

Efecto de la restricción hídrica invernal en olivo (*Olea europaea* L.): el potencial hídrico xilemático y la conductancia estomática

IBAÑEZ, A.A.¹; PARERA, C.¹; TORRES, M.¹

RESUMEN

Durante la aplicación de una restricción hídrica invernal, en las temporadas de 2011 y de 2012, se cuantificaron y relacionaron el estado hídrico del olivo (*Olea europaea* L.) con el contenido de humedad del suelo y la temperatura ambiental. El experimento se realizó en olivos del cv. Arbequina de 10 años de edad implantadas en la EEA San Juan INTA (San Juan, Argentina). Los tratamientos aplicados fueron: T1, riego completo con reposición del 100% de la evapotranspiración de cultivo (ETc) durante todo el ciclo y dos tratamientos con restricción hídrica (21 de junio al 31 de agosto), T2, regado con el 50% ETc y T3, sin riego, para el resto de la temporada los riegos fueron con el 100% de ETc. Se midieron el potencial hídrico xilemático (Ψ_{tallo}), la conductancia estomática (g_s), el contenido de agua extraíble relativa (AER) del suelo y el efecto de la temperatura ambiental.

Los resultados demostraron la factibilidad en la aplicación de restricciones hídricas invernales en la región árida de Argentina con baja disponibilidad de agua durante ese periodo. Las disminuciones en el Ψ_{tallo} y en la g_s dependen del contenido de AER del suelo y de la temperatura ambiental. La aplicación de una restricción hídrica que repone el 50% de la ETc, con una reserva inicial de agua fácilmente aprovechable (AFA) de 40 mm, afecta levemente el estado hídrico del olivo mientras que la aplicación de una restricción total del riego durante el invierno, sin reserva inicial de AFA, afecta severamente el Ψ_{tallo} y la g_s hasta valores extremos -6,80 MPa y 5,67 mmol/m²/s, respectivamente. Los indicadores fisiológicos de Ψ_{tallo} y de g_s del olivo se deben evaluar conjuntamente con el contenido de humedad del suelo.

Palabras claves: *Olea europaea* L., relaciones hídricas, riego deficitario.

ABSTRACT

*During the application of a winter water restriction in the seasons of 2011 and 2012, was quantified and related the water status of olive (*Olea europaea* L.) with soil moisture content and ambient temperature. The experiment was conducted in olive trees cv. Arbequina 10 years old in EEA San Juan INTA (San Juan, Argentina). The treatments were: T1, full irrigation with replacement of 100% of crop evapotranspiration (ETc) throughout the cycle and two treatments with water restriction (21 June to 31 August), T2, irrigated with 50% ETc and T3,*

¹Estación Experimental Agropecuaria San Juan, INTA, Calle 11 y Vidart (5427). Villa Aberastain. Pocito. San Juan. Argentina.
Correo electrónico: ibanez.antonio@inta.gob.ar; parera.carlos@inta.gob.ar

no-irrigation, for the rest of the season with irrigation were 100% ETc. The stem water potential (Ψ_{tallo}), stomatal conductance (g_s), relative extractable water (REW) soil and the effect of ambient temperature were measured.

The results demonstrated the feasibility in implementing winter water restrictions in the arid region of Argentina, with low water availability during that period. The decrease in Ψ_{tallo} and g_s depends on the content REW of soil and ambient temperatures. Applying a water restriction which replaces the 50% ETc, with an initial reserve of easily available water (AFA) of 40 mm, slightly affects the water status of the olive tree; while implementing a full irrigation restriction during the winter, without initial reserve of AFA, severely affects the Ψ_{tallo} and g_s to -6.80 MPa and 5.67 mmol/m²/s, respectively. Irrigation scheduling during the winter using Ψ_{tallo} and g_s must be evaluated together with the soil moisture content.

Keywords: *Olea europaea* L., water relations, deficit irrigation.

INTRODUCCIÓN

El olivo (*Olea europaea* L.) es un frutal mediterráneo cultivado en todo el mundo (Barranco *et al.*, 1998; Connor, 2005; Vossen, 2007; Breton *et al.*, 2009). En Argentina el olivo se cultiva en las provincias del noroeste (La Rioja, Catamarca y Salta), centro-oeste (Mendoza y San Juan) y centro (Córdoba y Buenos Aires), abarcando una superficie de 102.000 ha (Tagarelli, 2011; Searles *et al.*, 2011). San Juan se caracteriza por escasa precipitación anual, inviernos secos, vientos Zonda (viento local seco y caliente), veranos cálidos y suelos heterogéneos de profundidad variable (Poblete *et al.*, 1989 a, 1989 b; Liotta, 1999; Panigatti, 2010); en estas condiciones ambientales adversas la olivicultura se desarrolló basándose en las adaptaciones morfológicas y fisiológicas del olivo (Grammatikopoulos *et al.*, 1994; Lavee, 1996; Dichio *et al.*, 1997; Fernández *et al.*, 1997; Xiloyannis *et al.*, 1999; Ferreyra *et al.*, 2001; Pierantozzi *et al.*, 2013).

En la región del Mediterráneo el olivo se cultiva en secano, sin embargo, la aplicación de riego aumenta el rendimiento en frutos y en aceite (Goldhamer *et al.*, 1999; Alegre *et al.*, 2000; Ferreyra *et al.*, 2001; Ben-Gal *et al.*, 2011). En la región árida de Argentina para obtener una producción rentable es necesaria la aplicación de riego durante todo el ciclo de cultivo; es importante definir estrategias deficitarias de riego para incrementar la eficiencia de uso de agua (English y Raja, 1996; Fereres y Soriano, 2007; Geerts y Raes, 2009). La aplicación de estrategias deficitarias de riego implica el conocimiento previo de las respuestas fisiológicas y productivas del cultivo al déficit hídrico (Sánchez-Blanco y Torrecillas, 1995; Geerts y Raes, 2009; Steduto *et al.*, 2012).

El déficit hídrico es el principal factor ambiental que limita la fotosíntesis de las plantas y el rendimiento de los cultivos (Loreto y Sharkey, 1990; Bongi y Palliotti, 1994; Angelopoulos *et al.*, 1996; Chartzoulakis *et al.*, 1999; Shao *et al.*, 2008; Anjum *et al.*, 2011; Steduto *et al.*, 2012) y más aun en regiones áridas y semiáridas con disponibilidad limitada de agua donde el olivo se adapta favorablemente por su alto grado de tolerancia a la sequía (Lo Gullo y Salleo, 1988; Connor,

2005). Por esta razón el olivo es un árbol modelo donde se pueden realizar estudios morfológicos y fisiológicos en condiciones de estrés hídrico y rehidratación (Perez-Martin *et al.*, 2014) como aquellos donde se relacionan el grado de dependencia entre los indicadores hídricos de la planta, del suelo y de la atmósfera (Fernández *et al.*, 1997; Giorio *et al.*, 1999; Moriana *et al.*, 2002; Rousseaux *et al.*, 2008; Ben-Gal *et al.*, 2009; Masmoudi *et al.*, 2010; Dell'Amico *et al.*, 2012; Flexas *et al.*, 2014; Girón *et al.*, 2015) con la finalidad de mejorar el manejo del cultivo y maximizar su productividad (Hsiao, 1973; Restrepo-Díaz, *et al.*, 2010).

Existen antecedentes importantes sobre las respuestas a nivel fisiológico y productivo del olivo al riego y al déficit hídrico en etapas fenológicas (crecimiento vegetativo y desarrollo reproductivo) con alta actividad metabólica (Proietti y Antognozzi, 1996; Inglese *et al.*, 1996; Dichio *et al.*, 1997, 2003; Giorio *et al.*, 1999; Xiloyannis *et al.*, 1999; Alegre *et al.*, 2000; Ferreyra *et al.*, 2001; Stefanoudaki *et al.*, 2001, 2009; Moriana *et al.*, 2002, 2003; Tognetti *et al.*, 2004, 2005; Selles van Sch *et al.*, 2006; Lavee *et al.*, 2007; Aganchich *et al.*, 2009; Greven *et al.*, 2009; Rousseaux *et al.*, 2009; Correa-Tedesco *et al.*, 2010; Pacheco *et al.*, 2011; Dell'Amico *et al.*, 2012; Cano-Lamadrid *et al.*, 2015; Girón *et al.*, 2015; Rosecrance *et al.*, 2015). Se conoce que un estrés hídrico leve no afecta, fuertemente, las relaciones hídricas (Centritto *et al.*, 2005) ni la capacidad de asimilación de CO₂ del olivo (Aganchich *et al.*, 2009). Sin embargo, a medida que avanza el grado de estrés hídrico se reducen el estado hídrico y el intercambio gaseoso de la hojas (Alegre *et al.*, 2000; Stefanoudaki, *et al.*, 2001) por debajo de valores que causarían la deshidratación y muerte en otros cultivos (Orgaz y Fereres, 1998; Moriana *et al.*, 2002). Estas reducciones en el intercambio gaseoso se deben a limitaciones difusionales y no difusionales (Giorio *et al.*, 1999; Centritto *et al.*, 2003) reguladas por acuaporinas (Perez-Martin *et al.*, 2014). También se ha establecido que la menor sensibilidad al estrés hídrico podría ocurrir entre el endurecimiento de carozo y el inicio de la maduración del fruto (Alegre *et al.*, 1999; Goldhamer, 1999; Moriana *et al.*, 2003; Cano-Lamadrid *et al.*, 2015). Otros estudios inclu-

yen al periodo de acumulación de aceite (Berenguer *et al.*, 2006; Martinelli *et al.*, 2012; Rosecrance *et al.*, 2015) con efectos sobre el rendimiento y la calidad de aceite.

Sin embargo, son pocos los antecedentes relevantes, a nivel mundial, sobre el efecto del estrés hídrico durante la estación invernal (Rousseaux *et al.*, 2008; Rapoport *et al.*, 2012 y Pierantozzi *et al.*, 2013). Estos estudios fueron desarrollados en diferentes condiciones ambientales, en vivero o maceta (Rapoport *et al.*, 2012) y a campo, con periodos de estrés hídrico relativamente corto durante invierno, 20 de julio al 30 de agosto, Rousseaux *et al.* (2008) o relativamente largo y combinando estaciones de invierno-primavera (Pierantozzi *et al.*, 2013) obteniéndose diferentes respuestas fisiológicas, tal como en las relaciones hídricas.

El estado hídrico del olivo durante la estación invernal es de gran importancia debido a que las condiciones ambientales y las prácticas de manejo del cultivo, antes del inicio de brotación de yemas, son factores que interaccionan sobre el proceso de diferenciación de las yemas vegetativas y florales (Lavee, 1996; Andreini *et al.*, 2008; Rapoport *et al.*, 2012; Pierantozzi *et al.*, 2014). Una programación adecuada del riego en las distintas fases del cultivo requiere del conocimiento de la evapotranspiración del cultivo (Allen *et al.*, 2006), del estado de humedad del suelo (Hanson, 2000) y fundamentalmente del estado hídrico de la planta (Moreno *et al.*, 2007; Padilla-Díaz *et al.*, 2015). El potencial hídrico, la conductancia estomática de las hojas, el flujo de savia, la temperatura de canopia, el diámetro de tronco y la presión de turgencia de hojas integran los efectos del contenido de agua en el suelo y de las condiciones ambientales (Fernández *et al.*, 2001, 2011; Fereres y Goldhamer, 2003; Giorio y Giorio, 2003; Jones, 2004; Gil-Pelegri *et al.*, 2005; Sepulcre-Cantó *et al.*, 2006; Moreno *et al.*, 2007; Pérez-López *et al.*, 2008; Ben-Gal *et al.*, 2009; Berni *et al.*, 2009; Cuevas *et al.*, 2010; García López *et al.*, 2010; Padilla-Díaz *et al.*, 2015).

El objetivo principal de este trabajo fue evaluar el efecto de la restricción hídrica invernal (21 de junio al 31 de agosto) sobre el estado hídrico del olivo y establecer la relación de dependencia del potencial hídrico de planta y de la conductancia estomática de las hojas con el contenido de humedad del suelo. Adicionalmente, analizar el posible efecto de la temperatura ambiental sobre las relaciones hídricas seleccionadas durante dos ciclos anuales del cv Arbequina.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de experimentación

El estudio fue realizado en la EEA San Juan INTA (31° 37' S, 68° 32' O, altitud 618,23 m) en olivos (*Olea europaea* L.) cv. Arbequina de 10 años, en un marco de plantación de 6 m x 2 m y con un volumen de copa entre 11 a 14 m³/olivo.

La provincia de San Juan pertenece a la región árida de Argentina con tres regímenes climáticos: el seco de desierto, el seco de estepa y el frío de altura; el clima seco se caracterizada por escasa precipitación anual de régimen

estival, inviernos secos y cálidos, con viento Zonda desde mayo a noviembre y gran amplitud térmica (Poblete *et al.*, 1989a, 1989b). Los suelos son entisoles torrifluventes y torripsamentes típicos (Liotta, 1999; Panigatti, 2010).

El perfil del suelo presentó tres clases texturales de 0 a 0,30 m franco, de 0,30 m a 0,60 m franco arenoso y desde 0,60 m arenoso con gravas. La profundidad total de raíces fue de 0,56 m y se estableció como profundidad efectiva de raíces, el 80% de su profundidad total (Fuentes Yagüe, 1998), es decir 0,45 m.

Se utilizó el sistema de riego por goteo, con dos laterales separadas a 0,80 m, con gotero integral autocompensado de 3,6 l/h con espaciamiento a 0,70 m entre gotero.

La parcela experimental estuvo formada por 5 olivos, 3 centrales de medición y 2 extremos de bordura. El diseño experimental fue completamente aleatorizado (DCA) con 4 repeticiones (Kuehl, 2001).

Tratamientos de aplicación del riego

Los tratamientos de riego evaluados en los dos ciclos (2011 y 2012) fueron:

- T1: tratamiento control que repone 100% de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) durante todo el ciclo del cultivo.
- T2: tratamiento que repone el 50% de la ET_c desde el 21 de junio al 31 de agosto.
- T3: tratamiento sin riego desde el 21 de junio al 31 de agosto.

Se estableció como fecha final del periodo de restricción hídrica invernal, el 31 de agosto, tiempo antes que se inicie el movimiento de yemas (yema hinchada) en el cv Arbequina para no afectar la diferenciación morfológica visible de yemas que se produce a fines de invierno-inicio de primavera.

Antes de iniciar los tratamientos de riego, los olivos recibieron riegos profundos diferenciados. En el año 2011, los olivos de T1 y T2 recibieron riegos profundos de igual cantidad, dejando a los olivos de T3 sin riego profundo para producir el efecto del estrés hídrico durante el periodo invernal. En el año 2012, y con los resultados obtenidos en los olivos de T3 en la temporada anterior, se decidió aplicar riegos profundos a todos los olivos (T1, T2 y T3).

Finalizado el periodo de restricción (31 de agosto), nuevamente, se aplicaron riegos diferenciados en los olivos de T2 y T3 (en ambos años) para restablecer las condiciones de humedad de suelo semejantes a los olivos de T1.

Una vez restablecida las condiciones de humedad de los suelos de T2 y T3, las dosis de riego para el resto de la temporada anual fueron iguales a la dosis de T1 (100% de ET_c).

Los requerimientos hídricos fueron estimados siguiendo el método FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2006) mediante la siguiente fórmula:

$$ET_c = ET_o \times K_c \times K_r,$$

donde, E_{To} es la evapotranspiración de referencia, K_c es el coeficiente de cultivo y K_r es el coeficiente de reducción por superficie sombreada.

La E_{To} fue calculada a partir de datos de la estación agrometeorológica de la EEA San Juan (promedio de 1969 al 2010) mediante la utilización del tanque evaporímetro clase A ($E_{To} = K_p \times E_{pan}$) con valores del coeficiente del tanque evaporímetro (K_p) que varían entre 0,52 y 0,69 dependiendo de las condiciones ambientales del lugar. Los valores de K_c aplicados desde fines de otoño e invierno fueron iguales a 0,4 (Rousseaux *et al.*, 2008), mientras que para el resto del año fueron de 0,6. El K_r igual a 0,9 en ambos años, siguiendo la metodología propuesta por Pastor *et al.* (1999). La eficiencia de aplicación fue de 0,9 y la frecuencia del riego cada 3 a 5 días. La lámina de riego anual en los dos ciclos de cultivo fue la misma, calculada desde los 42 años de registros de E_{To} .

El umbral de riego teórico o nivel inferior de AFA (agua fácilmente aprovechable) fue establecido según la metodología propuesta por Allen *et al.* (2006).

Relaciones hídricas

La cantidad de agua en el suelo fue medida en laboratorio, determinando la humedad gravimétrica y volumétrica (%Hg y %Hv) sobre un perfil de 0,60 m de profundidad para incorporar los 0,45 m de profundidad efectiva de raíces y el posible efecto de absorción del resto del sistema radicular y crecimiento radicular próximo. El perfil de 0,60 m se construyó con muestras extraídas a dos profundidades, de textura franco de 0 a 0,30 m y de textura franco arenoso de 0,30 a 0,60 m. Las muestras de suelo húmedo, por parcela, fueron extraídas con barreno (48 h post-riego), entre 0,50 a 1,0 m alrededor del tronco, pesadas en balanza analítica (OHAUS-Adventure) y secadas hasta peso constante en estufa termostática (105 °C). Además, se estableció el contenido de agua extraíble relativo del suelo (Granier, 1987; Fernandez *et al.*, 2006) mediante la siguiente fórmula:

$$AER = (R - R_{min}) / (R_{max} - R_{min}),$$

donde, AER es el contenido de agua extraíble relativo del suelo, R es el contenido actual de agua del suelo, R_{min} es el contenido mínimo de agua del suelo medido en el experimento y R_{max} es el contenido de agua del suelo a capacidad de campo.

El estado hídrico de la planta se midió mediante el potencial hídrico a mediodía (Ferreyra *et al.*, 2002; Masmoudi *et al.*, 2010; Moriana *et al.*, 2012) utilizando como indicador al potencial hídrico xilemático (Ψ_{tallo}) mediante el método de cámara de presión y metodología descrita por Meyer y Reicosky (1985). Las mediciones se realizaron sobre una brindilla de 8 a 10 cm de longitud, cercanas a las ramas principales o tronco, cubiertas con bolsa plástica y papel aluminio dos horas antes de la medición (13 h), una brindilla por árbol, en las unidades de medición de cada parcela experimental.

Se estableció el cálculo de la cantidad de agua en el perfil de suelo de 0 a 0,60 m de los olivos de T1, T2 y T3 mediante la siguiente fórmula:

$$L_t = (A_{ai} + (A_r - A_f)) + dr$$

donde, L_t es la lámina total, A_i es el contenido de agua antes de iniciar la restricción hídrica invernal, A_r es el contenido de agua restablecido después de la restricción hídrica invernal, A_f es el contenido de agua al final de la restricción hídrica invernal y dr es la dosis de riego anual.

La conductancia estomática (g_s) se midió mediante un sistema portable de fotosíntesis (CIRAS 2-Portable Photosynthesis System) sobre una hoja desarrollada y expandida ubicada en el tercio medio de una brindilla de 15-25 cm de longitud, en los tres olivos centrales de cada parcela experimental. Las mediciones se realizaron entre las 10:30 h y las 14:00 h en invierno, y entre 9:30 a 13:00 h en primavera.

Análisis estadístico

Los datos fueron analizados con el software estadístico Infostat versión 2013 mediante análisis de varianza (ANOVA) aplicando un análisis factorial inicial de dos factores (Tratamientos de riego y Año) y su interacción, posteriormente, el efecto de los tratamientos se analizaron en una vía de clasificación (por cada año) y se estableció la comparación de medias mediante el Método de LSD Fisher, con un nivel de significancia de $p > 0,05$. También se aplicaron análisis de regresión para establecer las relaciones de dependencia entre los parámetros hídricos estudiados y la utilización de gráficos de puntos.

RESULTADOS

Los datos meteorológicos del sitio de estudio (1969 al 2012) se presentan en la figura 1 y en la tabla 1. En la figura 1 se representan las medias mensuales de las temperaturas mínimas, temperaturas máximas, E_{To} y E_{Tc} ; en estos gráficos se observan temperaturas mínimas próximas a 0° C y menor evapotranspiración entre los meses de mayo y agosto.

En la tabla 1 se muestran los valores promedio mensuales y anuales de E_{To} y E_{Tc} (1969 al 2010). También, se exponen los valores medios mensuales de precipitaciones, temperaturas y E_{To} de 2011 y de 2012; en estos datos se observa una diferencia de 110 a 130 mm con la E_{To} media anual de 42 años, que se concentra en la temporada estival (primavera-verano). En los años de 2011 y de 2012 las precipitaciones medias anuales fueron de 125,6 mm y 40,6 mm, respectivamente.

En la tabla 2 se detalla el contenido promedio de agua en el perfil de suelo de 0,6 m en los años 2011 y 2012. A la dosis anual de cada tratamiento se le adicionó el agua de los riegos profundos. En la sumatoria total de agua aplicada en el suelo los tratamientos deficitarios tuvieron 20 mm más comparado con los olivos de T1, a excepción del T3

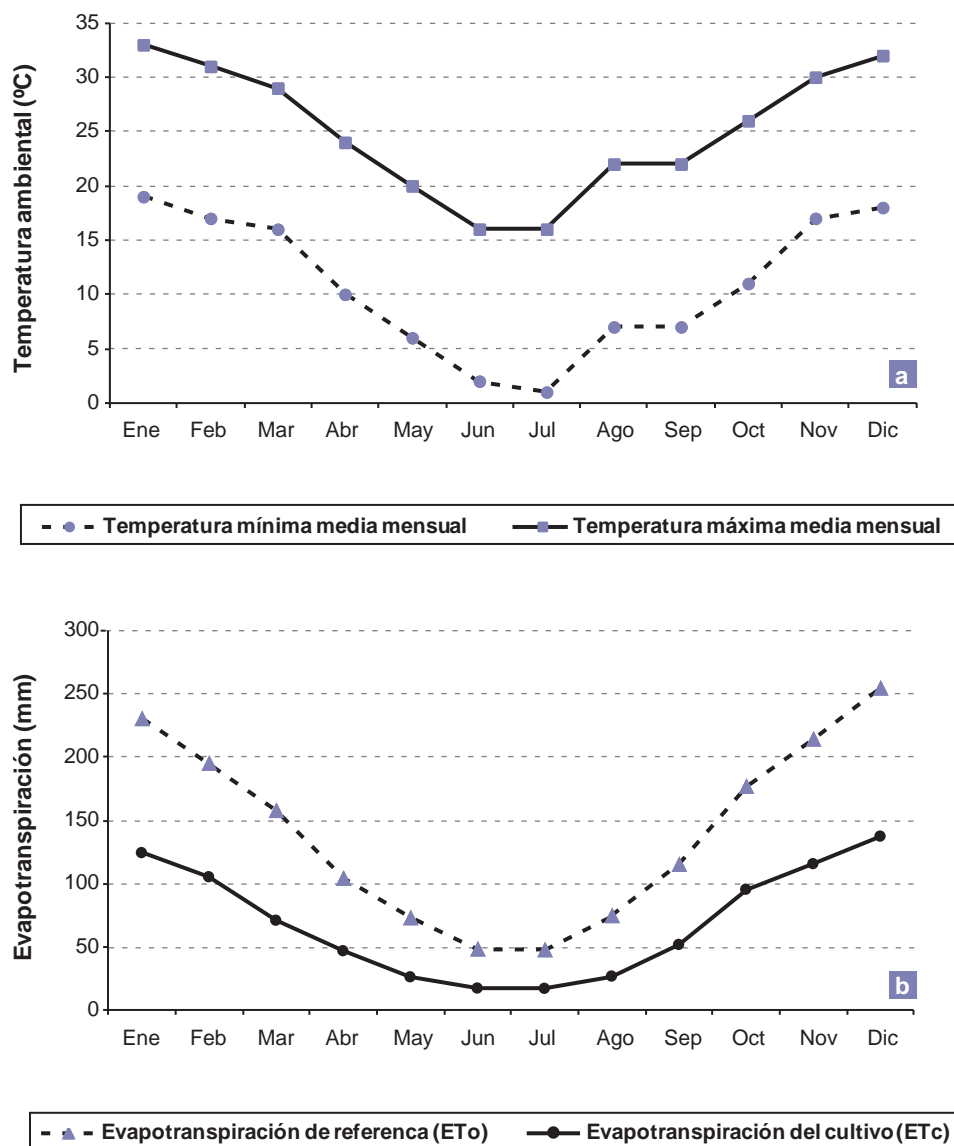


Figura 1. Valores de temperatura ambiental y evapotranspiración en Pocito, San Juan, desde 1969 al 2012. Estación meteorológica de la EEA San Juan INTA.

a. Temperaturas mínimas y máximas medias mensuales.

b. Evapotranspiración de referencia y de cultivo medias mensuales.

en 2011; esta diferencia se debió a láminas de los riegos profundos aplicadas a la salida del periodo de restricción hídrica invernal.

Al analizar estadísticamente el efecto de los tratamientos y año de aplicación se observaron diferencias significativas al igual que su interacción (tabla 3). En 2011 el Ψ_{tallo} fue más negativo que en 2012. En ambos ciclos los olivos de T3 mostraron valores significativamente más negativos que los olivos de T1 y T2. Similar comportamiento fue observado en el contenido de AER del suelo siendo significativamente menor en T3. Al evaluar la g_s , los olivos de T1 mostraron mayor g_s con respecto a los olivos de T2 y de T3.

En las figuras 2 y 3 a, b y c se detallan el contenido de AER del suelo, el Ψ_{tallo} y la g_s , respectivamente, de los dos ciclos del cultivo. El contenido de humedad del suelo que se midió sobre un perfil total de 0,60 m (con los valores obtenidos en dos estratos, una de 0 a 0,30 m y otra de 0,30 a 0,60 m) tuvo valores promedios de 18% Hg a Cc, de 8% Hg a Pm y de 1,45 de densidad aparente. Se registró un valor máximo de 20,6% Hg a CC (29,87% de Hv y 179,22 mm) y un valor mínimo de 3,11% Hg (4,5% Hv y 27,05 mm). El umbral de riego teórico (nivel inferior de AFA) fue de 10% Hg (14,5% Hv y 87 mm). El contenido de AER del perfil de suelo tuvo los siguientes valores, Rmin igual a 27,05 mm y Rmax igual a 179,22 mm.

Mes	Promedio 1969 al 2010			2011		2012				
	ETo (mm)	ETc (mm)	Pp. med. (mm)	Temp. amb. med. °C		ETo (mm)	Pp. med. (mm)	Temp. amb. med °C		ETo (mm)
				Máx.	Min.			Máx.	Min.	
Enero	229,94	124,17	54	33	19	235	21	35	21	247
Febrero	193,96	104,74	28,4	31	18	196	1,6	32	20	219
Marzo	157,54	70,89	9,4	29	15	146	1,6	31	16	167
Abril	104,11	46,86	3,8	26	10	124	2,4	24	11	112
Mayo	73,05	26,3	0	21	4	111	0	21	6	75
Junio	48,12	17,32	0,2	17	1	50	0	18	2	62
Julio	47,12	17,23	2,8	16	-1	43	0	16	0	46
Agosto	75,15	27,06	0	19	2	84	1	19	3	58
Septiembre	115,24	45,25	0	26	6	144	7	23	8	116
Octubre	177,13	95,65	0,2	26	11	197	2	26	11	162
Noviembre	213,6	115,34	26	31	16	222	4	32	17	239
Diciembre	253,38	136,83	0,8	33	19	266	0	34	18	299
Total anual	1689,1	827,63	125,6	26	10	1818	40,6	26	11	1800

Índice de Aridez 0,05* 3,3**

Tabla 1. Valores promedio mensuales y anuales de ETo y ETc de 42 años (1969-2010) y valores promedios mensuales de lluvias, temperaturas y ETo durante 2011 y 2012. Estación meteorológica de la EEA San Juan INTA. ETo (evapotranspiración de referencia), ETc (evapotranspiración del cultivo), Pp. med. (Precipitación media), Temp. amb. med. (Temperatura ambiental media), Min. (Mínima), Máx. (Máxima).

*Clasificación de zonas áridas UNESCO (1979) como la relación Pp media anual (mm)/ETo(mm).**Índice de aridez de De Martonne la: Pp/(Tm + 10).

Tratamientos de riego	Aai	Af	Ar	dr	Lt
Año 2011					
T1-100% de la ETc		134		920	1054
T2-50 % de la ETc (21/06 al 31/08)	124	65	124	891	1074
T3-Sin Riego (21/06 al 31/08)	62	35	141	864	1032
Año 2012					
T1-100% de la ETc		140		920	1060
T2-50 % de la ETc (21/06 al 31/08)	125	70	139	891	1085
T3-Sin Riego (21/06 al 31/08)	116	37	141	864	1084

Tabla 2. Contenido de agua en el perfil de suelo de 0 a 0,60 m (mm) 2011 y 2012, aplicados en el cv. Arbequina sometida a los tratamientos de riego (T1, T2 y T3) durante el periodo de restricción hídrica invernal (21 de junio al 31 de agosto) y resto del ciclo de cultivo. Referencias. Lt (Lámina total), Ai (contenido de agua antes de iniciar la restricción hídrica invernal), Af (contenido de agua al final de la restricción hídrica invernal), Ar (contenido de agua restablecido después de la restricción hídrica invernal) y dr (dosis de riego anual).

En el año 2011, iniciado el periodo de restricción hídrica, el contenido promedio de AER del suelo fue de 0,70 (132,93 mm) en T1, 0,64 (124,89 mm) en T2 y 0,24 (63,06 mm) en T3; finalizando la restricción hídrica (31/08) se alcanzaron valores promedio de 0,70 (134,70 mm) en T1, 0,25 (65,12 mm) en T2 y 0,04 (35,32 mm) en T3 (figura 2 a). Al analizar la evolución de la humedad del suelo, durante el periodo con-

siderado, se observa en T3 una caída significativa en el contenido de AER, estabilizándose entre 0,08 y 0,1 (40-45 mm) mientras que en T2 se diferenció significativamente de T1 a partir del 15/8. Al retornar el riego completo, los olivos de T3 recibieron una dosis de riego mayor que los olivos de T2, posteriormente, todos los olivos recibieron igual dosis de riego, alcanzando valores promedio en el

Análisis de Varianza	Ψ_{tallo}				g_s				Contenido de AER del suelo			
	(MPa)				(mmol/m ² /s)				de 0 a 0,60m			
A												
Fuente de Variación	F	p-valor	CV	r ² aj	F	p-valor	CV	r ² aj	F	p-valor	CV	r ² aj
Tratamientos de riego	151,49	<0,0001			27,32	<0,0001			103,24	<0,0001		
Año	561,32	<0,0001	31,26	0,67	24,95	<0,0001	66,23	0,16	1,89	0,1726	31,12	0,74
Tratamientos de riego x año	34,02	<0,0001			2,12	0,1211			10,17	0,0001		
B												
Fuente de Variación	F	p-valor	CV	r ² aj	F	p-valor	CV	r ² aj	F	p-valor	CV	r ² aj
Tratamientos de riego	132,82	<0,0001	26,76	0,52	6,74	0,0015	90,39	0,06	129,6	<0,0001	30,32	0,78
Test LSD Fisher $\alpha=0,05$	Medias				Medias				Medias			
Tratamiento 1 (100% ETc)	-2,73	<i>a</i>			46,37	<i>a</i>			0,74	<i>a</i>		
Tratamiento 2 (50 % ETc)	-3,20	<i>b</i>			34,90	<i>b</i>			0,54	<i>b</i>		
Tratamiento 3 (Sin Riego)	-5,12	<i>c</i>			25,38	<i>b</i>			0,11	<i>c</i>		
C												
Fuente de Variación	F	p-valor	CV	r ² aj	F	p-valor	CV	r ² aj	F	p-valor	CV	r ² aj
Tratamientos de riego	31,94	<0,0001	40,4	0,22	28,41	<0,0001	51,59	0,19	20,12	<0,0001	32,84	0,52
Test LSD Fisher $\alpha=0,05$	Medias				Medias				Medias			
Tratamiento 1 (100% ETc)	-1,31	<i>a</i>			60,83	<i>a</i>			0,61	<i>a</i>		
Tratamiento 2 (50 % ETc)	-1,71	<i>b</i>			55,69	<i>a</i>			0,41	<i>b</i>		
Tratamiento 3 (Sin Riego)	-2,25	<i>c</i>			32,08	<i>b</i>			0,25	<i>c</i>		

Tabla 3. Variabilidad expresada como porcentaje de la suma de cuadrados del potencial hídrico xilemático (Ψ_{tallo}), conductancia estomática (g_s) y contenido de agua extraíble relativa del suelo (AER) registrados en el cv. Arbequina sometida a los tratamientos de riego (T1, T2 y T3) durante el periodo de restricción hídrica desde el 21 de junio al 31 de agosto.

Letras distintas en cursivas indican diferencias significativas entre la media de los tratamientos (LSD Fisher, $\alpha \leq 0,05$).

A) Variabilidad de los parámetros hídricos por interacción entre los tratamientos de riego x año.

B) Variabilidad de los parámetros hídricos por tratamientos de riego en el primer ciclo de cultivo (2011).

C) Variabilidad de los parámetros hídricos por tratamientos de riego en el segundo ciclo de cultivo (2012).

contenido de AER del suelo entre 0,65 y 0,75 (125-140 mm).

La evolución de los indicadores fisiológicos del olivo tuvo una tendencia similar al contenido AER del suelo. El Ψ_{tallo} se diferenció significativamente en todos los tratamientos en el mes de julio, finalizando el periodo de restricción hídrica con valores promedio de -1,54 MPa en T1, -3,75 MPa en T2 y -6,80 MPa en T3 (figura 2 b). La g_s mostró diferencias significativas entre los tratamientos durante el mes de agosto, alcanzando valores promedio al finalizar la restricción hídrica de 24,50 mmol/m²/s en T1, 10,92 mmol/m²/s en T2 y 5,67 mmol/m²/s en T3 (figura 2 c).

En el segundo ciclo de cultivo, el comportamiento de las variables consideradas mostró un patrón similar al obser-

vado en el primer año. Antes de iniciar la restricción hídrica, el contenido promedio de AER del suelo fue de 0,55 (110,52 mm) en T1, 0,64 (125,25 mm) en T2 y 0,59 (116,75 mm) en T3 (figura 3 a). En el mes de agosto se diferenciaron significativamente los tres tratamientos, alcanzando T3 un valor mínimo promedio de 0,07 (37,25 mm). El Ψ_{tallo} y la g_s (figura 3 b y c) se diferenciaron significativamente en los tres tratamientos en el mes de julio, evidenciándose los valores inferiores en los olivos de T3.

En las figuras 2 c y 3 c se graficó la temperatura máxima diaria correspondiente a los días que se realizaron las mediciones de Ψ_{tallo} y de g_s , donde se observó un posible efecto de la temperatura sobre los indicadores hídricos del olivo. Esta influencia ambiental se estudió mediante análisis de regresión, obteniéndose distribuciones lineales y

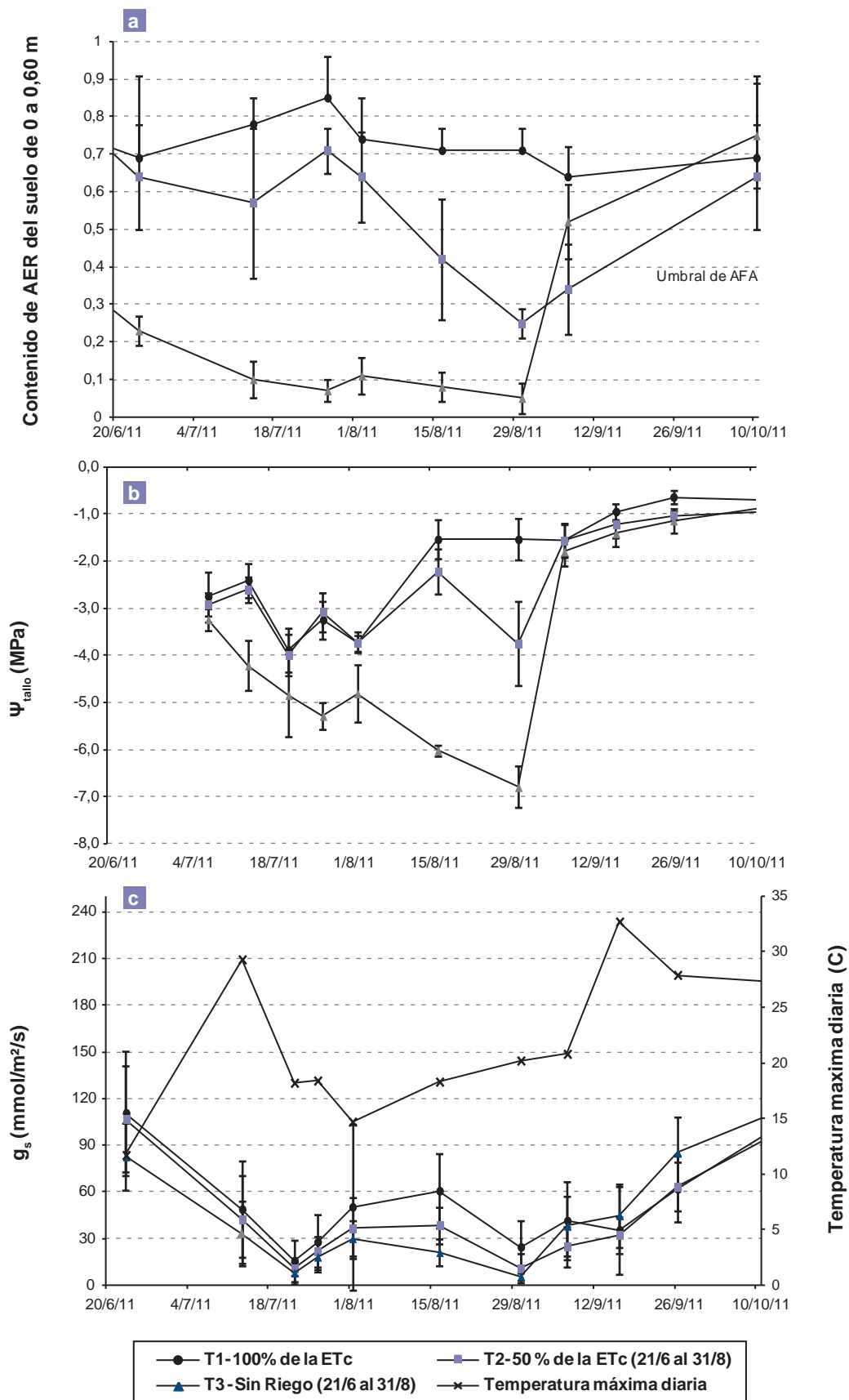


Figura 2. Evolución de los indicadores hídrico en suelo y en planta, de los olivos de T1, T2 y T3 durante el año 2011. Valores medios con desviación estándar de: a) Contenido de AER (agua extraíble relativa) del suelo b) Ψ_{tallo} , (Potencial hídrico xilemático) c) g_s (Conductancia estomática) con temperatura máxima diaria

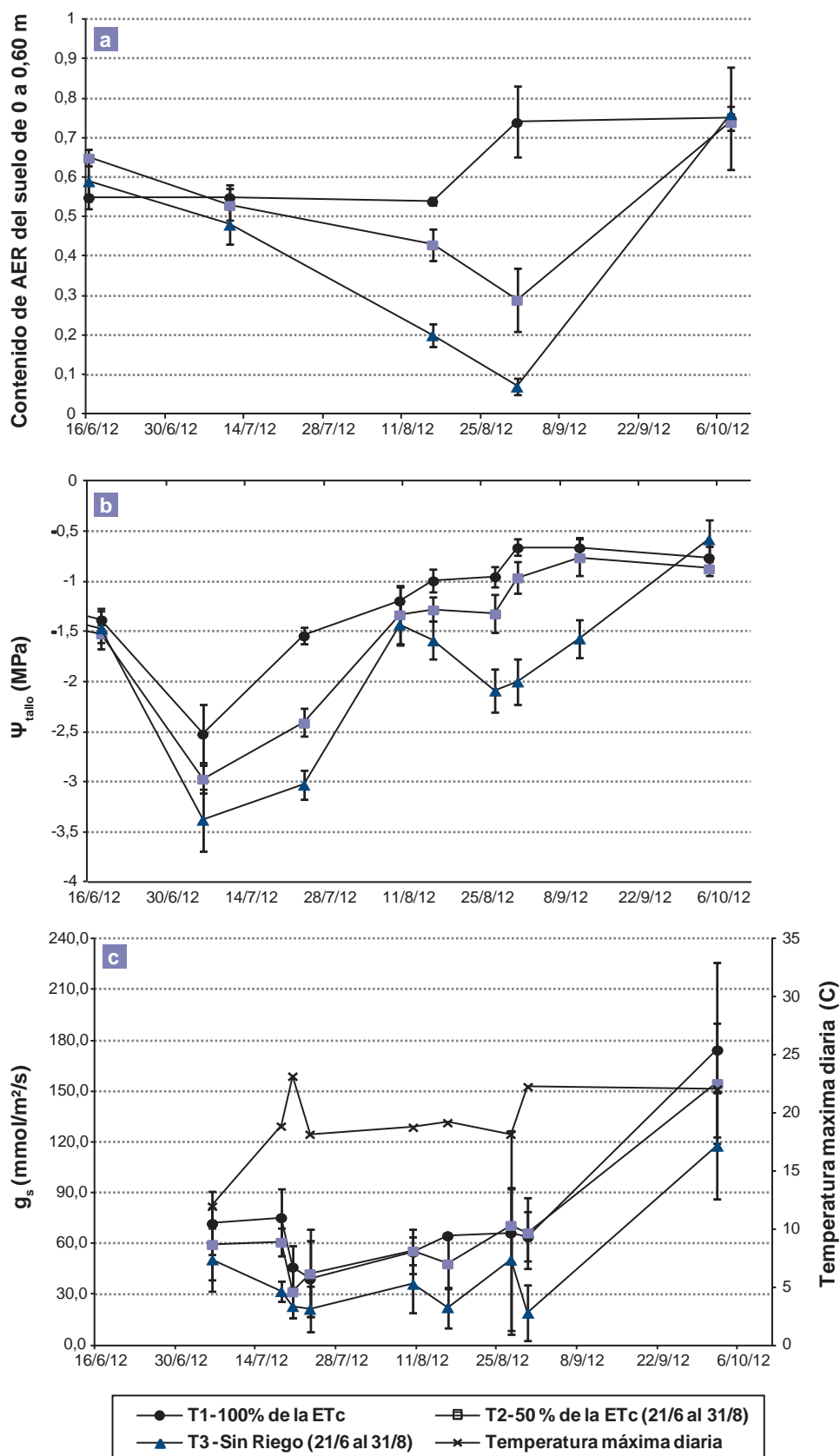


Figura 3. Evolución de los indicadores hídrico en suelo y en planta de los olivos de T1, T2 y T3 durante el año 2012.

Valores medios con desviación estándar de: a) Contenido de AER (agua extraíble relativa) del suelo b) Ψ_{tallo} , (Potencial hídrico xilemático) c) g_s (Conductancia estomática) con temperatura máxima diaria

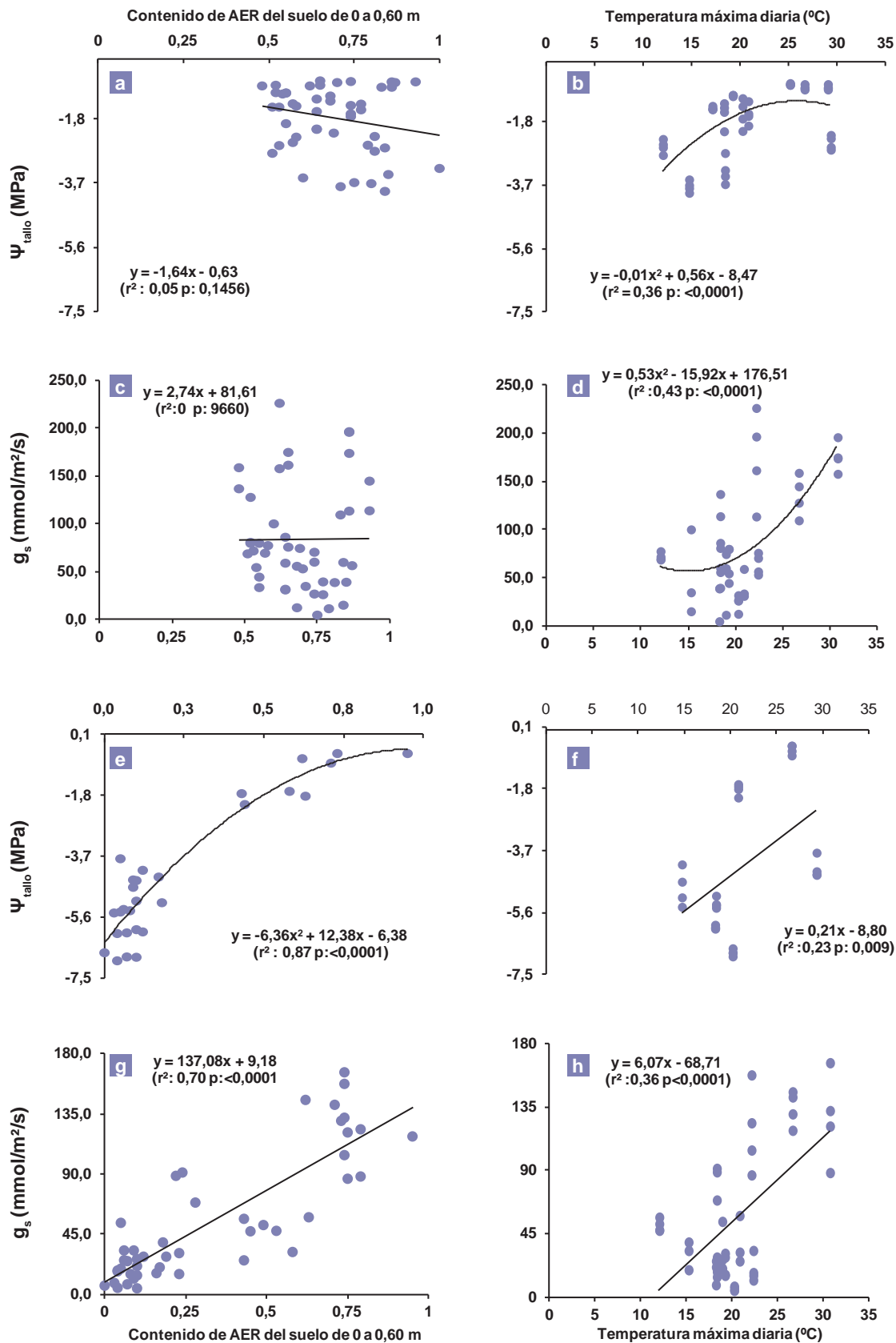


Figura 4. Efecto del contenido de AER del suelo y la temperatura máxima diaria sobre el potencial hídrico xilemático (Ψ_{tallo}) y la conductancia estomática (g_s) en condiciones de:

- Riego completo en invierno y primavera 100% ETc (T1) a, b, c y d.
- Restricción hídrica severa en invierno y riego completo post-restricción (T3) e, f, g y h.

curvilíneas de los datos (ajuste con función polinómica de segundo grado). En condiciones de riego completo (T1) se obtuvo un efecto significativo de la temperatura ambiental sobre las variaciones en el Ψ_{tallo} (figura 4 b) y en la g_s (figura 4 d) del olivo mientras que, bajo estrés hídrico y rehidratación, las variaciones en el Ψ_{tallo} y en la g_s son producidas, principalmente, por el contenido de AER del suelo y por la temperatura (figura 4 e y g).

DISCUSIÓN

En el presente ensayo el olivo mostró relaciones hídricas diferenciales, según el nivel de estrés hídrico durante el periodo de restricción hídrica invernal y según el año.

En ambos años se obtuvieron dos niveles de estrés hídrico; en el 2011, un nivel perteneciente a los olivos de T2 con Ψ_{tallo} de -3,20 MPa y g_s de 34,90 mmol/m²/s y otro nivel, en los olivos de T3 con Ψ_{tallo} de -5,12 MPa y g_s de 25,38 mmol/m²/s. En el 2012, un nivel de estrés hídrico con Ψ_{tallo} de -1,71 MPa y con g_s de 55,69 mmol/m²/s en los olivos de T2 y otro nivel, con Ψ_{tallo} de -2,25 MPa y con g_s de 32,08 mmol/m²/s en los olivos de T3.

Esta diferencia entre los niveles de estrés hídrico de los tratamientos deficitarios, con respecto al año 2011, está directamente relacionada con el contenido de agua del suelo al inicio de la restricción hídrica (especialmente en el T3) y a la diferencia entre las temperaturas mínimas, de los meses de invierno, acentuándose por las temperaturas bajo cero del mes de julio de 2011.

En los análisis de regresión, el Ψ_{tallo} y la g_s mostraron una relación curvilínea positiva con la temperatura ambiental, en condiciones de riego completo en invierno y primavera (figura 4 b y d).

Se observaron disminuciones en el Ψ_{tallo} y en la g_s de las hojas, con el descenso de la temperatura ambiental. Esta respuesta coincide con la deshidratación encontrada por Antognozzi *et al.* (1994) en hojas de olivos producida por el frío del invierno. Similares resultados fueron obtenidos por Pérez-López *et al.* (2010) en un ensayo con 6 cultivares de olivo (entre ellos el cv Arbequina), registrando disminuciones en el Ψ_{tallo} y en la g_s de las hojas a temperaturas menores a 10 °C, asociando esta deshidratación a una reducción en la absorción general de la raíz o al aumento de la viscosidad del agua a temperaturas más bajas.

En condiciones sin riego, durante invierno y riego completo en primavera, el Ψ_{tallo} y la g_s del olivo mostraron relaciones curvilíneas y lineales positivas con el contenido de agua del suelo y con la temperatura ambiental (figura 4 e, f, g y h).

Durante el año 2012, los olivos de T2 experimentaron un estrés hídrico leve, con un Ψ_{tallo} y una g_s de valores similares a los olivos con riego completo. Estos registros se asemejan a las respuestas obtenidas en etapas con alta actividad metabólica mediante la aplicación de riego parcial de raíces (Centritto *et al.*, 2005; Aganchich *et al.*, 2009) o riego deficitario (Correa-Tedesco *et al.*, 2010; Pierantozzi *et al.*, 2013) con dosis próximas al 100% de ETc, produciendo

descensos en el potencial hídrico de hoja (Ψ_{hoja}), en el Ψ_{tallo} y en la g_s , sin afectar la capacidad potencial de asimilación de CO₂ del olivo y con un incremento en el uso eficiente del agua. Si continúa la disminución de agua en el suelo, el estrés hídrico se vuelve moderado, como en los olivos de T2 (2011) y de T3 (2012), produciendo una disminución en el Ψ_{tallo} para extraer agua desde capas más profundas o más secas y un descenso en la g_s para reducir la transpiración. Similarmente, se observaron reducciones en el estado hídrico y en el intercambio gaseoso de las hojas del olivo a medida que aumenta el estrés hídrico por la aplicación de riego deficitario durante la estación estival (Alegre *et al.*, 2000; Stefanoudaki *et al.*, 2001; Pierantozzi *et al.*, 2013; Rosecrance *et al.*, 2015) como así también, reducciones de la presión de turgencia en las hojas por estrés hídrico moderado (Dell'Amico *et al.*, 2012; Girón *et al.*, 2015).

Si el estrés hídrico se vuelve severo, el Ψ_{tallo} y la g_s de las hojas alcanza valores extremos, como los obtenidos en los olivos de T3 de 2011. El Ψ_{tallo} de -5,12 MPa es sustancialmente inferior si se los compara con los reportados por Rousseaux *et al.* (2008) y por Pierantozzi *et al.* (2013), los cuales son próximos a -1,7 MPa y -3,5 MPa para las zonas de cultivo del noroeste y centro de Argentina, respectivamente, y son consistentes con aquellos valores obtenidos de -8 MPa en olivos, bajo condiciones extremas de sequía, en verano en España (Orgaz y Fereres, 1998; Moriana *et al.*, 2002) y en invernadero en Túnez (Boussadia *et al.*, 2008). Estos valores fisiológicos del Ψ_{tallo} del olivo se deben al elevado módulo de elasticidad de sus células, que permite extraer agua desde capas de suelo relativamente secas (Bongi y Palliotti, 1994; Dichio *et al.*, 1997; Fernández *et al.*, 2014).

Un registro promedio de 25,38 mmol/m²/s, observado en la g_s de las hojas de los olivos de T3 (2011) es un valor comparativamente aceptable con los registros observados por Moriana *et al.* (2002) en la tasa neta de fotosíntesis (0 y 2 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) en condiciones de estrés hídrico severo. Esta respuesta de la g_s de las hojas de los olivos se debe a su patrón de regulación estomática que permite mantener una determinada apertura estomática en condiciones limitadas de agua. La reducción en la g_s de las hojas del olivo, en condiciones de estrés hídrico, sostiene la actividad fotosintética a valores muy bajos debido a mecanismos de ajuste osmótico (Xiloyannis *et al.*, 1999; Dichio *et al.*, 2003) activo y pasivo (Boussadia *et al.*, 2013), manteniendo la turgencia de las células y evitando la separación de las raíces con las partículas del suelo.

Los valores promedio obtenidos en la g_s de los olivos son más bajos (entre 15 y 60 mmol/m²/s) si se los compara con los datos reportados por Rousseaux *et al.* (2008) en el cv. Manzanilla en la provincia de La Rioja, Argentina, donde registraron valores entre 78 y 186 mmol/m²/s; sin embargo, concuerdan con los registros reportados por Pierantozzi *et al.* (2013) durante la aplicación de déficit hídrico en la etapa de pre-floración y floración en el cv. Arbequina.

El retraso en la normalización de los valores de Ψ_{tallo} y de g_s en los olivos estresado, al momento del retorno del riego, esta relacionado con el grado de estrés alcanzado durante la restricción hídrica y a la dosis de riego en la rehidratación,

como los olivos de T3 necesitaron más tiempo para igualarse con los valores fisiológicos de los olivos con riego completo. Este retraso en los valores fisiológicos de los olivos con estrés hídrico, durante la etapa de rehidratación, coincide con la respuesta observadas por Pérez-López *et al.* (2008).

Las relaciones encontradas entre indicadores hídricos del olivo y contenido de agua en el suelo son consistentes con aquellas establecida por Moriana *et al.* (2002) entre el Ψ_{tallo} y el agua disponible en el suelo y entre la tasa neta de fotosíntesis y la g_s de las hojas del cv Picual. También concuerdan con las relaciones encontradas por Boussadia *et al.* (20008) entre g_s y el contenido relativo de agua de las hojas; similarmente, Rousseaux *et al.* (2008) establece una relación lineal positiva entre el Ψ_{hoja} y el contenido volumétrico de agua del suelo y una relación curvilínea negativa de la g_s con el déficit de presión de vapor atmosférico. Masmoudi *et al.* (2010) reportan relaciones lineales y curvilíneas entre Ψ_{hoja} y el contenido relativo de agua de las hojas y entre el Ψ_{hoja} y la g_s , en los diferentes tratamientos de riegos deficitarios en 5 cultivares de olivo.

Desde los datos obtenidos en los dos ciclos de cultivo del olivo podemos decir que un estrés hídrico leve o moderado, aplicado durante el invierno, con dosis de riego que restablezcan el 50% de la ETC o la suspensión total del riego, no afecta severamente el estado hídrico del olivo, previa máxima acumulación de agua en el perfil de suelo explorado por las raíces (práctica inevitable) e identificación de la fecha de diferenciación morfológica de yemas para determinar la finalización del periodo de restricción hídrica.

Es factible la aplicación de restricciones hídricas durante gran parte del invierno debido a las reducciones en la g_s y en la tasa neta de fotosíntesis y al estado de latencia de las yemas en el ciclo biológico (Rallo, 1998; Sanz-Cortés *et al.*, 2002; Fernández *et al.*, 2014). Además, en otoño se producen los altos valores de fotosíntesis y de conductancia estomática (Moriana *et al.*, 2002) y la diferenciación morfológica (endógena) de yemas vegetativas y florales que se visualización a fines del invierno o principio de la primavera (Lavee, 1996; Andreini *et al.*, 2008; Mert *et al.*, 2013; Fernández *et al.*, 2014). Otras características existentes en zonas áridas, como en la provincia de San Juan, que facilitarían la aplicación de restricciones hídricas invernales son:

- Suelos heterogéneos, de variable profundidad, que facilitan el agotamiento y recarga de agua.
- Precipitaciones, principalmente, de régimen estival.
- Implementación de riego por goteo por los agricultores.
- Disponibilidad limitada de agua, acentuada durante el invierno.

Es importante mencionar que entre los efectos negativos de la utilización de estrategias deficitarias en zonas áridas es el riesgo de salinización de los suelos, cuando se utilicen aguas salinas para riego (Sánchez-Blanco y Torrecillas, 1995).

Aunque en el balance de agua aplicada los tratamientos deficitarios tuvieron más agua que el control podría diseñarse la estrategia de riego:

Aumentando la reserva de agua, antes de iniciar la restricción hídrica para evitar una disminución de AFA por debajo del umbral y continuar al retorno del riego con dosis al 100% de la ETC.

Aplicando los riegos post-restricción hídrica próximos al umbral de riego.

Aunque las lluvias son escasas, se puede establecer una práctica alternativa de recarga del perfil del suelo con las últimas lluvias del verano mediante la aplicación de riegos días posteriores a las precipitaciones.

Finalmente, se menciona la importancia de estas prácticas de riego a largo plazo, analizando su impacto sobre el crecimiento vegetativo, floración, cuaje de frutos y productividad del agua; no obstante, resultados preliminares nos indican efectos favorables sobre el desarrollo reproductivo del olivo.

CONCLUSIONES

Los resultados demuestran que el olivo presenta un periodo de tolerancia al estrés hídrico leve y moderado, comprendido desde fines de junio hasta mediados de agosto, en las condiciones ambientales de Pocito, San Juan (Argentina). Durante este periodo se presentan bajos niveles de conductividad estomática de las hojas y de tasa neta de fotosíntesis (afectada por las bajas temperaturas).

Las variaciones en el Ψ_{tallo} y en la g_s de las hojas del olivo dependen del contenido de AER del suelo y de la temperatura ambiental.

La programación y control del riego, durante el invierno, mediante indicadores fisiológicos, (Ψ_{tallo} y g_s) deberían ser acompañados con mediciones de humedad del suelo.

En un suelo con riego completo, las variaciones en el Ψ_{tallo} y en la g_s del olivo son regulados por la temperatura ambiental.

En un suelo con restricción hídrica severa, con un contenido de agua inferior al umbral de AFA, afecta el estado hídrico general del olivo, con posible impacto negativo sobre la floración.

La restricción hídrica parcial y total, con reserva inicial de agua (entre 30 o 40 mm sobre el umbral de AFA) antes del invierno es una estrategia viable de aplicación en zonas áridas de Argentina para atenuar la baja disponibilidad de agua estacional. Se continúan con las evaluaciones fisiológicas y productivas de las estrategias deficitarias invernales; no obstante, resultados preliminares nos indican resultados favorables para el cultivo.

AGRADECIMIENTOS

Al personal de apoyo técnico Sres. Omar Morales y Diego Castro por la colaboración en el trabajo de campo; al Tec. Mario Liotta; a la EEA San Juan INTA y a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) por el financiamiento de la formación doctoral y realización de ensayo de tesis.

BIBLIOGRAFÍA

- AGANCHICH, B.; WAHBI, S.; LORETO, F.; CENTRITTO, M. 2009. Partial root zone drying: regulation of photosynthetic limitations and antioxidant enzymatic activities in young olive (*Olea europaea*) saplings. *Tree Physiology* 29: 685–696.
- ALEGRE, S.; GIRONA, J.; MARSAL, J.; ARBONÉS, A.; MATA, M.; MONTAGUT, D.; TEIXIDÓ, F.; MOTILVA, M.J.; ROMERO, M.P. 1999. Regulated deficit irrigation in olive trees. *Acta Hort. (ISHS)* 474: 373-376.
- ALEGRE, S.; MARSAL, J.; MATA, M.; ARBONES, A.; GIRONA, J.; TOVAR, M. J. 2000. Regulated deficit irrigation in olive trees (*Olea europaea* L. cv. Arbequina) for oil production. In IV International Symposium on Olive Growing 586: 259-262.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *FAO Riego y Drenaje* 56.
- ANDREINI, L.; BARTOLINI, S.; GUIVARC'H, A.; CHRQUI, D.; VITAGLIANO, C. 2008. Histological and immunohistochemical studies on flower induction in the olive tree (*Olea europaea* L.). *Plant Biology* 10: 588-595.
- 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*. Vol. 47, 301: 1093-1100.
- ANJUM, S.A.; XIE, X.; WANG, L.; SALEEM, M.F.; MAN, C.; LEI, W. 2011. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *Review. African Journal of Agricultural Research* Vol. 6(9), 2026-2032
- ANTOGNOZZI, E.; FAMIANI, F.; PROIETTI, P.; PANNELLI, G.; ALFEI, B. 1994. Frost resistance of some olive cultivars during the winter. *Acta Hort.* 356: 152-155.
- BARRANCO, D.; FERNADEZ-ESCOBAR, R.; RALLO, L. 1998. *El cultivo del olivo*. 2 ed. Mundi-Prensa. 120-265 pp.
- BEN-GAL, A.; NUTRIT A.; ALCHANATIS, V.; COHEN, Y.; YERMIYAHU, U.; ZIPORI, V.; PRESNOV, E.; SPRINTSIN, M.; DAG, A. 2009. Evaluating water stress in irrigated olives: correlation of soil water status, tree water status, and thermal imagery. *Irrig Sci* 27: 367-376.
- BEN-GAL, A.; YERMIYAHU, U.; ZIPORI, I.; PRESNOV, E.; HANOCH, E.; DAG, A. 2011. The influence of bearing cycles on olive oil production response to irrigation. *Irrig Sci* 29: 253-263.
- BERENQUER, 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.
- BERNI, J.A.J.; ZARCO-TEJADA, P.J.; SEPULCRE-CANTÓ, G.; FERERES, E.; VILLALOBOS, F. 2009. Mapping canopy conductance and CWSI in olive orchards using high resolution thermal remote sensing imagery. *Remote Sensing of Environment* 113: 2380–2388.
- BONGI, G.; PALLIOTTI, A. 1994. Olive. En: SCHAFFER, B., ANDERSEN, P.C. (Eds.), *Handbook of Environmental Physiology of Fruit Crops*. Volume I: Temperate Crops. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, EE. UU., 165–187 pp.
- BOUSSADIA, O.; MARIEM, F.B.; MECHRI, B.; BOUSSETTA, W.; BRAHAM, M.; EL HADJ, S.B. 2008. Response to drought of two olive tree cultivars (cv Koroneki and Meski). *Scientia Horticulturae* 116: 388-393.
- BOUSSADIA, O.; BCHIR, A.; STEPPE, K.; VAN LABEKE, M.C.; LEMEURE, R.; BRAHAM, M. 2013. Active and passive osmotic adjustment in olive tree leaves during drought stress. *European Scientific Journal*, Vol.9, N.º24: 423-439.
- BRETON, C.; TERRAL, J.F.; PINATEL, C.; MÉDAIL, F.; BON-HOMME, F.; BERVILLÉ, A. 2009. The origins of the domestication of the olive tree. *C. R. Biologies* 332: 1059–1064.
- 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.
- CENTRITTO, M.; LORETO, F.; CHARTZOULAKIS, K. 2003. The use of low [CO₂] to estimate diffusional and non-diffusional limitations of photosynthetic capacity of salt-stressed olive saplings. *Plant, Cell and Environment* 26: 585–594.
- CENTRITTO, M.; WAHBI, S.; SERRAJ, R.; CHAVES, M. M. 2005. Effects of partial rootzone drying (PRD) on adult olive tree (*Olea europaea*) in field conditions under arid climate II. Photosynthetic responses. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 106: 303–311.
- CONNOR, D.J. 2005. Adaptation of olive (*Olea europaea* L.) to water-limited environments. *Australian Journal of Agricultural Research*, 56: 1181–1189.
- CORREA-TEDESCO, G.; ROUSSEAU, 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.
- CUEVAS, M.V.; TORRES-RUIZ, J.M.; ALVAREZ, 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.
- CHARTZOULAKIS, K.; PATAKAS, A.; BOSBALIDIS, A.M. 1999. Changes in water relations, photosynthesis and leaf anatomy induced by intermittent drought in two olive cultivars. *Environmental and Experimental Botany* 42: 113–120.
- DELL'AMICO, J.; MORIANA, A.; CORELL, M.; GIRÓN, I.F.; MORALES, D.; TORRECILLAS, A.; MORENO, F. 2012. Low water stress conditions in table olive trees (*Olea europaea* L.) during pit hardening produced a different response of fruit and leaf water relations. *Agricultural Water Management* 114: 11–17.
- DICHIO, B.; NUZZO, V.; XILOYANNIS, C.; CELANO, G.; ANGELOPOULOS, K. 1997. Drought stress-induced variation of pressure-volume relationships in *Olea europaea* L. cv "Coratina". *Acta Hort.* 449: 401-410.
- DICHIO, B.; XILOYANNIS, C.; ANGELOPOULOS, K.; NUZZO, V.; BUFO, S.; CELANO, G. 2003. Drought-induced variations of water relations parameters in *Olea europaea*. *Plant and Soil* 257: 381-389.
- ENGLISH, M. y RAJA, S.N. 1996. Perspectives on deficit irrigation. *Agricultural Water Management* 32: 1-14.
- FERERES, E.; SORIANO, M.A. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 58, N.º 2: 147-159.
- FERERES, E.; GOLDHMAER, D. 2003. Suitability of stem diameter variations and water potential as indicators for irrigation scheduling of almond trees. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 78 (2): 139-144.
- FERNÁNDEZ, J.E.; MORENO, F.; GIRON, I.F.; BLAZQUEZ, M.O. 1997. Stomatal control of water use in olive tree leaves. *Plant and Soil* 190: 179-192.
- FERNÁNDEZ, J.E.; PALOMO, M.J.; DÍAZ-ESPEJO, A.; CLOTHIER, B.E.; GREEN, S.R.; GIRON, I.F.; MORENO, F. 2001. Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnostics of water stress. 2001. *Agricultural Water Management* 51: 99–123

- FERNÁNDEZ, J.E.; DÍAZ-ESPEJO, A.; INFANTE, J.M.; DURÁN, P. PALOMO, J.M.; CHAMORRO, V.; GIRÓN, F.I.; VILLAGARCÍA, L. 2006. Water relations and gas exchange in olive trees under regulated deficit irrigation and partial rootzone drying. *Plant Soil* 284: 273-291.
- FERNÁNDEZ, J.E.; TORRES-RUIZ, J.M.; DÍAZ-ESPEJO, A.; MONTERO, A.; ÁLVAREZ, R.; JIMÉNEZ, M.D.; CUERVA, J.; CUEVAS, M.V. 2011. Use of maximum trunk diameter measurements to detect water stress in mature 'Arbequina' olive trees under deficit irrigation. *Agricultural Water Management* 98: 1813-1821.
- FERNÁNDEZ, J.E. 2014. Understanding olive adaptation to abiotic stresses as a tool to increase crop performance. *Environmental and Experimental Botany* 103: 158-179.
- FERREYRA, R.E.; SELLES VAN SCH, G.; SELLES, I. 2001. Riego deficitario controlado en olivos. *Boletín INIA*. 59:1-48.
- FERREYRA, R.E.; SELLES VAN SCH, G.; LEMUS, G.S. 2002. Efecto del estrés hídrico durante la fase II de crecimiento de fruto del duraznero cv Kakamas en el rendimiento y estado hídrico de las plantas. *Agricultura Técnica* 62 (4): 565-573.
- FLEXAS, J.; DÍAZ-ESPEJO, A.; GAGO, J.; GALLÉ, J.; GALMÉS, J.; GULÍAS, J.; MEDRANO, H. 2014. Photosynthetic limitations in Mediterranean plants: A review. *Environmental and Experimental Botany*. 103: 12-23.
- FUNTES YAGÜE, J.L. 1998. *Técnicas de riego*. S.A. Mundi-Prensa Libros. España.
- GARCÍA LÓPEZ, A., CUN GONZÁLEZ, R., MONTERO SAN JOSÉ, L. 2010. Efecto de la hora del día en el potencial hídrico foliar del sorgo y su relación con la humedad en el suelo. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, Vol. 19, N.º 3: 7-11.
- GEERTS, S.; RAES, D. 2009. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management* 96: 1275-1284.
- GIL-PELEGRÍN, E.; ARANDA, I.; PEGUERO-PINA, J.J.; VILAGROSA, A. 2005. El continuo suelo-planta-atmósfera como un modelo integrador de la ecofisiología forestal. *Invest. Agrar.: Sist. Recur. For.* 14(3): 358-370.
- GIORIO, P.; SORRENTINO, G.; D'ANDRIA, R. 1999. Stomatal behavior, leaf water status and photosynthetic response in field-grown olive trees under water deficit. *Environmental and Experimental Botany* 42: 95-104.
- GIORIO, P.; GIORIO, G. 2003. Sap flow of several olive trees estimated with the heat-pulse technique by continuous monitoring of a single gauge. *Environmental and Experimental Botany* 49: 9-20.
- GIRÓN, F.I.; CORELL, M.; GALINDO, A.; TORRECILLAS, E.; MORALES, D.; DELL'AMICO, J.; TORRECILLAS, A.; MORENO, F.; MORIANA. 2015. Changes in the physiological response between leaves and fruits during a moderate water stress in table olive trees. *Agricultural Water Management* 148: 280-286.
- GOLDHAMER, D.A. 1999. Regulated deficit irrigation for California canning olives. *Acta Horticulturae* 474: 369-372.
- GRAMMATIKOPOULOS, G.; KARABOURNIOTIS, G.; KYPARISSIS, A.; PETROPOULOU, Y.; MANETAS, Y. 1994. Leaf hairs of olive (*Olea europea*) prevent stomatal closure by ultraviolet-B radiation. *Australian journal of plant physiology*, 21(3): 293-301.
- GRANIER, A. 1987. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology* 3: 309-320.
- 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.
- HANSON, R.B.; ORLOFF, S.; PETERS, D. 2000. Monitoring soil moisture helps refine irrigation management. *California Agriculture*, 54: 38-42.
- HSIAO, T. 1973. Plant response to water. *Ann Rev. Plant Physiol.* 1973. 24: 519-570
- 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, (2): 257-263.
- JONES, H.G. 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany* Vol. 55, N.º 407: 2427-2436.
- KUEHL, R.O. 2001. *Diseño de experimentos. Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación*. Internacional Thomson Editores S.A. México.
- LAVEE, S. 1996. *Biología y fisiología del olivo*. En: *Enciclopedia Mundial del Olivo*. Consejo Oleícola Internacional. 1 ed. Plaza & Janés Editores S.A. 61-110 pp.
- LAVEE, S.; HANOCH, E.; WODNER, M.; ABRAMOWITZ, 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.
- LIOTTA, M. 1999. *Los suelos en los valles de Tulum, Ullum y Zonda*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, San Juan.
- LO GULLO, M. y SALLEO, S. 1988. Different strategies of drought resistance in three Mediterranean sclerophyllous trees growing in the same environmental conditions. *New Phytol.* 108: 267-276.
- LORETO, F.; SHARKEY, T.D. 1990. Low humidity can cause uneven photosynthesis in olive (*Olea europea* L.) leaves. *Tree Physiology* 6: 409-415.
- MARTINELLI, F.; BASILE, B.; MORELLI, G.; D'ANDRIA, R.; TONUTTI, P. 2012. Effects of irrigation on fruit ripening behavior and metabolic changes in olive. *Scientia Horticulturae* 144: 201-207.
- MASMOUDI, C.C.; AYACHI, M.M.; GOUIA, M.; LAABIDI, F.; REGUAYA, S.B.; AMOR, A.O.; BOUSNINA, M. 2010. Water relations of olive trees cultivated under deficit irrigation regimes. *Scientia Horticulturae* 125: 573-578.
- MERT, C.; BARUT, E.; IPEK, A. 2013. Variation in flower bud differentiation and progression of floral organs with respect to crop load in olive. *Not Bot Horti Agrobo*, 41(1): 79-85.
- MEYER, W.S.; REICOSKY, D.C. 1985. Enclosing leaves for water potential measurement and its effect on interpreting soil-induced water stress. *Agricultural and Forest Meteorology*, 35: 187-192.
- MITTLER, R. 2006. Abiotic stress, the field environment and stress combination. *Trends in Plant Science*, Vol. 11, N.º 1: 15-19.
- MORENO, F.; ORTUÑO, M.F.; GARCÍA-ORLLANA, Y.; ALARCÓN, J.J.; CONEJERO, W.; NICOLÁS, E.; FERNÁNDEZ, J.E.; MARTÍN-PALOMO, M.J.; TORRECILLAS, A. 2007. Estado actual de la programación del riego en limonero mediante medidas del estado hídrico. *Ingeniería del Agua* Vol 14, N.º 3.
- MORIANA, A.; VILLALOBOS, F.J.; FERERES, E. 2002. Stomatal and photosynthetic responses of olive (*Olea europaea* L.) leaves to water deficits. *Plant, Cell and Environment* 25: 395-405.
- MORIANA, A.; ORGAZ, F.; PASTOR, M.; FERERES, E.; 2003. Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 128 (3): 425-431.
- MORIANA, A.; PÉREZ-LÓPEZ, D.; PRIETO, M.H.; RAMÍREZ-SANTA-PAU, M.; PÉREZ-RODRIGUEZ, J.M. 2012. Midday stem water potential as a useful tool for estimating irrigation requirements in olive trees. *Agricultural Water Management* 112: 43-54.

- ORGAZ, F.; FERERES, E. 1998. Riego. En: BARRANCO, D.; FERNADEZ-ESCOBAR, R.; RALLO, L., 1998. El cultivo del olivo. 2 ed. Mundi-Prensa, 259-280 pp.
- PACHECO, D.; OLGUÍN, A.; BUENO, L.; VITA, F.; CAPRARO, F. 2011. Plant and soil water status behavior under different irrigation strategies in cultivar "Arbequina" olive orchard. *Acta Horticulturae* 889: 311-316.
- PADILLA-DÍAZ, C.M.; RODRIGUEZ-DOMINGUEZ, C. M.; HERNANDEZ-SANTANA, V.; PEREZ-MARTIN, A.; FERNÁNDEZ, J.E. 2015. Scheduling regulated deficit irrigation in a hedgerow olive orchard from leaf turgor pressure related measurements. *Agricultural Water Management*. Article in press. N.º of Pages 10.
- PANIGATTI, J.L. 2010. Argentina 200 años, 200 suelos. Ed. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Buenos Aires.
- PASTOR, M.; CASTRO, J.; MARISCAL, M.J.; VEGA, V.; ORGAZ, F.; FERERES, E.; HIDALGO, J. 1999. Respuestas del olivar tradicional a diferentes estrategias y dosis de agua de riego. *Invest. Agr.: Prod. Prot. Veg.* Vol. 14 (3): 393-404.
- PERÉZ-LÓPEZ, D.; GIJON, M.C.; MORIANA, A. 2008. Influence of irrigation rate on the rehydration of olive tree plantlets. *Agricultural Water Management* 96: 1161-1166.
- PERÉZ-LÓPEZ, D.; GIJÓN, M.C.; MARIÑO, J.; MORIANA, A. 2010. Water relation response to soil chilling of six olive (*Olea europaea* L.) cultivars with different frost resistance. *Spanish Journal of Agricultural Research* 8 (3): 780-789.
- PEREZ-MARTÍN, A.; MICHELAZZO, C.; TORRES-RUIZ, J. M.; FLEXAS, J.; FERNÁNDEZ, J.E.; SEBASTIANI, L.; DÍAZ-ESPEJO, A. 2014. Regulation of photosynthesis and stomatal and mesophyll conductance under water stress and recovery in olive trees: correlation with gene expression of anhydrase and aquaporins. *Journal of Experimental Botany*. Vol. 65, 12: 3143-3156.
- PIERANTOZZI, P.; TORRES, M.; BODOIRA, R.; MAESTRI, D. 2013. Water relations, biochemical-physiological and yield responses of olive trees (*Olea europaea* L. cvs. Arbequina and Manzanilla) under drought stress during the preflowering and flowering period. *Agricultural Water Management* 125: 13-25.
- PIERANTOZZI, P.; TORRES, M.; LAVEE, S.; MAESTRI, D. 2014. Vegetative and reproductive responses, oil yield and composition from olive trees (*Olea europaea* L.) under contrasting water availability during the dry winter-spring period in central Argentina. *Annals of Applied Biology* 164: 116-127.
- POBLETE, A.G.; MINETTI, J.L. 1989a. Los mesoclimas de San Juan. Primera parte. Informe Técnico N.º 11. Centro de Investigaciones de San Juan. Universidad Nacional de San Juan.
- POBLETE, A.G.; MINETTI, J.L. 1989b. Los mesoclimas de San Juan. Segunda parte. Boletín N.º 4. Centro de Investigaciones de San Juan. Universidad Nacional de San Juan.
- 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*, Vol. 24:175-181.
- RALLO, L. 1998. Fructificación y Producción. En: BARRANCO, D.; FERNADEZ-ESCOBAR, R.; RALLO, L. 1998. El cultivo del olivo. 2 ed. Mundi-Prensa, 115-144 pp.
- RAPOPORT, H.; 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.
- RESTREPO-DÍAZ, H.; MELGAR, J.C.; LOMBARDINI, L. 2010. Ecophysiology of horticultural crops: an overview. *Agronomía Colombiana* 28 (1): 71-79.
- 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.
- ROUSSEAU, M.C.; BENEDETTI, J.P.; SEARLES, P.S. 2008. Leaf-level responses of olive trees (*Olea europaea*) to the suspension of irrigation during the winter in an arid region of Argentina. *Scientia Horticulturae* 115: 135-141.
- ROUSSEAU, M.C.; FIGUEROLA, P.I.; COREA-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.
- SANZ-CORTÉS, F.; MARTINEZ-CALVO, J.; BADENES, M.L.; BLEIHOLDER, H.; HACK, H.; LLÁCER, G.; MEIER, U. 2002. Phenological growth stages of olive trees (*Olea europaea*). *Ann. Appl. Biol.* 140: 151-157.
- SANCHEZ-BLANCO, M.J.; TORRECILLAS, A. 1995. Aspectos relacionados con la utilización de estrategias de riego. Riego Deficitario Controlado en cultivos leñosos. En: ZAPATA, M.; SEGURA, M. (Eds.). Riego Deficitario Controlado. Ed. Mundi Prensa. Madrid. 43-63.
- SEPULCRE-CANTÓ, G.; ZERCO-TEJADA, P.J.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J.C.; SOBRINO, J.A.; De MIGUEL, E.; VILLALOBOS, F.J. 2006. Detection of water stress in an olive orchard with thermal remote sensing imagery. *Agricultural and Forest Meteorology* 136: 31-44.
- SEARLES, P.S.; AGÜERO ALCARÁS, M.; ROUSSEAU, M.C. 2011. El consumo del agua por el cultivo de olivo (*Olea europaea* L.) en el noroeste de Argentina: una comparación con la Cuenca Mediterránea. *Ecología Austral* 21:15-28.
- SELLES VAN SCH, G.; FERREYRA, R.E. SELLES, I.M.; LEMUS, G.S. 2006. Efecto de diferentes regímenes de riego sobre la carga frutal, tamaño de fruta y rendimiento del olivo cv. Sevillana. *Agricultura Técnica* 66 (1): 48-56.
- SHAO, H.B.; CHU, L.Y.; JALEEL, C.A.; ZHAO, C.X. 2008. Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. *Comptes Rendus Biologies* 331: 215-225.
- STEFANOUDAKI, E.; CHARTZOULAKIS, K.; KOUTSAFTAKIS, A.; KOTSIFAKI, F. 2001. Effect of drought on qualitative characteristics of olive of cv Koroneiki. *Grasas y Aceite*. Vol. 52. Fasc. 3-4: 202-206.
- STEFANOUDAKI, E.; WILLIAMS, M.; CHARTZOULAKIS, K.; HARWOOD, J. 2009. Effect of irrigation on quality attributes of olive oil. *J. Agric. Food Chem.* 57: 7048-7055.
- STUDETO, P.; HSIAO, T.; FERERES, E.; RAES, D. 2012. Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. *FAO Riego y Drenaje* 66.
- TAGARELLI, S. 2011. La olivicultura en Argentina. Olivicultura. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Subsecretaría de Desarrollo de las Economías Regionales.
- 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.; MORELLI, G.; ALVINO, A. 2005. The effect of deficit irrigation on seasonal variations of plant water use in *Olea europaea* L. *Plant and Soil* 273: 139-155.
- VOSSSEN, P. 2007. Olive Oil: History, Production, and Characteristics of the World's Classic Oils. *Hort Science* Vol. 42(5): 1093-1100.
- XILOYANNIS, C.; DICHIO, B.; NUZZO, V.; CELANO, G. 1999. Defense strategies of olive against water stress. *Acta Horticulturae* 474: 423-426.