UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AGRONÓMICA
ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS

Utilización del potencial hídrico del tallo para el manejo del riego del olivar en seto: metodología y umbrales durante la primavera (brotación-endurecimiento del hueso) y el otoño (síntesis de aceite)

Tesis Doctoral

ANTONIO HUESO ÁLVAREZ
Ingeniero Técnico Agrícola
Máster en Olivicultura y Elaiotecnia

2020

Departamento de Producción Agraria

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AGRONÓMICA
ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS**

**Utilización del potencial hídrico del tallo para el manejo del
riego del olivar en seto: metodología y umbrales durante la
primavera (brotación-endurecimiento del hueso) y el otoño
(síntesis de aceite)**

Tesis Doctoral

ANTONIO HUESO ÁLVAREZ

Ingeniero Técnico Agrícola

Máster en Olivicultura y Elaiotecnia

Directora

MARÍA V. GÓMEZ DEL CAMPO GARCÍA-VALCÁRCEL

Dr. Ingeniero Agrónomo

2020

A mi hermana Teresa.

Mi gran apoyo.

*En tu interior está tu grandeza:
Déjala salir.
Cuéntale al mundo de lo que eres capaz.*

AGRADECIMIENTOS

A la Dr. María Gómez-del-Campo, directora de esta tesis, por toda su ayuda y consejos. Le agradezco su disponibilidad incondicional e inestimable apoyo y amistad durante el desarrollo de mi tesis. Gracias por haberme hecho participe en la colaboración de muchos proyectos, sin duda alguna siempre estaré agradecido.

A los compañeros del proyecto SENSOLEOVID, en concreto a María, Pilar, Juan y Adolfo, gracias también por transmitirme la pasión y visión de la investigación, espero tener la capacidad de incorporarlos en mi vida laboral.

A los miembros del tribunal de prelectura Inés Mínguez, Pilar Baeza y David Pérez por su ayuda en la mejora de la tesis.

A Eduardo por ayudarme tantas veces y siempre a cambio de nada. Espero y deseo aplicar todo lo que me enseñaste en mi vida laboral.

A Wang Jiwei y a Cesár por ayudarme, animarme y acompañarme en el trabajo de campo y laboratorio. Agradecerles sobre todo su tiempo, compañía y amistad, que hicieron de mi trabajo mas ameno y llevadero.

A Antonio, Anna, Andrés, Gema, Javier, Julián, María, Natalia, Letizia, Luz y Sebastián por ayudarme en la toma de datos en campo y laboratorio. Gracias por hacerme sentir en todo momento arropado por vosotros.

A mis amigos, Gonzalo, José Fernando, Gallardo, Sergio, Javi, José, Carlos, Antonio y Juan por darme ánimos y fuerza para nunca rendirme. Se lo afortunado que soy por tenerlos.

A toda mi familia China, gracias por las experiencias que viví allí fueron muy gratificantes y sin duda alguna me han aportado muchas cosas buenas tanto en lo laboral como en lo personal.

A mi familia, por apoyarme desde el primer momento que decidí comenzar esta andadura. Por ensañarme a ser fuerte y que todo es posible con esfuerzo y pasión. Gracias de corazón, sin su amor no lo hubiera logrado.

RESUMEN

El estado hídrico de los árboles se puede medir con diversos métodos. El más utilizado y fiable es el potencial hídrico del tallo (Ψ_{tallo}). Se mide introduciendo un brote con un par de hojas en una cámara de presión (Scholander). Se utiliza en experimentación, en el manejo del riego y para la determinación de los valores umbrales necesarios para el manejo del riego.

Actualmente no existe una metodología definida para la medida del Ψ_{tallo} en olivar en seto. Para ello se realizaron 6 experimentos en un olivar en seto de 'Arbequina', desarrollados en tres años (2016-2018). Se evaluaron diferentes efectos sobre el Ψ_{tallo} como: cubrir las hojas con una bolsa de aluminio antes de la medición, duración de esa cobertura, posición de las hojas cubiertas (sombra/sol) y la altura en el seto. También se evaluó el número mínimo representativo de muestra necesario para cada sector de riego. Los resultados revelan que el Ψ_{tallo} debe realizarse en hojas cubiertas al menos 1 hora. Las hojas deben ubicarse a la sombra y en la zona media del seto (0,85–1,70 m), ya que en la zona alta la variabilidad del Ψ_{tallo} es mayor. El Ψ_{tallo} varía diurnamente y se recomienda medir al mediodía solar. La medición se puede hacer en hojas de 1, 2 o 3 años sin efecto sobre el Ψ_{tallo} . En condiciones de alta hidratación, el efecto de estas prácticas tuvo mayor influencia en el Ψ_{tallo} que en condiciones de estrés. Para obtener un valor representativo de Ψ_{tallo} en un sector de riego, se deben cubrir 5 brotes en 5 árboles diferentes.

Las estrategias de riego deficitario buscan la reducción del riego, con un bajo efecto en la producción. Este déficit hídrico debe aplicarse teniendo en cuenta la sensibilidad en los distintos periodos fisiológicos del olivo. En esta tesis doctoral se evaluó el efecto de la reducción de las dosis de agua produciendo diferentes niveles de deshidratación de la planta en primavera (brotación-endurecimiento del hueso) y en otoño (síntesis de aceite).

La primavera, es un período crítico para la producción de aceituna y aceite debido a su impacto en el crecimiento vegetativo, floración y el desarrollo de la aceituna. A pesar de esto, apenas existen estudios sobre riego deficitario en este periodo. Por ello se realizó un experimento durante 5 años (2015-2019) en dos

parcelas de olivar en seto (C y L). Se estudió el efecto de los tratamientos de riego deficitario en primavera, desde el crecimiento de los brotes (abril-mayo) hasta el endurecimiento de hueso (principios de julio). Los parámetros evaluados fueron: el Ψ_{tallo} (medido en hojas cubiertas 1 hora, en la zona media del seto, a la sombra y al mediodía solar) crecimiento vegetativo, floración, fructificación, productividad del agua, características y producción de aceituna y aceite. Los tratamientos de control (C1 y L1) se regaron para mantener el bulbo húmedo cerca de la capacidad de campo durante toda la campaña de riego. Se establecieron tres tratamientos de riego deficitario durante este período en cada parcela. En la parcela C, los tratamientos C2, C3 y C4 recibieron 50, 25, 0% del agua aplicada a C1, mientras que en la parcela L, los tratamientos L2, L3 y L4 recibieron 40, 17, 0% de agua aplicada a L1. Los tratamientos de riego provocaron grandes diferencias en Ψ_{tallo} , que van desde -0,4 MPa a -5,0 MPa. Los resultados revelaron que la primavera es un período muy sensible al estrés hídrico a través de la reducción en el número de aceitunas, el componente más importante del rendimiento, pero también en el contenido final de aceite de la aceituna. Durante la floración, con una hidratación elevada (media del Ψ_{tallo} antes del riego > -1,0 MPa), los árboles desarrollaron más nudos, inflorescencias fértiles y aceitunas por inflorescencia, por lo tanto, hubo un mayor número de aceitunas. La producción de aceite se redujo significativamente cuando el Ψ_{tallo} en floración fue inferior a -1,5 MPa y se redujo a la mitad cuando el Ψ_{tallo} fue de -1,7 MPa. La máxima productividad del agua se logró en las plantas más hidratadas. Desde la floración hasta el endurecimiento de hueso, el Ψ_{tallo} podría reducirse a -1,8 MPa sin afectar la caída de aceituna, el tamaño de aceituna o la acumulación de aceite. El contenido de aceite de una aceituna en la cosecha estuvo altamente correlacionado con el peso seco de la aceituna en el endurecimiento de hueso. Durante floración no se recomienda realizar un déficit hídrico para controlar el exceso de vigor, ya que puede afectar al crecimiento vegetativo y a su vez repercute en la producción del año siguiente, por lo que se recomienda aplicar riego deficitario durante el endurecimiento de hueso, ya que aún hay crecimiento y la producción no se ve afectada.

En otro ensayo se estudió el efecto del riego deficitario en el otoño (final de agosto hasta final de octubre) en estos meses la aceituna sintetiza más del 80 % del

aceite. Se estableció un experimento en las mismas parcelas que el experimento de riego deficitario en primavera (C y L), durante tres campañas de riego sucesivas (2011-2013) para determinar el efecto de los tratamientos de riego durante la síntesis de aceite. Se evaluó el Ψ_{tallo} (medido en hojas cubiertas 1 hora, en la zona media del seto, a la sombra y al mediodía solar), características y producción de la aceituna, productividad del agua, crecimiento vegetativo, floración y fructificación del año siguiente. Los tratamientos de control (C1 y L1) se regaron para mantener el bulbo húmedo cerca de la capacidad de campo durante toda la campaña. Se establecieron tres tratamientos de riego deficitario en cada parcela. En la parcela C, los tratamientos C2, C3 y C4 recibieron 64, 38, 14% del agua aplicada a C1, mientras que en la parcela L, los tratamientos L2, L3 y L4 recibieron 71, 41, 18% de agua aplicada a L1. Los tratamientos produjeron diferencias significativas en el Ψ_{tallo} , fueron más bajas en la parcela C (valor medio de C4 -4,91 MPa) que L (L4 -2,58 MPa) debido a diferencias en la profundidad del suelo y a la distancia entre goteros. En las dos parcelas, los árboles estresados no se vieron significativamente afectados en términos de longitud del brote, floración, cuajado, abscisión del fruto y, en consecuencia, número de frutos. El contenido de aceite (% peso fresco) fue el parámetro menos sensible (umbral -4,11 MPa) con una relación lineal positiva entre el contenido de agua y aceite de una aceituna ($R^2 = 0,81$). La producción de aceituna fue más sensible al Ψ_{tallo} (umbral -1,82 MPa) que la producción de aceite (-2,21 MPa). La productividad máxima del agua se logró cuando el Ψ_{tallo} alcanzó -2,31 MPa. Nuestros resultados indican que Ψ_{tallo} debe mantenerse por encima de -2,21 MPa durante la síntesis de aceite para una producción máxima, pero se alcanzarán valores más altos de la productividad del agua en -2,31 MPa.

Esta tesis, contribuye, desde una perspectiva de manejo del riego de olivar en seto, por un lado, definiendo una metodología de medida de Ψ_{tallo} en olivar en seto y en segundo lugar, definiendo unos valores umbrales de riego en los periodos de primavera (brotación-endurecimiento del hueso) y otoño (síntesis de aceite). Estos umbrales propuestos para la programación del riego deben de complementarse con medidas de sensor de humedad del suelo. Los resultados obtenidos pueden ayudar a la hora medir el Ψ_{tallo} , reduciendo la variabilidad de la medida y permitiendo la

comparación de los valores medidos con otros trabajos, así como también la optimización del riego utilizando los umbrales para cada periodo estudiado.

Palabras claves: olivar en seto, potencial hídrico de tallo, riego deficitario controlado, manejo del riego, umbrales de riego.

SUMMARY

The water status of trees can be measured with various methods. The most used and reliable is the stem water potential (Ψ_{stem}). It is measured by introducing a shoot with a pair of leaves into a pressure chamber (Scholander). It is used in experimentation, in irrigation management and for the determination of the threshold values necessary for irrigation management.

Currently there is no defined methodology for measuring the Ψ_{stem} in olive orchards in hedgerows. For this, 6 experiments were carried out in an olive orchard in the 'Arbequina' hedge, developed in three years (2016-2018). Different effects on Ψ_{stem} were evaluated, such as: covering the leaves with an aluminum bag before the measurement, duration of this coverage, position of the covered leaves (shade/sun) and height in the hedge. The minimum representative sample number necessary for each irrigation sector was also evaluated. The results reveal that Ψ_{stem} should be done on covered leaves for at least 1 hour. The leaves should be located in the shade and in the middle of the hedge (0.85–1.70 m), since in the upper zone the variability of Ψ_{stem} is greater. Ψ_{stem} varies by day and it is recommended to measure at solar noon. The measurement can be made on 1, 2 or 3-year-old leaves with no effect on Ψ_{stem} . Under conditions of high hydration, the effect of these practices had a greater influence on Ψ_{stem} than under stress conditions. To obtain a representative value of Ψ_{stem} in an irrigation sector, 5 shoots must be covered in 5 different trees.

Deficit irrigation strategies seek to reduce irrigation, with a low effect on production. This water deficit must be applied taking into account the sensitivity in the different physiological periods of the olive tree. In this doctoral thesis, the effect of reducing the doses of water and producing different levels of dehydration of the plant in spring (sprouting-pit hardening) and in autumn (oil synthesis) was evaluated.

Spring is a critical period for olive and oil production due to its impact on vegetative growth, flowering, and olive development. Despite this, there are hardly any studies on deficit irrigation in this period. For this, an experiment was carried out for 5 years (2015-2019) in two olive orchards in hedge (C and L) cv. Arbequina.

The effect of deficit irrigation treatments in spring was studied, from shoot growth (April-May) to pit hardening (early July). The parameters evaluated were: the Ψ_{stem} (measured in covered leaves for 1 hour, in the middle of the hedge, in the shade and at noon) vegetative growth, flowering, fruiting, water productivity, characteristics and production of olives and oil. Control treatments (C1 and L1) were watered to keep the wet bulb close to field capacity throughout the irrigation season. Three deficit irrigation treatments were established during this period in each orchard. In orchard C, treatments C2, C3 and C4 received 50, 25, 0% of the water applied to C1, while in orchard L, treatments L2, L3 and L4 received 40, 17, 0% of water applied to L1. Irrigation treatments caused large differences in Ψ_{stem} , ranging from -0.4 MPa to -5.0 MPa. The results revealed that spring is a very sensitive period to water stress through the reduction in the number of olives, the most important component of yield, but also in the final oil content of the olive fruit. During flowering with high hydration (mean Ψ_{stem} before irrigation > -1.0 MPa), the trees developed more knots, fertile inflorescences and olives per inflorescence, therefore there were a greater number of olives. Oil production was significantly reduced when the flowering Ψ_{stem} was less than -1.5 MPa and was halved when the Ψ_{stem} was -1.7 MPa. The maximum water productivity was achieved in the most hydrated plants. From flowering to pit hardening, the Ψ_{stem} could be reduced to -1.8 MPa without affecting olive drop, olive size or oil accumulation. The oil content of an olive fruit at harvest was highly correlated with its dry weight at pit hardening. During flowering, it is not recommended to carry out a water deficit to control excess vigor, since it can affect vegetative growth and in turn affects the production of the following year, so it is recommended to apply deficit irrigation during pit hardening, since there is still growth and production is not affected.

On the other hand, the effect of deficit irrigation in autumn was studied, from the end of August to the end of October, in these months the olive synthesizes more than 80% of the oil. An experiment was established in the same orchards as the deficit irrigation experiment in spring (C and L), during three successive irrigation seasons (2011-2013) to determine the effect of irrigation treatments during oil synthesis. Ψ_{stem} (measured in covered leaves for 1 hour, in the middle of the hedge, in the shade and at solar noon), characteristics and production of the olive, water

productivity, vegetative growth, flowering and fruiting of the following year were evaluated. Control treatments (C1 and L1) were watered to keep the wet bulb close to field capacity throughout the season. Three deficit irrigation treatments were established in each orchard. In orchard C, treatments C2, C3 and C4 received 64, 38, 14% of the water applied to C1, while in orchard L, treatments L2, L3 and L4 received 71, 41, 18% of water applied to L1. The treatments produced significant differences in Ψ_{stem} , they were lower in orchard C (mean value of C4 -4.91 MPa) than L (L4 -2.58 MPa) due to differences in soil depth and the distance between drippers. In the two orchards, the stressed trees were not significantly affected in terms of shoot length, flowering, fruit set, abscission of the fruit and, consequently, number of fruits. The oil content (% fresh weight) was the least sensitive parameter (threshold -4.11 MPa) with a positive linear relationship between the water and oil content of an olive ($R^2 = 0.81$). Olive production was more sensitive to Ψ_{stem} (threshold -1.82 MPa) than oil production (-2.21 MPa). Maximum water productivity was achieved when the Ψ_{stem} was -2.31 MPa. Our results indicate that Ψ_{stem} should be maintained above -2.21 MPa during oil synthesis for maximum production, but higher values of water productivity will be reached at -2.31 MPa.

This doctoral thesis contributes, from a management perspective of olive orchard irrigation in hedge, on the one hand defining a methodology for measuring Ψ_{stem} in olive orchard in hedge and secondly defining threshold values of irrigation in the spring periods (sprouting-pit hardening) and autumn (oil synthesis). These proposed thresholds for irrigation scheduling must be complemented with soil moisture sensor measurements. The results obtained can help in measuring Ψ_{stem} , reducing the variability of the measurement and allowing the comparison of the measured values with other works, as well as the optimization of irrigation using the thresholds for each period studied.

Keywords: olive orchard in hedge, stem water potential, controlled deficit irrigation, irrigation management, irrigation thresholds.

ÍNDICE

1	Introducción	3
1.1	Situación del cultivo del olivo	3
1.2	Olivar en seto	4
1.3	Estrategias de riego deficitario. Optimización del riego en el olivar en seto.....	6
1.4	Medida del estado hídrico del árbol y umbrales de riego	8
1.5	Sensibilidad del olivo al déficit hídrico.....	12
1.6	Sensibilidad del olivo al déficit hídrico desde brotación hasta endurecimiento de hueso (primavera).....	13
1.7	Sensibilidad del olivo al déficit hídrico en síntesis de aceite (otoño)	14
1.8	Objetivos.....	16
2	Material y métodos	17
2.1	Ensayo 1. Metodología de medida del potencial hídrico de tallo en olivar en seto	17
2.1.1	Características de los ensayos	17
2.1.2	Clima y suelo	18
2.1.3	Experimentos y parámetros evaluados.....	21
2.1.3.1	Experimento 1. Hoja cubierta y sin cubrir	22
2.1.3.2	Experimento 2. Tiempo de cobertura	22
2.1.3.3	Experimento 3. Hoja cubierta al sol y a la sombra.....	22
2.1.3.4	Experimento 4. Altura en el seto	23
2.1.3.5	Experimento 5. Edad de la hoja.....	23
2.1.3.6	Experimento 6. Hora de medida.....	23
2.1.3.7	Experimento 7. Tamaño de muestra.....	23
2.2	Ensayo 2. Riego deficitario desde brotación hasta endurecimiento de hueso (primavera)	24
2.2.1	Características del ensayo	24
2.2.2	Clima y suelo	24
2.2.3	Descripción de los tratamientos de riego	27
2.2.4	Parámetros evaluados.....	28
2.2.4.1	Potencial hídrico de tallo	28
2.2.4.2	Crecimiento vegetativo y componentes del rendimiento.....	28
2.2.4.3	Seguimiento de maduración.....	29
2.2.4.4	Producción, número y característica de las aceitunas	29
2.3	Ensayo 3. Riego deficitario en el periodo de síntesis de aceite (otoño).....	30
2.3.1	Características del ensayo	30
2.3.2	Clima y suelo	30
2.3.3	Descripción de los tratamientos de riego	30
2.3.4	Parámetros evaluados.....	31

2.3.4.1	Potencial hídrico de tallo	31
2.3.4.2	Crecimiento de brotes y componentes del rendimiento	31
2.3.4.3	Seguimiento de maduración	31
2.3.4.4	Producción, número de aceitunas y característica de las aceitunas	32
2.4	Análisis estadístico	32
3	Resultados y discusión	34
3.1	Ensayo 1. Metodología de medida del potencial hídrico de tallo en olivar en seto	34
3.1.1	Condiciones ambientales	34
3.1.2	Experimentos	35
3.1.2.1	Experimento 1. Hoja cubierta y sin cubrir	35
3.1.2.2	Experimento 2. Tiempo de cobertura	37
3.1.2.3	Experimento 3. Hoja cubierta al sol y a la sombra	39
3.1.2.4	Experimento 4. Altura en el seto	41
3.1.2.5	Experimento 5. Edad de la hoja	44
3.1.2.6	Experimento 6. Hora de medida	45
3.1.2.7	Experimento 7. Tamaño de la muestra	47
3.2	Ensayo 2. Riego deficitario desde brotación hasta endurecimiento de hueso (primavera)	48
3.2.1	Condiciones ambientales	48
3.2.2	Riego aplicado	50
3.2.3	Estado hídrico de la planta	52
3.2.4	Crecimiento vegetativo y componentes del rendimiento	56
3.2.5	Seguimiento de maduración	63
3.2.6	Producción, número y característica de las aceitunas	68
3.3	Ensayo 3. Riego deficitario en el periodo de síntesis de aceite (otoño)	76
3.3.1	Condiciones ambientales	76
3.3.2	Riego aplicado	77
3.3.3	Estado hídrico de la planta	79
3.3.4	Crecimiento de brotes y componentes del rendimiento	80
3.3.5	Seguimiento de maduración	82
3.3.6	Producción, número de aceitunas y característica de las aceitunas	85
3.3.7	Productividad del agua	88
3.3.8	Relación entre el Ψ_{tallo} y las características de la aceituna y producción de la aceituna	90
4	Conclusiones	96
4.	Conclusions	98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de campo de los horizontes del suelo de la parcela A.....	19
Tabla 2. Descripción de campo de los horizontes del suelo de la parcela B.....	21
Tabla 3. Descripción de campo de los horizontes del suelo la parcela L.	26
Tabla 4. Valores medios de evapotranspiración de referencia diaria (ETO), déficit de presión de vapor (DPV) y temperatura máxima y mínima durante los días de medida.	35
Tabla 5. Potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallo}) a mediodía, medido en hojas cubiertas durante 1 hora previa a la medida y Ψ_{tallo} en hojas no cubiertas, coeficiente de variación y valor estadístico P. Los brotes se ubicaron en la zona media del seto (0.85-1.70 m) en la cara de la sombra de un olivar superintensivo. Valores medios de Ψ_{tallo} de 9 días de medida (n = 10).	36
Tabla 6 Valores medios de potencial hídrico (Ψ), tamaño de muestra, desviación estándar y valor P de los tratamientos evaluados en el experimento de hoja cubierta y sin cubrir...37	
Tabla 7. Potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallo}) a mediodía, medido en hojas cubiertas durante 1 y 2 horas previa a la medida, coeficiente de variación y valor estadístico P. Los brotes se ubicaron en la zona media del seto (0,85-1,70 m) en la cara de la sombra de un olivar en seto. Valores medios de Ψ_{tallo} de 9 días diferentes (n = 10).....	38
Tabla 8. Valores medios de potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallo}), tamaño de muestra, desviación estándar y valor P de los tratamientos evaluados en el experimento tiempo de cobertura.	39
Tabla 9. Potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallo}) a mediodía, medido en hojas cubiertas durante 1 hora, situadas en la zona media del seto, al sol y a la sombra, coeficiente de variación y valor estadístico P. Los brotes se ubicaron en la zona media del seto (0,85-1,70 m) Valores medios de Ψ_{tallo} de 9 días diferentes (n = 10).....	40
Tabla 10. Valores medios de potencial hídrico (Ψ_{tallo}), tamaño de muestra, desviación estándar y valor P de los tratamientos evaluados en el experimento de hoja cubierta al sol y a la sombra.	40
Tabla 11. Valores medios de potencial hídrico (Ψ_{tallo}), tamaño de muestra, desviación estándar y valor P de los tratamientos evaluados en el experimento de altura en el seto. .42	
Tabla 12. Potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallo}) a mediodía, medido en hojas de 1, 2 y 3 años de edad, cubiertas durante 1 hora previa a la medida, coeficiente de variación y valor estadístico P. Los brotes se ubicaron en la zona media del seto (0,85-1,70 m) en la cara de la sombra de un olivar superintensivo. Valores medios de Ψ_{tallo} de 5 días diferentes (n = 8).44	
Tabla 13. Valores medios de potencial hídrico (Ψ_{tallo}), tamaño de muestra, desviación estándar y valor P de los tratamientos evaluados en el experimento edad de la hoja.	45
Tabla 14. Potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallo}) medido a tres horas del día (10:00, 12:00 y 14:00, hora solar) en hojas ubicadas en la zona media del seto (0,85-1,70 m), las hojas fueron	

cubiertas 1 hora en el lado de la sombra, coeficiente de variación y valor estadístico P. Valores medios de Ψ_{tallo} de 5 días diferentes ($n = 8$).....46

Tabla 15. Valores medios de potencial hídrico (Ψ_{tallo}), tamaño de muestra, desviación estándar y valor P de los tratamientos evaluados en el experimento de hora de medida...46

Tabla 16. Potencial hídrico del tallo (Ψ_{tallo}) a mediodía, medido en hojas cubiertas durante 1 hora, ubicadas en la sombra y en la zona media del seto (0,85-1,70 m), tamaño de la muestra y coeficiente de variación medido en tres sectores de riego de un olivar superintensivo. Valores medios de Ψ_{tallo} de 5 días diferentes ($n=15$).48

Tabla 17. Características climáticas y dosis de riego aplicada en dos parcelas de ensayo con un tratamiento control (C1 y L1) y tres tratamientos de riego deficitario aplicado en primavera, en la Parcela C (C2, C3, C4) y en la Parcela L (L2, L3 y L4) desde el 1 de enero de 2015 hasta el 31 de diciembre de 2019.51

Tabla 18. Media de Ψ_{tallo} durante diferentes períodos fisiológicos: antes de la floración, floración, floración hasta endurecimiento y periodo experimental en un tratamiento control (C1) y tres tratamientos de riego deficitario aplicados en primavera en la Parcela C (C2, C3 y C4) durante los años 2015-2019 y promedio.55

Tabla 19. Media de Ψ_{tallo} durante diferentes períodos fisiológicos: antes de la floración, floración, floración hasta endurecimiento y periodo experimental en un tratamiento control (L1) y tres tratamientos de riego deficitario aplicados en primavera en la Parcela L (L2, L3 y L4) durante los años 2016-2019 y promedio.56

Tabla 20. Componentes del rendimiento en un tratamiento control (C1) y tres tratamientos de riego deficitario aplicado en primavera en la Parcela C (C2, C3 y C4) durante los años 2016-2019 y promedio.61

Tabla 21. Componentes del rendimiento en un tratamiento control (L1) y tres tratamientos de riego deficitario aplicado en primavera en la Parcela L (L2, L3 y L4) durante los años 2016-2019 y promedio.62

Tabla 22. Características de la aceituna en recolección, en un tratamiento control (C1) y tres tratamientos de riego deficitario aplicados en primavera en la Parcela C (C2, C3 y C4) durante los años 2015-2019 y promedio.....72

Tabla 23. Características de la aceituna en recolección, en un tratamiento control (L1) y tres tratamientos de riego deficitario aplicados en primavera en la Parcela L (L2, L3 y L4) durante 2019.73

Tabla 24. Producción de aceituna, aceite y productividad del agua, en un tratamiento control (C1) y tres tratamientos de riego deficitario aplicados en primavera en la Parcela C (C2, C3 y C4) durante 2015 – 2019.74

Tabla 25. Producción de aceituna, aceite y productividad del agua, en un tratamiento control (L1) y tres tratamientos de riego deficitario aplicados en la Parcela L (L2, L3 y L4) durante 2019.75

Tabla 26. Características climáticas y dosis de riego aplicada en dos parcelas experimentales con un tratamiento control (C1 y L1) y tres tratamientos de riego deficitario

aplicados en otoño en la Parcela C (C2, C3, C4) y en la Parcela L (L2, L3 y L4) desde el 1 de noviembre hasta el 30 de octubre de 2011, 2012 y 2013.78

Tabla 27. Crecimiento vegetativo y componentes del rendimiento en un tratamiento control (C1 y L1) y tres tratamientos de riego deficitario aplicados en otoño en cada parcela (C2, C3, C4 y L2, L3, L4).82

Tabla 28. Características de la aceituna en la recolección en dos parcelas, con un tratamiento control (C1 y L1) y tres tratamientos de riego deficitario aplicados en otoño en cada parcela (C2, C3, C4 y L2, L3, L4).87

Tabla 29. Producción de aceituna y de aceite y productividad de agua en dos parcelas, con un tratamiento control (C1 y L1) y tres tratamientos de riego deficitario aplicados en otoño en cada parcela (C2, C3, C4 y L2, L3, L4).88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vista detallada de la calicata de la parcela A, situada en el Carpio de Tajo.....	18
Figura 2. Vista detallada de la calicata de la parcela B, situada en el Viso de San Juan.....	20
Figura 3. Vista detallada de la calicata de la parcela L, situada en el Carpio de Tajo.	25
Figura 4. Relación del incremento de potencial hídrico (Ψ) de hoja sin cubrir frente a Ψ_{tallo} en hoja cubierta (expresado como % de Ψ) y Ψ_{tallo} de hoja cubierta. * El P-valor de la regresión fue significativo $\leq 0,05$	37
Figura 5. Incremento de Ψ_{tallo} en hoja cubierta al sol (expresado como % de Ψ) frente a Ψ_{tallo} en hoja cubierta a la sombra y Ψ_{tallo} en hoja cubierta a la sombra. * El P-valor de la regresión fue significativo $\leq 0,05$	41
Figura 6. Potencial hídrico del tallo (Ψ_{tallo}) a mediodía, medido en hojas ubicadas a diferentes alturas del seto ($H_0 = 0-0,85$ m, $H_1 = 0,85-1,70$ m, $H_2 = 1,70-2,10$ m). Las hojas se cubrieron durante 2 horas. Diferentes letras indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) dentro de las posiciones de altura de acuerdo con la prueba LSD. Valores medios de Ψ_{tallo} de 9 días diferentes ($n = 10$).....	43
Figura 7. Reducción de Ψ_{tallo} en hoja situada a la altura H_0 (A) e incremento de Ψ_{tallo} en hoja situada a la altura H_2 (B) (expresado como % de Ψ_{tallo}) frente a Ψ_{tallo} en hoja medida a la altura H_1 . * El P-valor de la regresión fue significativo $\leq 0,05$	43
Figura 8. Reducción de Ψ_{tallo} a las 10:00 (A) e incremento de Ψ_{tallo} a las 14:00 (B) (expresado como % de Ψ_{tallo}) frente a Ψ_{tallo} a las 12:00 hora solar.....	47
Figura 9. Lluvia mensual, evapotranspiración de referencia y temperaturas máximas y mínimas desde noviembre de 2015 hasta noviembre de 2019 en las dos parcelas de ensayo de riego deficitario aplicado en primavera situado en la Puebla de Montalbán (Toledo, España) ($39^\circ 48'N$, $04^\circ 27'O$, 516m de altitud).	49
Figura 10. Evolución del potencial hídrico de tallo (MPa), medido al mediodía en un tratamiento control (C1 y L1) y tres tratamientos de riego deficitario (C2, C3, C4 y L1, L2, L3) aplicados durante la primavera de 2015 a 2019 en la Parcela C (izquierda) y 2016 a 2019 en la Parcela L (derecha). *, Diferencias significativas con $P < 0,05$	54
Figura 11. Evolución de la longitud de los brotes (cm) en un tratamiento control (C1 y L1) y tres tratamientos de riego deficitario (C2, C3, C4 y L1, L2, L3) aplicados durante la primavera de 2016 a 2019 en la Parcela C (izquierda) y en la Parcela L (derecha). *, Diferencias significativas con $P < 0,05$	60
Figura 12. Relación entre la longitud del brote en endurecimiento de hueso (máximo % de C1 y L1 de cada año) y el Ψ_{tallo} en floración desde 2015 hasta 2019 en la Parcela C y desde 2016 hasta 2019 en la Parcela L. * El P-valor de la regresión fue significativo $\leq 0,05$	63
Figura 13. Evolución del peso seco de la aceituna (PS) y contenido de aceite (g/aceituna) en cuatro tratamientos de riego, aplicado durante la primavera de 2015 hasta 2019 en la	

Parcela C (izquierda) y desde 2016 hasta 2019 en la Parcela L (derecha). *, Diferencias significativas con $P < 0,05$ 66

Figura 14. Relación entre el contenido de aceite en recolección (g/aceituna) con el peso seco de la aceituna en endurecimiento de hueso (g/aceituna) desde 2015 hasta 2019 en la Parcela C y 2019 en la Parcela L. * El P-valor de la regresión fue significativo $\leq 0,05$ 67

Figura 15. Relaciones entre el PS y el contenido de aceite de la aceituna en endurecimiento de hueso (máximo % de C1 y L1 de cada año) y el Ψ_{tallo} desde floración hasta el endurecimiento hueso. Datos de 2015 hasta 2019 en la Parcela C y desde 2016 hasta 2019 en la Parcela L. * El P-valor de la regresión fue significativo $\leq 0,05$ 67

Figura 16. Relaciones entre el número de aceitunas y producción de aceite en recolección (máximo % de C1 y L1 de cada año) con el Ψ_{tallo} en floración. Datos de 2015 hasta 2019 en la Parcela C y 2019 en la Parcela L. * El P-valor de la regresión fue significativo $\leq 0,05$ 75

Figura 17. Lluvia mensual, evapotranspiración de referencia y temperaturas máximas y mínimas desde noviembre de 2010 hasta noviembre de 2013 en las dos parcelas de ensayo de riego deficitario aplicado en otoño de Puebla de Montalbán (Toledo, España). 77

Figura 18. Evolución del potencial hídrico de tallo (MPa), medido al mediodía en cuatro tratamientos de riego, aplicados en otoño en los años 2011, 2012 y 2013 en la Parcela C (izquierda) y Parcela L (derecha). *, Diferencias significativas con $P < 0,05$ 80

Figura 19. Evolución del contenido de aceite sobre PS (%) y en g/aceituna en cuatro tratamientos de riego aplicados en otoño en los años 2011, 2012 y 2013 en la Parcela C (izquierda) y Parcela L (derecha). *, Diferencias significativas con $P < 0,05$ 84

Figura 20. Relación entre el contenido de aceite de la aceituna y contenido de agua de la aceituna, durante el desarrollo de la aceituna, en cuatro tratamientos de riego aplicados en otoño en los años 2011, 2012 y 2013 en la Parcela C y la Parcela L. * El P-valor de la regresión fue significativo $\leq 0,05$ 84

Figura 21. Relaciones entre la productividad del agua de la aceituna y del aceite (% sobre el valor máximo en cada año) y el Ψ_{tallo} promedio, en 4 tratamientos de riego aplicados en el otoño en los años 2011, 2012 y 2013 en la parcela C y L. * El P-valor de la regresión fue significativo $\leq 0,05$ 89

Figura 22. Relaciones entre las características de la aceituna (% sobre el valor máximo en cada año) y el Ψ_{tallo} promedio en cuatro tratamientos de riego, aplicados en otoño en los años 2011, 2012 y 2013 en la Parcela C y L. El parámetro C es el valor umbral (Ψ_{tallo} , MPa) de la relación lineal. * El P-valor de la regresión fue significativo $\leq 0,05$ 92

Figura 23. Relaciones entre la producción de aceitunas y aceite (% sobre el valor máximo en cada año) y el Ψ_{tallo} promedio en cuatro tratamientos de riego, aplicados en otoño en los años 2011, 2012 y 2013 en la Parcela C y L. El parámetro C es el valor umbral (Ψ_{tallo} , MPa) de la relación lineal. * El P-valor de la regresión fue significativo $\leq 0,05$ 93

LISTA DE ABREVIATURAS

ABA	Ácido abscísico
CV	Coeficiente de variación
DPV	Déficit de presión de vapor
E	Error
ET _c	Evapotranspiración de cultivo
ET _o	Evapotranspiración de referencia
n	Tamaño de la muestra
NO-SE	Noroeste-Suroeste
N-S	Norte-Sur
E-O	Este-Oeste
PF	Peso fresco de la aceituna
PS	Peso seco de la aceituna
PA _{aceituna}	Productividad del agua de la aceituna
PA _{aceite}	Productividad del agua del aceite
RD	Riego deficitario
RDC	Riego deficitario controlado
S	Desviación estándar
SIAR	Servicio integral de asesoramiento al regante de Castilla la Mancha
Ψ	Potencial hídrico
Ψ_{hoja}	Potencial hídrico de hoja
$\Psi_{\text{raíz}}$	Potencial hídrico de raíz
Ψ_{tallo}	Potencial hídrico de tallo

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1 Introducción

1.1 Situación del cultivo del olivo

El cultivo del olivo surgió en la cuenca mediterránea, y poco a poco se fue extendiendo a otros lugares del mundo. En la actualidad la superficie de olivar en el mundo alcanza 12 millones de hectáreas. En España la superficie de olivar se estima en 2,6 millones de hectáreas, suponiendo un 22 % de la superficie mundial, esto supone que sea el primer país con más superficie (MAGRAMA, 2019, FAOSTAT, 2019).

La producción mundial de aceituna tiene una media anual de 17 millones de toneladas, de los cuales el 94 % corresponde a la de producción de aceite y el 6 % a la producción de aceituna de mesa. España al igual que lidera la superficie de olivo, también lo hace en aceituna y en consecuencia en aceite. La producción de aceituna de España es de 9,2 millones y de aceite 1,7 millones (MAGRAMA, 2019).

La mayoría de la superficie de olivar se cultiva en secano, en España esto supone el 78 % de la superficie total de olivar nacional. Esto hace que el agua sea un factor limitante del cultivo y como consecuencia de esto, se hayan utilizado sistemas de plantación de baja densidad ($70 \text{ olivos ha}^{-1}$), lo que se conoce como olivar tradicional. La recolección de este sistema se realiza de manera manual, golpeando las ramas hasta derribar los frutos en unas mantas. Para facilitar el derribo del fruto, en muchas ocasiones la recolección se hace con los frutos sobremaduros y a veces se recogen del suelo, esto hace que la calidad del fruto se vea mermada. Resumiendo, el olivar tradicional es un sistema de cultivo poco mecanizable y con altos costes de recolección (Rallo et al., 2013).

Después de la segunda guerra mundial, se produjo un éxodo del campo a la ciudad, este hecho hizo que la agricultura tuviera la necesidad de mecanizarse. En España, la intensificación de la olivicultura ocurre en los años 60, como consecuencia del despoblamiento de las zonas rurales (Rallo., 2013).

En 1961 el profesor Morettini propuso el tratado de Olivicultura, este se basa en incrementar el número de árboles por hectárea y en facilitar las nuevas técnicas de

mecanización (Morettini, 1972). Esta intensificación propuesta por el profesor dio lugar a dos sistemas de cultivo que conviven en la actualidad: el olivar intensivo y olivar superintensivo (Rallo et al., 2013).

El olivar intensivo se introdujo por la necesidad de obtener más rentabilidad al campo, introduciendo más plantas por hectárea y con una mayor mecanización del cultivo, siendo una alternativa al olivar tradicional. Las características de este sistema son: aprovechar al máximo el medio, acortar el periodo improductivo de la plantación, diseñar la plantación desde el punto de vista que puede ser mecanizable. La densidad de plantación es variable, puede ser de 200 a 400 olivos ha⁻¹, y con un marco de plantación de 5 x 5 (400 árboles/ha) o 7 x 7 m (204 árboles/ha) (Pastor et al., 2005).

1.2 Olivar en seto

A mediados de los 90, la olivicultura sufre una revolución, con la intensificación del olivar. El aumento del consumo del aceite de oliva, favoreció la expansión de la superficie de olivar en la cuenca mediterránea y en los países donde aún no se había implantado. La mecanización total del olivar en parte se debió a los costes de mano de obra. Con estas premisas mencionadas anteriormente surgió en la finca la Valonga, Binéfar (Huesca) un nuevo sistema de plantación. Este sistema de plantación ya fue propuesto por el profesor Morettini en 1961, pero no tuvo éxito, debido a los problemas con la mecanización de la cosecha. El marco de plantación de esta primera parcela experimental fue de 3 x 1,35 m, debido a la intensificación de las plantas, este nuevo sistema de cultivo se llamó superintensivo u olivar en seto.

Desde aquella primera plantación en Huesca, surgieron dos tipos de olivar en seto, adaptados a las cosechadoras cabalgantes que hay actualmente en el mercado. El primero son setos estrechos, con una altura de 2,5 m y 1,0-1,5 m de ancho, por lo tanto, se adaptaron a las maquinas vendimiadoras y se modificaron a las medidas del seto (Rius y Lacarte, 2015). La densidad de plantación de estos setos es alta (1200 -2000 árboles/ha). El segundo tipo de seto, tiene unas dimensiones más grandes que el primero (4,5 m de altura y 4,0 m de ancho), la densidad de plantación es de 250 a 500 árboles/ha (Connor et al., 2014). La recolección en este tipo de setos

es mediante una maquina cosechadora llamada “Colossus”, se desarrolló en Argentina para este tipo de setos (Ravetti, 2008). El olivar en seto supone una revolución en el cultivo del olivo porque la respuesta y el manejo del cultivo difiere mucho del olivar tradicional ($100 - 300$ árboles ha^{-1}) sin riego y en condiciones de baja precipitación (Connor et al., 2014).

En la actualidad la superficie alcanza las $100,000$ ha, suponiendo el 1% de la superficie total (Rius y Lacarte, 2015). El olivar en seto está basado en plantar más plantas por hectáreas (1.500 ha^{-1}) con una conducción en forma de seto. Los marcos de plantación son variables, dependiendo de las disponibilidades hídricas de la zona, la variedad y la latitud. La distancia entre planta puede ser de 1 o 2 m, y el ancho de calle de 3 a 7 m. El objetivo del olivar en seto es disminuir los costes de recolección, conseguir altas producciones en un periodo corto de tiempo y obtener casi en su totalidad un aceite de calidad.

La formación de los arboles es en un eje central, con una altura máxima de $2,5$ m, superior a esa altura, puede haber problemas de sombreamiento en las partes bajas del seto de la línea contigua, suponiendo una disminución de la productividad en dicha zona (Rallo et al., 2013). El seto debe de estar bien equilibrado para que la superficie foliar reciba la luz solar. El olivar en seto, al tener un sistema de conducción diferente al olivar tradicional e intensivo hay que elegir variedades de escaso vigor, precoces, poco alternantes y productivas. Las principales variedades que se utilizan son Arbequina, Arbosana, Koroneiki, Sikitita, Oliana y Toscana (Rius y Lacarte, 2015).

La orientación de las filas determina la iluminación recibida en la superficie foliar del seto. La más apropiada siempre que la topografía y los vientos dominantes lo permitan es Norte-Sur, ya que la planta maximiza la interceptación de luz solar (Rius y Lacarte, 2015).

En el olivar en seto después del tercer año de plantación se puede conseguir una producción superior a 2.000 kg/ha, en pocos años puede superar los 10.000 kg/ha, siempre y cuando se lleve a cabo un manejo adecuado del riego, intervenciones mínimas de poda y una correcta fertilización. A diferencia del olivar tradicional e

intensivo que tardan más en tener altas producciones debido al menor número de plantas por hectárea (Rius y Lacarte, 2015).

En la actualidad la máxima producción se alcanza entre los cuatro y cinco años de plantación (13.000-15.000 kg/ha), esta producción está por encima de los niveles de la rentabilidad (8.000 kg/ha). La inversión en las plantaciones en seto es elevada, pero debido a que se consigue altas producciones en un periodo corto de tiempo, se suele amortizar a los cinco o seis años.

1.3 Estrategias de riego deficitario. Optimización del riego en el olivar en seto

El olivo se adapta y es tolerante a la sequía, posee mecanismo de regulación de apertura y cierre de estomas, que permiten evitar la evaporación de la planta en periodos de déficit hídrico (Ferreles et al., 1996). En condiciones de extrema sequia, el olivo redujo el potencial hídrico a valores muy negativos (-8 MPa) (Ferreles et al., 1996). En otros cultivos como trigo o girasol en condiciones de estrés hídrico con un potencial hídrico de -5 MPa, los cultivos sufrieron una deshidratación total y marchitamiento irreversible. El olivo también es tolerante a la salinidad, y tiene una alta capacidad para crecer en suelos pobres (Ferreles et al., 2007). En zonas de baja precipitación, responde positivamente al riego (Connor, 2005). La aplicación de pequeñas dosis de riego en el olivar tiene una buena respuesta en el aumento del rendimiento, y en zonas donde la pluviometría es escasa se convierte en el factor de rendimiento más limitante (Ferreles et al., 2007). El olivar es un cultivo que no requiere grandes aportaciones hídricas, si aplicamos más de lo requerido puede dar lugar un exceso de vigor que causara una competencia lumínica con la fila de al lado (Rallo et al., 2013), para ello, hay que aplicar una estrategia que controle el crecimiento vegetativo (Connor et al., 2014). Moriana et al. (2003) observaron un incremento de la producción cuando aplicaron menos dosis de riego, pero disminuyó gradualmente cuando el aporte de agua se hizo para cubrir necesidades máximas (ETc 100%). La productividad del agua es mayor cuando los valores de la ETc son menores (Gucci et al., 2012).

La mayoría de la superficie de olivar en seto es de regadío, ya que el volumen de copa es grande y requiere una aplicación adicional de agua para satisfacer la transpiración y lograr una mayor rentabilidad. Para controlar el vigor del árbol, bien sea para que crezca más o para frenar el crecimiento y desarrollo según las necesidades, el riego puede ser una herramienta muy útil (Rius y Lacarte., 2015). A medida que aumenta la densidad de plantación, aumenta la superficie foliar y se incrementa la transpiración, por ello el agua disponible en la zona condicionará la densidad de plantación (Rallo et al., 2013).

En la cuenca mediterránea se encuentra la mayor zona de superficie de olivar, esta se caracteriza por la escasez de recursos hídricos. Por lo tanto, es necesario diseñar estrategias de riego deficitario (RD) para optimizar la cantidad de agua aplicada. Una buena estrategia de riego debe de tener en cuenta el efecto del déficit hídrico aplicado en la producción y calidad de aceite (Fernández y Moreno, 1999).

El RD es un tipo de estrategia que busca la optimización del riego durante las fases menos sensibles al estrés hídrico. Para ello hay que conocer la cantidad de agua que se puede reducir, basándose en la respuesta de los arboles al déficit hídrico y también utilizando instrumentos de medida del estrés hídrico que sean fiables (Cuevas et al., 2010). El estrés hídrico de una planta viene determinado por el estado hídrico, el cual se puede evaluar mediante el potencial hídrico o mediante otros indicadores de estado hídrico de las plantas. El potencial hídrico se mide con la cámara de presión tipo Sholander. El potencial hídrico depende de la cantidad de agua que extrae una planta por las raíces y por la transpiración de las hojas (Selles et al., 2006). Para diseñar las estrategias de RD hay que tener en cuenta una serie de factores: fisiología del olivo (conocer el ciclo del olivo en la zona donde se vaya a realizar el riego, resistencia a la sequía en algunos estados fenológicos), diseño de la plantación (densidad de plantación, sistema de conducción, variedad), el agua de riego (disponibilidad, salinidad), las características edáficas y las raíces, la climatología de la zona y la economía (producción, calidad, costes de producción).

La productividad del agua es la relación entre el rendimiento del cultivo y el agua consumida (precipitación + riego) para alcanzar ese rendimiento. La productividad tiene un papel importante en las estrategias de RD (Geerts y Raes, 2009).

El riego deficitario controlado (RDC) aplica una menor cantidad de agua que las necesidades del cultivo, en un período específico (Chalmers et al., 1981). Se desarrolló originalmente en los frutales de hueso, aplicaban menos agua que la evapotranspiración del cultivo (ETc) durante períodos específicos, sin provocar ningún efecto perjudicial en la producción (Chalmers et al., 1981). El RDC no tiene como finalidad incrementar la producción, sino mejorar la rentabilidad del cultivo, ya que no siempre la producción máxima significa máxima rentabilidad (Gómez del Campo et al., 2007). Varios autores observaron que las estrategias de RDC utilizan menos agua, pero se obtiene unas producciones similares o mayores (Fernández et al., 2013; Padilla-Díaz et al., 2018).

La mayoría de los ensayos sobre riego en olivar se han llevado a cabo en olivar tradicional o intensivo (Fernández y Moreno, 1999) pero debido a que la estructura de la copa es diferente, el olivar superintensivo necesita un manejo de riego distinto (Trentacoste et al., 2015). El primer experimento de RD en un olivar en seto fue publicado por Grattan et al. (2006).

1.4 Medida del estado hídrico del árbol y umbrales de riego

El potencial hídrico mide el estado energético del agua en un sistema, conocido como la energía del agua pura y libre (Campbell, 1985). El potencial hídrico se puede descomponer en varios tipos de potenciales: presión, osmótico y de gravedad, cada uno de ellos intervienen de manera específica. El potencial hídrico depende de la transpiración de la planta, del potencial hídrico del suelo y de la resistencia al movimiento del agua (García-Tejera et al., 2020). Se mide fácilmente con una cámara de presión (Scholander et al., 1965), cuya técnica consiste en aplicar una presión que va aumentando lentamente sobre las hojas o brotes cortados, hasta que aparece húmeda la zona de corte. La presión que se introduce en la cámara se logra mediante la inyección de nitrógeno. Esta presión aplicada es positiva y se marca en el manómetro, la presión positiva anula la negativa con la que el agua estaba en el interior de las hojas o brotes medidos (Botella y Campos 2005).

La medida del potencial hídrico de una hoja expuesta al sol se define como potencial hídrico de hoja (Ψ_{hoja}) El Ψ_{hoja} es recomendado por diversos autores para el uso en

la programación del riego (Turner, 1980; Fereres y Goldhamer, 1999). El potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallo}) es la medida de energía del agua retenida por la hoja. Shackel *et al* (1997) definió el Ψ_{tallo} como potencial de hojas no transpirantes y en equilibrio con el xilema tras llevar un tiempo embolsado. Este potencial tiene menor variabilidad y está bien relacionado con el crecimiento del árbol, del fruto y con la calidad en distintos tipos de suelos. El Ψ_{tallo} es un indicador muy sensible del estado hídrico en olivos jóvenes (Moriana y Fereres, 2002) y adultos (Fernández *et al.*, 2006; Moriana *et al.*, 2003) y se ha utilizado en diversos estudios de RDC (Moriana *et al.*, 2012; Trentacoste *et al.*, 2015; Marra *et al.*, 2016). Las mediciones de Ψ_{hoja} se hacen en hojas iluminadas, éstas son variables porque interfiere la conductancia de la hoja (Naor *et al.* 2001). Por ello, se recomienda medir en hojas sombreadas cerca del tronco, esta medida se denomina potencial hídrico del tallo (Ψ_{tallo}). Para la medida del Ψ_{tallo} las hojas se deben de cubrir con una bolsa de aluminio durante un tiempo suficiente para que se equilibre el Ψ_{hoja} con el Ψ_{tallo} (Levin, 2019). El potencial hídrico de tallo se considera como la medición estándar para determinar el estado hídrico de los árboles (Begg y Turner, 1970; Shackel *et al.*, 1997). Estos valores de Ψ_{tallo} son menos variables y más estables que el Ψ_{hoja} , además están mejor relacionados con el contenido de agua del suelo (McCutchan y Shackel, 1992; Santesteban *et al.*, 2019). Cuando se mide al final del invierno, se debe considerar que el Ψ_{tallo} puede estar condicionado por la baja temperatura del suelo (<6.5 °C), independientemente del contenido de agua del suelo y se puede observar un bajo Ψ_{tallo} , aunque la humedad del suelo sea alta (Centeno *et al.*, 2018).

En el manejo del riego, el potencial hídrico se puede medir en diferentes momentos del día. El potencial hídrico medido antes del amanecer se utiliza como sustituto del potencial hídrico del suelo (Boyer, 1995), en esta medida la transpiración de la planta es insignificante. En un día despejado, el potencial hídrico mínimo se alcanza al mediodía. En esta hora de medida los valores de potencial se estabilizan, ya que no hay tanta fluctuación, por ello es la hora de medida del Ψ_{tallo} recomendada. Shackel *et al.* (1997) observaron en unos estudios de riego deficitario que el Ψ_{tallo} medido a mediodía puede ser una guía para la programación del riego en perales, almendros, ciruelos y cerezos.

Surgen algunas preguntas cuando se mide el Ψ_{tallo} en un olivar en seto. Los cambios en la morfología de la raíz o del seto pueden alterar la resistencia al movimiento del agua. Se observaron cambios en las proporciones de raíz-brote en los árboles (Monkany et al., 2006). La baja conductancia hidráulica del olivo (Fernández y Moreno, 1999) puede afectar a la medición de las hojas según su posición en un seto, como se observó anteriormente en las plantas de tabaco (Begg y Turner, 1970), aunque en la vid Chone et al. (2001) no observaron grandes diferencias entre las medidas de las hojas con 1 m de diferencia de altura. La medición de Ψ_{tallo} se realiza en hojas cubiertas, por lo que surge una pregunta sobre la importancia de cubrirlas cuando las hojas se encuentran dentro de setos densos. Además, la duración de la cobertura de las hojas ha sido variable entre ensayos. Naor et al. (2006) cubrían brotes durante 90 minutos, mientras que Begg y Turner (1970) cubrían hojas de tabaco la tarde anterior a la medición. En vid, Chone et al. (2001) no observaron diferencias en el potencial de hojas cubiertas durante 1, 2 o 6 horas. Al mediodía, el Ψ_{tallo} es estable y las mediciones son menos variables, aun así, este breve período de cobertura de hoja reduce la cantidad de parcelas que se pueden monitorear. El olivo es un árbol perenne con hojas que persisten por más de 2 años. Dado que la edad puede determinar las propiedades hidráulicas de la hoja (Fernández et al., 1997) también puede afectar los valores del Ψ_{tallo} . El uso de Ψ_{tallo} para la programación del riego de un olivar comercial requiere el número mínimo representativo de muestras que dependerán de la sensibilidad y la variabilidad de las mediciones (Naor y Cohen, 2003; Intrigglia y Castel, 2004). Naor et al. (2006) observaron que el tamaño de muestra razonable ($n = 7$) permitió una variación del $\Psi_{\text{tallo}} \pm 0,15$ MPa en una parcela de manzanos.

Las estrategias de RDC se aplican mejor con los umbrales de riego, teniendo en cuenta la hidratación de la planta que controla muchos procesos fisiológicos (Hsiao, 1973). Para mantener la hidratación de las hojas alta, Fernández et al. (2011) y Padilla-Díaz et al. (2016) recomiendan mantener el Ψ_{tallo} por encima de -1,7 MPa. Marino et al., (2018) determinaron la respuesta fisiológica de la aceituna al estrés hídrico, determinando diferentes niveles de estrés: sin estrés (Ψ_{tallo} por encima de -2,0 MPa), estrés moderado (entre -2,0 y -3,5 MPa) y estrés elevado (por debajo de -3,5 MPa).

En los últimos años, se ha determinado el umbral de Ψ_{tallo} para la programación del riego del olivo en varias etapas fisiológicas con los correspondientes impactos en crecimiento vegetativo, producción y calidad del aceite. Trentacoste et al. (2019) observaron que manteniendo el Ψ_{tallo} entre -1,2 MPa y -1,7 MPa durante la primavera conseguían un buen control del seto sin exceso de crecimiento vegetativo. Moriana et al. (2012) recomendó un valor de -1,2 MPa antes del comienzo del endurecimiento de hueso. Durante el endurecimiento de hueso (julio en el hemisferio norte) el Ψ_{tallo} puede disminuir a -2,9 MPa sin afectar la producción (Gómez del Campo, 2013a) pero con un mayor contenido fenólico en el aceite (Gómez-del-Campo y García, 2013; Gucci et al., 2019). Más adelante en agosto, y durante la fase de síntesis de aceite (finales de verano y otoño), el Ψ_{tallo} debe mantenerse por encima de -2,21 MPa para una alta producción (Hueso et al., 2019) y un alto contenido fenólico (García et al., 2020).

Estos umbrales propuestos para el inicio de la programación del riego deben de complementarse con medidas de sensor de humedad del suelo. Ya que el Ψ_{tallo} indica en qué momento se debe iniciar el riego por haberse alcanzado un umbral de hidratación por debajo del cual se ve afectada la fisiología de planta, repercutiendo en la producción y en la calidad. Sin embargo, la duración del riego la debe indicar la medida de un sensor colocado en la máxima profundidad efectiva del perfil del suelo. Riegos superiores producen pérdidas por percolación, ya que las raíces de la planta no lo utilizaran.

García-Tejera et al. (2020) observaron que el Ψ_{tallo} integra, no solo la disponibilidad de agua en el suelo, sino también la resistencia existente en el movimiento de agua desde el suelo hasta las raíces, por tanto, en la medida del Ψ_{tallo} puede influir las características del suelo y el desarrollo de la copa. Por ello, la medida de Ψ_{tallo} podrá ser utilizada para manejo del riego cuando no existan resistencias al movimiento de agua debidas a cuestiones sanitarias o mecánicas, o climáticas (García-Tejera et al., 2020). En este sentido las medidas conjuntas de los sensores de humedad del suelo y Ψ_{tallo} permitirán detectar estas circunstancias. (García-Tejera et al., 2020).

1.5 Sensibilidad del olivo al déficit hídrico

El olivo es un cultivo con alta resistencia a la sequía, pero cuando se aplica un estrés hídrico severo durante el ciclo, puede afectar negativamente a la productividad (Barranco et al., 2017), principalmente en periodos estacionales que son sensibles al déficit hídrico influyendo en el crecimiento vegetativo, producción y calidad (Gucci et al., 2009).

Se ha observado que el ácido abscísico (ABA) sintetizado por las raíces cuando el contenido de agua en el suelo disminuye, provoca una disminución de la apertura de estomas. Este cierre de estomas provoca un descenso de la pérdida de agua por transpiración, sin que apenas afecte a la fotosíntesis.

En los ensayos de riego en olivar, se han identificado dos periodos sensibles al déficit hídrico. El primero, en primavera, desde la floración hasta el final de la caída de la aceituna, en este periodo ocurre muchos procesos fisiológicos: diferenciación floral, floración, cuajado y caída de la aceituna. El segundo periodo desde el final del verano hasta la recolección, cuando la mayoría del aceite se acumula en la aceituna, en este periodo la cantidad de riego puede afectar a la fotosíntesis y a la síntesis de aceite (Tognetti et al., 2006). Sin embargo, desde la caída de la aceituna hasta el comienzo de la síntesis de aceite (julio y primeras semanas de agosto en la zona mediterránea), se puede ahorrar agua reduciendo la cantidad de riego con una pequeña reducción de la producción de aceituna y aceite (Goldhamer, 1999; Moriana et al., 2003, Gómez del Campo, 2013a).

El crecimiento vegetativo del olivo, se considera uno de los procesos fisiológicos más sensibles a la sequía. La transpiración máxima se consigue cuando las necesidades hídricas son satisfechas, pero en el olivo no se recomienda el riego a necesidades totales, excepto en los primeros años en lo que se busca un mayor crecimiento de la copa o seto (Ruiz-Sánchez et al., 2010; Behboudian et al., 2011).

Un olivar que tiene un riego adecuado, garantiza un buen cuajado, desarrollo de la aceituna y aumenta la acumulación de aceite. Sin embargo, si el riego es excesivo, se produce un exceso de vigor en la planta que puede provocar una reducción de la inducción floral, de la acumulación de ácidos grasos y pueden aparecer

enfermedades como el repilo por el incremento de la humedad (Rius y Lacarte, 2015).

1.6 Sensibilidad del olivo al déficit hídrico desde brotación hasta endurecimiento de hueso (primavera)

La primavera se considera un período altamente sensible, ya que el estrés hídrico puede afectar a la campaña actual y a la siguiente si se produce una reducción del crecimiento vegetativo puede afectar la producción (Hartmann y Porlingis, 1957). Desde brotación (marzo) hasta la caída final de aceituna (principios de julio) se produce la mayoría de procesos fisiológicos del olivo que determinan el número de aceitunas. Diversos autores observaron disminución en el crecimiento vegetativo causado por el déficit hídrico en muchas especies entre ellas olivo (Girona et al., 2001). Esta disminución del crecimiento causa árboles más pequeños, de manera que puede reducir el vigor en plantaciones de alta densidad, que en ocasiones es recomendable (Rius y Lacarte. 2015).

En la primavera se determina el número de aceitunas y, en consecuencia, la producción: diferenciación floral, floración, cuajado y caída de aceituna. El riego deficitario aplicado en este periodo tiene un gran impacto ya que puede reducir la producción final a través del efecto sobre número final de aceitunas (Pastor et al., 2007).

Después de la latencia invernal, las yemas axilares reinician el crecimiento y comienza la diferenciación de la inflorescencia (Lavee, 1996; De la Rosa et al., 2000), esta dura de 2 o 3 meses hasta que comienza el desarrollo de las flores (De la Rosa et al., 2000; Cuevas y Polito, 2004). Durante este período se define la proporción de flores imperfectas por aborto pistilar (Reale et al., 2009). El agua y el estado nutricional determinarán no solo la cantidad de inflorescencia y flores (Hartmann y Panetsos, 1961) sino también la proporción de flores imperfectas (Uriu, 1960). Rapoport et al. (2012) observaron que el déficit hídrico durante 10 semanas antes de plena floración afecta a la estructura de la inflorescencia y a la calidad de la flor. Durante el proceso de endurecimiento de hueso, el estrés hídrico reduce el tamaño

del hueso (Lavee, 1986) y el tamaño de la aceituna en recolección (Rapoport et al., 2004).

En la zona centro de España, el endurecimiento de hueso se produce entre la primera y la tercera semana de julio, al mismo tiempo que finaliza la caída de aceituna (Gómez del Campo, 2013a; Hueso et al., 2019).

En la actualidad hay pocos estudios de riego deficitario en primavera, dado que la cuenca mediterránea, se caracteriza por ser lluviosa (Iniesta et al., 2009). Palese y et al. (2010) hicieron un estudio en olivar intensivo, y observaron que el crecimiento de los brotes se redujo en condiciones de déficit hídrico, pero el rendimiento solo se redujo en años secos. Pierantozzi et al. (2014) en una parcela de olivar tradicional, observaron que el riego deficitario aplicado en 4 meses antes de la floración, redujo el crecimiento vegetativo, las inflorescencias y el número de aceitunas. Hernández-Santana et al. (2017) en una parcela de olivar en seto 'Arbequina' observaron que el riego deficitario en primavera redujo el área foliar y el rendimiento de aceite. Finalmente, un estudio reciente de Trentacoste et al. (2019) en 'Arbosana' aplicaron un riego deficitario desde la primavera hasta principios del verano y observaron que las estructuras de inflorescencias no se vieron afectadas por el déficit hídrico, pero el número de aceitunas por inflorescencias se redujo

1.7 Sensibilidad del olivo al déficit hídrico en síntesis de aceite (otoño)

En la zona centro de España más del 80% del aceite se acumula desde finales del verano hasta la recolección en un olivar en seto de 'Arbequina' (Gómez-del-Campo, 2013a). Al final del endurecimiento del hueso, el crecimiento de la aceituna aumenta bruscamente a medida que las células del mesocarpio se expanden, este proceso predomina en la determinación del tamaño final de la aceituna (Gucci et al., 2009). Es durante esta fase, cuando comienza la biosíntesis de aceite en las células parenquimáticas del mesocarpio, al principio la síntesis se produce lentamente durante 4 semanas (Tombesi, 1994), pero luego la acumulación es más intensa durante el verano hasta que el frío del otoño restringe la actividad fotosintética (García Martos y Mancha, 1992).

Para estudiar el efecto déficit hídrico durante el periodo de síntesis de aceite, habría que aplicar un RDC, basado en unos umbrales de Ψ_{tallo} desde finales del verano hasta la recolección, cuando ETo es mayor, ya que se puede optimizar el uso del agua. Los resultados de los diferentes estudios son variables, la sensibilidad de la síntesis de aceite al déficit hídrico, se encuentra con una definición incompleta de los valores de umbral de Ψ_{tallo} . Aunque podemos considerar que este periodo es sensible al déficit hídrico pues produce una reducción del tamaño de la aceituna y en consecuencia una menor producción (Girona et al., 2004, Hueso et al., 2019).

Diversos autores estudiaron el efecto del déficit hídrico en este periodo. Tognetti et al. (2006) en 'Frantoio' y 'Leccino', observaron que la producción de aceite estaba relacionada linealmente con la cantidad de riego desde agosto hasta principios de octubre. Mientras que Gucci et al. (2007), también en 'Leccino', observó una reducción en el contenido de aceite a medida que el Ψ_{tallo} disminuyó durante el verano-otoño de -1,5 MPa a -3,5 MPa. Gómez-del-Campo. (2013a) observó que la producción de aceite disminuyó en una parcela de olivar en seto de 'Arbequina', cuando el Ψ_{tallo} estaba inferior a -2,0 MPa en agosto. Sin embargo, en un envelascosayo, la producción de aceite no se vio afectada cuando la restricción de agua no fue severa (Fernández et al., 2013).

1.8 Objetivos

Los objetivos principales de esta tesis fueron:

1. Definir una metodología de medida del Ψ_{tallo} , en la que se recojan todos los aspectos de medida como: cobertura de la hoja, posición de la hoja, edad de la hoja, hora de medida y tamaño de la muestra; con el objetivo de desarrollar un protocolo de medida del Ψ_{tallo} para el olivar superintensivo.
2. Evaluar si el riego deficitario podría aplicarse con éxito en el período que va desde brotación hasta endurecimiento de hueso de acuerdo con un valor de umbral de Ψ_{tallo} . Con este fin, se impusieron tres regímenes de riego y un tratamiento control en dos parcelas diferentes, para obtener una amplia gama de respuestas del Ψ_{tallo} y cuantificar su efecto sobre el crecimiento vegetativo, floración, producción de aceituna y aceite y características de la aceituna.
3. Evaluar si el riego deficitario podría aplicarse con éxito en el período de la síntesis de aceite de acuerdo con un valor de umbral de Ψ_{tallo} que puede establecerse para la producción máxima. Con este fin, se impusieron tres regímenes de riego y un tratamiento control en dos parcelas diferentes, para obtener una amplia gama de respuestas del Ψ_{tallo} y cuantificar su efecto sobre el crecimiento vegetativo, floración, producción de aceituna y aceite y características de la aceituna.

CAPÍTULO II: MATERIAL Y MÉTODOS

2 Material y métodos

En este apartado se recoge toda la información relativa de las características de los tres ensayos, las características climáticas y edáficas de la zona, así como protocolo experimental llevado a cabo y los parámetros evaluados. Se han realizado tres ensayos para definir por un lado la metodología de medida del potencial hídrico de tallo en olivar en seto (Ensayo 1), evaluar el efecto del riego deficitario desde brotación hasta endurecimiento de hueso (Ensayo 2) y evaluar el efecto del riego deficitario en el periodo de síntesis de aceite (Ensayo 3). Los tres ensayos se han llevado a cabo en un olivar en seto de la zona centro de España.

2.1 Ensayo 1. Metodología de medida del potencial hídrico de tallo en olivar en seto

2.1.1 Características de los ensayos

Se establecieron varios ensayos en dos parcelas de olivos (*Olea europea*) de la variedad Arbequina “Las Navas” (Parcela A) y “El Viso de San Juan” (Parcela B) durante 2016, 2017 y 2018. Ambas parcelas se encuentran en la meseta central de Castilla, en Toledo (España).

La Parcela A, tiene una superficie de 20 ha y está ubicada en La Puebla de Montalbán (Toledo) (39° 48' N, 4° 27' O; 516 msnm), tiene una pendiente del 5 %. Se plantó en 1997, con un marco de plantación de 4 x 2 m (1.250 ha⁻¹) y la orientación de las filas es NO-SE. El riego se aplicó con goteros de caudal 2,2 L/h, con una separación entre goteros de 0,60 m y con un número de goteros por árbol de 3. La Parcela B, tiene una superficie de 13 ha y está ubicada en El Viso de San Juan (Toledo) (40° 8' N, 4° 1' O; 566 msnm), tiene una pendiente del 3 %. Se plantó en 2010, con un marco de plantación de 6 x 1,5 m (1027 ha⁻¹) y la orientación de las filas es N-S. El riego se aplicó con goteros de caudal 3,8 L/h, con una separación entre goteros de 0,75 m y con un número de goteros por árbol de 2.

En ambas parcelas se aplicó fertilizantes mediante fertirrigación durante la campaña de riego de acuerdo con los análisis de nutrientes de las hojas realizados cada año en julio. El control de malas hierbas se llevó a cabo con un herbicida no

residual. La poda fue mecánica y manual para la Parcela A, manteniendo las dimensiones del seto 2,1 m de alto y 1,1 m de ancho. Para la Parcela B, la poda fue manual, manteniendo las dimensiones del seto 2,0 m de alto y 1,0 m de ancho.

2.1.2 Clima y suelo

La meseta central se caracteriza por tener una baja precipitación (promedio anual de 395 mm), una alta evaporación (promedio anual de 1.180 mm) y un largo período con heladas (noviembre a marzo). Cerca de las parcelas se encuentra una estación meteorológica del SIAR (Servicio Integral de Asesoramiento al Regante de Castilla la Mancha) que proporcionan la precipitación diaria, dirección y velocidad del viento, temperatura y humedad.

El suelo de la Parcela A, tiene baja profundidad efectiva (40-60 cm) (Figura 1) y baja capacidad de retención del agua. Se clasifica dentro del orden Haploxeralf típico, con una litología de arcosas, una pedregosidad del 2% y una rocosidad del 0%. La clasificación se ha realizado según Soil Taxonomy USDA, (2003).

Figura 1. Vista detallada de la calicata de la parcela A, situada en el Carpio de Tajo

El estudio del perfil del suelo y la toma de muestras del mismo está basado en la diferenciación e identificación de los horizontes que lo forman. La diferenciación de los horizontes deberá basarse, fundamentalmente, en: el color, la pedregosidad, el grado de presencia de raíces o la ausencia de ellas, y la estructura de las diferentes capas (Tabla 1).

Tabla 1. Descripción de campo de los horizontes del suelo de la parcela A.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ap Ochríco	0-20	<ul style="list-style-type: none"> - Límite topográfico: Irregular neto - Color (Munsell): (7,5YR5/4) en seco, (7,5YR4/3,5) en húmedo - Textura: Arcillosa - Elementos gruesos: Muy abundante. - Estructura: Deteriorada por laboreo - Raíces: Frecuentes, finas y medias - Relación HCl-10%: Positiva
Bt Argílico	20-40	<ul style="list-style-type: none"> - Color (Munsell): (7,5YR3/4) en seco, (7,5YR5, 5/2,5) en húmedo - Textura: Arcillosa - Estructura: Tipo: Prismática - Compactación, poros y grietas: posee poros y grietas rellenas de arcillas - Raíces: Frecuentes, finas y medias Relación HCl-10%: Positiva
CB	40-60	<ul style="list-style-type: none"> - Color (Munsell): (10YR3/4) en seco, (10YR4/3) en húmedo - Textura: Franco arcillo-arenosa - Estructura: Tipo: Prismática - Raíces: pocas raíces, grandes - Relación HCl-10%: Positiva
C	60-115	<ul style="list-style-type: none"> - Moteados: Vetas de arcilla (5YR6/4) en seco, (5YR5/3,5) en húmedo - Textura: Franco arcillo-arenosa - Estructura: Masiva - Raíces: no hay

Descripción de la formación del tipo de suelo en los horizontes

- Ap: horizonte mineral arado.
- Bt: horizonte mineral con acumulación de arcilla fluvial. Este horizonte representa la migración de la arcilla de horizontes superficiales a horizontes profundos.
- CB: horizonte de transición, de forma que sus propiedades se mezclan y resulta difícil inclinarse por uno de ellos. Se denominan por las letras de ambos horizontes, apareciendo en primer lugar la letra del horizonte al que más se parece.
- C: capas constituidas por material original más o menos transformado.

El suelo de la Parcela B, tiene alta profundidad efectiva (78 cm) (Figura 2) y alta capacidad de retención del agua. Se clasifica dentro del orden Haploxeralf típico, con una litología de arenas ocasionalmente con cantos (terrazza medio), una pedregosidad del 5%. La clasificación se ha realizado según Soil Taxonomy USDA, (2003).

Figura 2. Vista detallada de la calicata de la parcela B, situada en el Viso de San Juan

Tabla 2. Descripción de campo de los horizontes del suelo de la parcela B

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ap Ochríco	0-30	<ul style="list-style-type: none"> - Límite topográfico: Irregular neto - Color (Munsell):(10IR 5/6) en seco, (10IR4/6) en húmedo - Textura: Franco - Elementos gruesos: no presenta - Estructura: sin estructura - Compactación, poros, grietas: pocos poros compactos - Consistencia: desmenuzable (húmedo), muy duro (seco), no plástico (mojado) - Raíces: Si
Bt Argílico	30-84	<ul style="list-style-type: none"> - Color (Munsell):(10IR4/4) en seco, (10IR5/4) en húmedo - Textura: Arcillosa - Textura: Arcillosa - Estructura de tipo prismática grande y muy desarrollada - Compactación, poros, grietas: poroso - Consistencia: desmenuzable (húmedo), duro (seco), plástico-adherente (mojado) - Raíces hasta 72 cm
Btk	84-1,25	<ul style="list-style-type: none"> - Color (Munsell):(10IR 3/4) en seco, (10IR 4/4) en húmedo - Textura: Arcillosa - Elementos gruesos: No presenta - Compactación, poros, grietas: poroso - Consistencia: duro (seco), plástico-adherente (mojado) - No presenta raíces

Descripción de la formación del tipo de suelo en los horizontes (Tabla 2):

- Ap: horizonte mineral arado.
- Bt: horizonte mineral con acumulación de arcilla fluvial. Este horizonte representa la migración de la arcilla de horizontes superficiales a horizontes profundos.
- Btk: horizonte mineral con acumulación iluvial de arcilla silicatada (t) y acumulación pedogénica de carbonatos (k).

2.1.3 Experimentos y parámetros evaluados

El potencial hídrico del tallo (Ψ_{tallos} , MPa) se midió en brotes apicales al mediodía (11:30-12:30 hora solar) con una cámara de presión (Soil Moisture Equip., Santa Bárbara, CA, EE. UU.). La tasa de aumento de la presión dentro de la cámara de

presión fue de aprox. $0,03 \text{ MPa.s}^{-1}$ (Naor y Peres, 2006). Se diseñaron varios experimentos para determinar la metodología de otros aspectos, y en cada uno de los experimentos el parámetro evaluado fue el Ψ_{tallo} .

2.1.3.1 Experimento 1. Hoja cubierta y sin cubrir

En 2016, se llevó a cabo un experimento en la Parcela A, para responder a la pregunta si era necesario cubrir los brotes con una bolsa de aluminio para medir el Ψ_{tallo} . Para ello se midió el Ψ_{tallo} a mediodía en las hojas de la cara sombreada del seto, se cubrieron con una bolsa de aluminio 1 hora antes de hacer la medida a mediodía solar y se hizo lo mismo sin cubrir hojas. Los brotes tenían hojas de ese año y estaban ubicadas en la zona media del seto (0,85-1,7 m). Se realizó una medida de Ψ_{tallo} en hoja cubierta y sin cubrir en arboles individuales, con un total de 10 árboles seleccionados. Esta operación se hizo 4 días en julio y se repitió el mismo experimento en septiembre durante 5 días. Con el fin de tener un amplio rango de Ψ_{tallo} se aplicó un riego de 8 horas el 18/07/2016 y el 31/08/2016, después de estos días se cortó el riego. Las medidas experimentales se realizaron los días 19, 21, 22 y 23/07/2016 y 1, 3, 5, 6 y 7/09/2016.

2.1.3.2 Experimento 2. Tiempo de cobertura

En 2016, en la Parcela A, se hizo un experimento en los mismos días experimentales y en la misma parcela del Experimento 1. Para ello se midió el Ψ_{tallo} a mediodía en las hojas cubriéndolo con una bolsa de aluminio durante 1 y 2 horas antes de hacer la medida a mediodía solar.

2.1.3.3 Experimento 3. Hoja cubierta al sol y a la sombra

En la misma parcela y año que el Experimento 1, se llevó a cabo un ensayo para medir el Ψ_{tallo} en hoja cubierta en la parte del seto al sol y hoja cubierta en la sombra. Para ello se embolsaron brotes al sol y a la sombra durante 2 horas antes de la medida a mediodía solar. El resto de aspecto de la medida fueron los mismos que en el Experimento 1. Los días experimentales y el número de árboles seleccionados fueron los mismos que en el ensayo 1 y 2.

2.1.3.4 Experimento 4. Altura en el seto

En los mismos días experimentales y en la misma parcela del Experimento 1, se realizaron medidas de Ψ_{tallo} a tres alturas del seto H0 (0–0,85m), H1 (0,85–1,7m) y H2 (1,7–2,1 m), la medida fue a mediodía, en brotes de 1 año y previamente cubiertos durante 2 h, esto se repitió en 10 árboles en julio y septiembre.

2.1.3.5 Experimento 5. Edad de la hoja

En 2017 en la Parcela A, el riego se cortó en 10 árboles después de aplicar un riego de 8 horas el 18/07/2017. El Ψ_{tallo} se midió a mediodía en tres brotes por árbol con hojas de 1, 2 y 3 años. Los brotes fueron cubiertos durante 1 hora y estaban ubicados en la zona media del seto (0,85–1,70 m) de la cara sombreada. Los días de medida del Ψ_{tallo} fueron el 19, 21, 24, 26 y 28/07/2017.

2.1.3.6 Experimento 6. Hora de medida

En los mismos días y árboles del Experimento 3, el Ψ_{tallo} se midió a las 10:00, 12:00 y 14:00 hora solar en brotes de 1 año, previamente cubiertos durante 1 hora y ubicados a una altura del seto de 0,85-1,70 m.

2.1.3.7 Experimento 7. Tamaño de muestra

En 2018 en la Parcela B, el riego se detuvo el 30/07/2018 en tres sectores, cada uno de 3 ha. Se midió Ψ_{tallo} en 15 árboles (un muestreo por árbol) en cada sector el 31/07/2018 y los días 2, 4, 6 y 8/08/2018. Los 15 arboles de medida de cada sector se encontraban en tres filas diferentes. Las mediciones se realizaron en brotes apicales de hojas de 1 año de edad, previamente cubiertas durante 1 h, y ubicadas en el lado sombreado del seto a 0,85-1,70 m de altura. En este experimento el parámetro evaluado fue en número de muestras (n).

2.2 Ensayo 2. Riego deficitario desde brotación hasta endurecimiento de hueso (primavera)

2.2.1 Características del ensayo

Se establecieron dos ensayos entre 2015 y 2019 en dos parcelas cercanas de olivar superintensivo (*Olea europaea* L. 'Arbequina'), “Cantarranas” (Parcela C) y “Las Cañas” (Parcela L) ambas ubicadas en La Puebla de Montalbán, (Toledo). La parcela C (39° 48' N, 4° 27' O; 516 msnm) se encuentra a unos 300 m del ensayo de la Parcela A del Ensayo 1. Se plantó en 1997, con un marco de plantación de 4 x 2 m (1.250 oliva ha⁻¹), y orientación de las filas E - O. La parcela L (39° 49' N, 4° 26' O, 466 msnm) se plantó en 2001, con un marco de plantación de 4 x 2 m (1.250 olivos ha⁻¹) y orientación de las filas N-S.

2.2.2 Clima y suelo

La climatología, el control de malas hierbas, la poda y la fertilización de los ensayos C y L son los mismos que los referidos en el Ensayo 1.

El suelo de la Parcela C tiene las mismas características que el suelo de la Parcela A, descrito anteriormente en el Ensayo 1.

El suelo de la Parcela L, tiene alta profundidad efectiva (68 cm) (Figura 3) y alta capacidad de retención del agua. Se clasifica dentro del orden Haploxeralf típico, con una litología de arcosa, una pedregosidad del 2% y rocosidad del 0%. La clasificación se ha realizado según Soil Taxonomy USDA, (2003) (Tabla 3).

Figura 3. Vista detallada de la calicata de la parcela L, situada en el Carpio de Tajo.

Tabla 3. Descripción de campo de los horizontes del suelo la parcela L.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-18	<ul style="list-style-type: none"> - Color (Munsell): (10YR 6/4) en seco - Textura: franca. Bajo contenido de materia orgánica bien humificada - Elementos gruesos: aislados (1-2%) de caliza angulosa - Estructura: subangular fina moderada, abundantes poros - Raíces: Frecuentes, finas y medias
K	18-38	<ul style="list-style-type: none"> - Color (Munsell): (10YR 8/1) en seco, - Textura: franco-arenosa - Estructura: Tipo: masiva - Elementos gruesos: inapreciables - Raíces: muy pocas finas y medias
C1	38-60	<ul style="list-style-type: none"> - Color (Munsell): (10YR 6/4) en seco - Textura: arenosa a arenosa franca - Estructura: Tipo: masiva - Elementos gruesos: aislados (1-2%) de cuarcita rodada. - Raíces: muy pocas (menos que en el horizonte suprayacente) finas
2C2	60-68	<ul style="list-style-type: none"> - Color (Munsell): (10YR 7/4) en seco - Textura: arenosa franca a franco arenosa - Estructura: Tipo: masiva - Elementos gruesos: frecuentes (20%) de cuarcita angulosa y semiangulosa, predominando los diámetros entre 3 mm y 5 cm - Raíces: inapreciables
3C3k	68-+105	<ul style="list-style-type: none"> - Color (Munsell): (10YR 7/2) en seco - Textura: franco-arenosa - Estructura: Tipo: masiva - Elementos gruesos: no se aprecian - Raíces: no se aprecian

2.2.3 Descripción de los tratamientos de riego

En la Parcela C se estableció un ensayo de riego en la primavera del año 2015 y permaneció hasta la recolección 2019. En la Parcela L se estableció en la primavera de 2016 y se mantuvo hasta la recolección 2019.

Se implantaron cuatro tratamientos de riego en la Parcela C (C1, C2, C3 y C4) y en la Parcela L (L1, L2, L3 y L4), en un diseño completamente al azar de cuatro bloques. En la Parcela C, el ensayo tenía 3 hileras $\times$ 14 árboles, de los cuales se utilizaron tres árboles centrales de la hilera central para las medidas. En la Parcela L, el ensayo tenía hileras individuales de 14 árboles sin hileras borde. Todos los tratamientos recibieron la misma dosis de riego hasta finales del verano. El inicio de los tratamientos de riego dependía de las condiciones climáticas (07/05/2015, 24/05/2016, 02/05/2017, 14/06/2018 y 12/03/2019). Los tratamientos de riego finalizaron en la caída final de la aceituna, que coincidió con el endurecimiento de hueso (30/06/2015, 14/07/2016, 03/07/2017, 16/07/2018 y 11/07/2019). Una vez finalizado el experimento, todos los tratamientos recibieron el mismo riego hasta la recolección. Los árboles del tratamiento C1 y L1 se mantuvieron con un alto contenido de agua del suelo, cerca de la capacidad del campo. Se tuvo en cuenta las lecturas continuas de seis sensores WatermarkTM situados en tres árboles del tratamiento de control (C1) en el bloque 1 y se registraron en un data logger (Irrometer, CA, EE. UU.) Los sensores estaban en tres árboles representativos, situados a 0,3 m de profundidad y 0,3 m de distancia de los goteros adyacentes de los troncos.

Se establecieron tres tratamientos de riego deficitario para proporcionar grandes diferencias en la disponibilidad de agua. En la Parcela C, los goteros tenían un caudal de 3 L h⁻¹, una distancia entre goteros de 0,50 m y un número de goteros por árbol de 4. Para aplicar los tratamientos de riego se utilizó un programador, en el que se variaba la duración de riego. El agua de riego aplicada en C2, C3 y C4 fue 50, 25 y 0 % de C1, respectivamente. En la Parcela L, los goteros tenían un caudal de 3 L h⁻¹. La distancia entre goteros fue variable, dependiendo del tratamiento de riego 0,33 m (L1), 0,83 m (L2), 2 m (L3) y 0 m (L4) y del mismo modo el número de goteros por árbol fue variable 6, 2,4, 1 y 0 para L1, L2, L3 y L4, respectivamente. El porcentaje

de riego que recibió cada tratamiento respecto al tratamiento control (L1) fue 40 (L2), 17 (L3) y 0 % (L4).

2.2.4 Parámetros evaluados

2.2.4.1 Potencial hídrico de tallo

Durante el período de ensayo, el potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallo} , MPa) se midió al mediodía solar los días previos al riego, utilizando una cámara de presión (Soil Moisture Equip., Santa Bárbara, CA, EE. UU.). Se seleccionaron cuatro brotes apicales por tratamiento, situados en la sombra cerca del tronco en la zona media del seto (0,85-1,70 m). Los brotes seleccionados se cubrieron con papel de aluminio durante 1 h antes de la medida para permitir el equilibrio del Ψ_{tallo} (Begg y Turner, 1970). El Ψ_{tallo} promedio ponderado se calculó teniendo en cuenta los días entre cada medida, y se hizo para cada período fenológico (antes de la floración, durante la floración, desde la floración hasta el endurecimiento de hueso y durante todo el período experimental).

2.2.4.2 Crecimiento vegetativo y componentes del rendimiento

El desarrollo fenológico se registró cada año como brotación, plena floración y endurecimiento de hueso (Sanz-Cortes et al., 2002). Se recopilaron datos adicionales para definir el desarrollo de los componentes del rendimiento en 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019 de la siguiente manera. En invierno se seleccionaron tres brotes aleatoriamente y se etiquetaron, para la medida de la longitud del tallo y número de yemas. Los brotes fueron seleccionados en la zona media del seto y en la cara sur y este de las Parcelas C y L, respectivamente. Posteriormente, cuando comenzaron los tratamientos de riego, se midió la longitud de los nuevos brotes y el número de yemas cada 3 semanas. El número de inflorescencias por tallo se contó el 06/05/2015, 19/05/2016, 25/04/2017, 25/05/2018 y 07/05/2019. El número de aceitunas por tallo se contó al final del ensayo (30/06/2015, 14/07/2016, 03/07/2017, 16/07/2018 y 11/07/2019), en agosto (24/08/2016, 08/04/2017, 08/08/2018 y 21/08/2019), septiembre (07/09/2017, 05/09/2018 y 23/09/2019) y en recolección (10/07/2015, 27/10/2016, 23/10/2017, 24/10/2018 y 21/10/2019). En 2019 en la Parcela C, el tratamiento C4 al final del

ensayo no tenía aceitunas en los brotes marcados.

2.2.4.3 Seguimiento de maduración

El desarrollo de la aceituna se evaluó tomando muestras de 100 aceitunas por repetición, evitando los árboles seleccionados para la recolección. Los muestreos de aceitunas se tomaron de la zona media del lado sur y este de los setos para las Parcelas C y L, respectivamente. Los muestreos se hicieron en endurecimiento de hueso (30/06/2015, 14/07/2016, 03/07/2017, 16/07/2018 y 11/07/2019), en septiembre (23/09/2015, 23/09/2016, 07/09/2017, 12/09/2018 y 12/09/2019) y en recolección (07/10/2015, 27/10/2016, 23/10/2017, 24/10/2018 y 21/10/2019). En la Parcela C, la falta de aceitunas en C3 y C4 no permitió tomar muestras el 11/07/2019. Las aceitunas fueron embolsadas y colocadas en una nevera portátil hasta su preparación en el laboratorio. Se prepararon tres submuestras de 25 g para la determinación del peso fresco de la aceituna (PF) y luego se secaron en una estufa a 105°C para la determinación del peso seco de la aceituna (PS) y el cálculo de la humedad de la aceituna. El contenido de aceite se midió en las submuestras secas mediante la resonancia magnética nuclear (MiniSpec MQ-10, Bruker, Madison, EE. UU.), para ello se utilizó el método descrito por del Rio y Romero (1999).

2.2.4.4 Producción, número y característica de las aceitunas

La recolección se realizó en la Parcela C el 21/10/2015, 27/10/2016, 24/10/2017, 24/10/2018 y 21/10/2019 y en la Parcela C el 16/10/2019. Todas las aceitunas se recolectaron manualmente de los tres árboles seleccionados por repetición y tratamiento. La producción de cada árbol se pesó en fresco, y después se cogió una muestra de 450 g que a su vez se dividió en submuestras de 25 g cada una. Cada submuestra se volvió a pesar en el laboratorio y se introdujeron en una estufa a 105 °C para secar y calcular la humedad de la aceituna y el PS. El contenido de aceite se determinó por aceituna sobre PF y PS. El número de aceitunas por árbol se calculó a partir de la producción total y del PF de una aceituna. La producción de aceite se calculó a partir de la producción de aceituna y el contenido de aceite. La productividad del agua se calculó como la producción de kg aceituna (PA_{aceituna}) y

aceite (PA_{aceite}) por unidad de agua (cantidad de riego + precipitación efectiva desde el 1 de enero hasta la recolección) (Doorenbos y Pruitt, 1977).

2.3 Ensayo 3. Riego deficitario en el periodo de síntesis de aceite (otoño)

2.3.1 Características del ensayo

Se establecieron dos ensayos entre 2011 y 2013 en las dos parcelas C y L del Ensayo 2 descrito anteriormente.

2.3.2 Clima y suelo

Las características climatológicas y del suelo se han descrito en el Ensayo 2.

2.3.3 Descripción de los tratamientos de riego

En la Parcela C se estableció un ensayo de riego en 2011 y se mantuvo hasta la recolección 2013. En 2012 la floración fue escasa después de un invierno frío y seco y no se pudieron tomar datos, por este motivo se decidió trasladar el ensayo a la Parcela L en 2012 y mantenerlo hasta la recolección de 2013.

Se implantaron cuatro tratamientos de riego en la Parcela C (C1, C2, C3 y C4) y en la Parcela L (L1, L2, L3 y L4). El diseño de los dos ensayos de la Parcela C y L es el mismo que en el Ensayo 2. Todos los tratamientos recibieron la misma dosis de riego hasta finales del verano. El ensayo de riego comenzó el 23/08/2011, 23/08/2012 y 23/08/2013 en la Parcela C y el 23/08/2012 y 23/08/2013 en la Parcela L. Los tratamientos finalizaron en la recolección en la Parcela C (31/10/2011 y 21/10/2013) y en la Parcela L (23/10/2012 y 18/10/2013). Los árboles del tratamiento C1 y L1 se regaron manteniendo un alto contenido de agua del suelo cerca de la capacidad del campo.

Se establecieron tratamientos de riego deficitario para proporcionar grandes diferencias en la disponibilidad de agua. Para la Parcela C, los goteros tenían un caudal de 3 L h^{-1} , distanciados a 0,50 m. Para aplicar los tratamientos de riego se varió la duración de riego utilizando un programador. El agua de riego aplicada en C2, C3 y C4 fue 66, 38 y 13% de C1, respectivamente. En la Parcela L, los goteros

tenían un caudal de 3 L h⁻¹. La distancia entre goteros fue variable dependiendo del tratamiento 0,33 m (L1), 0,48 m (L2), 0,83 m (L3) y 2 m (L4) y del mismo modo el número de goteros por árbol fue variable 6, 4,2, 2,4 y 1 para L1, L2, L3 y L4, respectivamente. El porcentaje de riego que recibió cada tratamiento respecto al tratamiento control (L1) fue 70 (L2), 40 (L3) y 17% (L4).

2.3.4 Parámetros evaluados

2.3.4.1 Potencial hídrico de tallo

La metodología de medida del potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallo}) es la misma que la que se ha descrito en el Ensayo 2.

2.3.4.2 Crecimiento de brotes y componentes del rendimiento

El desarrollo fenológico se registró cada año como brotación, plena floración y endurecimiento de hueso (Sanz-Cortes et al., 2002). Se recopilaron datos adicionales para definir secuencias de desarrollo de rendimiento en 2011, 2012 y 2013 de la siguiente manera. En invierno se seleccionaron tres brotes aleatoriamente y se etiquetaron para la medida de la longitud del tallo y número de yemas. Los brotes fueron seleccionados de la zona media del seto y en la cara sur de la Parcela C y en la cara este de la Parcela L. Posteriormente, se hicieron recuentos del número de inflorescencias por tallo (16/05/2011, 14/05/2012 y 18/05/2013, 17/05/2014) y el número de aceitunas por tallo al final de la caída de aceituna (10/07/2011, 12/07/2012, 14/07/2013 y 11/07/2014). El número de aceitunas en la recolección permitió el cálculo adicional de la caída de aceituna.

2.3.4.3 Seguimiento de maduración

El desarrollo de la aceituna se evaluó del mismo modo que en el Ensayo 2. Los muestreos se hicieron a intervalos de dos semanas desde el 22/08 hasta la fecha de recolección. En la Parcela C, se tomaron muestras de aceitunas en 2011 y 2013 de la parte media del lado sur de los setos. En la Parcela L, se recolectaron aceitunas durante 2012 y 2013 en la zona media del lado este de los setos.

2.3.4.4 Producción, número de aceitunas y característica de las aceitunas

La recolección de las dos parcelas se llevó a cabo de la misma manera que en el Ensayo 2. Se midió la fuerza de retención de la aceituna el 31/10/2011, se midieron 20 aceitunas por tratamiento con un dinamómetro de precisión (Pesola, Suiza).

2.4 Análisis estadístico

El software utilizado para el análisis estadístico fue Infostat versión 1,5 (Universidad Nacional, Córdoba, Argentina) (Ensayos 1, 2 y 3). En los tres ensayos se realizó un análisis de la varianza (ANOVA). La separación de medias se llevó a cabo mediante el test LSD para un nivel de significancia de 0,05. También se utilizó el software Statgraphics Centurion Versión 18.1.12. (Statgraphics Technologies, Inc., The Plains, Virginia, EE. UU.) (Ensayo 1).

En el ensayo 1, el tamaño de la muestra (n) se determinó usando la siguiente fórmula. Se calculó la desviación estándar (s). El error (e) fue de 1 MPa y para una confianza de 5% $Z = 1.96$.

$$n = \frac{z_{\alpha/2}^2 * S^2}{e^2} = \frac{z_{\alpha/2}^2 * CV^2}{e_r^2}$$

Las relaciones entre los componentes del rendimiento, características de la aceituna y producción con el Ψ_{tallo} (Ensayo 2 y 3) se ajustaron mediante un modelo bilineal con meseta utilizando una ruta no lineal de Table Curve v 3,0 (Scientific, J. 1991).

CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3 Resultados y discusión

3.1 Ensayo 1. Metodología de medida del potencial hídrico de tallo en olivar en seto

3.1.1 Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales y los datos climáticos de los días experimentales se muestran en la Tabla 4. Los días de medida fueron en verano, por lo que eran días de alta demanda evaporativa ($ET_o > 4,7$ mm/día). El valor máximo de ET_o fue de 7,1 mm (19/07/2017) y el mínimo de 4,7 mm (6/09/2016 y 6/09/2016). La temperatura máxima fue de 43,6 °C (2/08/2018) y la temperatura mínima fue de 14°C (26/07/2017). El valor máximo del déficit de presión de vapor (DPV) fue de 3,77 KPa (6/08/2018) y el mínimo de 1,88 KPa (21/07/2017). Durante los días que se desarrollaron los ensayos de metodología de medida del Ψ_{tallo} no se registró ninguna precipitación.

Las dos parcelas de ensayo se ubicaron en la meseta sur de Castilla (516 msnm) en el centro de España, está se caracteriza por tener veranos secos y cálidos (Tabla 4). Los días de medida del Ψ_{tallo} fueron en la mitad de la campaña de riego (julio, agosto y septiembre) en condiciones de alta demanda evaporativa (4,7–7,1 mm/día). Los resultados de los ensayos de metodología de medida de Ψ_{tallo} , dependen del rango de Ψ_{tallo} experimentado en las dos parcelas.

En este caso, las condiciones climáticas, las características del suelo y la práctica de riego produjeron un amplio rango de Ψ_{tallo} , en exceso de 2 MPa. En la mayoría de los experimentos, las diferencias entre tratamientos se redujeron en las condiciones más estresadas (Figura 4, 5 y 7).

Tabla 4. Valores medios de evapotranspiración de referencia diaria (ET₀), déficit de presión de vapor (DPV) y temperatura máxima y mínima durante los días de medida.

Fecha	ET ₀ (mm)	DPV (KPa)	T ^a máx (°C)	T ^a mín (°C)
19/07/2016	6,3	2,69	40,8	15,5
21/07/2016	6,9	2,22	36,8	14,9
22/07/2016	6,4	2,19	34,9	14,5
23/07/2016	6,8	2,12	33,4	19,2
01/09/2016	5,7	1,92	35,8	16,0
03/09/2016	4,7	1,96	37,5	14,3
05/09/2016	4,9	2,57	39,9	17,5
06/09/2016	4,7	2,50	41,3	16,3
07/09/2016	5,8	2,55	40,1	16,4
19/07/2017	7,1	2,03	33,6	18,8
21/07/2017	6,7	1,88	32,7	14,5
24/07/2017	6,4	2,28	34,5	16,5
26/07/2017	6,0	2,12	36,1	14,0
28/07/2017	6,7	2,30	39,0	15,6
31/07/2018	5,5	2,84	39,9	16,1
02/08/2018	6,1	3,46	43,6	21,3
04/08/2018	5,5	3,21	42,3	17,5
06/08/2018	6,1	3,77	42,8	21,8
08/08/2018	4,8	2,77	40,2	14,5

3.1.2 Experimentos

3.1.2.1 Experimento 1. Hoja cubierta y sin cubrir

El Ψ_{tallo} medido en brotes cubiertos fue significativamente más alto que el Ψ medido en brotes que no fueron cubiertos, ambos estaban en la cara de la sombra (Tabla 5). Al comenzar el experimento, los valores de potenciales fueron de -1,15 y -1,03 MPa para brote cubierto y -1,28 y -1,23 MPa para brote sin cubrir. Al finalizar el experimento, después de pasar 5 y 7 días desde el ultimo riego los valores de potenciales fueron de -2,09 y -3,51 MPa para brote cubierto y -2,35 y -3,59 MPa para brote sin cubrir (Tabla 5). En general, el Ψ_{tallo} promedio de 10 árboles durante 9 días

fue -2,08 MPa para brotes cubiertos y el Ψ -2,28 MPa para brotes no cubiertos, (Tabla 6). Esta diferencia fue estadísticamente significativa a $P < 0,10$ (Tabla 6). Se observó una variabilidad menor en los brotes cubiertos (CV medio 3,3%) que en los brotes que no estaban cubiertos (4,1%) y en ambos tratamientos, la variabilidad disminuyó con el estrés hídrico. Las diferencias entre brotes cubiertos y sin cubrir se redujeron en condiciones más estresadas (Figura 4) ($R^2 = 0,49$).

El Ψ_{tallo} fue significativamente más alto (0,20 MPa) y fue menos variable cuando las hojas estaban cubiertas (Tabla 5 y 6) (Figura 4) en lugar de estar sin cubrir, aunque se encontraran a la sombra, como observó anteriormente Begg y Turner (1970). En condiciones no estresadas, el Ψ_{tallo} en hoja cubierta mostró diferencias del 15% respecto al Ψ_{tallo} en hoja sin cubrir. Esto puede ser debido a que la conductancia estomática de las hojas descubiertas interactúa con Ψ (Shackel et al., 1997) ya que los estomas permanecen abiertos en las hojas sombreadas (Gregoriou et al., 2007) reduciendo así el Ψ_{tallo} . En cualquier caso, estos resultados indican que los brotes deben estar cubiertos para reducir la transpiración y la variabilidad del Ψ .

Tabla 5. Potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallo}) a mediodía, medido en hojas cubiertas durante 1 hora previa a la medida y Ψ_{tallo} en hojas no cubiertas, coeficiente de variación y valor estadístico P. Los brotes se ubicaron en la zona media del seto (0.85-1.70 m) en la cara de la sombra de un olivar superintensivo. Valores medios de Ψ_{tallo} de 9 días de medida ($n = 10$).

Días desde el ultimo riego	Ψ_{tallo} (MPa) Cubierto	C.V. (%)	Ψ (MPa) No cubierto	C.V. (%)	Estadística P-valor
1	-1,15	4	-1,28	6	0,01
3	-1,55	3	-1,69	4	0,01
4	-1,96	4	-2,15	5	0,01
5	-2,09	3	-2,35	3	0,01
1	-1,03	3	-1,23	7	0,01
3	-1,75	5	-1,95	4	0,01
5	-2,69	3	-2,86	2	0,01
6	-3,02	3	-3,39	2	0,01
7	-3,51	2	-3,59	4	0,11

Tabla 6 Valores medios de potencial hídrico (Ψ), tamaño de muestra, desviación estándar y valor P de los tratamientos evaluados en el experimento de hoja cubierta y sin cubrir.

Tratamiento	n	Promedio Ψ (MPa)	Desviación estándar	Estadística P-valor
Hojas:				
- cubiertas	90	-2,08	0,80	0,10
- no cubiertas	90	-2,28	0,82

Figura 4. Relación del incremento de potencial hídrico (Ψ) de hoja sin cubrir frente a Ψ_{tallo} en hoja cubierta (expresado como % de Ψ) y Ψ_{tallo} de hoja cubierta. * El P-valor de la regresión fue significativo $\leq 0,05$.

3.1.2.2 Experimento 2. Tiempo de cobertura

La duración del tiempo de cobertura de los brotes (1 o 2 horas) no afectó significativamente a el Ψ_{tallo} y a la variabilidad del potencial (Tabla 7). Al comenzar el experimento, los valores de potenciales fueron de -1,15 y -1,03 MPa para brote cubierto 1 hora y -1,15 y -1,00 MPa para brote cubierto 2 horas. Al finalizar el experimento, después de pasar 5 y 7 días desde el último riego los valores de potenciales fueron de -2,09 y -3,51 MPa para brote cubierto 1 hora y -2,10 y -3,48 MPa para brote cubierto 2 horas (Tabla 7). En general, el Ψ_{tallo} promedio de 10 árboles durante 9 días fue -2,08 MPa para brotes cubiertos y el Ψ -2,28 MPa para

brotes no cubiertos, (Tabla 8). El valor promedio de Ψ_{tallo} fue -2,08 MPa y -2,06 durante 1 y 2 horas cubriendo, respectivamente, ($P > 0,84$) (Tabla 8).

El tiempo de cobertura (1 o 2 horas) no mostró diferencias significativas en el Ψ_{tallo} (Tabla 7 y 8), confirmando que un tiempo de cobertura de 1 hora es suficiente para que la medida sea correcta. Chone et al. (2001) también observaron que cubrir las hojas de la vid durante 1, 2 o 6 horas no afectó al Ψ_{tallo} .

Tabla 7. Potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallo}) a mediodía, medido en hojas cubiertas durante 1 y 2 horas previa a la medida, coeficiente de variación y valor estadístico P. Los brotes se ubicaron en la zona media del seto (0,85-1,70 m) en la cara de la sombra de un olivar en seto. Valores medios de Ψ_{tallo} de 9 días diferentes ($n = 10$).

Días desde el ultimo riego	Ψ_{tallo} (MPa)		Ψ_{tallo} (MPa)		Estadística P-valor
	1 hora cubierto	C.V. (%)	2 horas cubierto	C.V. (%)	
1	-1,15	3	-1,15	4	0,81
3	-1,55	3	-1,54	2	0,41
4	-1,96	4	-1,96	3	0,99
5	-2,09	3	-2,10	2	0,62
1	-1,03	3	-1,00	6	0,18
3	-1,76	5	-1,69	3	0,06
5	-2,69	3	-2,63	2	0,06
6	-3,02	3	-3,00	2	0,51
7	-3,51	2	-3,48	3	0,37

Tabla 8. Valores medios de potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallo}), tamaño de muestra, desviación estándar y valor P de los tratamientos evaluados en el experimento tiempo de cobertura.

Tratamiento	n	Promedio Ψ_{tallo} (MPa)	Desviación estándar	Estadística P-valor
1 hora cubierta	90	-2,08	0,80	0,84
2 hora cubierta	90	-2,06	0,80	

3.1.2.3 Experimento 3. Hoja cubierta al sol y a la sombra

El Ψ_{tallo} de las hojas cubiertas al sol y hojas cubiertas a la sombra, no fue significativamente diferente (Tablas 9 y 10), mostrando valores más negativos en hojas cubiertas al sol que en sombra. Al comenzar el experimento los valores de potenciales fueron de -1,19 y -1,05 MPa para brote cubierto a la sombra y -1,53 y -1,40 MPa para brote cubierto al sol. Al finalizar el experimento, después de pasar 5 y 7 días desde el último riego los valores de potenciales fueron de -2,16 y -3,58 MPa para brote cubierto a la sombra y -2,66 y -3,84 MPa para brote cubierto al sol (Tabla 9). El valor promedio de Ψ_{tallo} fue -2,13 MPa para las hojas ubicadas en el lado de la sombra y -2,54 MPa para las expuestas al sol (Tabla 10). La variabilidad fue ligeramente mayor en las hojas expuestas a la sombra (CV promedio 3,2%) que en el sol (3,6%). Las diferencias entre brotes cubiertos al sol y cubiertos a la sombra se redujeron en condiciones más estresadas (Figura 5) ($R^2=0,88$).

El Ψ_{tallo} de las hojas cubiertas ubicadas en la sombra fue significativamente menor (en 0.41 MPa) que las hojas cubiertas ubicadas en la parte expuesta soleada del seto (Tabla 9 y 10), alcanzando una diferencia máxima del 34% en condiciones de alta hidratación (Figura 5).

Tabla 9. Potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallo}) a mediodía, medido en hojas cubiertas durante 1 hora, situadas en la zona media del seto, al sol y a la sombra, coeficiente de variación y valor estadístico P. Los brotes se ubicaron en la zona media del seto (0,85-1,70 m) Valores medios de Ψ_{tallo} de 9 días diferentes ($n = 10$).

Días desde el ultimo riego	Ψ_{tallo} (MPa)		Ψ_{tallo} (MPa)		Estadística P-valor
	Cubierto sombra	C.V. (%)	Cubierto sol	C.V. (%)	
1	-1,19	6	-1,53	5	0,01
3	-1,62	2	-2,09	5	0,01
4	-2,03	4	-2,56	3	0,01
5	-2,16	3	-2,66	3	0,01
1	-1,05	4	-1,40	4	0,01
3	-1,79	3	-2,20	5	0,01
5	-2,70	3	-3,01	3	0,01
6	-3,09	2	-3,60	2	0,01
7	-3,58	2	-3,84	2	0,01

Tabla 10. Valores medios de potencial hídrico (Ψ_{tallo}), tamaño de muestra, desviación estándar y valor P de los tratamientos evaluados en el experimento de hoja cubierta al sol y a la sombra.

Tratamiento	n	Promedio Ψ_{tallo} (MPa)	Desviación estándar	Estadística P-valor
Hojas situadas:				
- en la sombra	90	-2,13	0,81	0,01
- en el sol	90	-2,54	0,80

Figura 5. Incremento de Ψ_{tallo} en hoja cubierta al sol (expresado como % de Ψ) frente a Ψ_{tallo} en hoja cubierta a la sombra y Ψ_{tallo} en hoja cubierta a la sombra. * El P-valor de la regresión fue significativo $\leq 0,05$.

3.1.2.4 Experimento 4. Altura en el seto

El Ψ_{tallo} se vio significativamente afectado por la altura de los brotes a lo largo del seto (Figura 6). En la mayoría de las medidas, el Ψ_{tallo} fue mayor cuando se midió en la parte inferior del seto H0 (0–0,85m) que en la parte media H1 (0,85–1,7m) y en la parte superior H2 (1,7–2,1m). Los valores promedio de Ψ_{tallo} fueron -2,06, -2,13 y -2,30 MPa para H0, H1 y H2 respectivamente (Tabla 11). La diferencia entre las alturas fue significativamente diferente a $P < 0,08$ (Tabla 11). La diferencia promedio entre H0 y H1 es 0,07 MPa y entre H0 y H2 es 0,24 MPa. Se observó poca diferencia en la variabilidad de los datos respecto a la media. Las diferencias entre las alturas se redujeron en las condiciones más estresadas (Figura 7-A, $R^2=0,58$; Figura 7-B, $R^2=0,44$).

El Ψ_{tallo} mostró diferencias significativas en las hojas medidas a distinta altura en el seto. Esta es una respuesta a un gradiente de Ψ_{tallo} establecido en el tronco central del olivo, y que está relacionado con la distancia desde las raíces. Los valores promedio fueron -2,06, -2,13 y -2,33 MPa para Ψ_{tallo} medido en H0, H1 y H2, respectivamente (Figura 6). Las diferencias de Ψ_{tallo} fueron mayores entre H1 y H2 (10%) que entre H1 y H0 (-4%). Esto también fue observado por Begg y Turner (1970) y Connor et al. (1977), estudiaron el gradiente vertical decreciente de Ψ_{tallo}

en tabaco y en un bosque de cenizas de montaña, respectivamente. Por el contrario, Chone et al. (2001) observaron un Ψ_{tallo} similar en las hojas basales de la vid con las hojas situadas 1 m más arriba. Estas diferencias de Ψ_{tallo} en el olivo se explican por la alta resistencia al movimiento del agua observada en los olivos como resultado del pequeño diámetro de los vasos xilemáticos (40 μm) (Fernández et al., 2006) en comparación con el diámetro mayor de la vid (75 μm) (Pire et al., 2007). Bonghi y Pallioti (1994) observaron que las diferencias de Ψ_{hoja} y $\Psi_{\text{raíz}}$ en olivo fueron debidas a la alta resistencia del movimiento del agua. Varios autores han utilizado los brotes ubicados en la altura media del seto para determinar el Ψ_{tallo} del árbol (Marra et al., 2016, Ahumada-Orellana et al., 2017).

Tabla 11. Valores medios de potencial hídrico (Ψ_{tallo}), tamaño de muestra, desviación estándar y valor P de los tratamientos evaluados en el experimento de altura en el seto.

Tratamiento	n	Promedio Ψ (MPa)	Desviación estándar	Estadística P-valor
Altura en el seto				
- H0 (0-0,85m)	90	-2,06	0,80	0,08
- H1 (0,85-1,70m)	90	-2,13	0,81	
- H2 (1,70-2,10m)	90	-2,33	0,84

Figura 6. Potencial hídrico del tallo (Ψ_{tallo}) a mediodía, medido en hojas ubicadas a diferentes alturas del seto (H0 = 0-0,85 m, H1 = 0,85-1,70 m, H2 = 1,70-2,10 m). Las hojas se cubrieron durante 2 horas. Diferentes letras indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) dentro de las posiciones de altura de acuerdo con la prueba LSD. Valores medios de Ψ_{tallo} de 9 días diferentes ($n = 10$)

Figura 7. Reducción de Ψ_{tallo} en hoja situada a la altura H0 (A) e incremento de Ψ_{tallo} en hoja situada a la altura H2 (B) (expresado como % de Ψ_{tallo}) frente a Ψ_{tallo} en hoja medida a la altura H1. * El P-valor de la regresión fue significativo $\leq 0,05$.

3.1.2.5 Experimento 5. Edad de la hoja

El Ψ_{tallo} no mostró diferencias significativas en hojas de 1, 2 y 3 años. Los valores promedio de Ψ_{tallo} no fueron significativamente diferentes ($P > 0,99$), con valores medios de -2,81, -2,80 y -2,81 MPa para hojas de 1, 2 y 3 años, respectivamente (Tablas 12 y 13), en todos los días de medida. Al comenzar el experimento, los valores de potenciales fueron de -1,52, -1,49 y -1,54 MPa para brote de 1, 2 y 3 años respectivamente. Al finalizar el experimento, después de pasar 10 días desde el último riego, los valores de potenciales alcanzaron valores de -4,00, -3,98 y -3,93 MPa para brotes de 1, 2 y 3 años respectivamente (Tabla 12). Se observaron ligeras diferencias en la variabilidad entre las edades de las hojas. El CV medio de las hojas de 1 año (3,9%) fue menor que las hojas de 2 y 3 años (4,2%).

El Ψ_{tallo} no se vio afectado por la edad de la hoja (1, 2 o 3 años) (Tabla 12). Las diferencias en los aspectos morfológicos y fisiológicos de las hojas de diferentes edades (Fernández et al., 1997) no afectaron al equilibrio del estado de hidratación que se establece entre las hojas situadas en el ápice y las hojas que se encuentran en el interior.

Tabla 12. Potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallo}) a mediodía, medido en hojas de 1, 2 y 3 años de edad, cubiertas durante 1 hora previa a la medida, coeficiente de variación y valor estadístico P. Los brotes se ubicaron en la zona media del seto (0,85-1,70 m) en la cara de la sombra de un olivar superintensivo. Valores medios de Ψ_{tallo} de 5 días diferentes ($n = 8$).

Días desde el ultimo riego	Ψ_{tallo} (MPa)		Ψ_{tallo} (MPa)		Ψ_{tallo} (MPa)		Estadística P-valor
	Hojas de 1 año	C.V. (%)	Hojas de 2 años	C.V. (%)	Hojas de 3 años	C.V. (%)	
1	-1,52	4	-1,49	5	-1,54	4	0,32
3	-2,18	6	-2,21	7	-2,23	10	0,91
6	-2,89	4	-2,90	4	-2,90	3	0,97
8	-3,47	3	-3,44	2	-3,48	2	0,57
10	-4,00	2	-3,98	3	-3,93	2	0,34

Tabla 13. Valores medios de potencial hídrico (Ψ_{tallo}), tamaño de muestra, desviación estándar y valor P de los tratamientos evaluados en el experimento edad de la hoja.

Tratamiento	n	Promedio Ψ_{tallo} (MPa)	Desviación estándar	Estadística P-valor
Hojas de:				
- 1 año de edad	40	-2,81	0,90	0,99
- 2 año de edad	40	-2,80	0,90	
- 3 año de edad	40	-2,81	0,87	

3.1.2.6 Experimento 6. Hora de medida

El Ψ_{tallo} se vio significativamente afectado por la hora del día en la que realizó la medida (10, 12 y 14 horas solares) (Tabla 14). Las medidas de Ψ_{tallo} a las 10:00 horas solares (valor medio de -2,38 MPa) fueron significativamente más altas que las de las 12:00 (-2,81 MPa) y las 14:00 horas (-2,74 MPa) ($P < 0,06$) (Tabla 15). Al comenzar el experimento los valores de potenciales fueron de -1,11, -1,52 y -1,52 MPa para los brotes medidos a las 10:00, 12:00 y 14:00 horas solares, respectivamente. Al finalizar el experimento, después de pasar 10 días desde el último riego, los valores de potenciales fueron de -3,52, -4,00 y -3,86 MPa para los brotes medidos a las 10:00, 12:00 y 14:00 horas solares, respectivamente (Tabla 14). Bajo condiciones de estrés hídrico ($> -2,20$ MPa), el Ψ_{tallo} no fue significativamente diferente entre el Ψ_{tallo} medido a 12:00 y a las 14:00. Pero cuando el estrés fue severo ($< -2,90$ MPa), el Ψ_{tallo} fue significativamente diferente entre las medidas a 12:00 y a las 14:00. Se obtuvo una variabilidad menor a las 14:00 horas (3,8%) que en las otras horas (4,4%). Las diferencias entre los tiempos de medición no estaban relacionadas con las condiciones de estrés (Figura 8-A y B).

El Ψ_{tallo} respondió a la hora de medida cuando se realizó 2 horas antes o después del mediodía (Tabla 14). Los valores más altos (valor medio -2,38 MPa) se alcanzaron por la mañana (10:00 hora solar) y los más bajos al mediodía (-2,81 MPa) mientras que los de la tarde (14:00) tuvieron una recuperación lenta -2,74 MPa. Nuestros resultados confirman que Ψ_{tallo} varía dependiendo de la hora de medida, siendo la

más idónea a mediodía solar, siendo la misma hora de medida de otros autores (Fernández et al., 2011; Gómez del Campo, 2013a; Padilla-Díaz et al., 2016; Trentacoste et al., 2019; Gucci et al., 2019; Hueso et al., 2019). Las medidas realizadas también coinciden con el estudio de Fernández y Moreno (1999), que observaron que los valores de Ψ_{tallo} son más estables a mediodía solar.

Tabla 14. Potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallo}) medido a tres horas del día (10:00, 12:00 y 14:00, hora solar) en hojas ubicadas en la zona media del seto (0,85-1,70 m), las hojas fueron cubiertas 1 hora en el lado de la sombra, coeficiente de variación y valor estadístico P. Valores medios de Ψ_{tallo} de 5 días diferentes (n = 8).

Días desde el ultimo riego	Ψ_{tallo} (MPa) 10:00	C.V. (%)	Ψ_{tallo} (MPa) 12:00	C.V. (%)	Ψ_{tallo} (MPa) 14:00	C.V. (%)	Estadís tica P-valor
1	-1,11 a	9	-1,52 b	4	-1,52 b	4	0,01
3	-1,94 a	4	-2,18 b	9	-2,22 b	7	0,03
6	-2,35 a	3	-2,89 c	4	-2,74 b	4	0,01
8	-3,00 a	3	-3,47 c	3	-3,37 b	2	0,01
10	-3,52 a	2	-4,00 c	2	-3,86 b	2	0,01

* Letras diferentes indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$), dentro de la hora de medida de acuerdo con la prueba LSD.

Tabla 15. Valores medios de potencial hídrico (Ψ_{tallo}), tamaño de muestra, desviación estándar y valor P de los tratamientos evaluados en el experimento de hora de medida.

Tratamiento	n	Promedio Ψ_{tallo} (MPa)	Desviación estándar	Estadística P-valor
Hora de medida:				
- 10:00 hora solar	40	-2,38	0,85	0,06
- 12:00 hora solar	40	-2,81	0,90	
- 14:00 hora solar	40	-2,74	0,84

Figura 8. Reducción de Ψ_{tallo} a las 10:00 (A) e incremento de Ψ_{tallo} a las 14:00 (B) (expresado como % de Ψ_{tallo}) frente a Ψ_{tallo} a las 12:00 hora solar.

3.1.2.7 Experimento 7. Tamaño de la muestra

El tamaño medio de la muestra se analizó en tres sectores de riego, y se observó que era necesario realizar al menos 5 medidas de potencial para que este sea representativo. El coeficiente de variación para este valor de muestra fue del 3% (Tabla 16). Al comenzar el experimento (31/07/2018), los valores de potenciales fueron de -2,30, -2,37 y -2,36 MPa para los sectores 1, 2 y 3, respectivamente. Al finalizar el experimento, después de pasar 9 días desde el último riego, los valores de potenciales fueron de -4,64, -4,80 y -4,85 MPa para los sectores 1, 2 y 3, respectivamente (Tabla 16).

Se observó que, tomando un valor de 5 muestras, proporcionaron un valor representativo de Ψ_{tallo} , para sectores de riego individuales con una variación de Ψ_{tallo} de ± 0.17 MPa (Tabla 16). En un estudio similar en manzano, Naor et al. (2006) establecieron que se requería un tamaño de muestra mayor de 7 para obtener un valor representativo, en ese caso con una variación media de ± 0.15 MPa. La medida de Ψ_{tallo} debe hacerse lo más rápido posible alrededor del mediodía ya que, como se discutió anteriormente, aumenta y luego disminuye antes y después del mediodía.

Tabla 16. Potencial hídrico del tallo (Ψ_{tallo}) a mediodía, medido en hojas cubiertas durante 1 hora, ubicadas en la sombra y en la zona media del seto (0,85-1,70 m), tamaño de la muestra y coeficiente de variación medido en tres sectores de riego de un olivar superintensivo. Valores medios de Ψ_{tallo} de 5 días diferentes (n=15).

	Sector 1			Sector 2			Sector 3		
Días desde el último riego	Ψ_{tallo} (MPa)	Tamaño muestra	C.V. (%)	Ψ_{tallo} (MPa)	Tamaño muestra	C.V. (%)	Ψ_{tallo} (MPa)	Tamaño muestra	C.V. (%)
1	-2,30	3	4	-2,37	5	5	-2,36	6	5
3	-2,90	4	4	-3,14	6	4	-3,31	4	3
5	-3,57	5	3	-3,64	3	3	-3,63	4	3
7	-4,02	8	4	-4,19	7	3	-4,09	6	3
9	-4,64	4	2	-4,80	5	2	-4,85	5	2
Media	-3,48	5	3	-3,63	5	3	-3,65	5	3

3.2 Ensayo 2. Riego deficitario desde brotación hasta endurecimiento de hueso (primavera)

3.2.1 Condiciones ambientales

Los datos climáticos se resumen en la Figura 9 como temperaturas mínimas y máximas mensuales ($^{\circ}\text{C}$), lluvia (mm) y evapotranspiración de referencia (ET_0 , mm). Las precipitaciones y ET_0 durante los períodos de riego se presentan en la Tabla 17.

El mes Julio fue el más caluroso (con una temperatura media de $27,7^{\circ}\text{C}$) y enero el más frío (temperatura media de $3,9^{\circ}\text{C}$). La temperatura más alta ($41,3^{\circ}\text{C}$) se registró el 06/07/2015 y la más baja ($-8,1^{\circ}\text{C}$) el 07/01/2019. Las precipitaciones variaron entre años, de 293, 459, 254, 420 y 220 mm en 2015-2019, respectivamente. Las precipitaciones ocurrieron principalmente en abril, mayo y octubre, mientras que en junio, julio y agosto fueron meses secos. Desde enero hasta julio (final del ensayo) las precipitaciones diferían entre años, siendo de 187, 258, 105, 322 y 75 mm en 2015-2019, respectivamente. Las condiciones ambientales se mantuvieron altamente evaporativas, con una ET_0 acumulativa, tanto anualmente

(1.185, 1.146, 1.222, 1.085 y 1.216 mm) como durante los períodos de ensayos (307, 307, 361, 202 y 569 mm) en 2015-2019, respectivamente.

Las precipitaciones bajas de la región mediterránea determinan la rentabilidad del olivar y la necesidad de riego para lograr altos rendimientos. Esta zona se caracteriza por tener un clima mediterráneo, con primavera fría y lluviosa (Figura 9). En estas condiciones, el crecimiento vegetativo comenzó a finales de marzo, la floración se produjo entre la segunda quincena de mayo y junio y el endurecimiento de hueso ocurrió en las primeras semanas de julio. El crecimiento vegetativo se detiene en las primeras semanas de julio. Aunque la primavera se caracteriza por ser lluviosa, en 2017 y 2019 fue poco lluviosa (105 y 75 mm de lluvia desde enero a julio, respectivamente) en comparación con el año 2018 que fue muy húmedo (322 mm) y se provocaron diferentes estados hídricos de planta (Figura 9).

Figura 9. Lluvia mensual, evapotranspiración de referencia y temperaturas máximas y mínimas desde noviembre de 2015 hasta noviembre de 2019 en las dos parcelas de ensayo de riego deficitario aplicado en primavera situado en la Puebla de Montalbán (Toledo, España) (39 ° 48'N, 04 ° 27'O, 516m de altitud).

3.2.2 Riego aplicado

La cantidad de agua aplicada varió anualmente según las condiciones climáticas (Tabla 17). En la Parcela C, C1 recibió 47, 90, 96, 54 y 192 mm en 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019, respectivamente, durante el período ensayo, mientras que C2, C3 y C4 recibieron en promedio de 50, 25 y 0 % de lo aplicado a C1. Durante las cinco campañas de riego, el promedio de riego aportado a C1, C2, C3 y C4 fue de 233, 185, 162 y 138 mm, respectivamente. El ahorro de agua resultante de los tratamientos deficitarios en relación con el tratamiento control (C1) fue de 50, 75 y 100% en C2, C3 y C4, respectivamente, durante la primavera y 21, 30 y 41% durante toda la campaña de riego.

En la Parcela L, el tratamiento L1 recibió 108, 135, 86 y 342 mm en 2016, 2017, 2018 y 2019, respectivamente, durante el período ensayo, mientras que L2, L3 y L4 recibieron en promedio 40, 17 y 0% de L1. Durante las cuatro campañas de riego, se aplicó un promedio de 309, 209, 170 y 142 mm a L1, L2, L3 y L4, respectivamente. Este ahorro de agua resultante de los tratamientos deficitarios en relación con L1 fue de 60, 83 y 100% en L2, L3 y L4, respectivamente, durante la primavera y 32, 45 y 54% durante toda la campaña de riego.

Tabla 17. Características climáticas y dosis de riego aplicada en dos parcelas de ensayo con un tratamiento control (C1 y L1) y tres tratamientos de riego deficitario aplicado en primavera, en la Parcela C (C2, C3, C4) y en la Parcela L (L2, L3 y L4) desde el 1 de enero de 2015 hasta el 31 de diciembre de 2019.

	Precipitación (mm)	ET _o (mm)	Riego aplicado (mm) Parcela C				Riego aplicado (mm) Parcela L			
			C1 (100%)	C2 (50%)	C3 (25%)	C4 (0%)	L1 (100%)	L2 (40%)	L3 (17%)	L4 (0%)
01/01- 6/05/15	152	276	-	-	-	-				
07/05 - 30/06/15	35	307	47	23	11	0				
30/06 - 22/08/15	6	326	83	83	83	83				
23/08 - 31/12/15	100	276	88	88	88	88				
Total	293	1.185	219	195	183	171				
01/01- 23/05/16	246	322	-	-	-	-	-	-	-	-
24/05 - 14/07/16	12	307	90	45	23	0	108	43	18	0
15/07 - 22/08/16	0	239	60	60	60	60	58	58	58	58
23/08 - 31/12/16	201	278	96	96	96	96	83	83	83	83
Total	459	1.146	246	201	178	156	249	184	159	141
01/01- 01/05/17	72	268	-	-	-	-	-	-	-	-
02/05 -03/07/17	33	361	96	48	29	6	135	54	23	0
04/07 - 22/08/17	41	306	69	69	69	69	77	77	77	77
23/08 - 31/12/17	108	287	72	72	72	72	88	88	88	88
Total	254	1.222	236	188	169	146	300	219	188	165
01/01- 13/06/18	322	416	-	-	-	-	-	-	-	-
14/06 -16/07/18	0	202	54	27	14	0	86	34	15	0
17/07 - 22/08/18	1	204	41	41	41	41	54	54	54	54
23/08 - 31/12/18	97	263	50	50	50	50	64	64	64	64
Total	420	1.085	146	119	105	92	204	152	133	118
01/01- 11/03/19	23	98	-	-	-	-	-	-	-	-
12/03 -11/07/19	52	569	192	96	48	0	342	137	58	0
12/07 - 22/08/19	2	257	58	58	58	58	63	63	63	63
23/08 - 31/12/19	143	292	69	69	69	69	79	79	79	79
Total	220	1.216	319	223	175	127	484	279	200	142

3.2.3 Estado hídrico de la planta

El Ψ_{tallo} fue distinto durante el período de ensayo, entre los años, las parcelas y los tratamientos (Figura 10 y Tablas 18 y 19).

En la Parcela C, el valor más alto de Ψ_{tallo} (-0,52 MPa) se registró en C1 el 05/03/2016 y el más bajo (-4,98 MPa) en C4 el 24/06/19. Los valores promedio de Ψ_{tallo} durante el período de ensayo, fueron -1,42, -1,72, -2,11 y -2,56 MPa para C1, C2, C3 y C4, respectivamente (Tabla 18). Se observaron diferencias significativas entre los tratamientos, 28, 37, 37, 11 y 21 días después del comienzo del riego en 2015-2019, respectivamente (Figura 10). Después del 30/06/2016, 08/06/2017, 25/06/2018 y 16/05/2019, todos los tratamientos fueron significativamente diferentes entre sí. En el análisis de los cinco años de ensayo, el Ψ_{tallo} de C1 antes de floración, durante floración y desde floración hasta el endurecimiento de hueso, fue significativamente mayor (-0,81, -1,04 y -1,48 MPa, para cada período, respectivamente) que en C4 (-0,99, -1,57 y -2,73 MPa).

En la Parcela L, el valor más alto de Ψ_{tallo} (-0,43 MPa) se registró en L1 el 05/03/2016 y el más bajo (-3,43 MPa) en L4 el 03/07/2017. Los valores promedio de Ψ_{tallo} durante el período de ensayo, fueron -1,21, -1,42, -1,60 y -1,83 MPa para L1, L2, L3 y L4, respectivamente (Tabla 18). Se observaron diferencias significativas entre los tratamientos 23, 42, 34 y 21 días después de comenzar el ensayo de riego en 2016-2019, respectivamente. Después del 23/06/2016, 08/06/2017, 25/06/2018 y 05/05/2019, todos los tratamientos fueron significativamente diferentes entre sí. En el análisis de los cuatro años de ensayo, el Ψ_{tallo} del tratamiento L1 durante la floración y desde la floración hasta el endurecimiento de hueso fue significativamente mayor (-0,95 y -1,28 MPa, para cada período respectivamente) que en L4 (-1,32 y -1,95 MPa) pero no fue significativo el Ψ_{tallo} antes de floración.

Las dos parcelas de ensayo (C y L) están distanciadas a 2 km, pero las diferentes características del suelo, determinaron las diferencias en el estado hídrico de la planta (Figura 7). El valor más alto de Ψ_{tallo} , se midió en la Parcela L (-0,43 MPa) y el más bajo en la Parcela C (-4,98 MPa). La profundidad efectiva de enraizamiento es

mayor en la Parcela L (0,80 m) que en la Parcela C (0,60 m). Las diferencias entre parcelas, provocaron que el tratamiento sin regar (C4 y L4) alcanzara valores mínimos de Ψ_{tallo} de -4,98 MPa en la Parcela C y -3,43 MPa en la Parcela L. Estos valores están cerca del valor umbral de estrés alto en olivo (-3,5 MPa; Marino et al., 2018). Durante todo el período de ensayo, los tratamientos de control de ambas parcelas (C1 y L1) se mantuvieron sin estrés hídrico (valores medios de -1,42 y -1,21 MPa, respectivamente) (Tabla 18 y 19). Estos valores están por encima del valor umbral de -2 MPa (Marino et al., 2018) y ligeramente más bajo del valor umbral propuesto por Fernández et al., (2011) para la programación de riego con déficit hídrico bajo (-1,20 MPa). El aumento de la demanda evaporativa, provocó una reducción de Ψ_{tallo} a lo largo de la primavera. El Ψ_{tallo} en el tratamiento control (C1 y L1) fue de -0,81 y -0,67 MPa en el periodo anterior a la floración, -1,04 y -0,95 MPa en floración y -1,48 y -1,28 MPa en floración hasta endurecimiento de hueso. El Ψ_{tallo} de los tratamientos de control en endurecimiento, fue similar al valor umbral sin estrés hídrico de -1,50 MPa sugerido por Moriana et al. (2012) y Trentacoste et al. (2015, 2019) para programación de riego.

Figura 10. Evolución del potencial hídrico de tallo (MPa), medido al mediodía en un tratamiento control (C1 y L1) y tres tratamientos de riego deficitario (C2, C3, C4 y L1, L2, L3) aplicados durante la primavera de 2015 a 2019 en la Parcela C (izquierda) y 2016 a 2019 en la Parcela L (derecha). *, Diferencias significativas con $P < 0,05$.

Tabla 18. Media de Ψ_{tallo} durante diferentes períodos fisiológicos: antes de la floración, floración, floración hasta endurecimiento y periodo experimental en un tratamiento control (C1) y tres tratamientos de riego deficitario aplicados en primavera en la Parcela C (C2, C3 y C4) durante los años 2015-2019 y promedio.

		Tratamientos de riego - Parcela C			
		C1	C2	C3	C4
		(100%)	(50%)	(25%)	(0%)
Ψ_{tallo} antes de floración (MPa)	2015	-0,80 a	-0,87 a	-1,17 b	-1,15 b
	2016	-0,68	-0,64	-0,66	-0,68
	2017	-0,95	-0,99	-0,97	-1,03
	2018	-0,75	-0,75	-0,75	-0,75
	2019	-0,87 a	-0,94 b	-1,12 c	-1,36 d
	2015-2019	-0,81 a	-0,84 ab	-0,93 bc	-0,99 c
Ψ_{tallo} en floración (MPa)	2015	-1,02 a	-1,22 a	-1,50 b	-1,62 b
	2016	-0,89 a	-0,90 a	-0,95 a	-1,04 c
	2017	-1,13 a	-1,29 b	-1,40 c	-1,51 d
	2018	-0,88 a	-0,96 b	-0,99 c	-1,10 d
	2019	-1,28 a	-1,50 b	-1,89 c	-2,59 d
	2015-2019	-1,04 a	-1,17 ab	-1,35 bc	-1,57 c
Ψ_{tallo} desde floración hasta endurecimiento (MPa)	2015	-1,80 a	-2,03 b	-2,34 c	-2,71 d
	2016	-1,23 a	-1,32 b	-1,50 c	-1,80 d
	2017	-1,54 a	-2,10 b	-2,71 c	-3,08 d
	2018	-1,15 a	-1,31 b	-1,51 c	-1,81 d
	2019	-1,66 a	-2,11 b	-2,92 c	-4,23 d
	2015-2019	-1,48 a	-1,78 a	-2,19 b	-2,73 c
Ψ_{tallo} durante el periodo experimental (MPa)	2015	-1,55 a	-1,73 b	-2,04 c	-2,32 d
	2016	-1,23 a	-1,32 b	-1,50 c	-1,80 d
	2017	-1,72 a	-2,46 b	-3,24 c	-3,74 d
	2018	-1,36 a	-1,62 b	-1,92 c	-2,44 d
	2019	-1,24 a	-1,46 b	-1,87 c	-2,51 d
	2015-2019	-1,42 a	-1,72 a	-2,11 c	-2,56 d

Medias para cada fila seguidas de letras diferentes son significativamente diferentes con $P < 0,05$, según la prueba de rango múltiple de LSD.

Tabla 19. Media de Ψ_{tallo} durante diferentes períodos fisiológicos: antes de la floración, floración, floración hasta endurecimiento y periodo experimental en un tratamiento control (L1) y tres tratamientos de riego deficitario aplicados en primavera en la Parcela L (L2, L3 y L4) durante los años 2016-2019 y promedio.

		Tratamientos de riego - Parcela L			
		L1	L2	L3	L4
		(100%)	(50%)	(25%)	(0%)
Ψ_{tallo} antes de floración (MPa)	2016	-0,48 a	-0,48 a	-0,50 a	-0,53 b
	2017	-0,71	-0,71	-0,71	-0,71
	2018	-0,70	-0,70	-0,70	-0,70
	2019	-0,81 a	-0,95 b	-1,04 c	-1,20 d
	2016-2019	-0,67	-0,71	-0,73	-0,79
Ψ_{tallo} en floración (MPa)	2016	-0,69 a	-0,78 b	-0,81 b	-1,03 c
	2017	-1,02 a	-1,14 b	-1,21 b	-1,30 c
	2018	-0,85 a	-0,87 b	-0,91 c	-0,96 d
	2019	-1,24 a	-1,50 b	-1,76 c	-2,00 d
	2016-2019	-0,95 a	-1,07 a	-1,17 ab	-1,32 b
Ψ_{tallo} desde floración hasta endurecimiento (MPa)	2016	-1,05 a	-1,24 b	-1,36 c	-1,61 d
	2017	-1,29 a	-1,53 b	-1,80 c	-2,10 d
	2018	-1,09 a	-1,20 b	-1,31 c	-1,40 d
	2019	-1,67 a	-2,09 b	-2,41 c	-2,68 d
	2016-2019	-1,28 a	-1,51 ab	-1,72 bc	-1,95 c
Ψ_{tallo} durante el periodo experimental (MPa)	2016	-1,05 a	-1,24 b	-1,36 c	-1,61 d
	2017	-1,29 a	-1,53 b	-1,80 c	-2,10 d
	2018	-1,31 a	-1,47 b	-1,65 c	-1,81 d
	2019	-1,20 a	-1,44 b	-1,61 c	-1,80 d
	2016-2019	-1,21a	-1,42 b	-1,60 c	-1,83 d

Medias para cada fila seguidas de letras diferentes son significativamente diferentes con $P < 0.05$, según la prueba de rango múltiple de LSD.

3.2.4 Crecimiento vegetativo y componentes del rendimiento

La brotación ocurrió entre marzo y abril (30/03/2015, 15/03/2016, 20/03/2017, 04/04/2018 y 01/04/19), plena floración entre mayo y junio (26/05/2015, 03/06/2016, 25/05/2017, 08/06/2018 y 27/05/2019) y el endurecimiento de hueso en julio (15/07/2015, 21/07/2015, 04/07/2017, 16/07/2018 y 11/07/2019).

El crecimiento vegetativo se produjo desde la brotación hasta finales de junio, pero el período más intenso se localizó desde mayo hasta mediados de junio, al mismo tiempo que ocurrió la floración (Figura 11). Se vio significativamente afectado por

las condiciones del año (Figura 11 y Tablas 20 y 21). En 2019, los nudos desarrollados por los tratamientos de control (11 y 9 nudos en C1 y L1) fueron superiores a los del año 2018 (4 nudos). El número de nudos se vio significativamente afectado por los tratamientos de riego. El tratamiento más regado (C1 y L1) desarrolló un mayor número de nudos (7 y 5 en C1 y L1) que el tratamiento sin regar (C4 y L4). En 2019, el número de brotes que desarrollaron una estructura vegetativa fue significativamente mayor en el tratamiento más regado. No se observó efecto significativo en el resto de los años. La longitud del brote también se vio significativamente afectada en 2019. Desde el 07/05/2019, C1 y L1 desarrollaron brotes con más longitud que C4 y L4 (Figura 11). En el análisis de todos los años de ensayo, los brotes de los tratamientos más regados fueron más largos (9 cm) que los no regados (6 cm). La longitud relativa del brote en el endurecimiento de hueso (expresada como % de C1 y L1 de cada año) estuvo significativamente relacionado con el Ψ_{tallo} en floración (Figura 12) ($R^2 = 0,64$). La relación indica que una disminución en el Ψ_{tallo} de 1,0 MPa produjo una reducción del 49% en la longitud del brote. El crecimiento máximo del brote se logró a -1.00 MPa. Sin embargo, se observaron diferencias significativas entre los tratamientos cuando el Ψ_{tallo} en floración fue inferior a -1,50 MPa (Tablas 18 y 19). El crecimiento del brote se redujo a la mitad a Ψ_{tallo} -2,12 MPa.

En la primavera, al mismo tiempo que se desarrollan las flores y los frutos, se produce el crecimiento vegetativo. La cantidad de brotes nuevos determinará la producción del año siguiente. En las condiciones del ensayo, el crecimiento vegetativo se produjo principalmente entre mayo y mediados de junio. En este mismo periodo se produjo la floración (Figura 11). Los nudos desarrollados se redujeron significativamente con los tratamientos de riego. El crecimiento de los brotes se relacionó con el Ψ_{tallo} en floración (Figura 12).

El mayor incremento de crecimiento vegetativo se observó a -1,0 MPa y se redujo significativamente cuando Ψ_{tallo} estaba por debajo de -1,50 MPa. Este valor fue muy similar al umbral que observaron Grattan et al. (2006), Moriana et al. (2012) y Gómez del Campo, (2013a). En el olivar en seto, el crecimiento vegetativo puede controlarse mediante el riego deficitario en primavera para mantener un tamaño óptimo del seto (Hernández-Santana et al., 2017) que garantice iluminación y

acumulación de aceite (Trentacoste et al., 2019). Pero nuestros resultados indican que cuando los árboles están sujetos a un estrés hídrico durante el período de crecimiento vegetativo, la producción de aceituna se verá más afectada. Sin embargo, cuando se aplica el estrés hídrico algunos días después de la caída de aceituna (desde junio hasta julio, cerca del endurecimiento de hueso), se producirá una reducción del crecimiento, pero la producción no se verá afectada (Gómez del Campo, 2013a; Hernández-Santana et al., 2017). A finales de junio todavía hay crecimiento de brotes y se logrará una reducción del crecimiento importante, cuando se riegue a valores inferiores de Ψ_{tallo} de -1,30 MPa (Gómez del Campo, 2013a). La alta resistencia de la producción de aceitunas al estrés hídrico durante el período de endurecimiento de hueso fue investigada por numerosos autores (Goldhamer, 1999; Gucci et al., 2012; Tognetti et al., 2006).

El valor umbral de -1,50 MPa se considera sin estrés hídrico para el olivo (Marino et al., 2018) y pone de manifiesto la alta sensibilidad de la primavera al estrés hídrico (Rapoport et al., 2004; Hammami et al., 2011). Trentacoste et al. (2019) propusieron un valor umbral similar para obtener producciones.

Los componentes del rendimiento mostraron diferencias entre los años de ensayo (Tablas 20 y 21). El año 2016 fue un año lluvioso, con gran cantidad de brotes que desarrollaron inflorescencias y en consecuencia tuvieron una gran cantidad de aceitunas por brote. Por el contrario, el año 2019 fue especialmente seco, y tuvo menos brotes que desarrollaran inflorescencias.

Las diferencias entre los tratamientos de riego en los componentes del rendimiento se observaron en 2019. El tratamiento más regado C1 y L1 desarrolló un mayor número de brotes/yemas, inflorescencias/yemas, inflorescencias fértiles, aceitunas por inflorescencias y aceitunas por yemas que en el tratamiento sin riego (C4 y L4). El tratamiento de riego afectó significativamente al número de inflorescencia/brote, inflorescencias fértiles y la aceituna/brote cuando el Ψ_{tallo} fue inferior a -1,73, -2,25 y -1,73 MPa, respectivamente.

Se evaluó la caída de aceituna después del endurecimiento de hueso contando nuevamente las aceitunas por brote en septiembre. Se observó una reducción

significativa de la caída de la aceituna en el tratamiento sin regar (C4) en 2015 y C3 en 2019 (Tabla 20). Con un valor de Ψ_{tallo} desde la floración hasta el endurecimiento de hueso inferior a -2,71 MPa tuvo una caída media de aceitunas del 22%.

La producción de aceite es el producto del número de aceituna y el contenido de aceite por aceituna. El número de aceituna es el resultado de sucesivos procesos fisiológicos en primavera: desarrollo de brotes durante el año anterior, diferenciación floral, floración, cuajado y caída de aceituna. El riego deficitario afectó significativamente a la cantidad de inflorescencias/brote cuando el Ψ_{tallo} en floración fue inferior a -1,73 MPa (Tablas 18 y 19, Tablas 20 y 21). El número de aceituna/yema integra a ambos componentes productivos y se vio afectado cuando el Ψ_{tallo} fue de -1,73 MPa. Rapoport et al. (2012) también observaron que la floración y fructificación se vieron afectadas cuando se aplicó estrés hídrico durante el período inicial de floración. El número final de aceitunas depende de la caída natural de la flor y de la aceituna cuando se encuentra en endurecimiento de hueso. Cuando el Ψ_{tallo} desde la floración hasta el endurecimiento de hueso es inferior a -2,71 MPa, más del 22% de las aceitunas cayeron más tarde (Tablas 20 y 21). Sin embargo, si el estrés se produce algunas semanas después (después del endurecimiento de hueso) no se observó caída de aceituna (Gómez del Campo, 2013a). El Ψ_{tallo} en primavera determinó la floración, el número de aceitunas/árbol, la producción de aceituna, producción de aceite, y estos parámetros se vieron afectados por las diferencias de Ψ_{tallo} . Los valores máximos de estos parámetros se alcanzaron cuando el Ψ_{tallo} en floración fue de -1,00 MPa, y se observó una reducción significativa cuando el Ψ_{tallo} fue inferior a -1,50 MPa. En relación con el valor umbral de -1,50 MPa de Ψ_{tallo} en floración propuesto para obtener una máxima producción. Hay que decir que algunos años el Ψ_{tallo} de los tratamientos fue superior a -1,50 MPa. Sin embargo, en las últimas semanas de ensayo, cerca del endurecimiento de hueso, el Ψ_{tallo} disminuyó hasta -3,00 MPa (Figura 10), afectando significativamente a los componentes del rendimiento (Tablas 20 y 21).

Figura 11. Evolución de la longitud de los brotes (cm) en un tratamiento control (C1 y L1) y tres tratamientos de riego deficitario (C2, C3, C4 y L1, L2, L3) aplicados durante la primavera de 2016 a 2019 en la Parcela C (izquierda) y en la Parcela L (derecha). *, Diferencias significativas con $P < 0,05$.

Tabla 20. Componentes del rendimiento en un tratamiento control (C1) y tres tratamientos de riego deficitario aplicado en primavera en la Parcela C (C2, C3 y C4) durante los años 2016-2019 y promedio.

		Tratamientos de riego - Parcela C			
		C1 (100%)	C2 (50%)	C3 (25%)	C4 (0%)
Nudos desarrollados (número)	2015	4,85	3,67	4,13	3,48
	2016	7,34	6,67	7,11	5,67
	2017	6,92	4,49	4,97	4,13
	2018	4,15	3,96	4,10	4,19
	2019	11,44 a	7,47 b	5,51 c	3,22 d
	2015-2019	6,94 a	5,25 b	5,16 bc	4,14 c
Brotación (brotes/yema)	2015	0,01	0,01	0,01	0,02
	2016	0,01	0,00	0,01	0,01
	2017	0,09	0,09	0,07	0,05
	2018	0,04	0,07	0,05	0,05
	2019	0,07 a	0,03 b	0,01 b	0,01 b
	2015-2019	0,04	0,04	0,03	0,03
Iniciación (inflorescencias/yema)	2015	0,42	0,50	0,44	0,45
	2016	0,63	0,61	0,61	0,50
	2017	0,36	0,38	0,52	0,56
	2018	0,55	0,63	0,60	0,57
	2019	0,21 a	0,14 b	0,11 b	0,05 c
	2015-2019	0,40	0,45	0,43	0,42
Inflorescencias fértils (%)	2015	47	43	40	46
	2016	50	74	55	49
	2017	60	53	51	61
	2018	28	40	29	20
	2019	70 a	65 a	57 a	0 b
	2015-2019	49 ab	55 a	44 bc	35 c
Aceituna por inflorescencia fértil	2015	1,13	1,23	1,20	1,21
	2016	1,13	1,39	1,28	1,54
	2017	1,38	1,35	1,17	1,49
	2018	1,09	1,24	1,02	1,03
	2019	1,81 a	2,06 a	1,99 a	0,00 b
	2015-2019	1,14 a	1,27 a	1,13 a	0,77 b
Caída de aceituna (%)	2015	2 b	11 b	13 ab	30 a
	2016	0	3	0	3
	2017	1	0	2	2
	2018	0	0	0	0
	2019	1 b	0 b	14 a	-
	2015-2019	1 b	3 ab	6 a	7 a
Aceituna por yema (número)	2015	0,22	0,25	0,17	0,25
	2016	0,39	0,47	0,38	0,37
	2017	0,37	0,36	0,39	0,44
	2018	0,13	0,27	0,18	0,17
	2019	0,24 a	0,17 a	0,08 b	0,00 b
	2015-2019	0,25	0,30	0,22	0,23

Tabla 21. Componentes del rendimiento en un tratamiento control (L1) y tres tratamientos de riego deficitario aplicado en primavera en la Parcela L (L2, L3 y L4) durante los años 2016-2019 y promedio.

		Tratamientos de riego - Parcela L			
		L1 (100%)	L2 (40%)	L3 (17%)	L4 (0%)
Nudos desarrollados (número)	2016	5,34	5,54	5,24	5,37
	2017	2,83	2,63	2,66	4,00
	2018	3,97	4,12	4,14	3,95
	2019	9,03 a	4,51 b	4,27 bc	3,22 c
	2016-2019	5,29 a	4,20 b	4,08 b	4,14 b
Brotación (brotes/yema)	2016	0,01	0,01	0,01	0,00
	2017	0,00	0,00	0,02	0,01
	2018	0,10	0,13	0,10	0,12
	2019	0,03 a	0,01 b	0,01 b	0,00 b
	2016-2019	0,04	0,04	0,04	0,03
Iniciación (inflorescencias/yema)	2016	0,63	0,61	0,50	0,61
	2017	0,76 a	0,54 b	0,48 b	0,56 b
	2018	0,53	0,37	0,37	0,41
	2019	0,16 a	0,08 b	0,03 b	0,03 b
	2016-2019	0,51 a	0,39 b	0,35 b	0,40 b
Inflorescencias fértils (%)	2016	50	55	49	74
	2017	33	42	47	39
	2018	54	39	47	35
	2019	73 a	78 a	73 a	0 b
	2016-2019	53 a	54 a	52 a	37 b
Aceituna por inflorescencia fértil	2016	1,13	1,28	1,54	1,39
	2017	1,17	1,21	1,28	1,13
	2018	1,06	1,25	0,87	1,21
	2019	2,01 a	1,38 a	1,25 a	0,00 b
	2016-2019	1,36 a	1,28 a	1,23 a	0,93 b
Caída de aceituna (%)	2016	0	0	3	3
	2017	8	9	11	7
	2018	1	3	7	0
	2019	0	0	0	-
	2016-2019	2	3	6	4
Aceitunas por yema (número)	2016	0,39	0,38	0,37	0,47
	2017	0,25	0,24	0,29	0,29
	2018	0,32	0,18	0,19	0,13
	2019	0,19 a	0,08 b	0,03 bc	0,00 c
	2016-2019	0,28	0,21	0,21	0,22

Medias para cada fila seguidas de letras diferentes son significativamente diferentes con $P < 0,05$, según la prueba de rango múltiple de LSD.

Figura 12. Relación entre la longitud del brote en endurecimiento de hueso (máximo % de C1 y L1 de cada año) y el Ψ_{tallo} en floración desde 2015 hasta 2019 en la Parcela C y desde 2016 hasta 2019 en la Parcela L. * El P-valor de la regresión fue significativo $\leq 0,05$.

3.2.5 Seguimiento de maduración

La evolución del contenido de aceite (% PS y g/aceituna) se muestra en la Figura 13. En la Parcela C, el contenido de aceite (% PS) del tratamiento control (C1) fue significativamente mayor que los tratamientos C2, C3 y C4, después del 06/09/2011 y 04/09/2013, mientras que C3 y C4 no fueron significativamente diferentes entre ellos. El contenido de aceite (g/aceituna) fue significativamente mayor en C1 el 13/10/2011 y después del 04/09/2013. Mientras tanto, el contenido de aceite en peso fresco (% PF) no se vio afectado significativamente por el riego (datos no mostrados). Las diferencias de PF (g/aceituna) aparecieron en septiembre en la Parcela C. Los tratamientos de riego no produjeron diferencias en el desarrollo de la aceituna en la Parcela L.

La evolución del PS y el contenido de aceite por aceituna (g/aceituna) de las Parcelas C y L se muestran en la Figura 13. En la Parcela C, el PS y el contenido de aceite en endurecimiento de hueso y en recolección se vieron significativamente afectados por tratamientos de riego, los años más secos. Las aceitunas del tratamiento más regado (C1) fueron más grandes (0,20 g PS/aceituna) y con más aceite (0,010 g/aceituna) en el endurecimiento de hueso, que las aceitunas del tratamiento sin

riego (C4) (0,13 g PS/aceituna y 0,006 g/aceituna). En la recolección, las aceitunas de C1 tuvieron un PS de 0,60 g/aceituna y 0,43 g/aceituna para el contenido de aceite. En la Parcela L, el PS de la aceituna no se vio significativamente afectado en el endurecimiento de hueso (valor medio 0,18 g/aceituna) y tampoco en la recolección (0,68 g/aceituna), pero en 2019 el contenido de aceite si se vio significativamente afectado. El tratamiento más regado (L1) tuvo un mayor contenido de aceite (0,008 g/aceituna) que el tratamiento sin regar (L4) (0,003 g/aceituna). Mientras tanto, en el análisis de todos los años de ensayo no se observó un efecto significativo en el contenido de aceite, los valores promedio fueron de 0,008 y 0,24 g/aceituna en el endurecimiento de hueso y en recolección, respectivamente.

El estrés hídrico en primavera redujo significativamente el tamaño de la aceituna y el contenido de aceite en endurecimiento de hueso. Cuando el Ψ_{tallo} desde floración hasta endurecimiento de hueso fue menor de -1,8 MPa en el tamaño de la aceituna y -2,0 MPa, en el contenido de aceite, se produjo un descenso en ambos (Figura 13). Al mismo tiempo, se observó que el PS de la aceituna en endurecimiento de hueso determinó significativamente el contenido final de aceite en recolección (Figura 15). Por cada 0,2 g de PS de la aceituna en endurecimiento de hueso, el contenido de aceite aumentó en recolección en 0,26 g. Esta relación explica la capacidad significativamente menor de acumulación de aceite de las aceitunas cuando se aplicó un estrés hídrico 5 meses antes de la recolección. Una vez finalizado el ensayo, después del endurecimiento de hueso, todos los tratamientos se regaron con la misma dosis, y no se observó un aumento en el tamaño de la aceituna en aquellos tratamientos que tenían más estrés hídrico y menor carga de aceituna (Ben-Gal et al., 2011; Fernández et al., 2015). Nuestros resultados podrían explicarse por la reducción drástica de la multiplicación de células del mesocarpio durante el desarrollo temprano de la aceituna (Hammami et al., 2011).

El incremento de tamaño de la aceituna y la multiplicación de las células después del endurecimiento de hueso no compensó con el número de células desarrolladas en el periodo de ensayo, entre los tratamientos deficitarios y el control. Estos resultados están de acuerdo con los obtenidos por Gucci et al. (2009) cuando aplicaron un estrés hídrico severo. Cuando el estrés hídrico se aplica más tarde o en menor

medida, el número de células no se ve afectado y el tamaño final de la aceituna depende más del tamaño de la célula (Rapoport et al., 2004; Gucci et al., 2009 y Gómez del Campo et al., 2013a).

La falta de diferencias en el contenido de aceite (% PF) podría explicarse por la relación de la humedad de la aceituna y el contenido de aceite durante el período de síntesis de aceite. Cuando todos los datos del contenido de agua y aceite (g/aceituna) de ambas parcelas y años se agruparon, se observó una relación lineal positiva entre ambos parámetros ($R^2=0,68$, $n=82$) (Figura 14). Durante el desarrollo de la aceituna, el agua aumentó de 18 a 101 g en 100 aceitunas y el aceite de 1 a 26 g. Un aumento de 20 g de agua en 100 aceitunas se asoció con un incremento de 6 g de aceite.

Cuando los datos para cada año de ambas parcelas se expresaron en relación con el valor del tratamiento control C1 y L1 de ese año, se observaron relaciones positivas significativas entre el PS de la aceituna y el contenido de aceite en endurecimiento de hueso con el Ψ_{tallo} medido desde la floración hasta el endurecimiento de hueso (Figura 15). Estas relaciones indican que una disminución en el Ψ_{tallo} de 1,0 MPa produce reducciones de 11 y 17% en los valores más altos de ese año en PS de aceituna y contenido de aceite, respectivamente.

Figura 13. Evolución del peso seco de la aceituna (PS) y contenido de aceite (g/aceituna) en cuatro tratamientos de riego, aplicado durante la primavera de 2015 hasta 2019 en la Parcela C (izquierda) y desde 2016 hasta 2019 en la Parcela L (derecha). *, Diferencias significativas con $P < 0,05$.

Figura 14. Relación entre el contenido de aceite en recolección (g/aceituna) con el peso seco de la aceituna en endurecimiento de hueso (g/aceituna) desde 2015 hasta 2019 en la Parcela C y 2019 en la Parcela L. * El P-valor de la regresión fue significativo $\leq 0,05$.

Figura 15. Relaciones entre el PS y el contenido de aceite de la aceituna en endurecimiento de hueso (máximo % de C1 y L1 de cada año) y el Ψ_{tallo} desde floración hasta el endurecimiento hueso. Datos de 2015 hasta 2019 en la Parcela C y desde 2016 hasta 2019 en la Parcela L. * El P-valor de la regresión fue significativo $\leq 0,05$.

3.2.6 Producción, número y característica de las aceitunas

El número de aceitunas fue diferente entre los años de ensayo (Tabla 22 y 23). En 2018, los árboles del tratamiento C1 desarrollaron más aceitunas (7.170) que en 2019 (1.883). Los tratamientos de riego afectaron significativamente al número de aceitunas. El tratamiento más regado (C1 y L1) tuvo un mayor número de aceitunas, con valores de 4.605 y 2.526 aceitunas/árbol para C1 y L1 respectivamente, que el tratamiento sin regar (C4 y L4) que tuvo 3.585 y 491 aceitunas/árbol para C4 y L4 respectivamente. El número de aceitunas se vio significativamente afectado cuando el Ψ_{tallo} fue inferior a -1,41 MPa (Tablas 18 y 19).

Las características de la aceituna en recolección (Tablas 22) difieren entre años. En la Parcela C, las aceitunas fueron más grandes y tuvieron más aceite en 2019 que en 2015 y 2018. En la Parcela C, el riego deficitario de primavera determinó significativamente las características de la aceituna en recolección. En el análisis de todos los años de ensayo, las aceitunas del tratamiento C1 fueron más grandes (1,44 g PF/aceituna, 0,60 g PS/aceituna) y con más aceite (18% PF, 43% PS y 26,52 g aceite/100 aceitunas) que las aceitunas del tratamiento C4 (1,22 g PF/aceituna, 0,48 g PS/aceituna, 14% PF, 36% PS, y 17,43 g de aceite/100 aceitunas). La humedad de la aceituna no se vio afectada por los tratamientos de riego deficitario. En la Parcela L, el tamaño de la aceituna no se vio afectado, pero el contenido de aceite fue mayor en el tratamiento L1 (42% PS, 32 g de aceite/100 aceituna) que en L4 (37% PS, 25 g de aceite/100 aceituna) (Tabla 23). El tamaño de la aceituna y el contenido de aceite en endurecimiento de hueso se redujeron significativamente cuando el Ψ_{tallo} desde la floración hasta el endurecimiento de hueso fue menor a -1,8 MPa y -2,0 MPa, respectivamente. El PS de la aceituna y el contenido de aceite de la aceituna depende del Ψ_{tallo} entre la floración y el endurecimiento de hueso, cuando se redujo el Ψ_{tallo} en 1 MPa se produjo un descenso del 11 y 17% del control, respectivamente. Indicando la mayor sensibilidad de los componentes que determinan el número de aceituna y luego la producción en comparación con las características de la aceituna.

La producción de aceitunas y de aceite fue diferente entre los años de ensayo (Tabla 24). En la Parcela C, en 2018, la producción del tratamiento C1 fue mayor (9.488 kg aceituna/ha, 1.457 kg aceite/ha) que en 2019 (4.685 kg aceituna/ha, 1.005 kg

aceite/ha). La producción se vio significativamente afectada por los tratamientos de riego en primavera. El tratamiento más regado (C1) produjo más aceituna (valor medio 7.395 kg/ha) y aceite (1.278 kg/ha) que C4 (5.314 kg aceituna/ha, 777 kg aceite/ha) (Tabla 24). En la Parcela L, en 2019, el tratamiento más regado (L1) produjo más aceituna (6.118 kg aceituna/ha) y más aceite (998 kg/ha) que el tratamiento sin regar (L4) (975 kg aceituna/ha, 154 kg aceite/ha) (Tabla 25).

En el ensayo de la Parcela C, se observó un año de carga en 2018 y una descarga en 2019. En 2019, la tendencia fue de descarga en los cuatro tratamientos de riego, ya que paso de tener en 2018 9,5 a 4,5 t/ha en 2019 para el tratamiento de control (C1) y 4,5 a 0,8 t/ha para el tratamiento mas deficitario (C4) (Tabla 24). Esta disminución de la producción en los cuatro tratamientos se debe al agotamiento de las plantas del ensayo, ya que desde que comenzó en 2015, las intervenciones de poda fueron mínimas y surgió la necesidad de realizar una poda de renovación. Marra et al. (2016), observaron una disminución en el rendimiento de 11 t/ha a 5,7 t/ha entre los años 2009 y 2010, esto fue consecuencia de la disminución del número de aceitunas por árbol.

El riego deficitario durante la primavera redujo significativamente la producción de aceitunas y aceite (Tablas 24 y 25). El tratamiento sin riego (C4 y L4) redujo la producción de aceituna y aceite un 56 y 62% en comparación con el tratamiento control, respectivamente. La producción de aceite se relacionó linealmente con el Ψ_{tallo} en floración (Figura 16). La producción máxima se logró cuando el Ψ_{tallo} en floración fue de -1,0 MPa y se redujo significativamente a -1,50 MPa, y cuando alcanzo valores de -1,71 MPa, se redujo a la mitad. La reducción de la producción por estrés hídrico en primavera se debe a que ambos componentes (número de aceitunas y contenido de aceite por aceituna) se ven afectados, pero principalmente por el número de aceitunas. Cuando el déficit hídrico se aplica algunos días después de la floración, la producción se ve menos afectada que el área foliar (Hernández-Santana et al., 2017). Se observó que la sensibilidad al estrés hídrico durante la floración fue similar en lo productivo y en lo vegetativo. El número de aceituna es el parámetro que determina principalmente la producción de aceite en los ensayos de riego (Ben-Gal et al., 2011; Fernandes-Silva et al., 2010; Moriana et al., 2003) debido a la cantidad de mesocarpio desarrollado por un árbol (Lavee y Wodner, 2004). El

número de aceitunas en recolección se vio significativamente afectado cuando el Ψ_{tallo} en floración fue inferior a -1,41 MPa (Tablas 22 y 23), y se relacionó con el Ψ_{tallo} (Figura 16) como observaron Rapoport et al. (2012). El número de aceitunas fue máximo a -1,0 MPa y se redujo a la mitad cuando el Ψ_{tallo} en floración fue de -1,88 MPa (Figura 16).

Estos umbrales propuestos para la programación del riego deben ser complementados con medidas de sensor de humedad del suelo. La medida de Ψ_{tallo} podrá ser utilizada para manejo del riego cuando no existan resistencias al movimiento de agua debidas a cuestiones sanitarias o mecánicas, o climáticas (García-Tejera et al., 2020). En este sentido las medidas conjuntas de los sensores de humedad del suelo y Ψ_{tallo} permitirán detectar estas circunstancias (García-Tejera et al., 2020).

La productividad del agua fue significativamente mayor en los tratamientos con riego ($C1 = 0,27$ y $L1 = 0,15$ kg aceite/ m^3) que en los tratamientos sin riego ($0,20$ y $0,06$ kg aceite / m^3). No hay diferencias significativas entre $C1$ y $C2$ y $L1$ y $L2$. En los años 2016, 2017 y 2018, la productividad del agua no se vio afectada significativamente por los tratamientos de riego. Se observó una reducción significativa de la productividad del agua cuando el Ψ_{tallo} en floración fue inferior a -1,50 MPa (Tablas 18 y 19).

En el manejo del riego, se debe considerar la productividad del agua (producción por agua consumida tanto por riego como por lluvia). En otros ensayos, se ha observado una relación polinómica entre la producción de aceite y el agua consumida por la planta (Moriani et al., 2003; Trentacoste et al., 2015; Fernández et al., 2018) con una productividad máxima a diferentes valores. La productividad del agua se redujo a medida que se reducía el riego (Tablas 24 y 25), con un efecto significativo en el Ψ_{tallo} en floración inferior a -1,50 MPa. En contraste con Trentacoste et al. (2019), obtuvieron valores más bajos en el tratamiento más regado, esto puede deberse al menor estrés aplicado en comparación con nuestro ensayo.

Cuando el número de aceitunas y la producción de aceite de ambas parcelas se expresaron en relación con el valor del tratamiento control (C1 y L1) de cada año, se observó una relación positiva significativa en el Ψ_{tallo} en floración (Figura 16). Estas relaciones indican que una disminución en el Ψ_{tallo} de 1,0 MPa produjo reducciones del 58 y 66% en el número de aceitunas y en el contenido de aceite, respectivamente.

Tabla 22. Características de la aceituna en recolección, en un tratamiento control (C1) y tres tratamientos de riego deficitario aplicados en primavera en la Parcela C (C2, C3 y C4) durante los años 2015-2019 y promedio.

		Tratamientos de riego - Parcela C			
		C1 (100%)	C2 (50%)	C3 (25%)	C4 (0%)
Aceituna (número/árbol)	2015	7.055 a	5.243 b	3.766 bc	3.083 c
	2016	4.107	3.871	4.099	4.268
	2017	3.453	2.886	3.595	3.630
	2018	7.170	6.900	7.764	7.433
	2019	1.883 a	1.799 a	804 b	473 c
	2015-2019	4.605 a	3.995 ab	3.808 b	3.585 b
PF aceituna (g/aceituna)	2015	1,09	1,12	1,13	1,10
	2016	1,37	1,47	1,48	1,32
	2017	1,58a	1,56a	1,34b	1,40b
	2018	1,06	1,13	1,02	1,00
	2019	2,00a	1,69b	1,40 c	1,25 c
	2015-2019	1,44a	1,41a	1,29 b	1,22 b
PS aceituna (g/aceituna)	2015	0,44	0,45	0,45	0,43
	2016	0,55	0,53	0,54	0,46
	2017	0,67 a	0,66 a	0,56 b	0,56 b
	2018	0,44	0,46	0,41	0,40
	2019	0,87 a	0,73 b	0,59 c	0,53 c
	2015-2019	0,60 a	0,57 a	0,51 b	0,48 c
Contenido de aceite (% PF)	2015	16 a	17 a	16 a	13 b
	2016	18	16	16	15
	2017	18	18	17	16
	2018	15	15	14	14
	2019	21 a	20 b	16 c	13 d
	2015-2019	18 a	17 a	16 b	14 c
Contenido de aceite (% PS)	2015	39	35	39	34
	2016	44	36	44	43
	2017	44	44	41	39
	2018	37	38	36	36
	2019	49 a	46 b	38 c	30 d
	2015-2019	43 a	40 a	40 a	36 b
Contenido de aceite (g/100 aceitunas)	2015	17,30	18,50	17,70	14,60
	2016	24,20	22,80	23,90	19,60
	2017	28,94 a	28,67 a	22,84 b	22,08 b
	2018	16,30	17,30	14,70	14,20
	2019	42,82 a	33,96 b	22,16 c	15,90 d
	2015-2019	26,42 a	24,61 b	20,56 c	17,43 d
Humedad (%)	2015	60	60	60	61
	2016	59	63	64	65
	2017	58	58	58	60
	2018	59	60	60	60
	2019	56	57	58	57
	2015-2019	58	59	60	61

Medias para cada fila seguidas de letras diferentes son significativamente diferentes con $P < 0,05$, según la prueba de rango múltiple de LSD.

Tabla 23. Características de la aceituna en recolección, en un tratamiento control (L1) y tres tratamientos de riego deficitario aplicados en primavera en la Parcela L (L2, L3 y L4) durante 2019.

		Tratamientos de riego - Parcela L			
		L1	L2	L3	L4
		(100%)	(40%)	(17%)	(0%)
Aceituna (número/árbol)	2019	2.526 a	1.374 b	765 c	491 c
PF aceituna (g/aceituna)	2019	1,95	1,77	1,73	1,59
PS aceituna (g/aceituna)	2019	0,77	0,77	0,73	0,68
Contenido de aceite (% PF)	2019	16	18	17	16
Contenido de aceite (% PS)	2019	42 a	40 a	40 a	37 b
Contenido de aceite (g/100 aceituna)	2019	31,87 a	30,82 a	29,30 ab	25,10 b
Humedad (%)	2019	61	56	58	57

Medias para cada fila seguidas de letras diferentes son significativamente diferentes con $P < 0,05$, según la prueba de rango múltiple de LSD.

Tabla 24. Producción de aceituna, aceite y productividad del agua, en un tratamiento control (C1) y tres tratamientos de riego deficitario aplicados en primavera en la Parcela C (C2, C3 y C4) durante 2015 – 2019.

		Tratamientos de riego - Parcela C			
		C1 (100%)	C2 (50%)	C3 (25%)	C4 (0%)
Producción de aceituna (kg/ha)	2015	9.540 a	7.237 ab	5.253 bc	4.305 c
	2016	7.011	7.177	7.145	6.908
	2017	6.778	5.567	6.023	6.368
	2018	9.488	9.767	9.896	9.233
	2019	4.685 a	3.744 b	1.411 c	738d
	2015-2019	7.395 a	6.537 b	5.738 c	5.314 c
Producción de aceite (kg/ha)	2015	1.491 a	1.201 a	820 b	572 b
	2016	1.242	1.099	1.192	1.039
	2017	1.239	1.030	976	1.003
	2018	1.457	1.492	1.425	1.310
	2019	1.005 a	752 b	223 c	94 d
	2015-2019	1.278 a	1.095 b	901 c	777 d
PA _{aceituna} (kg aceituna/m ³)	2015	2,05 a	1,64 ab	1,23 bc	1,03 c
	2016	1,23	1,37	1,42	1,44
	2017	1,59	1,47	1,68	1,89
	2018	1,93	2,11	2,20	2,11
	2019	1,06 a	1,08 a	0,47 b	0,30 c
	2015-2019	1,57	1,53	1,40	1,35
PA _{aceite} (kg aceite/m ³)	2015	0,32 a	0,27 a	0,19 b	0,14 b
	2016	0,22	0,21	0,24	0,22
	2017	0,29	0,27	0,27	0,30
	2018	0,30	0,32	0,32	0,30
	2019	0,23 a	0,22 a	0,07 b	0,04 c
	2015-2019	0,27 a	0,26 ab	0,21 bc	0,20 c

Medias para cada fila seguidas de letras diferentes son significativamente diferentes con $P < 0,05$, según la prueba de rango múltiple de LSD.

Tabla 25. Producción de aceituna, aceite y productividad del agua, en un tratamiento control (L1) y tres tratamientos de riego deficitario aplicados en la Parcela L (L2, L3 y L4) durante 2019.

		Tratamientos de riego - Parcela L			
		L1	L2	L3	L4
		(100%)	(40%)	(17%)	(0%)
Producción de aceituna (kg/ha)	2019	6.118 a	2.989 b	1.662 c	975 c
Producción de aceite (kg/ha)	2019	998 a	524 b	285 c	154 c
PA _{aceituna} (kg fruit/m ³)	2019			0,51	
		0,94 a	0,74 ab	bc	0,37 c
PA _{aceite} (kg oil/m ³)	2019	0,15 a	0,13 a	0,09 b	0,06 b

Medias para cada fila seguidas de letras diferentes son significativamente diferentes con $P < 0,05$, según la prueba de rango múltiple de LSD.

Figura 16. Relaciones entre el número de aceitunas y producción de aceite en recolección (máximo % de C1 y L1 de cada año) con el Ψ_{tallo} en floración. Datos de 2015 hasta 2019 en la Parcela C y 2019 en la Parcela L. * El P-valor de la regresión fue significativo $\leq 0,05$.

3.3 Ensayo 3. Riego deficitario en el periodo de síntesis de aceite (otoño)

3.3.1 Condiciones ambientales

Los datos climáticos se resumen en la Figura 17 como temperaturas mínimas y máximas mensuales (°C), lluvia (mm) y evapotranspiración de referencia (ET_o, mm). Las precipitaciones y ET_o durante los períodos de riego se presentan en la Tabla 26.

El mes de agosto fue el más caluroso (con una temperatura media de 26,6 °C) y enero el más frío (temperatura media de 6,1 °C). La temperatura más alta (40,3 °C) se registró el 10/08/2012 y la más baja (-9,4 °C) el 02/09/2012. Las precipitaciones variaron entre años, de 338 mm en 2012 a 459 mm en 2013. Se registraron principalmente en abril, mayo y octubre, mientras que junio, julio y agosto fueron meses secos. Durante el período de ensayo (finales de agosto, septiembre y octubre) las precipitaciones diferían entre años, siendo de 2, 96 y 22 mm en 2011, 2012 y 2013, respectivamente. Las condiciones se mantuvieron altamente evaporativas con ET_o acumulativo alto, tanto anualmente (1.191, 1.305 y 1.062 mm) como durante los períodos de ensayos (252, 284 y 183 mm) en 2011, 2012 y 2013, respectivamente.

Las parcelas de ensayo están situadas en la meseta sur de Castilla (516 m snm) en el centro de España. Esta zona se caracteriza por tener bajas temperaturas desde el otoño hasta la primavera (Figura 17). Las bajas precipitaciones de la región mediterránea determinan la rentabilidad del olivar y la necesidad de riego para lograr altos rendimientos. La zona de estudio tiene baja precipitación (precipitación anual promedio de 395 mm) con grandes diferencias entre los años de ensayo. El año 2013 fue el más húmedo (459 mm) en comparación con 2011 (371 mm) y 2012 (338 mm) (Tabla 26). El otoño puede ser un período relativamente lluvioso, pero en estos años la lluvia fue escasa. Desde finales de agosto hasta finales de octubre, las precipitaciones fueron de 2, 96 y 22 mm y se combinaron con una alta demanda de evaporación (ET_o) de 252, 284 y 183 mm en 2011, 2012 y 2013, respectivamente.

Figura 17. Lluvia mensual, evapotranspiración de referencia y temperaturas máximas y mínimas desde noviembre de 2010 hasta noviembre de 2013 en las dos parcelas de ensayo de riego deficitario aplicado en otoño de Puebla de Montalbán (Toledo, España).

3.3.2 Riego aplicado

La cantidad de agua aplicada varió anualmente según las condiciones climáticas (Tabla 26). En la Parcela C, C1 recibió 167, 90 y 105 mm en 2011, 2012 y 2013, respectivamente, durante el período de síntesis de aceite, mientras que C2, C3 y C4 recibieron en promedio de 66, 38 y 13% de lo aplicado a C1. Durante las tres campañas de riego, el promedio de riego aportado a C1, C2, C3 y C4 fue de 348, 307, 274 y 243 mm, respectivamente. El ahorro de agua resultante de los tratamientos deficitarios durante la síntesis de aceite en relación con C1 fue de 35, 61 y 88% en C2, C3 y C4, respectivamente. Los valores correspondientes durante toda la campaña de riego fueron 12, 21 y 30%.

En la Parcela L, el tratamiento L1 recibió 153 y 140 mm durante el período de síntesis de aceite en 2012 y 2013, respectivamente, mientras que L2, L3 y L4 recibieron en promedio 71, 41 y 18% de L1. Durante las dos campañas de riego, se

aplicó un promedio de 281, 238, 195 y 162 mm a L1, L2, L3 y L4, respectivamente. Este ahorro de agua resultante de los tratamientos deficitarios en relación con L1 fue de 29, 59 y 83% en L2, L3 y L4, respectivamente, durante la síntesis de aceite y 15, 31 y 43% durante toda la campaña de riego.

Tabla 26. Características climáticas y dosis de riego aplicada en dos parcelas experimentales con un tratamiento control (C1 y L1) y tres tratamientos de riego deficitario aplicados en otoño en la Parcela C (C2, C3, C4) y en la Parcela L (L2, L3 y L4) desde el 1 de noviembre hasta el 30 de octubre de 2011, 2012 y 2013.

	Precipitación (mm)	ETo (mm)	Riego aplicado (mm) Parcela C			
			C1	C2	C3	C4
01/10 - 18/05/11	340	402	-	-	-	-
19/05 - 22/08/11	14	520	263	263	263	263
23/08 - 21/10/11	2	252	167	109	67	20
22/10 - 31/10/11	15	17	-	-	-	-
Total	371	1191	430	372	330	283
01/11 - 05/03/12	88	162	-	-	-	-
06/03 - 22/08/12	117	849	240	240	240	240
23/08 - 23/10/12	96	284	90	63	36	9
24/10 - 31/10/12	37	10	-	-	-	-
Total	338	1305	330	303	276	249
01/11 - 02/06/13	426	411	-	-	-	-
03/06 - 22/08/13	7	458	180	180	180	180
23/08 - 15/10/13	22	183	105	66	37	17
15/10 - 20/10/13	4	10	-	-	-	-
Total	459	1062	285	246	217	197
	Precipitación (mm)	ETo (mm)	Riego aplicado (mm) Parcela L			
			L1	L2	L3	L4
01/11 - 05/03/12	88	162	-	-	-	-
06/03 - 22/08/12	117	849	143	143	143	143
23/08 - 23/10/12	96	284	153	107	61	26
24/10 - 31/10/12	37	10	-	-	-	-
Total	338	1305	296	250	204	169
01/11 - 02/06/13	426	411	-	-	-	-
03/06 - 22/08/13	7	458	126	126	126	126
23/08 - 15/10/13	22	183	140	100	59	28
15/10 - 20/10/13	4	10	-	-	-	-
Total	459	1062	266	226	185	154

3.3.3 Estado hídrico de la planta

El Ψ_{tallo} fue distinto durante el período de ensayo, en los años, parcelas y tratamientos (Figura 18). En la Parcela C, el valor más alto de Ψ_{tallo} (-1,69 MPa) se registró en C1 el 19/09/2013 y el más bajo (-6,26 MPa) en C4 el 13/10/2011.

En las dos campañas de riego, los valores promedio de Ψ_{tallo} fueron -2,57, -3,0, -3,99 y -4,91 MPa para C1, C2, C3 y C4, respectivamente. En ambos años, el tratamiento C4 mostró un Ψ_{tallo} significativamente menor que los otros tratamientos a partir de dos semanas después de comenzar el riego del ensayo. El 13/10/2011 y el 8/10/2013 todos los tratamientos fueron significativamente diferentes entre sí. En la Parcela C, se observó que el Ψ_{tallo} aumentó el 10/08/2013 después de una lluvia de 16 mm el 30/09/2013.

En la Parcela L, el valor más alto de Ψ_{tallo} (-0,75 MPa) se registró en L1 el 10/02/2012 y el más bajo (-4,04 MPa) en L4 el 20/10/13. Los valores promedio de Ψ_{tallo} durante el ensayo fueron -1,22, -1,51, -1,98 y -2,58 MPa para L1, L2, L3 y L4, respectivamente. En ambos años, se observaron diferencias significativas entre los tratamientos a partir de dos semanas después de comenzar el riego del ensayo. A finales de septiembre, todos los tratamientos presentaron valores significativamente diferentes. El aumento de Ψ_{tallo} observado el 10/02/2012 y el 10/08/2013 fue debido a las precipitaciones de 46 mm el 28/09/2012 y 16 mm el 30/09/2013, respectivamente.

Las Parcelas C y L estuvieron expuestas a condiciones climáticas similares, pero las diferencias en características del suelo llevaron a diferentes respuestas de riego entre los tratamientos. Los valores medios de Ψ_{tallo} de los tratamientos menos regados (C4 y L4) -4,91 y -2,58 MPa, respectivamente, diferían mucho entre las dos parcelas (Figura 18) a pesar de que se aplicó un riego similar durante el período experimental (15 mm y 27 mm respectivamente). Estas diferencias pueden atribuirse en parte a la mayor profundidad efectiva de enraizamiento de la Parcela L (0,80 m) que en la Parcela C (0,60 m) y a la distancia entre goteros. La combinación de poca lluvia, alta demanda evaporativa y poca profundidad de suelo de la Parcela C fue propicio para el desarrollo de condiciones severas de estrés hídrico. En este

caso, no fue posible mantener una alta hidratación de la planta en el tratamiento control (C1) durante todo el experimento. Un mes después de comenzar el ensayo los olivos de los tratamientos C2, C3 y C4 presentaron un promedio de Ψ_{tallo} por debajo de -4,0 MPa (Figura 18), con mínimos de -6,26 MPa y -5,93 MPa en 2011 y 2013, respectivamente. Estos valores están cerca de los valores de -8,0 MPa medidos en olivar de secano (Moriana et al., 2003). En la Parcela L, los valores más bajos de Ψ_{tallo} fueron -4,04 y -3,74 MPa en 2012 y 2013, respectivamente.

Figura 18. Evolución del potencial hídrico de tallo (MPa), medido al mediodía en cuatro tratamientos de riego, aplicados en otoño en los años 2011, 2012 y 2013 en la Parcela C (izquierda) y Parcela L (derecha). *, Diferencias significativas con $P < 0.05$.

3.3.4 Crecimiento de brotes y componentes del rendimiento

La brotación ocurrió el 28/03/2011, 20/03/2012 y 25/03/2013, plena floración el 16/05/2011, 21/05/2012 y 18/05/2013 y el endurecimiento del hueso, el 10/07/2011, 21/07/2012 y 14/07/2013.

En ambas parcelas, la longitud del brote (cm), el número de inflorescencias (nº inflorescencia/brote), la producción de aceitunas (nº aceitunas/brote) y la caída de

aceituna (%) diferían entre años y no se vieron significativamente afectados por los tratamientos de riego (Tabla 27). La fuerza de retención de la aceituna mostró un valor medio de 562 g en 2011, y no se vio afectada significativamente por los tratamientos de riego (datos no mostrados).

La producción de aceite es el producto del número de aceitunas y del contenido de aceite de una aceituna. El número de aceitunas es, en sí mismo, el resultado combinado de procesos sucesivos de desarrollo de yemas, iniciación floral, floración, cuajado de aceitunas, acumulación de aceite y caída de aceitunas. Los brotes se desarrollan principalmente en primavera y están fuertemente limitados por el suministro de fotoasimilados (Cherbiy-Hoffmann et al., 2013) y, por lo tanto, dependen de las reservas acumuladas durante el otoño y el invierno que también respaldan el crecimiento vegetativo de primavera además de la diferenciación floral (Tombesi, 2003). En este ensayo, el déficit hídrico aplicado en otoño no afectó a la concentración de carbohidratos en los órganos de reserva al final del invierno (Hueso et al., 2016) y no produjo ningún efecto significativo sobre la floración o la producción de aceitunas en la siguiente campaña (Tabla 27). La ausencia de diferencias en la fuerza de retención de la aceituna entre tratamientos es consistente con la falta de diferencias en la caída de aceitunas entre tratamientos (Tabla 27), a pesar de alcanzar un alto estrés hídrico (-6 MPa) como también observaron Gucci et al. (2007). La falta de diferencias entre los tratamientos de riego en el crecimiento vegetativo, floración, aceitunas por brote y la caída de aceituna supuso que al año siguiente el número de aceitunas no se viese afectado (Tabla 27). Tognetti et al. (2006) también observaron una respuesta similar durante el mismo período de déficit hídrico. Estos resultados en conjunto indican que se puede aplicar un alto estrés hídrico durante este período sin afectar al comportamiento de los árboles en el año siguiente.

Tabla 27. Crecimiento vegetativo y componentes del rendimiento en un tratamiento control (C1 y L1) y tres tratamientos de riego deficitario aplicados en otoño en cada parcela (C2, C3, C4 y L2, L3, L4).

		Tratamientos de la Parcela C			
		C1	C2	C3	C4
Longitud de brote (cm)	2012	12,9	25,2	18,6	17,0
	2013	5,3	4,8	3,9	3,9
	2014	18,9	18,4	13,8	16,3
Inflorescencias (número/brote)	2012	0,97	0,36	0,58	0
	2013	7,83	8,5	8,53	9,1
	2014	4,38	3,14	4,72	4,2
Aceitunas (número/brote)	2012	1,3	0,7	0,58	0
	2013	4,5	4,1	5,4	5,3
	2014	5,1	3,4	5,3	5,64
Caída de aceituna (%)	2013	2	4	4	13
	2014	16	3	11	9
		Tratamientos de la Parcela L			
		L1	L2	L3	L4
Longitud de brote (cm)	2013	6,3	9,2	8,4	7,0
	2014	14,1	8,8	11,1	12,9
Inflorescencias (número/brote)	2013	8,2	6,7	7,1	7,9
	2014	2,0	5,3	4,9	3,6
Aceitunas (número/brote)	2013	5,6	4,6	4,1	5,3
	2014	1,7	2,9	2,9	1,9
Caída de aceituna (%)	2013	3	2	5	1
	2014	47	22	12	9

3.3.5 Seguimiento de maduración

La evolución del contenido de aceite (% PS y g/aceituna) se muestra en la Figura 19. En la Parcela C, el contenido de aceite (% PS) del tratamiento control (C1) fue significativamente mayor que en resto de tratamientos, después del 6/09/2011 y 4/09/2013, mientras que C3 y C4 no fueron significativamente diferentes. El contenido de aceite (g/aceituna) fue significativamente mayor en C1 el 13/10/2011 y después del 4/09/2013. Mientras tanto, el contenido de aceite en peso fresco (% PF) no se vio afectado significativamente por el riego (datos no mostrados). Las diferencias de PF (g/aceituna) aparecieron en septiembre en la Parcela C pero el PS se vio afectado más tarde (datos no mostrados). Los tratamientos de riego no produjeron diferencias en el desarrollo de la aceituna en la Parcela L.

La falta de diferencias en el contenido de aceite (% PF) podría explicarse por la relación del agua de la aceituna y el contenido de aceite durante el período de síntesis de aceite. Cuando todos los datos del contenido de agua y aceite (g/aceituna) de ambas parcelas y años se agruparon, se observó una relación lineal positiva entre ambos parámetros ($R^2=0,68$, $n=82$) (Figura 20). Durante el desarrollo de la aceituna, el agua aumentó de 18 a 101 g en 100 aceitunas y el aceite de 1 a 26 g. Un aumento de 20 g de agua en 100 aceitunas se asoció con un incremento de 6 g de aceite.

El crecimiento de la aceituna y el contenido de aceite aumentaron en el tratamiento control desde finales de agosto hasta la recolección, finales de octubre (Figura 19). Durante estos dos meses anteriores a la recolección se acumuló más del 86 % del aceite total y el tamaño de la aceituna aumento en un 44 %. Gómez-del-Campo, (2013a) ha observado incrementos similares en la misma variedad y sistema de cultivo. Dos semanas después de comenzar el ensayo de riego, el crecimiento de la aceituna se vio afectado por la disminución del estado hídrico de la planta en la Parcela C. El tamaño de la aceituna y el contenido de aceite (expresado como g/aceituna y % PS, respectivamente) fueron significativamente menores en los tratamientos C2, C3 y C4 que C1. Sin embargo, en la Parcela L no se observaron diferencias entre los tratamientos (Figura 19).

Figura 19. Evolución del contenido de aceite sobre PS (%) y en g/aceituna en cuatro tratamientos de riego aplicados en otoño en los años 2011, 2012 y 2013 en la Parcela C (izquierda) y Parcela L (derecha). *, Diferencias significativas con P < 0,05.

Figura 20. Relación entre el contenido de aceite de la aceituna y contenido de agua de la aceituna, durante el desarrollo de la aceituna, en cuatro tratamientos de riego aplicados en otoño en los años 2011, 2012 y 2013 en la Parcela C y la Parcela L. * El P-valor de la regresión fue significativo $\leq 0,05$.

3.3.6 Producción, número de aceitunas y característica de las aceitunas

El número de aceitunas no se vio afectado significativamente por los tratamientos de riego aplicado durante el periodo de síntesis de aceite en ninguna de las parcelas y años (Tabla 28).

Las características de la aceituna en la recolección, muestran diferencias entre los años experimentales (Tabla 28). Las aceitunas fueron más grandes y con más aceite en 2011 en la Parcela C y 2012 en la Parcela L. En la Parcela L no se observaron diferencias significativas en la mayoría de las características de la aceituna evaluadas, mientras que en la Parcela C los tratamientos de riego afectaron significativamente a todos los parámetros. C1 tuvo aceitunas más grandes (promedio 0,43 g PS) con mayor contenido de aceite (promedio 38,6% PS) y fueron menos maduros (IM=0,15) que C4 (valores promedio, PS 0,31 g, contenido de aceite 26,6% PS, IM=1,07). La capacidad de extracción de aceite (valor medio del 55%) no fue significativamente diferente en ninguna de las parcelas y años (datos no mostrados).

Los datos de producción de aceituna y aceite se presentan en la Tabla 29. En la Parcela L no se observaron diferencias significativas en la mayoría de los parámetros de producción evaluados, mientras que en la Parcela C los tratamientos de riego afectaron significativamente a la producción de aceituna y aceite. El tratamiento control (C1) mostró una producción significativamente mayor que los otros tratamientos. Los tratamientos de riego deficitario (C2, C3 y C4) redujeron la producción de aceituna en 22, 28 y 35% y la producción de aceite en 19, 29 y 44% de C1, respectivamente.

En 2012 se observó una descarga total, ya que no tuvo producción debido a que la floración fue escasa después de un invierno frío y seco, por este motivo en 2012 hubo que trasladar el ensayo a la parcela L. En la Parcela L, la producción paso en 2012 (descarga) de 7 a 12 t/ha en 2013 (carga) para el tratamiento de control (L1) y 8 a 10 t/ha para el tratamiento más deficitario (L4). Gómez del Campo, (2013) observó una disminución de la producción de 14 a 9 t/ha en el tratamiento de control y 12 a 8 t/ha en el tratamiento más deficitario entre los años 2008 y 2009.

La producción de aceituna, el tamaño de la aceituna y el contenido de aceite se vieron afectados por las condiciones climáticas interanuales, las características edáficas y la cantidad de agua aplicada (Tablas 28 y 29). Para evitar esta variabilidad, se estudió las relaciones de estos parámetros con el estado hídrico de la planta (Ψ_{tallo}). Se tuvo en cuenta las parcelas, los tratamientos y los años, utilizando valores relativos a los máximos registrados en cada parcela. Los resultados mostraron diferencias significativas en características de la aceituna (Figura 21), producción (Figura 22) y productividad del agua (Figura 23) al Ψ_{tallo} , mostrando en cada caso un umbral de respuesta.

En estudios previos se han obtenido umbrales de Ψ_{tallo} para la producción de aceite, pero las comparaciones son complicadas por la metodología empleada para la medida del Ψ_{tallo} , la sensibilidad del cultivo y las características de la parcela. En nuestro ensayo, se midió el Ψ_{tallo} antes del riego, por lo que fue el valor más bajo alcanzado. Marra et al. (2016) sugirieron mantener el Ψ_{tallo} entre -3,5 y -2,5 MPa para obtener un rendimiento óptimo en los setos 'Arbequina'. En un olivar de alta densidad 'Arbequina' Gómez-del-Campo (2013b) propuso un umbral de riego en agosto de -2,0 MPa para alta producción y ahorro de agua. Gucci et al. (2007) en 'Leccino' observaron que el contenido de aceite disminuyó cuando el Ψ_{tallo} se redujo en verano y otoño de -1,5 MPa a -3,5 MPa. Para conseguir una alta producción de aceite, establecemos un umbral de Ψ_{tallo} de -2,21 MPa, este nivel de estrés se considera moderado (-2.0 a -3.5 MPa) en una evaluación fisiológica (Marino et al., 2018).

Tabla 28. Características de la aceituna en la recolección en dos parcelas, con un tratamiento control (C1 y L1) y tres tratamientos de riego deficitario aplicados en otoño en cada parcela (C2, C3, C4 y L2, L3, L4).

		Tratamientos de la Parcela C			
		C1	C2	C3	C4
Aceitunas (número/árbol)	2011	11.914	11.473	11.990	11.855
	2013	12.011	11.097	13.316	15.393
Peso fresco PF (g/aceituna)	2011	0,92 a	0,78 b	0,70 bc	0,50 c
	2013	0,92 a	0,75 b	0,56 c	0,48 c
Peso seco PS (g/ aceituna)	2011	0,44 a	0,41 b	0,38 c	0,34 d
	2013	0,42 a	0,36 b	0,32 c	0,29 c
Contenido aceite (% PF)	2011	19,9 a	20,3 a	19,2 a	16,9 b
	2013	16,5	16,9	17,0	14,6
Contenido aceite (% PS)	2011	41,3 a	38,8 b	35,1 c	28,9 d
	2013	35,9 a	34,9 a	29,5 b	24,3 c
Contenido aceite (g/100 aceitunas)	2011	18,2 a	15,9 b	13,5 c	9,9 d
	2013	15,1 a	12,5 b	9,5 c	7,2 d
Humedad (%)	2011	51,8 a	47,6 b	45,1 c	41,4 d
	2013	54,1 a	51,8 b	42,4 c	39,5 d
		Tratamientos de la Parcela L			
		L1	L2	L3	L4
Aceitunas (número/árbol)	2012	7.138	8.445	8.183	8.360
	2013	12.483	10.834	11.816	10.011
Peso fresco PF (g/aceituna)	2012	1,49	1,35	1,34	1,30
	2013	1,03	1,09	0,98	0,94
Peso seco PS (g/aceituna)	2012	0,59	0,56	0,54	0,55
	2013	0,4	0,43	0,41	0,43
Contenido aceite (% PF)	2012	17,6	17,9	17,3	17,5
	2013	13,6 b	14,1 b	14,2 ab	15,5 a
Contenido aceite (% PS)	2012	44,5	43,3	42,6	41,4
	2013	35,1	35,2	34,0	33,8
Contenido aceite (g/100 aceitunas)	2012	26,2	24,1	23,2	22,7
	2013	13,9	15,3	14,0	14,6
Humedad (%)	2012	60,5	58,7	59,5	57,7
	2013	61,3 a	60,0 b	58,1 c	54,2 d

Las letras diferentes son significativamente diferentes con $P < 0,05$, según la prueba de rango múltiple de LSD.

Tabla 29. Producción de aceituna y de aceite y productividad de agua en dos parcelas, con un tratamiento control (C1 y L1) y tres tratamientos de riego deficitario aplicados en otoño en cada parcela (C2, C3, C4 y L2, L3, L4).

		Tratamientos de la Parcela C			
		C1	C2	C3	C4
Producción aceituna (kg/ha)	2011	13.399 a	11.178 b	10.261 b	8.635 c
	2013	13.867 a	10.177 b	9.176 b	9.078 b
Producción aceite (kg/ha)	2011	2.682 a	2.265 b	1.960 c	1.454 d
	2013	2.276 a	1.729 b	1.552 bc	1.319 c
PA _{aceituna} (kg aceituna/m ³)	2011	2,31 a	1,99 ab	1,84 b	1,69 b
	2013	1,94 a	1,51 b	1,42 b	1,45 b
PA _{aceite} (kg aceite/m ³)	2011	0,41 a	0,38 ab	0,35 b	0,28 c
	2013	0,32 a	0,26 ab	0,24 b	0,21 b
		Tratamientos de la Parcela L			
		L1	L2	L3	L4
Producción aceituna (kg/ha)	2012	12.839	13.970	13.578	12.876
	2013	15.957 a	14.553 a	14.187 a	11.795 b
Producción aceite (kg/ha)	2012	2.261	2.505	2.351	2.218
	2013	2.163	2.042	2.014	1.820
PA _{aceituna} (kg aceituna/m ³)	2012	2,21	2,61	2,77	2,83
	2013	2,30	2,22	2,31	2,02
PA _{aceite} (kg aceite/m ³)	2012	0,39	0,47	0,48	0,49
	2013	0,31	0,31	0,33	0,31

Las letras diferentes son significativamente diferentes con $P < 0,05$, según la prueba de rango múltiple de LSD.

3.3.7 Productividad del agua

Se hicieron estimaciones de la productividad del agua en términos de producción de aceituna y de aceite. PA_{aceituna} (kg aceituna/m³) mostró diferencias significativas entre los tratamientos en la Parcela C, pero no en la Parcela L. Fue significativamente menor en C4 que en C1. Un análisis de la productividad relativa del agua reveló relaciones polinómicas con el Ψ_{tallo} (Figura 20) ($R^2=0,54$ para PA_{aceituna} y $R^2 = 0,74$ para PA_{aceite}) en las cuales la productividad máxima del agua ocurrió a Ψ_{tallo} similares de -1,50 MPa y -2,31 MPa para producción de aceituna y aceite, respectivamente.

En el manejo del riego se debe considerar la producción, pero también la productividad del agua (producción por agua de riego aplicada y lluvia efectiva). En

estos ensayos, los tratamientos de riego modificaron significativamente la PA_{aceituna} y PA_{aceite} (Tabla 29), que oscilaron entre 2,83 y 1,42 kg de aceituna/ m^3 y 0,49 y 0,21 kg de aceite/ m^3 . Estos son valores más altos que los observados por Correa-Tedesco et al., (2010) en condiciones no limitadas de agua (Ψ_{tallo} de -2,45 MPa) y más bajos que los de Ahumada-Orellana et al. (2017) en el que los tratamientos alcanzaron el Ψ_{tallo} de -6 MPa. En el cálculo de la productividad del agua, los diferentes cálculos para calcularla, complican la comparación entre ensayos (Fernández, 2017).

La relación polinómica sobre la productividad del agua y el Ψ_{tallo} (Figura 21) estableció valores máximos de productividad de agua de aceituna y aceite en Ψ_{tallo} de -1,50 y -2,31 MPa, respectivamente, estos valores se consideran no estresados o moderadamente estresados, respectivamente (Marino et al., 2018). La producción de aceite se redujo sustancialmente (57% del máximo) bajo un estrés más severo (-5,0 MPa) y la productividad del agua fue menor (70% del máximo). En condiciones bien regadas (-1.2 MPa) la productividad del agua se redujo ligeramente (92%) a pesar de una mayor producción (100%), como también lo observaron Fernández et al. (2018). Trentacoste et al. (2015) observaron relaciones polinómicas similares.

Figura 21. Relaciones entre la productividad del agua de la aceituna y del aceite (% sobre el valor máximo en cada año) y el Ψ_{tallo} promedio, en 4 tratamientos de riego aplicados en el otoño en los años 2011, 2012 y 2013 en la parcela C y L. * El P-valor de la regresión fue significativo $\leq 0,05$.

3.3.8 Relación entre el Ψ_{tallo} y las características de la aceituna y producción de la aceituna

Se agruparon los datos de ambas parcelas y de cuatro años de estudio, para explorar las relaciones generales entre el Ψ_{tallo} promedio medido durante el periodo de ensayo y las características y producción de la aceituna en relación con C1 y L1. Debido a que ambas parcelas variaban en la cantidad de agua aplicada, productividad y capacidad de respuesta al estado hídrico de la planta. El valor de cada tratamiento se hizo porcentual sobre el valor máximo de cada año y parcela.

La relación de PF y PS de la aceituna en recolección (expresados como % del valor máximo alcanzado en cada parcela y año) estuvieron estrechamente relacionados con el Ψ_{tallo} (Figura 22) ($R^2=0,88$ para PF y $R^2=0,76$ para PS) en todos los tratamientos. La relación de PF y PS permaneció constante cuando el Ψ_{tallo} estuvo en -2,37 y -2,61 MPa, respectivamente, lo que indica una mayor sensibilidad del PF que del PS. La disminución adicional por debajo de ese valor umbral de Ψ_{tallo} redujo PF y PS en un 16% y 10% por MPa, respectivamente. De manera similar, la relación del contenido de aceite de la aceituna (expresado como % PF, % PS y g/100 aceitunas) estuvo estrechamente relacionado con el Ψ_{tallo} (Figura 22) (% PF, $R^2 = 0,56$; % PS, $R^2 = 0,95$; g aceite/100 aceitunas, $R^2 = 0,88$). El contenido de aceite % PF, % PS y g/100 aceitunas se mantuvieron constante a Ψ_{tallo} más alto que -4,11, -2,71 y -2,57 MPa, respectivamente, lo que indica la menor sensibilidad al Ψ_{tallo} del contenido de aceite % PF. Por debajo de esos valores, una reducción en 1 MPa disminuyó linealmente 16, 13 y 18% respectivamente. La humedad de la aceituna (%) permaneció constante a Ψ_{tallo} más alto que -2,10 MPa por debajo de ese valor la humedad de la aceituna disminuyó un 8% cuando se redujo el Ψ_{tallo} en 1 MPa.

El parámetro más sensible a las diferencias en Ψ_{tallo} fue el contenido de agua de la aceituna y el menos sensible fue el contenido de aceite (% PF). Por debajo de -2,10 MPa y -4,11, se produjo una reducción del 8 y 15 %, respectivamente (Figura 23). Ahumada-Orellana et al., (2017) también observaron una respuesta del tamaño de la aceituna en $\Psi_{\text{tallo}} < -2,37$ MPa en 'Arbequina'. La baja respuesta del contenido de aceite (% PF) con el Ψ_{tallo} (Figura 22) puede explicarse por la disminución proporcional del contenido de aceite y de agua cuando hubo déficit hídrico (Figura

20). Durante la maduración de la aceituna se asoció un aumento de 20 g de agua en 100 aceitunas, en todos los tratamientos, con un aumento de 4 g de aceite. El azúcar se transporta en solución acuosa de las hojas a las aceitunas, de modo que las aceitunas aumentan simultáneamente en contenido de aceite y agua. Se ha observado una respuesta similar en la vid, donde las bayas acumulan menos azúcar en el tratamiento con menos riego (Bondada et al., 2005).

La relación de producción de aceituna y aceite (expresada como % del valor máximo de cada año y parcela) se relacionó con el Ψ_{tallo} (Figura 23) ($R^2 = 0,73$ y $R^2 = 0,88$, respectivamente). Las relaciones entre estos parámetros permanecieron constantes con valores más altos de -1.82 y -2,21 MPa para la producción de aceituna y aceite, respectivamente. Esto indica que la producción de aceituna es más sensible que la producción de aceite al Ψ_{tallo} . Por debajo de los valores umbral de Ψ_{tallo} , la producción de aceituna y de aceite disminuyen, respectivamente, en un 11% y un 14% cuando se redujo el Ψ_{tallo} en 1 MPa.

Figura 22. Relaciones entre las características de la aceituna (% sobre el valor máximo en cada año) y el Ψ_{tallo} promedio en cuatro tratamientos de riego, aplicados en otoño en los años 2011, 2012 y 2013 en la Parcela C y L. El parámetro C es el valor umbral (Ψ_{tallo} , MPa) de la relación lineal. * El P-valor de la regresión fue significativo $\leq 0,05$.

Figura 23. Relaciones entre la producción de aceitunas y aceite (% sobre el valor máximo en cada año) y el Ψ_{tallos} promedio en cuatro tratamientos de riego, aplicados en otoño en los años 2011, 2012 y 2013 en la Parcela C y L. El parámetro C es el valor umbral (Ψ_{tallos} , MPa) de la relación lineal. * El P-valor de la regresión fue significativo $\leq 0,05$.

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES

4 Conclusiones

El Ψ_{tallo} mide el estado hídrico de los árboles y puede utilizarse para la programación del riego, ya que permite determinar el momento de iniciar el riego. Actualmente no existe una metodología definida para la medida del Ψ_{tallo} en olivar en seto. El Ψ_{tallo} se requiere para la determinación de los valores umbrales necesarios para el manejo del riego. Según los resultados obtenidos, los brotes muestreados deben ubicarse a media altura del seto y deben cubrirse con bolsas de aluminio antes de la medida del Ψ_{tallo} , incluso cuando estén ubicadas a la sombra, para reducir la transpiración y la variabilidad de la medida. Con 1 hora cubierta es suficiente, pero pueden permanecer cubiertas durante 2 horas sin afectar a la medida. Los brotes deben muestrearse en el lado de la sombra y no en el del sol. Los valores del Ψ_{tallo} dependen de la hora del día, pero no de la edad de las hojas. Se recomienda que la medida de Ψ_{tallo} se realice al mediodía solar en brotes con hojas de 1, 2 o 3 años. Se debe tener especial cuidado en condiciones de alta hidratación porque la metodología de medida utilizada tiene más influencia en los resultados que en condiciones de estrés. Para obtener un valor representativo del Ψ_{tallo} en un sector de riego dentro de una parcela, se precisa medir en 5 brotes de 5 árboles diferentes aplicando la metodología descrita anteriormente.

Las estrategias de riego deficitario buscan la reducción del riego, con un bajo efecto en la producción. Este déficit hídrico debe aplicarse teniendo en cuenta la sensibilidad en los distintos periodos fisiológicos del olivo. En esta tesis doctoral se evaluó el efecto de la reducción de las dosis de agua y, produciendo un incremento de deshidratación de la planta en la primavera (brotación-endurecimiento del hueso) y el otoño (síntesis de aceite), determinar los umbrales de riego para esos periodos.

El período desde el desarrollo de la yema hasta el endurecimiento de hueso es altamente sensible al déficit hídrico. Nuestros resultados indican que no se debe aplicar riego deficitario en primavera. El Ψ_{tallo} durante floración debe mantenerse por encima de -1,50 MPa, pero los valores más altos de floración, cuajado, número de aceitunas y producción se alcanzaron con Ψ_{tallo} de -1,0 MPa. En el olivar en seto,

el crecimiento vegetativo debe ser controlado, y el riego deficitario podría ser una herramienta interesante. Sin embargo, la sensibilidad del crecimiento vegetativo, es similar a la producción, lo que indica que tanto el crecimiento como la producción se verán afectados si el Ψ_{tallo} durante la floración es inferior a -1,50 MPa. Por lo tanto, para un buen control del crecimiento vegetativo, sin afectar a la producción, se recomienda aplicar riego deficitario durante el endurecimiento de hueso, ya que aún hay crecimiento y la producción no se ve afectada.

En otro de los ensayos se estudió el efecto del riego deficitario en el periodo de síntesis de aceite. El riego con estrés moderado ($\Psi_{\text{tallo}} > -2,21$ MPa) no disminuyó significativamente la producción de aceite. La máxima productividad del agua, se logró cuando se aplicó el riego con un Ψ_{tallo} de -2,31 MPa. El mantenimiento de este estrés moderado no afectó al crecimiento o floración del año siguiente y, por consiguiente, a la producción.

Los resultados obtenidos en estos ensayos ponen de manifiesto que el manejo del riego deficitario controlado utilizando las medidas del Ψ_{tallo} es posible en olivar en seto, ya que se consigue maximizar el rendimiento y la productividad del agua. Estrategia de riego importante en aquellas zonas en las que el agua es escasa. Los umbrales propuestos para la programación del riego en otoño y en primavera deben de complementarse con medidas de sensor de humedad del suelo.

4. Conclusions

Ψ_{stem} measures the water state of the trees and is often used for irrigation scheduling. Currently, there is no defined methodology for the measurement of Ψ_{stem} in olive orchards in hedges. Ψ_{stem} is required to determine the threshold values necessary for irrigation management. According to the results obtained, the sampled shoots should be located mid-height of the hedge and should be covered with aluminum bags before measuring Ψ_{stem} , even when they are located in the shade, to reduce transpiration and the variability of the measurement. With 1 hour covered is enough, but they can remain covered for 2 hours without affecting the measurement. Shoots should be sampled on the shady side and not on the sun side. Ψ_{stem} values depend on the time of day, but not on the age of the leaves. It is recommended that the measurement of Ψ_{stem} be carried out at solar noon in shoots with leaves of 1, 2 or 3 years. Special care must be taken in conditions of high hydration because the measurement methodology used has more influence on the results than under stress conditions. To obtain a representative value of Ψ_{stem} in an irrigation sector within an orchard, it is necessary to measure in 5 shoots of 5 different trees applying the methodology described above.

Deficit irrigation strategies look for to reduce irrigation, with low effect on production. Water deficit must be applied taking into account the sensitivity in the different physiological periods of the olive tree. In this doctoral thesis, the effect of reducing water doses was evaluated, producing an increase in dehydration of the plant in spring (sprouting-pitt hardening) and autumn (synthesis of oil).

The period from bud development to pit hardening is highly sensitive to water deficit. Our results indicate that deficit irrigation should not be applied in spring. Ψ_{stem} during flowering should be kept above -1.50 MPa, but the highest values of bloom, fruit set, number of olives and production were reached with a Ψ_{stem} of -1.0 MPa. In the hedged olive orchard, vegetative growth should be controlled, and deficit irrigation could be an interesting tool. However, in spring the sensitivity to water stress of vegetative growth is similar to that of production, which indicates that both growth and production will be affected if Ψ_{stem} during flowering is less than -1.50 MPa. Therefore, for good control of vegetative growth, without affecting

production, it is recommended to apply deficit irrigation during pit hardening, since there is still growth.

In another of the trials, the effect of deficit irrigation in the oil synthesis period was studied. Irrigation with moderate stress ($\Psi_{\text{stem}} > -2.21$ MPa) did not significantly decrease oil production. Maximum water productivity was achieved when irrigation was applied with a Ψ_{stem} less than -2.31 MPa. Maintaining this moderate stress didn't affect growth or flowering of the following year and, consequently, production.

The results obtained in these experiments show that the management of irrigation using Ψ_{stem} measures could be used in hedgerow orchards, since it is possible to maximize the yield and productivity of the water, in those areas where water is scarce. Allowing the implementation of controlled deficit irrigation strategies. The thresholds proposed for the scheduling of irrigation in autumn and spring must be complemented with soil moisture sensor measurements.

CAPÍTULO V: REFERENCIAS

1. Ahumada-Orellana, L. E., Ortega-Farías, S., Searles, P. S., Retamales, J. B., (2017). Yield and water productivity responses to irrigation cut-off strategies after fruit set using stem water potential thresholds in a super-high-density olive orchard. *Front. Plant Sci*, 8, 1-11.
2. Barranco, D.; Fernández-Escobar, R.; Rallo, L.; (2017). *El cultivo del olivo*. Madrid.Ed. Mundi-Prensa.
3. Begg, J.E., Turner, N.C., (1970). Water potential gradients in field tobacco. *Plant Physiol* 46: 343-346.
4. Behboudian, M. H., Marsal, J., Girona, J., Lopez, G. (2011). 4 Quality and Yield Responses of Deciduous Fruits to Reduce Irrigation. *Hortic rev*, 38, 149.
5. 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(3), 253-263.
6. Bondada, B.R., Matthews, M.A., Shackel, K.A., (2005). Functional xylem in the post-veraison grape berry. *J. Exp. Bot.* 56(421), 2949-2957.
7. Bonghi, G., Rocchi, P., Pallioti, A., (1994). Drought effects on chlorophyll fluorescence. *Med. Bio Enviro* 22: 75-82.
8. Botella, O; Campos, I. (2005). Las relaciones Agua-Planta. *In Agua y Agronomía*. Ediciones Mundi-Prensa. p85-161.
9. Boyer, J.S., (1995). *Measuring the Water Status of Plants and Soils*. Academic Press.
10. Campbell, G.S., (1985). *Soil Physics With BASIC: Transport Models for Soil-plant Systems*. Elsevier, Amsterdam; New York.
11. Centeno, A., Memmi, H., Moreno, M. M., Moreno, C., Pérez-López, D., (2018). Water relations in olive trees under cold conditions. *Sci. Hortic*, 235, 1-8.
12. Chalmers, D.J., Mitchell, P.D., Heek, L.V., (1981). Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density and summer pruning. *J.Am. Soc. Hortic. Sci.* 106, 307-312.
13. 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. *Sci. Hortic.* 150, 110-116.

14. Chone, X., Van Leeuwen, C., Dubourdieu, D., Gaudillère, J. P., (2001). Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status. *Ann. bot*, 87(4), 477-483.
15. Connor, D. J., Legge, N. J., Turner, N. C., (1977). Water relations of mountain ash (*Eucalyptus regnans* F. Muell.) forests. *Funct. Plant Biol*, 4(5), 753-762.
16. Connor, D.J., (2005). Adaptation of olive (*Olea europaea* L.) to water-limited environments. *Aust. J. Agric. Res.* 56(11), 1181-1189.
17. Connor, D.J., Gomez-del-Campo, M., Rousseaux, M.C., Searles, P.S., (2014). Structure, management and productivity of hedgerow olive orchards: A review. *Sci. Hortic.* 169, 71-93.
18. 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. *Agric. Water Manag.* 97(11), 1829-1837.
19. Cuevas, J., Polito, V.S., (2004). The role of staminate flowers in the breeding system of *Olea europaea* (Oleaceae): an andromonoecious, wind-pollinated taxon. *Ann. Bot.* 93, 547-553.
20. 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. *Agric. Water Manage.* 97, 1293-1302.
21. De la Rosa, R., Rallo, L., Rapoport, H.F., (2000). Olive floral bud growth and starch content during winter rest and spring bud break. *HortScience* 35, 1223-1227.
22. Del Río, C., Romero, A.M., (1999). Whole, unfilled olives can be used to determine their oil content by nuclear magnetic resonance. *Hort Technol.* 9, 675-680.
23. Doorenbos, J., Pruitt, W.O., (1977). Las necesidades de agua de los cultivos. Monografía Estudio FAO: Riego y Drenaje, no. 24, Rome, 194 pp.
24. FAOSAT. (2019). Anuario estadístico. <http://www.fao.org/statistics/es>
25. Fereres, E., Goldhamer, D. A., (1990). Deciduous fruit and nut trees. *Agronomy (USA)*.
26. Fereres, E., Soriano, M.A., (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *J Exp Bot* 58,147-159.
27. Fernandes-Silva, A. A., Ferreira, T. C., Correia, C. M., Malheiro, A. C., Villalobos, F. J. (2010). Influence of different irrigation regimes on crop yield and water use efficiency of olive. *Plant and soil*, 333(1-2), 35-47.

28. Fernández, J. E., Moreno, F., Girón, I. F., Blázquez, O. M., (1997). Stomatal control of water use in olive tree leaves. *Plant soil*, 190(2), 179-192.
29. Fernández, J.E., Moreno, F., (1999). Water use by olive tree. *J. Crop Prod.* 2, 101–162.
30. Fernández, J. E., Durán, P. J., Palomo, M. J., Díaz-Espejo, A., Chamorro, V., Girón, I. F., (2006). Calibration of sap flow estimated by the compensation heat pulse method in olive, plum and orange trees: relationships with xylem anatomy. *Tree Physiol*, 26(6), 719-728.
31. Fernández, J.E., Díaz-Espejo, A., Infante, J.M., Durán, P., Palomo, M.J., Chamorro, V., Girón, I.F., Villagarcía, L., (2006). Water relations and gas exchange in olive trees under regulated deficit irrigation and partial rootzone drying. *Plant Soil*. 284(1-2), 273-291.
32. Fernández, J. E., Rodriguez-Dominguez, C. M., Perez-Martin, A., Zimmermann, U., Rüger S, Martín-Palomo, M. J., Torres-Ruiz, J.M., Cuevas, M.V., Sann, C., Ehrenberger, W., Diaz-Espejo, A., (2011). Online- monitoring of tree water stress in a hedgerow olive orchard using the leaf patch clamp pressure probe. *Agric. Water Manag* 100:25–35.
33. Fernández, J.E., Perez-Martin, A., Torres-Ruiz, J.M., Cuevas, M.V., Rodriguez-Dominguez, C.M., Elsayed-Farag, S., Morales-Sillero, A., García, J.M., Hernandez-Santana, V., Diaz-Espejo, A., (2013). A regulated deficit irrigation strategy for hedgerow olive orchards with high plant density. *Plant Soil*. 372, 279-295.
34. Fernández, J.E., (2017). Plant-based methods for irrigation scheduling of woody crops. *Horticulturae* 3 (2): 35.
35. Fernández, J. E., Diaz-Espejo, A., Romero, R., Hernandez-Santana, V., García, J. M., Padilla-Díaz, C. M., Cuevas, M. V. (2018). Precision irrigation in olive (*Olea europaea* L.) tree Orchards. In: water scarcity and sustainable agriculture in semiarid environment tools, strategies, and challenges for woody crops. Chapter 9: 179-217. Elsevier.
36. Fernández FJ, Ladux JL, Searles PS. (2015) Dynamics of shoot and fruit growth following fruit thinning in olive trees: Same season and subsequent season responses. *Sci Hortic*. 192:320-330.
37. García, J.M., Mancha, M., (1992). Evolución de la biosíntesis de lípidos durante la maduración de las variedades de aceituna 'Picual' y 'Godal'. *Grasas y aceites*. 43,

- 277-280.
38. García, J.M., Hueso, A., Gómez-del-Campo, M., (2020). Deficit irrigation during the oil synthesis period affects olive oil quality in high-density orchards (cv. Arbequina). *Agric. Water Manag.* 230, 105858.
 39. García-Tejera, O., López-Bernal, Á., Orgaz, F., Testi, L., Villalobos, F. J. (2020). The pitfalls of water potential for irrigation scheduling. *Agric. Water Manag.* 243, 106522.
 40. Geerts, S., Raes, D. (2009). Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agric. Water Manag.* 96(9), 1275-1284.
 41. Girona, J., Luna, A., Arbonés, A., Mata, M., Rufat, J., Marsal, J. (2001). Young olive trees response (*Olea europaea*, cv 'Arbequina') to different water supplies. Water function determination. Proceedings of the fourth International Symposium on Olive Growing. Bari (Italy). *Act. Hort.*
 42. Goldhamer, D.A., (1999). Regulated deficit irrigation for California canning olives. *Acta Hort.* 474, 369–372.
 43. Gómez del Campo, M., Fernández, J. E. (2007). Manejo del riego en plantaciones de olivar en seto. Editorial Agrícola.
 44. Gómez del Campo, M., (2013). Summer deficit-irrigation strategies in a hedgerow olive orchard cv. "Arbequina": effect on fruit characteristics and yield. *Irrig. Sci.* 31, 259–269.
 45. Gómez-del-Campo M., (2013b). Summer deficit irrigation in a hedgerow olive orchard cv. Arbequina: relationship between soil and tree water status, and growth and yield components. *Spanish J Agric Res.* 11(2):547-557.
 46. Gómez del Campo, M., García, J.M., (2013). Summer deficit-irrigation strategies in a hedgerow olive cv. Arbequina orchard: effect on oil quality. *J. Agric. Food Chem.* 61, 8899–8905.
 47. 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. *Agric. Water Manag.* 85, 133–140.
 48. Gregoriou, K., Pontikis, K., Vemmos, S., (2007). Effects of reduced irradiance on leaf morphology, photosynthetic capacity, and fruit yield in olive (*Olea europaea* L.). *Photosynthetica*, 45(2), 172-181.
 49. Gucci, R., Lodolini, E., Rapoport, H.F., (2007). Productivity of olive trees with different water status and crop load. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 82(4), 648-656.

50. Gucci, R., Lodolini, E.M., Rapoport, H.F., (2009). Water deficit-induced changes in mesocarp cellular processes and the relationship between mesocarp and endocarp during olive. fruit development. *Tree Physiol.* 29(12), 1575-1585.
51. Gucci, R., Goldhamer, D.A., Fereres, E., (2012). Olive. In: Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., Raes, D. (Eds.), *Crop Yield Response to Water*. Irrig Drain Pap No. 66, FAO, Rome, Italy, pp. 298–313
52. Gucci, R., Caruso, G., Gennai, C., Esposto, S., Urbani, S., Servili, M., (2019). Fruit growth, yield and oil quality changes induced by deficit irrigation at different stages of olive fruit development. *Agric. Water Manag.* 212, 88-98.
53. Hammami, S.B.M., Manrique, T., Rapoport, H.F., (2011). Cultivar-based fruit size in olive depends on different tissue and cellular processes throughout growth. *Sci Hortic.* 130, 445–451
54. Hartmann, H. T., Porlingis, I. (1957). Effect of different amounts of winter chilling on fruitfulness of several olive varieties. *Botanical Gazette*, 119(2), 102-104.
55. Hartmann, H.T., Panetsos, C., (1961). Effect of soil moisture deficiency during floral development on fruitfulness in the olive. *Proc. Am. Soc. Hortic. Sci.* 78, 209–217.
56. Hernandez-Santana, V., Fernández, J. E., Cuevas, M. V., Perez-Martin, A., Diaz-Espejo, A. (2017). Photosynthetic limitations by water deficit: effect on fruit and olive oil yield, leaf area and trunk diameter and its potential use to control vegetative growth of super-high density olive orchards. *Agric. Water Manag.* 184, 9-18.
57. Hueso, A., Trentacoste, E. R., Ruiz, C., Meng, L., Perez Pastor, A., De la Rosa, J. M., Gómez-del-Campo, M. (2016). Effect of deficit irrigation during oil synthesis period on carbohydrates content in olive hedgerows (cv. Arbequina). *Acta Hortic.* 1199: 75-79.
58. Hueso, A., Trentacoste, E. R., Junquera, P., Gómez-Miguel, V., Gómez-del-Campo, M. (2019). Differences in stem water potential during oil synthesis determine fruit characteristics and production but not vegetative growth or return bloom in an olive hedgerow orchard (cv. Arbequina). *Agric. Water Manag.* 223, 105589.
59. Hsiao, T.C., (1973). Plant responses to water stress. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 24(1), 519-570.
60. 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. *Eur J Agron* 30:258–265.
61. Intrigliolo, D. S., Castel, J. R., (2004). Trunk diameter variations and soil water potential evolution in a drip irrigated plum orchard. *Irrig. Sci*, 23, 93-102.
 62. Lavee, S., (1986). Olive. In: Monselise, S.P. (Ed.), *CRC Handbook of Fruit Set and Development*. CRC Press, Inc, Boca Raton, Florida, pp. 261–276
 63. Lavee, S., (1996). Biology and physiology of the olive. In: *International Olive Oil Council (Ed.), World Olive Encyclopedia*. Plaza and Janes, Barcelona, Spain, pp. 59–110.
 64. Levin, A.D., 2019. Re-evaluating pressure chamber methods of water status determination in field-grown grapevine (*Vitis* spp.). *Agric. Water Manag.* 221, 422–429.
 65. MAGRAMA. (2019). Anuario estadístico. <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticasagrarias/agricultura/superficies-producciones-anuales-cultivos>
 66. Marino, G., Caruso, T., Ferguson, L., Marra, F.P., (2018). Gas exchanges and stem water potential define stress thresholds for efficient irrigation management in olive (*Olea europea* L.). *Water* 10 (3), 342.
 67. Marra, F.P., Marino, G., Marchese, 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. *Irrig. Sci.* 34(4), 313-325.
 68. McCutchan, H., Shackel, K. A. (1992). Stem-water potential as a sensitive indicator of water stress in prune trees (*Prunus domestica* L. cv. French). *J Am Soc Hortic Sci*, 117(4), 607-611.
 69. Morettini, A., 1972. *Olivicoltura*. Ramo editorial degli agricoltori. Rome. Italy.
 70. Moriana, A., Fereres, E., (2002). Plant indicators for scheduling irrigation of young olive trees. *Irrig. Sci.* 21(2), 83-90.
 71. Moriana, A., Orgaz, F., Pastor, M., Fereres, E., (2003). Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 128(3), 425-431.
 72. Moriana, A., Perez-Lopez, D., Prieto, M.H., Ramirez-Santa-Pau, M., Perez-Rodriguez, J.M., (2012). Midday stem water potential as a useful tool for estimating irrigation requirements in olive trees. *Agric. Water Manag.* 112, 43-54.

73. Mokany, K., Raison, R.J., Prokushkin, A.S., (2006). Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes. *Glob. Chang. Biol.* 12, 84–96.
74. Naor, A., Hupert, H., Greenblat, Y., Peres, M., Kaufman, A., Klein, I., (2001). The response of nectarine fruit size and midday stem water potential to irrigation level in stage III and crop load. *J Am Soc Hortic Sci*, 126(1), 140-143.
75. Naor, A., Cohen, S., (2003). Sensitivity and variability of maximum trunk shrinkage, midday stem water potential, and transpiration rate in response to withholding irrigation from field-grown apple trees. *HortScience*, 38(4), 547-551.
76. Naor, A., Gal, Y., Peres, M., (2006). The inherent variability of water stress indicators in apple, nectarine and pear orchards, and the validity of a leaf-selection procedure for water potential measurements. *Irrig. Sci*, 24(2), 129-135.
77. Padilla-Díaz, C.M., Rodriguez-Dominguez, C.M., Hernandez-Santana, V., Perez-Martin, A., Fernández, J.E., (2016). Scheduling regulated deficit irrigation in a hedgerow olive orchard from leaf turgor pressure related measurements. *Agric. Water Manag* 164:28–37.
78. Padilla-Díaz, C. M., Rodriguez-Dominguez, C. M., Hernandez-Santana, V., Perez-Martin, A., Fernandes, R. D. M., Montero, A., Fernández, J. E. (2018). Water status, gas exchange and crop performance in a super high-density olive orchard under deficit irrigation scheduled from leaf turgor measurements. *Agric. Water Manag*, 202, 241-252.
79. Palese, A.M, Nuzzo V, Favati F, Pietrafesa A, Celano G, Xiloyannis, C., (2010). Effects of water deficit on the vegetative response, yield and oil quality of olive trees (*Olea europaea* L., cv Coratina) grown under intensive cultivation. *Sci Hortic* 125:222–229.
80. Pastor Muñoz-Cobo, M. (2005). Ciclo anual del olivo y sensibilidad al déficit hídrico. *Cultivo del olivo con riego localizado* ed. Mundi-Prensa-Junta de Andalucía, Madrid, España, 61-81.
81. Pastor, M., Garcia-Vila, M., Soriano, M.A., Vega, V., Fereres, E., (2007). Productivity of olive orchards in response to tree density. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 82, 555–562.
82. Pierantozzi, P., Torres, M., Lavee, S., Maestri, D., (2014). 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. *Ann Appl Biol* 164:116–127.
83. Pire, R., Sanabria, M. E., Pereira, A., Díez, J., (2007). Hydraulic conductivity and thickness of the xylem vessels in five vine materials subjected to water deficit. *Interciencia*, 32(1), 35-40.
84. Rallo, L., Barranco, D., Castro-García, S., Connor, D. J., Gómez-del-Campo, M., Rallo, P., (2013). High-density olive plantations. *Hortic Rev*, 41, 303-384.
85. Rapoport, H.F., Costagli, G., Gucci, R., (2004). The effect of water deficit during early fruit development on olive fruit morphogenesis. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 129, 121–127.
86. Rapoport, H.F., Hammami, S.B., Martins, P., Pérez-Priego, O., Orgaz, F., (2012). Influence of water deficits at different times during olive tree inflorescence and flower development. *Environ Exp Bot.* 77:227–233.
87. Ravetti, L., (2008). Evaluation of new olive mechanical harvesting technologies in Australia. *Acta Hortic.* 791, 387–392.
88. Reale, L., Sgromo, C., Ederli, L., Pasqualini, S., Orlandi, F., Fornaciari, M., Ferranti, F., Romano, B., (2009). Morphological and cytological development and starch accumulation in hermaphrodite and staminate flowers of olive (*Olea europaea* L.). *Sex. Plant Reprod.* 22, 109–119.
89. Rius, S., Lacarte, J.M., (2015). La revolución del olivar: el cultivo en seto. *Paraninfo*, Madrid.
90. Ruiz-Sánchez, M.C., Domingo, R., Castel, J.R. (2010). Review. Deficit irrigation in fruit trees and vines in Spain. *Span. J. Agric. Res.* 8, S5–S20.
91. Sanz-Cortes, F., Martinez-Calvo, J., Badenes, M.L., Bleiholder, H., Hack, H., Llacer, G., Meier, U., (2002). Phenological growth stages of olive trees (*Olea europaea*). *Ann. Appl. Biol.* 140(2), 151-157.
92. Santesteban, L. G., Miranda, C., Marín, D., Sesma, B., Intrigliolo, D. S., Mirás-Avalos, Escalona, A. Montoro J. M., Herralde, F. Baeza, P. Romero, P. Yuste, J. Uriartei, D., Martínez-Gascueña, J. Cancela, J.J. Pinillos, V. Loidi, M. Urrestarazu, J. Royo, J.B., (2019). Discrimination ability of leaf and stem water potential at different times of the day through a meta-analysis in grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Agric. Water Manag*, 221, 202-210.
93. Scientific, J. (1991). Table curve: curve fitting software. Corte Madera, CA: Jandel Scientific, 280.

94. Selles van Sch, G., Ferreyra, R., Selles, I., Lemus, G. (2006). Efecto de diferentes regímenes de riego sobre la carga frutal, tamaño de fruta y rendimiento del olivo cv. Sevillana. *Agric Téc*, 66(1), 48-56.
95. Shackel, K. A., Ahmadi, H., Biasi, W., Buchner, R., Goldhamer, D., Gurusinghe, S., McGourty, G. (1997). Plant water status as an index of irrigation need in deciduous fruit trees. *Hort Technology*, 7(1), 23-29.
96. Scholander, P. F., Bradstreet, E. D., Hemmingsen, E. A., & Hammel, H. T. (1965). Sap pressure in vascular plants: negative hydrostatic pressure can be measured in plants. *Science*, 148(3668), 339-346.
97. Uriu, K., (1960). Periods of pistil abortion in the development of the olive flower. *Proc. Am. Soc. Hortic. Sci.* 73, 194-202.
98. 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). *Eur. J. Agron.*
99. Tombesi, A., (1994). Olive fruit growth and metabolism. *Acta Hortic.* 356 (pp. 225-232).
100. Tombesi, A., (2003). Biología floral e di fruttificazione. *Olea. Trattato di Oliv. 25*(4), 356-364.
101. Trentacoste, E.R., Puertas, C.M., Sadras, V.O., (2015). Effect of irrigation and tree density on vegetative growth, oil yield and crop water productivity in young olive orchard under arid conditions in Mendoza, Argentina. *Irrig. Sci.* 33, 429-440.
102. Trentacoste, E. R., Calderón, F. J., Contreras-Zanessi, O., Galarza, W., Banco, A. P., Puertas, C. M. (2019). Effect of regulated deficit irrigation during the vegetative growth period on shoot elongation and oil yield components in olive hedgerows (cv. Arbosana) pruned annually on alternate sides in San Juan, Argentina. *Irrig. Sci.* 1-14.
103. Turner, N. C., Long, M. J. (1980). Errors arising from rapid water loss in the measurement of leaf water potential by the pressure chamber technique. *Funct. Plant Biol.* 7(5), 527-537.