporadas (20.000 kg ha⁻¹), la diferencia en los valores del Ψ_x probablemente está explicada por otros factores como el agua disponible en el suelo al inicio del RDC o el clima.

El análisis de la calidad del aceite contribuyó a definir el momento óptimo de cosecha. En la primera temporada, cuando los árboles fueron cosechados en mayo, la acidez (%) de los frutos fue alta en el control (0.81) y en los tratamientos de RDC, especialmente en el T0 con un promedio de 2.81. Estos valores son superiores al límite (<0.80) establecido por el Consejo Oleícola Internacional (COI), el organismo que regula el comercio de aceite de olivo mundialmente, como para ser considerados como un aceite “extra-virgen”. Además, los valores de los coeficientes de extinción K232 y K270 (que indican oxidación), fueron mayores que los valores de la normativa de COI. Por este motivo, un muestro más temprano fue agregado en la tercera temporada. Cuando los frutos fueron muestreados en abril, la acidez (%) fue baja (0.09 – 0.16) sin diferencias entre el T0 y los otros grupos experimentales. En la mayoría de los trabajos de RDC en olivo, no se han encontrado diferencias en la acidez ni en indicadores de oxidación el aceite de los frutos provenientes de árboles bien regados, comparado con el de frutos de árboles con tratamiento de riego deficitario (Berenguer et al., 2006; García et al., 2011; García et al., 2016).

Uno de los efectos positivos sobre la calidad del aceite de oliva, en respuesta a tratamientos leves o moderados de RDC, es el aumento en fenoles totales, porque generan un aceite más estable y con mejores atributos sensoriales (Motilva et al., 2000; Caruso et al., 2014; Rosecrance et al., 2015; García et al., 2016). En el trabajo actual, no hubo diferencias significativas entre el control y los tratamientos, aunque el aceite del T66 y T33

tenían aproximadamente 25 % más polifenoles que el control en la mayoría de las fechas muestreadas. En cambio, en el T0, con un estrés hídrico más severo, los fenoles tendieron a ser menores que el control.

El porcentaje del ácido graso principal, el ácido oleico, no fue afectado por el déficit hídrico en este experimento, aunque hubo efectos menores sobre el ácido palmítico y el linoleico. Muchos trabajos de riego deficitario, realizados en países con tradición aceitera, tampoco observaron cambios marcados en los ácidos grasos bajo RDC en distintos períodos (Patumi et al., 1999; Tovar et al., 2001b; Servili et al., 2007; Caruso et al., 2014). Esto se podría deber a que la composición de ácidos grasos depende de un largo proceso de biosíntesis de lípidos durante el crecimiento del fruto (García et al., 2011).

Es conocido que el porcentaje de ácido oleico de muchas variedades es menor cuando son cultivadas en el centro y el Noroeste Argentino, en comparación a cultivos en la Cuenca Mediterránea, el lugar de origen del olivo (Mannini et al., 2001; Torres et al., 2009; Rondanini et al., 2011; Rondanini et al., 2014). Evidencias de experimentos manipulativos indican que el ácido oleico disminuye en algunas variedades a lo largo de la temporada, en respuesta a las altas temperaturas en la región (García-Inza et al., 2014; García-Inza et al., 2016). Recientemente, se ha reportado que el riego podría afectar más a los ácidos grasos en climas cálidos, que en climas fríos (Caruso et al., 2014). En el trabajo actual, no se encontró un efecto del RDC sobre el ácido oleico (%) en 'Manzanilla' en la cosecha final. Rondanini et al. (2014) mostraron que el ácido oleico (%) disminuye durante la etapa III del crecimiento del fruto de los árboles bien regados, en un trabajo donde evaluaron la dinámica de ese ácido graso. Por otro lado, Vita Serman et al. (2011) en la variedad 'Arbequina' encontraron que el ácido oleico aumenta levemente (de 55 a 57%) con RDC aplicado en la mayor parte de la temporada, en la región cálida de Argentina. Sin embargo,

ese aumento no fue suficiente para obtener niveles de ácido oleico cercanos a los obtenidos en los aceites producidos en la Cuenca Mediterránea (> 65%). Además el RDC ocasionó menor rendimiento de aceite en algunos años.

4.5. Conclusión:

Luego de tres temporadas de aplicar RDC se concluye que es posible reducir el riego durante la etapa III del crecimiento del fruto en olivares adultos (11 años) en el cv 'Manzanilla fina'. La suspensión total del riego en este período, por nueve semanas, generó un estrés severo que aceleró el índice de madurez provocando caídas de frutos y pérdidas en el rendimiento (-30%) en temporadas de alta producción. En cambio, la aplicación del 33% de la ETc generó un estrés hídrico más moderado, sin caída de frutos. En este caso, el porcentaje de humedad (50-55%) en la pasta fue asociado a una buena calidad del aceite; y posiblemente pudo tener mayor extractabilidad que el control según lo encontrado en otros estudios a valores similares de humedad (Gómez-del-Campo; 2011García et al., 2016), aunque aquella variable no fue medida. Además, se observó que si se prolonga el momento de la cosecha desde principios de abril hasta mayo, no se generan aumentos de cantidad de aceite, y disminuye la calidad en el control y en todos los tratamientos de RDC. El uso de un RDC con el 33% de la ETc en la etapa III permitiría una reducción del riego anual del 13%, y potencialmente podría ser combinado con RDC en otros momentos de la temporada.

Capítulo 5. Discusión general

5.1. Abordaje del problema

El elevado uso del agua que realiza la agricultura representa un desafío a nivel mundial por su escasez. Aunque los cultivos bajo riego producen casi la mitad de los alimentos a nivel mundial, la gran utilización del agua que hace la agricultura no siempre está asociada a altos niveles de productividad y uso eficiente (FAO, 2003; Fereres y Evans, 2006). En zonas áridas como el Noroeste Argentino, el uso del agua es sumamente importante, debido a que los cursos de agua superficial son reducidos y la principal fuente se concentra en acuíferos profundos, que tienen una recarga desconocida. Además, las superficies de cultivo de olivo, vid y nogal han aumentado substancialmente en los últimos 20 años. Estas nuevas plantaciones riegan con alta frecuencia para asegurar altos rendimientos a nivel comercial. Para mantener la sostenibilidad del sector agrícola, a largo plazo en el Noroeste Argentino, es necesario implementar estrategias relacionadas con el ahorro del agua. En la Cuenca Mediterránea, motivados también por la escasez del recurso, varios trabajos evaluaron las respuestas a disminuciones de riego en el cultivo de olivo. Estos trabajos fueron conducidos principalmente en el verano, cuando la evapotranspiración del cultivo es alta y existe competencia en el uso del agua con otros sectores (Patumi et al., 2002; Gucci et al., 2007; Gómez-del-Campo, 2011; Naor et al., 2012). Esta tesis propuso evaluar el RDC en olivos durante la pre y pos cosecha, entre fines del verano y mediados del otoño. Los experimentos presentan resultados originales en las respuestas fisiológicas, vegetativas y reproductivas del cultivo bajo riego deficitario en este período, debido a que la información en estos temas era sumamente escasa. En la Cuenca Mediterránea las precipitaciones son comunes en el otoño, y el uso del riego deficitario como herramienta no fue evaluada (Girón et al., 2015). Previamente, solo un trabajo de

corto plazo en México midió las respuestas productivas al RDC en poscosecha (Grijalva-Contreras et al., 2013).

En esta tesis se realizaron experimentos con tratamientos de RDC entre fines del verano y mediados del otoño (i.e. 10 semanas) en dos grupos de árboles, uno con fruta y el otro sin fruta, luego de ser cosechado. El objetivo fue evaluar la pre y poscosecha respectivamente en la variedad ‘Manzanilla fina’. Esta variedad es equivalente a ‘Manzanilla de Sevilla’ y es la más plantada en el mundo para la producción de aceitunas de mesa. Para los experimentos se implementó un control con árboles bien regados al 100% de la ETc y tres tratamientos de riego deficitario de 66, 33 y 0% de ETc utilizando riego por goteo en olivos maduros, en una finca comercial en Aimogasta, La Rioja.

Para abordar el capítulo 2, primer capítulo con resultados, los tratamientos permitieron generar en el suelo amplios rangos de contenido hídrico (Fig. 2.2A, B) desde valores próximos a 0 hasta 100% del agua extraíble (REW). Las disminuciones registradas en el agua del suelo se reflejaron de manera consistente en descensos de los valores de las variables fisiológicas hídricas de las plantas, desde la primera a la cuarta semana de aplicados los tratamientos, modulados por el nivel de riego. Las medidas continuas de las variaciones en el diámetro del tronco (Fig. 2.3), quincenales del potencial hídrico xilemático y de la conductancia foliar, (Fig. 2.2C, D, E, F) y diarias del flujo de savia (Fig. 2.4), nos permitieron evaluar su dinámica en el período experimental. Con los cálculos de la intensidad de señal, coeficiente de variación y sensibilidad (Fig. 2.7; Cuadro 2.2) se determinó la pertinencia de aquellas variables continuas y discontinuas para ser utilizadas en la programación de los riegos, como una alternativa al método propuesto por FAO basado en datos meteorológicos. Finalmente, se establecieron relaciones entre las variables fisiológicas (Fig. 2.6) y entre variables fisiológicas y el REW (Fig. 2.5), las cuales

contribuyeron a avanzar en la comprensión de la fisiología del olivo con diversos grados de estrés. Así, establecimos algunos valores umbrales relacionados con el manejo del riego.

Además en el mismo grupo de árboles con RDC durante la poscosecha, en el capítulo 3, se evaluó la floración de retorno (Fig. 3.2) y la calidad de floración, contabilizando el número de flores perfectas e imperfectas. El objetivo fue en este caso, determinar el efecto de los diferentes niveles de estrés luego del primer y segundo año de RDC (Cuadro 3.2). La evaluación del cuaje (Cuadro 3.2), una de las principales variables de respuesta del rendimiento, posibilitó conocer la existencia de algún efecto del estrés hídrico generado en el año anterior a cada medición. Con las determinaciones del número de frutos y rendimiento, en cada una de las tres temporadas experimentales (Figs. 3.3, 3.4), se conoció el impacto del RDC sobre el cultivo, como una manera de evaluar su posible aplicación en fincas comerciales. Esta evaluación fue complementada con determinaciones de variables relacionadas con la calidad de aceituna para ‘mesa’, como la relación pulpa-carozo y el peso fresco (Cuadro 3.3). Las mediciones de variables vegetativas, como en las ramas (Cuadro 3.4) le dieron mayor robustez a la interpretación de los valores de floración y rendimiento. Además la economía del agua pudo ser integrada al rendimiento, con el cálculo de su productividad (Fig. 3.5), respondiendo al problema de escasez en estas zonas áridas.

Por otro lado, para el capítulo 4 se utilizaron los árboles que permanecieron con fruta durante la aplicación de los tratamientos de RDC, con el objetivo de evaluar su pertinencia cuando los frutos son destinados a la producción de aceite. En este experimento se evaluó el peso (fresco y seco), y el tamaño (largo y ancho) de los frutos (Cuadro 4.2) para conocer algunos de los componentes del rendimiento relacionados con la calidad del fruto. Para evaluar el efecto de las disminuciones de riego en la humedad (%) de la pasta, la

cual es una variable importante para la extracción de aceite, se siguió la dinámica de la humedad a lo largo de la temporada, con una frecuencia quincenal (Fig. 4.2). En estos momentos también se determinó el índice de madurez de los frutos y la concentración (%) del aceite. Posteriormente, se midieron las variables de calidad más importantes en el aceite de oliva, como el perfil de ácidos grasos, acidez (%), índice de peróxidos, coeficientes de extinción (K232, K270) y polifenoles totales (Cuadro 4.3; 4.4), mediante un muestreo temprano en abril, y otro más tardío en mayo. Finalmente, al culminar cada temporada experimental se determinó el rendimiento de frutos, a partir de las cosechas manuales en la totalidad de cada árbol, para luego estimar el rendimiento de aceite por ha (Fig. 4.3).

5.2. Validación de hipótesis

El segundo capítulo de esta tesis evaluó las respuestas de varios indicadores del suelo y de la planta al riego deficitario controlado de poscosecha en olivares maduros y su potencial para la programación del riego. El Objetivo 1 proponía determinar la dinámica de las respuestas de variables fisiológicas al RDC en poscosecha incluyendo potencial hídrico xilemático, conductancia foliar, contracción diaria del tronco y la transpiración del canopy. A partir de este objetivo, en el capítulo 1 se desprendían dos hipótesis, la (H1) proponía que *tanto la conductancia foliar (g_l) como el potencial hídrico xilemático (ψ_x) disminuirán significativamente en árboles no regados y en árboles regados con el 33% de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) con respecto al control (i.e., 100 % ET_c). No se observarán reducciones con un riego de 66% de la ET_c durante el período del experimento*. Los resultados obtenidos en las dos temporadas experimentales marcaron disminuciones significativas en el ψ_x y la g_l en los árboles sin regar y en el T33 en la mayoría de los casos, siendo además consistentes con la humedad de suelo encontrada (Fig.

2.2A, B). El Ψ_x del T0 tuvo descensos abruptos a partir del inicio del RDC marcando diferencias con el control desde la segunda semana de aplicados los tratamientos para mantenerse entre -2.7 a -3.8 MPa hasta el final del experimento en los años 2009 y 2010. El T33 no mostró diferencias con el control en el año 2009, aunque mostró una tendencia a presentar menores valores de Ψ_x en todas las fechas evaluadas durante el RDC. En el año 2010, disminuyó gradualmente hasta mantenerse en valores cercanos a -3.0 MPa, con diferencias significativas en relación al control (Fig. 2.2C, D). De la misma manera que el Ψ_x , la g_l del T0 disminuyó después del inicio de RDC y se mantuvo con diferencias hasta el fin de la aplicación de los tratamientos, con valores cercanos a $100 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. La g_l de T33 en el 2009 al igual que el Ψ_x mostró una tendencia a ser menor sin diferencias significativas, pero en el 2010 los valores fueron diferentes desde la cuarta semana (Fig. 2.2E, F). **Estas evidencias permiten aceptar la H1**, debido a que se observa en la gran mayoría de las medidas realizadas, los dos tratamientos de menor riego mostraron diferencias con el control. Aunque en el T33 durante el año 2009, el Ψ_x y la g_l no se diferenciaron significativamente, los mismos mantuvieron la tendencia de ser menores en relación a los valores del control, durante toda la temporada. Las dinámicas del Ψ_x y la g_l permitieron mostrar bajo estas condiciones de cultivo, en la poscosecha en otoño, los árboles de olivo sin fruta, regados al 33% de la ETc alcanzaron un estrés leve, mientras que en árboles sin riego el estrés fue entre moderado y severo. Como fue mencionado, existe gran escasez de trabajos de riego deficitario en la literatura iniciados a fines del verano, para contrastar la dinámica de la respuesta de las variables encontradas. La mayoría de los experimentos que registraron la dinámica del Ψ_x y g_l fue realizada al inicio del verano, utilizando árboles con fruta. Por lo general, en estas dinámicas se observaron, descensos más marcados en las variables evaluadas, como es esperable, por la demanda hídrica de los

frutos y por las mayores temperaturas estivales del verano (Moriana et al., 2003; Fernández et al., 2011b; Cuevas et al., 2012).

En esta tesis la respuesta de asimilación de dióxido de carbono y la eficiencia de los fotosistemas al RDC no fue evaluado. Sin embargo, basado en la reducción pronunciada en conductancia foliar sobre varias semanas, es probable que la asimilación de CO₂ fue reducida en el T0. Potencialmente, eso afectó la acumulación de reservas (azúcares, hidrato de carbono) (Arias et al., 2015) en las hojas y otros órganos de los árboles y posiblemente modificó la resistencia a las heladas. Mas investigaciones serían necesarias para evaluar esta posibilidad.

Luego, la H2 del mismo objetivo anterior, proponía que *a diferencia de las respuestas de la g_l y el ψ_x que serán reducidas a partir de riegos al 33% de la ETc, la contracción diaria del tronco (maximum daily shrinkage, MDS) solo será reducida bajo condiciones de estrés severo en árboles sin riego*. En algunos frutales, el MDS mostró una función cóncava, a distintos valores de ψ_x , y la contracción del tronco aumentó en los árboles levemente estresados, en relación al control. Sin embargo, cuando el estrés hídrico es severo, la contracción disminuye (Ortuño et al., 2010; Fernández y Cuevas, 2010). En la figura 2.3 (E, F) se observa que durante el año 2009, la MDS en los árboles sin regar (T0) no fue menor que el control, aunque marcó una tendencia a tener menores valores entre mediados de marzo y mediados de abril. Pero en el año 2010, los valores del T0 fueron mayores al control, próximo al del final del período de RDC, aunque los valores de ψ_x indicaron un estrés hídrico severo. A partir de estos resultados **se rechaza la H2**, principalmente debido a que en el 2010 la dinámica de los valores obtenidos es opuesta a la esperada, por presentar mayor MDS el T0 en relación al control. Por medio de estos datos, además se puede confirmar que la MDS no es una variable muy sensible al estrés hídrico en

olivo, como ha sido encontrado en algunos otros frutales como el duraznero en poscosecha (Conejero et al., 2011; De la Rosa et al., 2015). Sin embargo, se observó que otros indicadores derivados de las VDT, como la tasa del crecimiento del tronco (TGR) y el incremento en el diámetro máximo del tronco (MXTD), mostraron una dinámica consistente con la humedad del suelo y con otras variables fisiológicas. Por ejemplo, los valores de la TGR (Fig. 2.3C, D) en el T0 fueron menores al control, próximo al inicio del RDC, aunque posteriormente mostraron algunas variaciones en todos los tratamientos, debido a las precipitaciones y al consecuente humedecimiento del tronco. En cambio, el incremento en el MXTD (Fig. 2.3E, F) marcó diferencias significativas entre el T0 y el control, entre tres y cinco semanas del inicio del RDC, pero no mostró variaciones en respuesta a las precipitaciones. El análisis de esta dinámica representa una contribución al conocimiento de las relaciones hídricas del olivo, debido a que en la actualidad existe un gran interés en identificar alguna variable derivada de las VDT que detecte de manera anticipada la ocurrencia de un estrés hídrico. En este sentido esta tesis encontró un gran potencial en la TGR y MXTD, en los dos años evaluados para la detección del estrés. En verano, Moriana et al. (2010) encontraron también que algunos parámetros derivados de la TGR eran buenos indicadores del estrés. En los siguientes párrafos se discutirán otros aspectos necesarios para evaluar la pertinencia de estas variables en la programación de los riegos.

Además se evaluaron las variables fisiológicas en árboles de olivo, con el fin de alcanzar el Objetivo 2, el cual determinó el efecto del RDC en poscosecha sobre los componentes del rendimiento y el crecimiento vegetativo. En el capítulo introductorio se habían propuesto dos hipótesis para ser contrastadas. La H3 mencionaba que **en respuesta a las reducciones en g_1 y ψ_x , la elongación de las ramas y el crecimiento del tronco en**

poscosecha serán menores en árboles no regados en relación a los otros tratamientos. Este comportamiento resultará en menos sitios potenciales para floración y consecuentemente menor número de frutos, y un menor rendimiento en la próxima temporada. Con respecto a la H3, en el capítulo 2 se prueba que, durante el período de RDC, el T0 y T33 respondieron con disminuciones en el ψ_x y la g_1 a niveles de estrés entre moderado-severo y leve, respectivamente. Sin embargo, el crecimiento de ramas no fue afectado por los tratamientos de menor riego, registrándose valores similares al control (Cuadro 3.4). Esto se debió principalmente a que el crecimiento en todos los árboles fue muy bajo en este período, incluyendo a los árboles del control. La mayoría del crecimiento de las ramas ocurrió durante la primavera y los principios del verano cuando el control y todos los tratamientos recibieron un riego equivalente a 100% de ETc. Por lo tanto, los potenciales sitios reproductivos fueron similares para los tratamientos de RDC y el control. Esto originó que la suma del número de frutos y el rendimiento (Fig. 3.3A, B) fuera similar para todos los árboles evaluados, luego de tres temporadas de RDC. En cambio, el RDC disminuyó el crecimiento del tronco en el T33, y en el T0 se contrajo. Luego de reiniciar el riego al 100% de la ETc, ambos tratamientos mostraron una recuperación de su crecimiento, pero en el T0 la recuperación fue menor que en el testigo al final de la temporada (Cuadro 3.4). Por lo tanto **la H3 es rechazada parcialmente**. Los datos del crecimiento de las ramas revelan un hallazgo sumamente importante en este experimento, debido a que se descubrió que en el período de poscosecha es posible reducir el riego, sin reducir significativamente el número de frutos y el rendimiento, durante tres temporadas consecutivas, en la región árida del Noroeste Argentino. Un trabajo que evaluó el rendimiento luego del RDC de poscosecha, en una temporada en México, encontró menor rendimiento con un riego deficitario del 50% de la ETc (Grijalva-Contreras et al., 2013).

Sin embargo el ψ_x no fue reportado en este trabajo, por lo tanto, es difícil realizar una comparación entre ambos experimentos.

En el retorno de floración, después de la primera aplicación de RDC, se observó un aumento del 57% en la densidad de inflorescencias (Fig. 3.2), y este aumento resultó en aproximadamente un 45% más de frutos y rendimiento (Fig. 3.3A, B) en el T0 con respecto al resto de los tratamientos y el control. También se demostró que la calidad floral (i.e. cantidad de flores perfectas; Cuadro 3.2) fue similar al testigo. Estos resultados sugieren que el período de inducción floral se extiende unas semanas luego del verano, aunque el estrés moderado-severo del T0 mostró un efecto contrario al esperado, al aumentar el nivel de retorno de floración. Por lo tanto **la hipótesis (H4) es rechazada parcialmente** ya que planteaba *que el retorno de floración será menor en árboles no regados, con respecto a los otros tratamientos, resultando en menos rendimiento en la próxima primavera. Esto corroboraría que la inducción e iniciación floral se extienden más allá del período coincidente con el endurecimiento del endocarpo (i.e., inicio del verano). En el tratamiento de 33% ETc, la duración y severidad del estrés no serían suficientemente largas o intensas como para disminuir la floración en la próxima primavera.* Esta hipótesis (H4) no es rechazada totalmente ya que existió cierta certeza al predecir la extensión del período de inducción floral luego del endurecimiento del endocarpo, aunque no podemos determinar con los resultados obtenidos hasta que semana las yemas fueron inducidas por el estrés, durante el RDC. Tampoco podemos establecer un valor de ψ_x efectivo para la inducción, pero como referencia se puede tomar el valor más negativo alcanzado en la primera temporada para el T0, que fue de -3.2 MPa. Estos datos complementan algunos estudios de RDC en poscosecha en duraznero de cosecha temprana, donde se observaron aumentos en el retorno de floración, por una inducción del tratamiento

de mayor estrés. Pero en este trabajo, la inducción fue generada en dos temporadas consecutivas luego de dos años de RDC (Larson et al., 1988; Johnson et al., 1992).

El objetivo 3 de esta tesis postulaba determinar el efecto del RDC en la acumulación de aceite y la calidad (composición de ácidos grasos, fenoles y otros parámetros) durante la precosecha desde fines del verano hasta mediados del otoño, durante tres años. Dos hipótesis se ponían a prueba para este objetivo, una de ellas, la H5 anunciaba que *la concentración de aceite en los frutos será menor cuanto menores sean los volúmenes de riego (sin que se observen diferencias entre el tratamiento 66% y el control). Por este motivo, el rendimiento de aceite al final de las tres temporadas experimentales será menor en los tratamientos 33 y 0% de ETC.* Con este experimento se determinó, mediante muestreos quincenales, que ninguno de los tratamientos de RDC de poscosecha causó disminuciones significativas en la concentración de aceite durante los tres años evaluados (Fig. 4.2C, D). Esto se debió a que la acumulación del aceite ocurrió en su mayoría antes de aplicar los tratamientos. Sin embargo en el tratamiento sin riego, se observaron disminuciones (-30%) en el rendimiento de aceite (Fig. 4.3A) en las temporadas de alta producción (2008-09, 2010-11). Estos menores rendimientos de aceite fueron debidos a que la madurez de los frutos se adelantó en el tratamiento sin riego, según los datos del índice, generando una caída de frutos antes de la cosecha, al final de la temporada. Por otro lado, el menor rendimiento de aceite en el T0, en la temporada de alta producción (2008-09), fue seguido por un mayor rendimiento en la temporada siguiente (2009-10), comparado con el testigo. En otras palabras, el estrés hídrico durante el otoño en precosecha redujo la alternancia de producción en el T0. Esto generó que el rendimiento de aceite en el T0 sea similar al resto de los tratamientos, incluyendo al testigo, según lo observado en el rendimiento acumulado de las tres temporadas de RDC (Fig. 4.3.B). Por lo tanto, **los**

resultados encontrados conducen a rechazar la H5, y refuerzan en alguna medida lo observado por otros autores donde encontraron reducciones en el rendimiento de aceite por el riego deficitario iniciado en verano, sin disminuciones en la concentración de aceite (Allegre et al., 2002; Grattan et al., 2006).

Finalmente en la última hipótesis de la tesis (H6) se planteaba que *el estrés hídrico no afectará la composición de ácidos grasos mientras que el contenido de polifenoles será mayor cuanto menor sea la dosis de riego aplicada en las cosechas tempranas y tardías*. Luego de tres temporadas experimentales **esta hipótesis (H6) es rechazada en gran parte**. Aunque hubo algunas diferencias menores en los valores de ácidos grasos entre el T0 y el control (Cuadro 4.4), los mismos no mostraron diferencias en el porcentaje de ácido oleico; el ácido graso de mayor importancia en el aceite de oliva. Además, no se observaron aumentos en la relación oleico/linoleico por efectos del estrés, reforzando lo conocido hasta el momento en otros trabajos (Patumi et al., 2002; Caruso et al., 2014). Tampoco se encontraron diferencias significativas en el contenido de polifenoles, con la aplicación de RDC en precosecha (Cuadro 4.3); aunque los tratamientos de 66 y 33% de ETc mostraron una tendencia a presentar mayores valores de polifenoles. El parámetro de aceite más afectado por el RDC fue la acidez (%), y los resultados indican que una cosecha temprana (abril) generó menor acidez (%) en los frutos que una cosecha tardía (mayo), en todos los grupos experimentales. Los resultados descriptos en este objetivo superan lo anteriormente conocido en olivo debido a las escasas referencias de las respuestas de la concentración de aceite, el perfil de ácidos grasos y varios parámetros de calidad al RDC, en la etapa III del crecimiento del fruto en la precosecha. Puertas et al. (2011) no encontró ningún efecto del riego deficitario en la etapa III en Mendoza (Argentina), quizás debido a que el estrés hídrico generado en ese trabajo fue mínimo.

5.3. Relevancia para el estado actual del conocimiento y aplicaciones

En gran parte, los trabajos previos de RDC fueron llevados a cabo en los países tradicionalmente olivícolas (i.e., España e Italia) bajo condiciones de clima mediterráneo. Esos experimentos fueron iniciados desde principios del verano, en variedades típicamente aceiteras. En cambio, los experimentos de esta tesis se realizaron bajo condiciones climáticas muy diferentes. El clima continental y las elevadas temperaturas de La Rioja (Argentina), aceleran la fenología de este cultivo, adelantando, por ejemplo, el momento de cosecha para algunas variedades como ‘Manzanilla Fina’. Además, la distribución de las precipitaciones en la Cuenca Mediterránea y el Noroeste Argentino son muy distintos, con precipitaciones desde el otoño hasta la primavera en el Mediterráneo, y en el verano en el NOA. Hasta el momento, existía una escasa e incompleta información disponible sobre las respuestas del olivo al RDC en el otoño, durante la poscosecha para árboles destinados a la producción de aceitunas de mesa (Capítulo 2, 3) y en precosecha para árboles con frutos destinados a la elaboración de aceite (Capítulo 4).

Las condiciones de aridez de la zona, durante fines del verano y el otoño permitieron generar varios niveles de estrés hídrico y se evaluaron de manera integrada una serie de variables fisiológicas (capítulo 2), y variables vegetativas y reproductivas (capítulo 3), en poscosecha.

Bajo las condiciones experimentales de este trabajo, se concluye que es posible suspender el riego en poscosecha y reducirlo hasta un 20% del total anual. Las reducciones del riego pueden generar un estrés moderado-severo, observado en el ψ_x y la g_l , sin disminuciones significativas en el nivel de floración y el rendimiento en comparación con un control regado al 100% de la ETc. Aunque no hubo diferencias significativas luego de

tres temporadas de RDC, el rendimiento acumulado de frutos fue 7% y 13% menos en el T66 y 33, respectivamente, que en el control. Este resultado sugiere que para determinar los efectos a largo plazo se requerirían experimentos de mayor duración, tal como se realizaron en otros frutales, como ciruelo (Intrigliolo et al., 2010; Intrigliolo et al., 2013), mandarino (Ballester et al., 2014) y níspero (Hueso y Cuevas, 2012). Es posible que algunas variables no examinadas en esta tesis, como el nivel de reservas de hidratos de carbono no estructurales durante el invierno (e.g., manitol, sacarosa, almidón, etc), pudieran disminuir el vigor vegetativo y la floración en primavera en el largo plazo.

En esta tesis también se evaluó el riego deficitario en precosecha cuando los frutos permanecieron en el árbol hasta mediados del otoño (capítulo 4). Los resultados de la cantidad y calidad de aceite señalan que es importante considerar la intensidad del estrés generado por las reducciones del riego. Se observó que la suspensión del riego (T0) generó un estrés muy severo (e.i., -6 MPa), disminuyendo el rendimiento y la calidad del aceite (elevada acidez y peróxidos) en temporadas de alta producción. Sin embargo, el riego deficitario equivalente a 33% de la ETc generó una disminución moderada de la humedad en la pasta, mejorando así las condiciones en la extracción del aceite, y no produjo efectos negativos en la calidad del aceite. El riego con 33% de la ETc, en la etapa III del crecimiento del fruto, reduciría un 13% la cantidad anual de agua usada. Potencialmente, el RDC en esta etapa podría ser combinado con RDC en otros períodos, para reducir aún más el riego anual.

En los experimentos de RDC en pre y poscosecha, en T0 luego de la primera temporada, se registraron aumentos en el retorno de floración, sin cambios en la calidad floral, los cuales generaron mayores rendimientos. Posiblemente el estímulo inductor fue el estrés moderado-severo generado en el otoño. Este estímulo pudo actuar reemplazando

algunas horas de frío, las cuales son necesarias de alcanzar en el olivo, durante fines del otoño e invierno, para romper la dormición de las yemas (Castillo-Llanque et al., 2014; Rapoport, 2014). Otros trabajos con olivo también observaron mayor número de inflorescencias respecto a sus controles, luego de aplicar suspensiones de riego en el verano (Grattan et al., 2006; Gucci et al., 2007). Los resultados de esta tesis marcan evidencias de que el período de inducción floral se prolonga más allá del verano, aunque, con los datos disponibles de esta tesis, no se puede determinar un rango más acotado de valores de ψ_x con efecto inductivo, ni tampoco la duración mínima necesaria del estrés. Por ello, nuevos experimentos de RDC podrían ser realizados con suspensiones del riego desde mediados del verano, hasta fines del invierno. Potencialmente, esta información podría ser utilizada para mejorar la floración en algunas temporadas, en zonas con inviernos de pocas horas de frío.

Las mediciones de ψ_x realizadas en árboles con y sin frutos mostraron menores valores en los árboles con frutos. Se observaron diferencias de hasta 3 MPa aproximadamente, cerca del final de la temporada. Este resultado indica que los frutos representan un destino importante de agua (revisado por Lacoite, 2000), y revelan la necesidad de integrar algún factor que incluya la carga frutal en los métodos convencionales de programaciones del riego de la FAO basado en datos meteorológicos (Allen et al., 1998).

Los resultados del capítulo 2 permitieron realizar un avance en el uso de medidas fisiológicas para la programación del riego en poscosecha. En las relaciones entre variables se encontró una alta correlación entre el agua extraíble del suelo (REW) y el Ψ_x , mostrando que para mantener un árbol bien regado, es necesario alcanzar el 50% del REW. Un aspecto clave en estas relaciones es medir la humedad del suelo con precisión, ya que el REW tuvo

un coeficiente de variación mayor a las otras variables. La implementación en el campo de varios sensores de medición continua del agua en el suelo, disminuiría este problema y facilitaría la obtención de los datos en el campo. Por otro lado, algunas medidas automatizadas de los troncos con los dendrómetros, como el incremento del MXTD y la TGR, también tuvieron buenas correlaciones con el Ψ_x y mostraron un gran potencial. El mayor ajuste ($r^2 = 0.78$) ocurrió con el incremento del MXTD y del Ψ_x . Esta relación muestra que el mayor incremento del máximo diámetro ocurre cuando el Ψ_x es mayor a -1.8 MPa. Esto podría ser utilizado como una referencia complementaria a las mediciones de humedad de suelo. Los resultados constituyen un avance en la integración de estas medidas continuas a las programaciones tradicionales. Sin embargo, se requieren más experimentos para evaluar la programación del riego en árboles con distintas cargas de frutos.

5.4. Conclusiones finales

- Las estrategias de riego deficitario en olivo que se apliquen en Argentina, deben contemplar las condiciones climáticas de las zonas de producción, ya que pueden ser muy distintas a las estrategias tradicionalmente utilizadas en la Cuenca Mediterránea europea, debido a la diferencia en las variables climáticas entre ambas regiones.
- La estrategia de RDC en poscosecha indica que se puede reducir significativamente el riego, en fincas maduras de olivo del Noroeste Argentino. Dicha reducción en el riego podría ser de hasta un 20% del total anual utilizado, sin comprometer el rendimiento de frutos en la siguiente temporada.
- Una disminución moderada del riego (13% del uso anual), antes de la cosecha en el otoño, no afecta la calidad y la cantidad del aceite de oliva.

- Es posible realizar la programación del riego en la poscosecha del olivo utilizando primeramente los valores de humedad del suelo y de manera complementaria los indicadores derivados de las variaciones del diámetro del tronco.

Bibliografía

- Alegre, S., Girona, J., Marsal, J., Arbonés, A., Mata, M., Montagut, D., Teixidó, F., Motiva, M.J., Romero, M.P., 1999. Regulated deficit irrigation in olive trees. *Acta Horticulturae* 474, 373-376.
- Alegre, S., Girona, J., Arbonés Florensa, A., Marsal, J., 2001. Estrategias de riego deficitario controlado para el riego del olivar. *Fruticultura Professional*, No 120. Es, 19–28.
- Alegre, S., Marsal, J., Mata, M., Arbones, A., Girona, J., 2002. Regulated Deficit Irrigation in Olive Trees (*Olea europaea* L. cv. Arbequina) for Oil Production. *Acta Horticulturae* 586, 259-263.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome.
- 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.
- Arias, N. S., Bucci, S. J., Scholz, F.G., Goldstein G. 2015. Freezing avoidance by supercooling in *Olea europaea* cultivars: the role of apoplastic water, solute content and cell wall rigidity. *Plant, Cell and Environment* 38, 2061–2070.
- Assouline, S., Russo, D., Silber, A., Or, D., 2015. Balancing water scarcity and quality for sustainable irrigated agriculture. *Water Resources Research* 51, 3419-3436.
- Ayerza, R., Sibbett, G.S., 2001. Thermal adaptability of olive (*Olea europaea* L.) to the Arid Chaco of Argentina. *Agricultural, Ecosystems and Environment* 84, 277–285.

- Aybar, V. E., De Melo-Abreu, J. P., Searles, P. S., Matias, A. C., Del Río, C., Caballero, J. M., Rousseaux, M. C., 2015. Evaluation of olive flowering at low latitude sites in Argentina using a chilling requirement model. *Spanish Journal of Agricultural Research* 1-24.
- Ballester, C., Buesa, I., Bonet, L., Intrigliolo, D. S., 2014. Usefulness of stem dendrometers as continuous indicator of loquat trees water status. *Agricultural Water Management* 142, 110-114.
- Berenguer, M. J., Vossen, P. M., Grattan, S. R., Connell, J. H., Polito, V. S., 2006. Tree Irrigation levels for optimum chemical and sensory properties of olive oil. *HortScience* 41, 427-432.
- Bodoira, R., Torres, M., Pierantozzi, P., Taticchi, A., Servili, M., Maestri, D., 2015. Oil biogenesis and antioxidant compounds from “Arauco” olive (*Olea europaea* L.) cultivar during fruit development and ripening. *European Journal of Lipid Science and Technology* 117, 377-388.
- Bodoira, R., Torres, M., Pierantozzi, P., Aguate, F., Taticchi, A., Servili, M., Maestri, D., 2016. Dynamics of fatty acids, tocopherols and phenolic compounds biogenesis during olive (*Olea europaea* L.) fruit ontogeny. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 93, 1289-1299.
- Bonsch, M., Popp, A., Biewald, A., Rolinski, S., Schmitz, C., Weindl, I., Humpenöder, F., 2015. Environmental flow provision: Implications for agricultural water and land-use at the global scale. *Global Environmental Change* 30, 113-132.
- Cano-Lamadrid, M., Girón, I.F., Pleite, R., Burló, F., Corell, M., Moriana, A., Carbonell-Barrachina, A.A., 2015. Quality attributes of table olives as affected by regulated deficit irrigation. *LWT - Food Science and Technology* 62, 19-26.

- Carignano, C., Cioccale, M.A., 2008. Impacto de la sobreexplotación de acuíferos de la provincia de La Rioja. IV Congreso Iberoamericano de Ambiente y Calidad de Vida V Congreso de Ambiente y Calidad de Vida, Pp. 244 en: Libro de Actas.
- 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.
- Caruso, G., Gucci, R., Urbani, S., Esposto, S., Taticchi, A., Di Maio, I., Servili, M., 2014. Effect of different irrigation volumes during fruit development on quality of virgin olive oil of cv. Frantoio. *Agricultural Water Management* 134, 94-103.
- Castillo-Llanque, F.J., Rapoport, H.F., 2011. Relationship between reproductive behaviour and new shoot development in 5-year-old branches of olive trees. *Trees* 25, 823-832.
- Castillo-Llanque, F.J., Rapoport, H.F., Baumann Samanez, H., 2014. Irrigation withholding effects on olive reproductive bud development for conditions with insufficient winter chilling. *Acta Horticulturae* 1057, 113-119
- Chaikiattiyos, S., Menzel, C.M., Rasmussen, T.S., 1994. Floral induction in tropical fruit trees: effects of temperature and water supply. *Journal of Horticultural Science* 69, 397-425.
- Chalmers, D., Mitchell, P., van Heek, L., 1981. Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density, and summer pruning. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 106, 307-312.
- Chalmers, D., Burge, G., Jerie, P., Mitchell, P., 1986. The mechanism of regulation of 'Bartlett' pear fruit and vegetative growth by irrigation withholding and regulated deficit irrigation. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 111, 904-907.

- Chaves, M.M., Zarrouk, O., Francisco, R., Costa, J.M., Santos, T., Regalado, A.P., Rodrigues, M.L., Lopes, C.M., 2010. Grapevine under deficit irrigation: hints from physiological and molecular data. *Annals of Botany* 105, 661-676.
- Cherbiy-Hoffmann, S.U., Searles, P.S., Hall, A.J., Rousseaux, M.C., 2012. Influence of light environment on yield determinants and components in large olive hedgerows following mechanical pruning in the subtropics of the Southern Hemisphere. *Scientia Horticulturae* 137, 36-42.
- Cherbiy-Hoffmann, S.U., Hall, A.J., Rousseaux, M.C., 2013. Fruit, yield, and vegetative growth responses to photosynthetically active radiation during oil synthesis in olive trees. *Scientia Horticulturae* 150, 110-116.
- Cifre, J., Bota, J., Escalona, J. M., Medrano, H., Flexas, J., 2005. Physiological tools for irrigation scheduling in grapevine (*Vitis vinifera* L.) An open gate to improve water-use efficiency? *Agriculture, Ecosystems and Environment* 106, 159–170.
- Cimato, A., Castelli, S., Tattini, M., Traversi, M. L., 2010. An ecophysiological analysis of salinity tolerance in olive. *Environmental and Experimental Botany* 68, 214–221.
- Civantos L., 2008. La olivicultura en el mundo y en España. Pp. 17-35 en: Barranco, D., Fernández-Escobar, R., Rallo, L. (eds.) *El cultivo del olivo* 5th. Editorial Mundi-Prensa, Madrid, España.
- Cocozza, C., Giovannelli, A., Lasserre, B., Cantini, C., Lombardi, F., Tognetti, R., 2012. A novel mathematical procedure to interpret the stem radius variation in olive trees. *Agricultural and Forest Meteorology* 161, 80-93.
- COI (2013). Consejo Oleícola Internacional. <http://www.internationaloliveoil.org>.

- Conde, C., Delrot, S., Geros, H., 2008. Physiological, biochemical and molecular changes occurring during olive development and ripening. *Journal of Plant Physiology* 165, 1545-1562.
- Conejero, W., Mellisho, C.D., Ortuño, M.F., Moriana, A., Torrecillas, A., 2011. Using trunk diameter sensors for regulated deficit irrigation scheduling in early maturing peach trees. *Environmental and Experimental Botany* 71, 409-415.
- Connor, D.J., 2005. Adaptation of olive (*Olea europaea* L.) to water-limited environments. *Australian Journal of Agricultural Research* 56, 1181-1189.
- Connor, D.J., Fereres, E., 2005. The physiology of adaptation and yield expression in olive. *Horticultural Reviews* 31, 155-229.
- Connor, D.J., Gómez-del-Campo, M., Rousseaux, M.C., Searles, P.S., 2014. Structure, management and productivity of hedgerow olive orchards: A review. *Scientia Horticulturae* 169, 71-93.
- Corell, M., Pérez-López, D., Martín-Palomo, M.J., Centeno, A., Girón, I., Galindo, A., Moriana, A., 2016. Comparison of the water potential baseline in different locations. Usefulness for irrigation scheduling of olive orchards. *Agricultural Water Management* 177, 308-316.
- Correa-Tedesco, G., Rousseaux, M.C., Searles, P.S., 2010. Plant growth and yield responses in olive (*Olea europaea*) to different irrigation levels in an arid region of Argentina. *Agricultural Water Management* 97, 1829-1837.
- Costa, J.M., Ortuño, M.F., Chaves, M.M., 2007. Deficit irrigation as a strategy to save water: Physiology and potential application to horticulture. *Journal of Integrative Plant Biology* 49, 1421-1434.

- Costagli, G., Gucci, R., Rapoport, H.F., 2003. Growth and development of fruits of olive “Frantoio” under irrigated and rainfed conditions. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 78, 119-124.
- Covas, M.I., Ruiz-Gutierrez, V., de la Torre, R., Kafatos, A., Lamuela-Raventos, R.M., Osada, J., Visioli, F., 2006. Minor components of olive oil: evidence to date of health benefits in humans. *Nutrition Reviews* 64, 20–30.
- Covas, M.I., de la Torre, R., Fitó, M., 2015. Virgin olive oil: a key food for cardiovascular risk protection. *British Journal of Nutrition* 113(S2), S19-S28.
- Cucurachi, A., 1975. Nuovi sistemi di estrazione dell'olio dalle olive. *Annali Istituto Sperimentale di Elaiotecnica* V, 155.
- Cuevas, J., Pinillos, V., Cañete, M.L., Parra, S., González, M., Alonso, F., Fernández, M.D., Hueso, J.J., 2012. Optimal duration of irrigation withholding to promote early bloom and harvest in “Algerie” loquat (*Eriobotrya japonica* Lindl.). *Agricultural Water Management* 111, 79–86.
- Cuevas, M.V., Torres-Ruiz, J.M., Álvarez, R., Jiménez, M.D., Cuerva, J., Fernández, J.E., 2010. Assessment of trunk diameter variation derived indices as water stress indicators in mature olive trees. *Agricultural Water Management* 97, 1293-1302.
- Cuevas, M.V., Martín-Palomo, M.J., Diaz-Espejo, A., Torres-Ruiz, J.M., Rodriguez-Dominguez, C.M., Perez-Martin, A., Pino-Mejías, R., Fernández, J.E., 2013. Assessing water stress in a hedgerow olive orchard from sap flow and trunk diameter measurements. *Irrigation Science* 31, 729-746.
- Dabbou, S., Chehab, H., Faten, B., Esposto, S., Selvaggini, R., Taticchi, A., Hammami, M., 2010. Effect of three irrigation regimes on Arbequina olive oil produced under Tunisian growing conditions. *Agricultural Water Management* 97, 763-768.

- Dabbou, S., Dabbou, S., Chehab, H., Taticchi, A., Servili, M., Hammami, M., 2015. Content of fatty acids and phenolics in coratina olive oil from tunisia: Influence of irrigation and ripening. *Chemistry and Biodiversity* 12, 397-406.
- Dag, A., Bustan, A., Avni, A., Tzipori, I., Lavee, S., Riov, J., 2010. Timing of fruit removal affects concurrent vegetative growth and subsequent return bloom and yield in olive (*Olea europaea* L.). *Scientia Horticulturae* 123, 469-472.
- Dag, A., Kerem, Z., Yogev, N., Zipori, I., Lavee, S., Ben-David, E., 2011. Influence of time of harvest and maturity index on olive oil yield and quality. *Scientia Horticulturae*, 127, 358-366.
- De la Rosa, R., León, L., Moreno, I., Barranco, D., Rallo, L., 2008. Ripening time and fruit characteristics of advanced olive selections for oil production. *Australian Journal of Agricultural Research* 59, 46-51.
- De la Rosa, J.M., Dodd, I.C., Domingo, R., Pérez-Pastor, A., 2016. Early morning fluctuations in trunk diameter are highly sensitive to water stress in nectarine trees. *Irrigation Science* 34, 117-128.
- 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.
- Diaz-Espejo, A., Buckley, T.N., Sperry, J.S., Cuevas, M.V., de Cires, A., Elsayed-Farag, S., Martin-Palomo, M.J., Muriel, J.L., Perez-Martin, A., Rodriguez-Dominguez, C.M., Rubio-Casal, A.E., Torres-Ruiz, J.M., Fernández, J.E., 2012. Steps toward an improvement in process-based models of water use by fruit trees: A case study in olive. *Agricultural Water Management* 114, 37-49.

- Dichio B., Xiloyannis, C., Sofo, A., Montanaro, G., 2005. Osmotic regulation in leaves and roots of olive trees during a water deficit and rewatering. *Tree Physiology* 26, 179-185.
- Esparza G., DeJong, T.M., Weinbaum, S.A., Klein, I., 2001a. Effects of irrigation deprivation during the harvest period on yield determinants in mature almond trees. *Tree Physiology* 21, 1081-1079.
- Evelt, S.R., Schwartz, R.C., Casanova, J.J., Heng, L.K., 2012. Soil water sensing for water balance, ET and WUE. *Agricultural Water Management* 104, 1-9.
- FAO (2008). Food and Agricultural Organization. <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/irrigationmap/ar/index.stm>
- Fereres, E., 2008. The future of irrigation in horticulture. *Chronica Horticulturae* 48, 9-11.
- Fereres, E., 2012., 4.1 Fruit trees and vines, in E. Fereres (Ed.), *Crop Yield Response to Water*. FAO Irrigation and Drainage Paper 66 Rome: FAO, pp. 246–497.
- Fereres, E., Castel, J.R., 1981. *Drip Irrigation Management*. Division of Agricultural Sciences, University of California Publication Leaflet 21259.
- Fereres, E., Evans, R.G. 2006. Irrigation of fruit trees and vines: an introduction. *Irrigation Science* 24, 55-57.
- Fereres, E., Goldhamer, D.A., Parsons, L.R., 2003. Irrigation water management of horticultural crops. *American Society for Horticultural Science* 38, 1036-1042.
- Fereres, E., Orgaz, F., Gonzalez-dugo, V., Testi, L., Villalobos, F.J., 2014. Balancing crop yield and water productivity tradeoffs in herbaceous and woody crops. *Functional Plant Biology* 41, 1009-1018.
- Fernández, J.E., 2014a. Understanding olive adaptation to abiotic stresses as a tool to increase crop performance. *Environmental and Experimental Botany* 103, 158-179.

- Fernández, J.E., 2014b. Plant-based sensing to monitor water stress : Applicability to commercial orchards. *Agricultural Water Management* 142, 99-109.
- Fernández, J.E., Moreno, F., 1999. Water use by the olive tree. *Journal of Crop Production* 2, 101-162.
- Fernández, J.E., Cuevas, M.V., 2010. Irrigation scheduling from stem diameter variations: A review. *Agricultural and Forest Meteorology* 150, 135-151.
- Fernández, J.E., Cuevas, M.V., 2011. Using plant-based indicators to schedule irrigation in olive. *Acta Horticulturae* 888, 207-214.
- Fernández, J.E., Torrecillas, A., 2012. For a better use and distribution of water: An introduction. *Agricultural Water Management* 114, 1-3.
- Fernández, J.E., Moreno, F., Girón, I.F., Blázquez, O.M., 1997. Stomatal control of water use in olive tree leaves. *Plant Soil* 190, 179-192.
- Fernández, J.E., Romero, D.R., J.C. Montaña, J.C., Díaz-Espejo, A., Muriel, J.L., Cuevas, M.V., F. Moreno, F., Girón, I.F., Palomo, M.J. 2008. Design and testing of an automatic irrigation controller for fruit tree orchards, based on sap flow measurements. *Australian Journal of Agricultural Research* 59, 589-598.
- Fernández, J.E., Moreno, F., Palomo, M.J., Cuevas, M. V, Ruiz, J.M., Moriana, A., 2011a. Combining sap flow and trunk diameter measurements to assess water needs in mature olive orchards. *Environmental and Experimental Botany* 72, 330-338.
- Fernández, J.E., Ruiz, J.M., Díaz-Espejo, A., Montero, A., Alvarez, R., Jimenez, M.D., Cuerva, J., Cuevas, M.V., 2011b. Use of maximum trunk diameter measurements detect water stress in mature 'Arbequina' olive trees under deficit irrigation. *Agricultural Water Management* 98, 1813-1821.

- Fernández, J.E., Moreno, F., Martín-Palomo, M.J., Cuevas, M.V., Torres-Ruiz, J.M., Moriana, A., 2011c. Combining sap flow and trunk diameter measurements to assess water needs in mature olive orchards. *Environmental and Experimental Botany* 72, 330-338.
- Fernández, J.E., Perez-Martin, A., Torres-Ruiz, J.M., Cuevas, M.V, Rodriguez-Dominguez, C.M., Elsayed-Farag, S., Diaz-Espejo, A., 2013. A regulated deficit irrigation strategy for hedgerow olive orchards with high plant density. *Plant and Soil* doi10.1007/s11104-013-1704-2.
- Fernández, F.J., Ladux, J.L., Searles, P.S., 2015. Dynamics of shoot and fruit growth following fruit thinning in olive trees: Same season and subsequent season responses. *Scientia Horticulturae* 192, 320-330.
- Figuerola, P.I., Rousseaux, M.C., Searles, P.S., 2013. Soil evaporation beneath and between olive trees in a non- Mediterranean climate under two contrasting irrigation regimes. *Journal of Arid Environments* 97, 182-189.
- Fiorino, P., 1996. Técnicas Agronómicas y Características del Aceite de Oliva. Pp. 195-222 en: Consejo Oleícola Internacional (eds.) *Enciclopedia Mundial del Olivo*, Barcelona, España.
- Fulton, A., Buchner, R., Olson, B., Schwankl, L., Gilles, C., Bertagna, N., Walton, J., Shackel, K., 2001. Rapid equilibration of leaf and stem water potential under field conditions in almonds, walnuts, and prunes. *HortTechnology* 11, 609-615.
- Garces-Restrepo, C., Muñoz, G., Vermillion, D., 2008. Irrigation management transfer: worldwide efforts and results. *FAO Water Reports* 32. FAO, Rome.

- García, J.M., Cuevas, M.V, Fernández, J.E., 2011. Production and oil quality in “Arbequina” olive (*Olea europaea*, L.) trees under two deficit irrigation strategies. *Irrigation Science*, 1987. Doi.org/10.1007/s00271-011-0315-z.
- García, J.M., Morales-Sillero, A., Pérez-Rubio, A.G., Diaz-Espejo, A., Montero, A., Fernández, J.E., 2016. Virgin olive oil quality of hedgerow “Arbequina” olive trees under deficit irrigation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. doi/10.1002/jsfa.7828.
- García-Inza, G.P., Castro, D.N., Hall, A.J., Rousseaux, M.C., 2014. Responses to temperature of fruit dry weight, oil concentration, and oil fatty acid composition in olive (*Olea europaea* L. var. “Arauco”). *European Journal of Agronomy* 54, 107-115.
- García-Inza, G.P., Castro, D.N., Hall, A.J., Rousseaux, M.C., 2016. Opposite oleic acid responses to temperature in oils from the seed and mesocarp of the olive fruit. *European Journal of Agronomy* 76, 138-147.
- 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.
- Girón, I.F., Corell, M., Martín-Palomo, M.J., Galindo, A., Torrecillas, A., Moreno, F., Moriana, A., 2015. Feasibility of trunk diameter fluctuations in the scheduling of regulated deficit irrigation for table olive trees without reference trees. *Agricultural Water Management* 161, 114-126.
- Girona, J., Luna, M., Arbones, M., Mata, J., Rufat, J., Marsal, J., 2002. Young olive tree responses (*Olea europea*, cv “Arbequina”) to different water supplies. Water function determination. *Acta Horticulturae* 568, 277-280.

- Girona, J., Gella, M., Mata, M., Arbonés, A., Rufat, J., Marsal, J., 2005. Peach tree response to single and combined deficit irrigation regimes in deep soils. *Agricultural Water Management* 72, 97-108.
- 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.
- Goldhamer, D.A., Fereres, E., 2004. Irrigation scheduling of almond trees with trunk diameter sensors. *Irrigation Science* 23, 11-19.
- Goldhamer, D.A., Dunai, J., Ferguson, L., 1993. Water use requirements of manzanillo olives and responses to sustained deficit irrigation. *Acta Horticulturae* 335, 365-372.
- 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.
- Gomez-del-Campo, M., 2011. Summer deficit-irrigation strategies in a hedgerow olive orchard cv. "Arbequina": effect on fruit characteristics and yield. *Irrigation Science*. <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0299-8>.
- Gómez-del-Campo, M., Fernández, J.E., 2007. Manejo del Riego de Olivares en Seto a Partir de Medidas en Suelo y Planta. Editorial Agrícola Española, S.A. Madrid, Spain.

- Gómez del Campo, M., Rapoport, H., 2008. Descripción de la iniciación floral, floración, cuajado, caída de frutos y endurecimiento del hueso. *Agricultura*, mayo 400-406.
- Gómez-del-Campo, M., Morales-Sillero, A., Vita Serman, F., Rousseaux, M.C., Searles, P.S., 2010. Olive growing in the arid valleys of northwest Argentina (provinces of Catamarca, La Rioja and San Juan). *Olivae* 114, 23-45.
- Gómez-del-Campo, M., 2013a. Summer deficit irrigation in a hedgerow olive orchard cv. 'Arbequina': relationship between soil and tree water status, and growth and yield components. *Spanish Journal of Agricultural Research* 11, 547-557.
- Gómez-del-Campo, M., 2013b. Summer deficit-irrigation strategies in a hedgerow olive orchard cv. 'Arbequina': effect on fruit characteristics and yield. *Irrigation Science* 31, 249-259.
- Gómez-del-Campo, M., Pérez-Expósito, M.Á., Hammami, S.B.M., Centeno, A., Rapoport, H.F., 2014. Effect of varied summer deficit irrigation on components of olive fruit growth and development. *Agricultural Water Management* 137, 84-91.
- Gómez-Rico, A., Salvador, M.D., Moriana, A., Pérez, D., Olmedilla, N., Ribas, F., Fregapane, G., 2007. Influence of different irrigation strategies in a traditional Cornicabra cv. olive orchard on virgin olive oil composition and quality. *Food Chemistry* 100, 568-578.
- Gonzalez Ribot, J.V., Miguel, R.E., 2016. Evolución de los niveles estáticos de agua subterránea en las colonias agrícolas de Tilimuqui, Malligasta y Anguinán, Chilecito, Provincia de La Rioja. Periodo 1973-2005-2014. III Jornadas Nacionales de Ambiente y I Jornadas Internacionales de Ambiente. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Tandil, Buenos Aires.

- Grattan, S.R., Berenguer, M.J., Connell, J.H., Polito, V. S., Vossen, P.M., 2006. Olive oil production as influenced by different quantities of applied water. *Agricultural Water Management* 85, 133-140.
- Greven, M., Neal, S., Green, S., Dichio, B., Clothier, B., 2009. The effects of drought on the water use, fruit development and oil yield from young olive trees. *Agricultural Water Management* 96, 1525-1531.
- Grijalva-Contreras, R.L., Macías-Duarte, R., Martínez-Díaz, G., Robles-Contreras, F., Valencia-Ruíz, M.J., Nuñez-Ramírez, F., 2013. Effect of regulated deficit irrigation on productivity, quality and water use in olive cv “Manzanilla”. 2013. *American Journal of Plant Sciences*, 109-113.
- Gucci, R., Lodolini, E., Rapoport, H.F., 2007. Productivity of olive trees with different water status and crop load. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 82, 648-656.
- Hammami, S.B.M., Manrique, T., Rapoport, H., 2011. Cultivar-based fruit size in olive depends on different tissue and cellular processes throughout growth. *Scientia Horticulturae* 130, 445-451.
- Hartmann, H.T., 1953. Effect of winter chilling on fruitfulness and vegetative growth in the olive. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science* 62, 184-190.
- Hartmann, H.T., Panetsos, C., 1962. Effect of soil moisture deficiency during floral development on fruitfulness in olive. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science* 78, 209-217.
- Hueso, J.J., Cuevas, J., 2010. Ten consecutive years of regulated deficit irrigation probe the sustainability and profitability of this water saving strategy in loquat. *Agricultural Water Management* 97, 645-650.

- Ibañez, A.A., Parera, C., Torres, M., 2016. Efecto de la restricción hídrica invernal en olivo (*Olea europaea* L.): el potencial hídrico xilemático y la conductancia estomática. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 42, 186-200.
- INA-CRAS (2005). Instituto Nacional del Agua-Centro Regional de Agua Subterránea. <http://www.ina.gov.ar/cras/> El Riego en Argentina. Chambouleyron, J., Morábito, J.A. Inglese, P., Barone. E., Gullo, G., 1996. The effect of complementary irrigation on fruit growth, ripening pattern and oil characteristics of olive (*Olea europaea* L.) cv. Carolea. *Journal of Horticultural Science* 71, 257-263.
- Iniesta, F., Testi, L., Orgaz, F., Villalobos, F.J., 2009. The effects of regulated and continuous deficit irrigation on the water use, growth and yield of olive trees. *European Journal of Agronomy* 30, 258-265.
- International Olive Council (COI), 2013. Revising the trade Standard applying to olive oils and olive-pomance oils. Decision No DEC-20/100- V/2013. COI T.15. No 3, Rev. 7.
- Intrigliolo, D.S., Castel, J.R., 2007b. Evaluation of grapevine water status from trunk diameter variations. *Irrigation Science* 26, 49-59.
- Intrigliolo, D.S., Castel, J.R., 2010. Response of plum trees to deficit irrigation under two crop levels: Tree growth, yield and fruit quality. *Irrigation Science* 28, 525-534.
- IUPAC, 1992. Standard methods for the analysis of oils, fats and derivatives (Suplemento al Séptimo edición). Dieffenbacher, A., Pocklington, W.D. (Eds.) Blackwell Science, Oxford.
- Intrigliolo, D.S., Ballester, C., Castel, J.R., 2013. Carry-over effects of deficit irrigation applied over seven seasons in a developing Japanese plum orchard. *Agricultural Water Management* 128, 13-18.

- Johnson, R.S., Handley, D., De Jong, T.M., 1992. Long-term response of early maturing peach trees to postharvest water deficits. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 117, 881-886.
- Johnson, R.S., Handley, D., Day, K.R., 1994. Postharvest water stress of an early maturing plum. *Journal of Horticultural Science* 69, 1035-1041.
- Khan S., Tariq R., Yuanlai C., BlackwellKhan J., 2006. Can irrigation be sustainable? *Agricultural Water Management* 80, 87-99.
- Kiritsakis, A., Markakis P., 1988. Olive Oil: A Review. *Advances in Food Research* 31, 453-482.
- Larson, K., De Jong, T., Johnson, R.S., 1988. Physiological and growth responses of mature peach trees to postharvest water stress. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 113, 296-300.
- Lavee, S., 1996. *Biología y Fisiología del Olivo*. Pp. 59-110 en *Enciclopedia Mundial del Olivo*. (eds) Consejo Oleícola Internacional: Madrid.
- Lavee, S., Hanoch, E., Wodner, M., Abramowitch, H., 2007. The effect of predetermined deficit irrigation on the performance of cv. Muhasan olives (*Olea europaea* L.) in the eastern coastal plain of Israel. *Scientia Horticulturae* 112, 156-163.
- López-Bernal, Á., García-Tejera, O., Vega, V.A., Hidalgo, J.C., Testi, L., Orgaz, F., Villalobos, F.J., 2015. Using sap flow measurements to estimate net assimilation in olive trees under different irrigation regimes. *Irrigation Science* 33, 357-366.
- Maldonado, M.B., Zuritz, C.A., 2003. Modelación Matemática Del Proceso de Tratamiento Con Hidróxido Sódico de Aceitunas Verdes de Mesa. *Grasas Y Aceites* 54, 180-87.

- Mannina, L., Fontanazza, G., Patumi, M., Ansanelli, G., Segre, A., 2001. Italian and Argentine olive oils: a NMR and gas chromatographic study. *Grasas y Aceites* 52, 380-388.
- Marra, F.P., Marino G., Marcehese, A., Caruso, T. 2016. Effects of different irrigation regimes on a super-high-density olive grove cv. “Arbequina”: vegetative growth, productivity and polyphenol content of the oil. *Irrigation Science* 34, 313-325.
- Marsal, J., Behboudian, M.H., Mata, M., Basile, B., del Campo, J., Girona, J., Lopez, G., 2010. Fruit thinning in ‘Conference’ pear grown under deficit irrigation to optimise yield and to improve tree water status. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 85, 125-130.
- Martínez, J.M., Muñoz, E., Alba, J., Lanzón, A., 1975. Report about the use of the “Abencor” analyzer. *Grasas y Aceites* 26, 379-385.
- Maseda, P.H., Fernández, R.J., 2006. Stay wet or else: three ways in which plants can adjust hydraulically to their environment. *Journal of Experimental Botany* 57, 3963-3977.
- Melgar, J.C., Mohamed, Y., Serrano, N., García-Galavís, P.A., Navarro, C., Parra, M.A., Fernández-Escobar, R., 2009. Long term responses of olive trees to salinity. *Agricultural Water Management* 96, 1105–1113.
- Michelakis, N., 1997. Daily stem radius variations as indicators to optimize olive tree irrigation scheduling. *Acta Horticulturae* 449, 297-304.
- (MGyP) 2010. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. <http://www.alimentosargentinos.gov.ar/0-3/olivo/internacional/Argentina%20historia%20y%20futuro.pdf>.

- Mitchell, P., Chalmers, D., 1982. The effect of reduced water supply on peach tree growth and yields. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 107, 853-856.
- Morales-Sillero, A., García, J.M., Torres-Ruiz, J.M., Montero, A., Sánchez-Ortiz, A., Fernández, J.E., 2013. Is the productive performance of olive trees under localized irrigation affected by leaving some roots in drying soil? *Agricultural Water Management* 123, 79-92.
- Moreno, F., Conejero, W., Martín-Palomo, M.J., Giron, I.F., Torrecillas, A., 2006. Maximum daily trunk shrinkage reference values for irrigation scheduling in olive trees. *Agricultural Water Management* 84, 290-294.
- Morettini, A., 1972. *Olivicoltura*. Ramo Editoriale Degli Agricoltori. Roma.
- Moriana, A., Fereres, E., 2002. Plant indicators for scheduling irrigation of 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., Fereres, E., Orgaz, F., Castro, J., Humanes, M.D., Pastor, M., 2000. The relations between trunk diameter fluctuations and tree water status in olive trees (*Olea europaea* L.). *Acta Horticulturae* 537, 293-297.
- Moriana, A., Villalobos, F.J., Fereres, E., 2002. Stomatal and photosynthetic responses of olive (*Olea europaea* L.) leaves to water deficits. *Plant, Cell Environ* 25, 395-405.
- 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 scheduling using trunk diameter sensors. *Agricultural Water Management* 97, 1822-1828.
- Moriana, A., Moreno, F., Girón, I.F., Conejero, W., Ortuño, M.F., Morales, D., 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.
- Moriana, A., Pérez-López, D., Prieto, M.H., Ramírez-Santa-Pau, M., Pérez-Rodríguez, J.M., 2012. Midday stem water potential as a useful tool for estimating irrigation requirements in olive trees. *Agricultural Water Management* 112, 43-54.
- Moriana, A., Corell, M., Girón, I.F., Conejero, W., Morales, D., Torrecillas, A., Moreno, F., 2013. Regulated deficit irrigation based on threshold values of trunk diameter fluctuation indicators in table olive trees. *Scientia Horticulturae* 164, 102-111.
- Motilva, M.J., Tovar, M.J., Romero, M.P., Alegre, S., Girona, J., 2000. Influence of regulated deficit irrigation strategies applied to olive trees (*Arbequina* cultivar) on oil yield and oil composition during the fruit ripening period. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 80, 2037-2043.
- Naor, A., 2006. Irrigation scheduling and evaluation of tree water status in deciduous orchards. *Horticultural Reviews* 32, 111-163.
- Naor, A., Stern, R., Peres, M., Greenblat, Y., Gal, Y., Flaishman, M., 2005. Timing and severity of postharvest water stress affect following-year productivity and fruit quality of field-grown 'Snow Queen' nectarine. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 130, 806-812.

- Orgaz, F., Villalobos, F.J., Testi, L., Fereres, E., 2007. A model of daily mean canopy conductance for calculating transpiration of olive canopies. *Functional Plant Biology* 34, 178-188.
- 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.
- Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Conejero, W., Ruiz-Sánchez, M.C., Alarcón, J.J., Torrecillas, A., 2006a. Stem and leaf water potentials, gas exchange, sap flow and trunk diameter fluctuations for detecting water stress in lemon trees. *Trees* 20, 1–8.
- Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Conejero, W., Ruiz-Sánchez, M.C., Mounzer, O., Alarcón, J.J., Torrecillas, A., 2006b. Relationships between climatic variables and sap flow, stem water potential and maximum daily trunk shrinkage in lemon trees. *Plant Soil* 279, 229-242.
- Padilla-Díaz, C.M., Rodríguez-Dominguez, C.M., Hernández-Santana, V., Pérez-Martín, A., Fernández, J.E., 2016. Scheduling regulated deficit irrigation in a hedgerow olive orchard from leaf turgor pressure related measurements. *Agricultural Water Management* 164, 28-37.
- Pastor M., 2004. Sistemas de manejo del suelo, en: Barranco, D., Fernanández-Escobar, R., Rallo, L. (eds.) *El cultivo del olivo 5th*. Editorial Mundi-Prensa, Madrid, España, pp. 239-296.

- Pastor Muñoz-Cobo, M., 2005. Ciclo anual del olivo y sensibilidad al déficit hídrico, in: Pastor Muñoz-Cobo, M. (Ed.), Cultivo del olivo con riego localizado ed. Mundi-Prensa - Junta de Andalucía, Madrid, España, pp. 61-81.
- Pastor Muñoz-Cobo M., Moya I., 2005. Los nutrientes y el olivar, en Cultivo del Olivo con Riego Localizado (eds.) Pastor Muñoz-Cobo M. Mundi-Prensa, Madrid, España, pp. 477-504.
- Patumi, M., Andria, R., Fontanazza, G., Morelli, G., Giorio, P., Sorrentino, G., 1999. Yield and oil quality of intensively trained trees of three cultivars of olive (*Olea europaea* L.) under different irrigation regimes. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 74, 729-737.
- Patumi, M., d'Andria, R., Marsilio, V., Fontanazza, G., Morelli G., Lanza, B., 2002. Olive and olive oil quality after intensive monocone olive growing (*Olea europaea* L., cv. Kalamata) in different irrigation regimes. *Food Chemistry* 77, 27-34.
- Paz, V. P. da Silva, Eduardo, R., Teodoro, F., Campos, F., 2000. Ambiente Water Resources, Agricultural Irrigated and Environment. *Engenharia Agrícola* 75.
- 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.
- Pérez-Pastor, A., Ruiz-Sánchez, M.C., Conesa, M.R., 2016. Drought stress effect on woody tree yield. In: *Water Stress and Crop Plants: a Sustainable Approach*. John Wiley, UK.
- Perry, C., Steduto, P., Allen, R. G., Burt, C. M., 2009. Increasing productivity in irrigated agriculture: agronomic constraints and hydrological realities. *Agricultural Water Management* 96, 1517-1524.

- Pierantozzi, P., Torres, M., Lavee, S., Maestri, D., 2013a. Vegetative and reproductive responses, oil yield and composition from olive trees (*Olea europaea*) under contrasting water availability during the dry winter-spring period in central Argentina. *Annals of Applied Biology* 164, 116-127.
- Pierantozzi, P., Torres, M., Bodoira, R., Maestri, D., 2013b. Water relations, biochemical-physiological and yield responses of olive trees (*Olea europaea* L. cvs. Arbequina and Manzanilla) under drought stress during the pre-flowering and flowering period. *Agricultural Water Management* 125, 13-25.
- Poblete, M.A., Guimareas R.E., 2006. Evaluación hidrogeológica de los acuíferos explotados en la cuenca Antinaco - Los Colorados. Centro Regional de Aguas Subterráneas 28.
- Proietti, P., Antognozzi, E., 1996. Effect of irrigation on fruit quality of table olives (*Olea europaea*), cultivar "Ascolana tenera." *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science* 24, 175-181.
- Puertas, C., Trentacoste, E., Morábito J., Perez J., 2012. Effects of Regulated Deficit Irrigation During Stage III of Fruit Development on Yield and Oil Quality of Olive Trees (*Olea europaea* L. 'Arbequina'). *Acta Horticulturae* 889, 303-10.
- Rallo, L., 1995. Fructificación y producción en olivo. *Revista Agropecuaria- Expo oliva'95*, 13-16.
- Rallo, L., Cuevas, J., 2008. Fructificación y producción, in: Barranco, D., Fernández-Escobar, R., Rallo, L. (Eds.), *El cultivo del olivo*. Mundi-Prensa, Madrid, España, pp. 127-158.

- Rallo, G., Provenzano, G., 2012. Modelling eco-physiological response of table olive trees (*Olea europaea* L.) to soil water deficit conditions. *Agricultural Water Management* 120, 79-88.
- Rallo, L., Torreño, P., Vargas, A., Alvarado, J. 1994. Dormancy and alternate bearing in olive. *Acta Horticulturae* 356, 127-136.
- Ramirez-Anaya, J.D.P., Samaniego-Sánchez, C., Castañeda-Saucedo, M.C., Villalón-Mir, M., López-García de la Serrana, H., 2015. Phenols and the antioxidant capacity of Mediterranean vegetables prepared with extra virgin olive oil using different domestic cooking techniques. *Food Chemistry* 188, 430-438.
- Rapoport H., 2008. Botánica y morfología, en Barranco, D, Fernández- Escobar, R. y Rallo L. (eds.) *El cultivo del Olivo*. Mundi prensa-Madrid, España, pp. 37-62.
- Rapoport, H.F., 2014. The reproductive biology of the olive tree and its relationship to extreme environmental conditions. *Acta horticulturae* 1057, 41-50.
- Rapoport, H.F., Martins, P. 2006. Flower quality in the olive: broadening the concept. *Olivebiotec 2006, II International Seminar*, pp. 397-402.
- Rapoport, H.F., Costagli, G., Gucci, R., 2001. The effect of early water deficit on olive fruit development. *Hortscience* 36, 451.
- Rapoport, H. F., Costagli, G., Gucci, R. (2004). The effect of water deficit during early fruit development on olive fruit morphogenesis. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 129, 121-127.
- Rapoport, H.F., Hammami, S.B.M., Martins, P., Pérez-Priego, O., Orgaz, F. 2012. Influence of water deficits at different times during olive tree inflorescence and flower development. *Environmental and Experimental Botany* 77, 227-233.

- Rapoport, H.F., Pérez-López, D., Hammami, S.B.M., Agüera, J., Moriana, A., 2013. Fruit pit hardening: physical measurement during olive fruit growth. *Annals of Applied Biology* 163, 200-208.
- Rondanini, D.P., Castro, D.N., Searles, P.S., Rousseaux, M.C., 2011. Fatty acid profiles of varietal virgin olive oils (*Olea europaea* L.) from mature orchards in warm arid valleys of Northwestern Argentina (La Rioja). *Grasas y Aceites* 62, 399-409.
- Rondanini, D.P., Castro, D.N., Searles, P.S., Rousseaux, M.C., 2014. Contrasting patterns of fatty acid composition and oil accumulation during fruit growth in several olive varieties and locations in a non-Mediterranean region. *European Journal of Agronomy* 52, 237-246.
- Rosecrance, R.C., Krueger, W.H., Milliron, L., Bloese, J., Garcia, C., Mori, B., 2015. Moderate regulated deficit irrigation can increase olive oil yields and decrease tree growth in super high density “Arbequina” olive orchards. *Scientia Horticulturae* 190, 75-82.
- Rousseaux, M.C., Benedetti, J.P., Searles, P.S., 2008. Leaf-level responses of olivetrees (*Olea europaea*) to the suspension of irrigation during the winter in an arid region of Argentina. *Scientia Horticulturae* 115, 135-141.
- Rousseaux, M.C., Figuerola, P.I., Correa-Tedesco, G., Searles, P.S. 2009. Seasonal variations in sap flow and soil evaporation in an olive (*Olea europaea* L.) grove under two irrigation regimes in an arid region of Argentina. *Agricultural Water Management* 96, 1037-1044.
- Rufat, J., Villar, J.M., Pascual, M., Falguera, V., Arbonés, A., 2014. Productive and vegetative response to different irrigation and fertilization strategies of an Arbequina

- olive orchard grown under super-intensive conditions. *Agricultural Water Management*, 144, 33-41.
- Saxton, K.E., Rawls, W.G., 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America Journal* 70, 1569-1578.
- Searles, P.S., Saravia, D.A., Rousseaux, M.C., 2009. Root length density and soil water distribution in drip-irrigated olive orchards in Argentina under arid conditions. *Crop Pasture Science* 60, 280-288.
- Searles, P.S., Agüero Alcarás, M., Rousseaux, M.C., 2011. Consumo del agua por el cultivo del olivo (*Olea europaea* L.) en el noroeste de Argentina: una comparación con la Cuenca Mediterránea. *Ecología Austral* 21, 15-28.
- Searles P., Rousseaux M.C., Ladux J., Trentacoste E., Arjona C., Cólica J., Matias C., Bueno L., Vita Serman F., 2012. Following olive footprints in Argentina. In: *Following Olive Footprints (Olea europaea L.)-Cultivation and Culture, Folk and History, Traditions and Uses*, eds El-Kholy M., Avanzato D., Caballero J., Chartzoulakis K., Vita Serman F., Perri E., International Society of Horticultural Science Scripta Series, pp. 13-23.
- Servili, M., Esposto, S., Lodolini, E.M., Selvaggini, R., Taticchi, A., Urbani, S., Montedoro, G., Serravalle, M., Gucci, R., 2007. Irrigation effects on quality phenolic composition, and selected volatiles of virgin olive oils cv. Leccino. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 55, 6609-6618.
- Soda, N., Ephrath, J.E., Dag, A., Beiersdorf, I., Presnov, E., Yermiyahu, U., Ben-Gal, A., 2016. Root growth dynamics of olive (*Olea europaea* L.) affected by irrigation induced salinity. *Plant and Soil* 1-14. DOI 10.1007/s11104-016-3032-9.

- Sofo, A., Manfreda, S., Dichio, B., Fiorentino, M., Xiloyannis, C. 2007. The olive tree: a paradigm for drought tolerance in Mediterranean climates. *Hydrology and Earth System Sciences* 4, 2811-2835.
- Southwick, S.M., Davenport, T.L., 1986. Characterization of water stress and low temperature effects on flower induction in citrus. *Plant Physiology* 81, 26-29.
- Stark A., Madar Z., 2002. Olive oil as a functional food: epidemiology and nutritional approaches. *Nutrition Review* 60 170-176.
- Stefanoudaki, E., Williams, M., Chartzoulakis, K., Harwood, J. 2009. Effect of irrigation on quality attributes of olive oil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57, 7048-7055.
- Tardieu, F., Simonneau, T., 1998. Variability among species of stomatal control under fluctuating soil water status and evaporative demand: modelling isohydric and anisohydric behaviours. *Journal of Experimental Botany* 49, 419-432.
- Tognetti, R., D'Andria, R., Morelli, G., Calandrelli, D., Fragnito, F., 2004. Irrigation effects on daily and seasonal variations of trunk sap flow and leaf water relations in olive trees. *Plant and Soil* 263, 249-264.
- Tognetti, R., D'Andria, R., Lavini, A., Morelli, G., 2006. The effect of deficit irrigation on crop yield and vegetative development of *Olea europaea* L. (cvs. Frantoio and Leccino). *European Journal of Agronomy* 25, 356-364.
- 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.

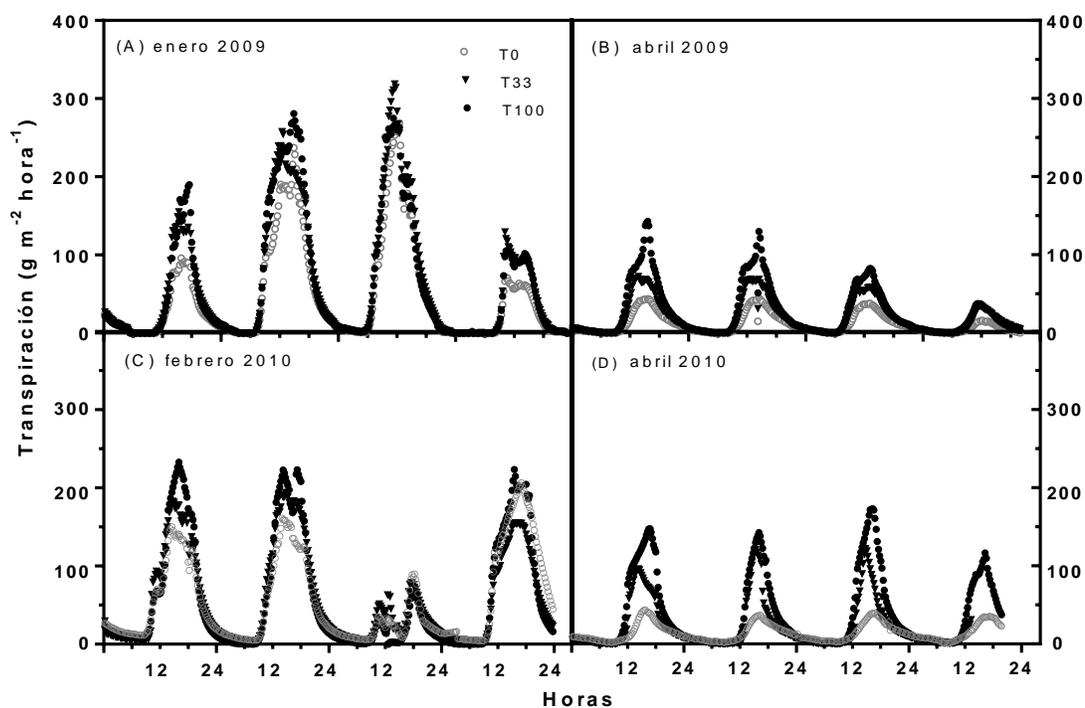
- Torrecillas A., Domingo R., Galego R., Ruíz-Sánchez, M.C., 2000. Apricot tree response to withholding irrigation at different phenological periods. *Scientia Horticulturae* 85, 201-215.
- Torres, M.M., Pierantozzi, P., Caceres, M.E., Labombarda, P., Fontanazza, G., Maestri, D., 2009. Genetic and chemical assessment of arbequina olive cultivar grown in Cordoba province, Argentina. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 89, 523-530.
- Tovar, M.J., Motilva, M.J., Luna, M., Girona, J., Romero, M.P., 2001b. Analytical characteristics of virgin olive oil from young trees (Arbequina cultivar) growing under linear irrigation strategies. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 78, 843-849.
- Trentacoste, E.R., Puertas, C.M., 2010. Preliminary characterization and morpho-agronomic evaluation of the olive germplasm collection of the Mendoza province (Argentina). *Euphytica* 177, 99-109.
- Trentacoste, E.R., Puertas, C.M., Sadras, V.O., 2012. Modelling the intraspecific variation in the dynamics of fruit growth, oil and water concentration in olive (*Olea europaea* L.). *European Journal of Agronomy* 38, 83-93.
- Trentacoste, E.R., Puertas, C.M., Sadras, V.O., 2015. Effect of Irrigation and Tree Density on Vegetative Growth, Oil Yield and Water Use Efficiency in Young Olive Orchard under Arid Conditions in Mendoza, Argentina. *Irrigation Science* 33, 429-40.
- Uceda M, Frias L., 1975. Trend of the quality and quantitative composition of olive fruit oil during ripening. *Proceedings of the International Meeting on Olive Oil*. Cordoba, Spain, p.p. 25-46.
- United Nations Environment Programme (UNEP), 2008. An overview of the state of the world's fresh and marine waters (Second Edition) <http://www.unep.org/dewa/vitalwater/article43.html>.

- Venot, J.P., 2016. A Success of Some Sort: Social Enterprises and Drip Irrigation in the Developing World. *World Development*, 79, 69-81.
- Venot, J.P., Zwarteveen, M., Kuper, M., Boesveld, H., Bossenbroek, L., van der Kooij, S., Verma, S., 2014. Beyond the promises of technology: A review of the discourses and actors who make drip irrigation. *Irrigation and Drainage* 63, 186-194.
- Villalobos, F.J., Orgaz, F., Mateos, L. 1995. Non-destructive measurement of leaf area in olive (*Olea europaea* L.) trees using a gap inversion method. *Agricultural and Forest Meteorology*, 73, 29-42.
- Vita Serman, F., Pacheco, D., Olgún Pringles, A., Bueno, L., Capraro, F., 2011. Effect of regulated deficit irrigation strategies on productivity, quality and water use efficiency in a high-density “Arbequina” olive orchard located in an arid region of Argentina. *Acta Horticulturae* 888, 81-88.
- Vitagliano C, Sebastiani L., 2002. Physiological and biochemical remarks on environmental stress in olive (*Olea europaea* L.) 586, 435-441.
- Vörösmarty, C.J., McIntyre, P.B., Gessner, M.O., Dudgeon, D., Prusevich, a, Green, P., Davies, P.M. 2010. Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature* 467, 555-561.
- Wang, D., Gartung, J., 2010. Infrared canopy temperature of early-ripening peach trees under postharvest deficit irrigation. *Agricultural Water Management*. 97, 1787-1794.
- Xiloyannis C, Dichio B, Nuzzo V, Celano G, Metzidakis IT, Voyiatzis D.G., 1999. Defence strategies of olive against water stress, en: Proceedings of the Third International Symposium on olive Growing 2, *Acta Horticulturae* 474, 423-426.

Zelege, K.T., Ayton, J., 2014. Fruit and oil quality of olive (*Olea europaea* L.) under different irrigation regimes and harvest times in south eastern Australia. *Journal of Food, Agriculture & Environment* 12, 458-464.

Zohary D., Spiegel-Roy, P., 1975. Beginning of fruit growing in the old world. *Science* 187, 31-427.

APÉNDICES

Apéndice 1.

En el gráfico del apéndice 1 se observan los patrones diarios de transpiración en árboles de olivo antes de aplicar los tratamientos de RDC, en enero y febrero de 2009 y 2010 respectivamente (A, C); y durante la aplicación de los tratamientos en abril de 2009 y 2010 (B, D). Los valores se encuentran expresados en $\text{kg m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$.