

UNIVERSIDAD



DE EXTREMADURA

TESIS DOCTORAL

**EFEECTO DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES
EPISODIOS DE ESTRÉS HÍDRICO, SOBRE EL
COMPORTAMIENTO FISIOLÓGICO DEL
CIRUELO JAPONÉS TARDÍO EN
EXTREMADURA.**

Fernando Blanco Cipollone

Programa de Doctorado en Ciencia de los Alimentos

2019

UNIVERSIDAD



DE EXTREMADURA

TESIS DOCTORAL

**EFEECTO DE LA APLICACIÓN DE DIFERENTES
EPISODIOS DE ESTRÉS HÍDRICO, SOBRE EL
COMPORTAMIENTO FISIOLÓGICO DEL
CIRUELO JAPONÉS TARDÍO EN
EXTREMADURA.**

Fernando Blanco Cipollone

Programa de Doctorado en Ciencia de los Alimentos

2019

Conformidad de las directoras

Fdo. María José
Moñino Espino

Fdo. María del Henar
Prieto Losada

Fdo. María Isabel
Caballero Caballero

María José Moñino Espino. Doctor Ingeniero Agrónomo, investigadora del Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura (CICYTEX), Finca La Orden, perteneciente a la Consejería de Economía e Infraestructuras de la Junta de Extremadura.

María del Henar Prieto Losada Doctor Ingeniero Agrónomo, investigadora del Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura (CICYTEX), Finca La Orden, perteneciente a la Consejería de Economía e Infraestructuras de la Junta de Extremadura.

Isabel Caballero Caballero, Doctor por la Universidad de Valladolid, profesor Contratado Doctor del Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales, Sociales y de la Matemática de la Facultad de Educación (Campus de Soria) de la Universidad de Valladolid.

INFORMAN:

Que la Memoria titulada “Efecto de la aplicación de diferentes episodios de estrés hídrico sobre el comportamiento fisiológico del ciruelo japonés tardío en Extremadura”, que presenta el Ingeniero Agrónomo, Fernando Blanco Cipollone para optar al grado de Doctor, ha sido realizada bajo nuestra dirección en el Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura (CICYTEX) Finca La Orden, de la junta de Extremadura.

Financiada por: INIA: proyecto RTA2013-00045-C04-02, RTA2009-0026-C02-02, beca de formación de personal investigador, Fernando Blanco-Cipollone (CPR-2014-0148). Junta de Extremadura y FEDER proyecto CCESAGROS

Considerando que se trata de un trabajo original de investigación que reúne todos los requisitos establecidos en el RD 99/2011, de 28 de enero, estimamos que puede ser presentado para su defensa ante el Tribunal nombrado a tal efecto.

Agradecimientos

Esta tesis es el resultado de años de trabajo en el que han participado muchas personas, sería egoísta decir que es sólo fruto de mi trabajo, porque sin la dedicación, conocimientos y tiempo de todas ellas no habría sido posible llegar a este punto. Por eso os quiero dar las gracias.

A Maria José que, a base de mucha paciencia, me has enseñado que los pequeños detalles marcan la diferencia, que no existen los atajos para lograr un objetivo y que la actitud que tomemos en la vida marca nuestra felicidad. Muchas gracias por acompañarme en todos estos años.

A Toni, que desde el primer día pusiste a mi disposición todos tus conocimientos, que siempre con un buen humor y paciencia me has enseñado a amar mucho más mi trabajo, haciendo que el duro trabajo en el campo lo fuese un poco menos.

A todos y cada uno de mis compañeros que han estado a mi lado a largo de estos años: a Alberto Samperio, quien me marcó el camino a seguir, a Jose Ángel y sus charlas filosóficas, a David y Luis quienes siempre han tenido una sonrisa (o un silbido) desde primera hora. A Valme, Carlota y Encarna que siempre mostraron su fe en mí. A Carlos quien, con su ternura nunca ha dejado de apoyarme y animarme. A Dami y nuestra relación especial que me ha animado muchos días. A Sandra, buena compañera, mejor amiga, portadora de una sonrisa que me ha alegrado muchas mañanas grises. A Nieves, quien me ha mostrado su apoyo en los momentos de flaqueza dándome toda su ternura y amistad. A Ignacio y Manuela, grandes compañeros y cómplices de penas y alegrías. A Ángel Chávez que siempre creíste en mí. A Isabel quien en poco tiempo me enseñó muchas cosas y forjó una Amistad duradera. A todos vosotros: gracias.

A Sandra, Mar, Carlos, Álex, Sole, que han sabido acompañarme cuando necesitaba compañía y a dejarme solo cuando lo necesitaba, porque la amistad es la suma de todos los momentos que hemos vivido juntos.

A mi familia, quienes me habéis mostrado en todo momento vuestro apoyo y cariño, soportando y entendiendo mis momentos de estrés y que con cariño habéis sabido ayudarme. A mis padres que han forjado en mí lo que soy, mostrándome con cariño y ejemplo grandes valores que me acompañarán toda la vida.

A ti, que te debo muchos años de crecimiento profesional y personal. A ti, mi orientadora, mi confidente, mi apoyo. A ti, mi AMIGA. A ti que, sin tu ayuda, perseverancia, y amor incondicional no sería posible nada de esto. A ti, Henar, porque sin ti esto no sería posible y aunque no sea suficiente para mostrarte todo lo que te debo: Gracias

A Henar

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	CAPÍTULO 1: SUMMARY, RESUMEN, INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	22
1.1.	Summary	22
1.2.	Resumen	24
1.3.	Introducción General.....	26
1.3.1.	Características e importancia económica del cultivo del ciruelo japonés en Extremadura	26
1.3.2.	Los recursos hídricos en la fruticultura actual.....	27
1.3.3.	Estrategias para un uso eficiente del agua en fruticultura	29
1.3.4.	Riego deficitario controlado en ciruelo japonés.....	32
1.3.5.	Indicadores del estado hídrico.....	33
1.4.	Objetivos	37
1.5.	Referencias.....	38
2.	CAPÍTULO 2: PLANT WATER STATUS INDICATORS FOR IRRIGATION SCHEDULING IN ISO- AND ANISOHYDRIC BEHAVIOR: VINE AND PLUM TREES ...	48
2.1.	Abstract	48
2.2.	Resumen	49
2.3.	Introduction	50
2.4.	Material and Methods.....	53
2.4.1.	Experimental sites, Meteorological conditions and crop characteristics.....	53
2.4.1.1.	Experiment 1	53
2.4.1.2.	Experiment 2	54
2.4.2.	Measurements and Irrigation Treatments.....	54
2.4.2.1.	Experiment 1	54
2.4.2.2.	Experiment 2	55
2.4.3.	Data Analysis and Statistics	56
2.5.	Results	57
2.5.1.	Experiment 1	57
2.5.2.	Experiment 2	60
2.6.	Discussion	62
2.6.1.	Plant Water Status Indicators Versus Water Stress.....	64
2.6.2.	Use of Water Stress Indicators	64

ÍNDICE DE CONTENIDOS

2.6.3.	When to Use Predawn or Noon Stem Water Potential.....	66
2.7.	References	67
3.	CAPÍTULO 3: LONG-TERM EFFECTS OF IRRIGATION REGIME ON FRUIT DEVELOPMENT PATTERN OF THE LATE-MATURING ‘ANGELENO’ JAPANESE PLUM	76
3.1.	Abstract	76
3.2.	Resumen	77
3.3.	Introduction	78
3.4.	Material and Methods.....	80
3.4.1.	Experimental site.....	80
3.4.2.	Irrigation treatments	80
3.4.3.	Monitoring of seasonal fruit evolution.....	81
3.4.4.	Plant water status.....	81
3.4.5.	Crop phenology	82
3.4.6.	Yield determinations	82
3.4.7.	Statistical analysis	82
3.5.	Results	83
3.5.1.	Climatic conditions and irrigation volumes applied.....	83
3.5.2.	Yield components.....	86
3.5.3.	Phenology and fruit development pattern	87
3.5.4.	Tree water status and the influence of stress on fruit growth.....	89
3.6.	Discussion	95
3.7.	Conclusions	99
3.8.	References	100
4.	CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN DE DIFERENTES ESTRATEGIAS DE RIEGO DEFICITARIO EN EL CULTIVAR DE CICLO LARGO DE CIRUELO JAPONÉS ‘ANGELENO’.	108
4.1.	Resumen	108
4.2.	Abstract	109
4.3.	Introducción	110
4.4.	Materiales y métodos	112
4.4.1.	Características de la plantación y tratamientos de riego	112

ÍNDICE DE CONTENIDOS

4.4.2.	Estado hídrico de planta	115
4.4.3.	Desarrollo vegetativo y productivo y determinaciones de calidad de la fruta.....	115
4.4.4.	Análisis de datos.....	117
4.5.	Resultados	117
4.5.1.	Climatología y agua aplicada	117
4.5.2.	Humedad del suelo.....	119
4.5.3.	Estado hídrico.....	122
4.5.4.	Desarrollo reproductivo.....	125
4.5.5.	Desarrollo vegetativo	126
4.5.6.	Recolección.....	129
4.6.	Discusión.....	133
4.7.	Conclusiones	136
4.8.	Referencias.....	137
5.	CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES.....	144
5.1.	Discusión General	144
5.2.	Conclusiones Generales	148
5.3.	General Conclusions	150
5.4.	Referencias.....	152

ÍNDICE DE FIGURAS

Figure 2.1. Seasonal course (2009) of (a) Ψ_{pd} and (b) Ψ_{st} , with the relationships between those variables and noon stomatal conductance (gs); respectively (c,d), for the three treatments developing approximately to a weak, mild and severe water stress (see text for corresponding Ψ_{pd} ranges). The standard deviations of means are approximately within symbol width. Vineyard (Beja, Portugal). 58

Figure 2.2. Observed Ψ_{pd} (a) and Ψ_{st} of grapevines at 10:00 a.m. (b); 2:00 p.m. (c) and 6:00 p.m. (d) (solar noon at ~ 1:45 p.m.) for the treatments described (Low Stress, Medium Stress and High Stress, see text) immediately before and during the 2010 stress cycle (8th to 16th August 2010). Irrigation events during the stress cycle: see text. The standard deviations of means are within symbol width. Vineyard (Beja, Portugal)..... 59

Figure 2.3. Plum stem water potential along the day in the control (green) and stressed plots (red) for four dates: (a) 1 July; (b) 8 July; (c) 14 July; (d) 22 July. Each point represents the average of 8 trees; the vertical bars represent the standard error of each mean. Hours are legal time (solar time ~ legal time - 2.7 h). Plum orchard (Badajoz, Spain)..... 60

Figure 2.4. Relationship between Ψ_{st} measured after solar noon and daily relative transpiration (RTr) of plum. Each point is the average of two trees only for the days when Ψ_{st} was measured during the last period of each stress cycle (2014–2016). 61

Figure 3.1. Meteorological conditions for the orchard over the eight years studied; (a) Average monthly temperatures, (b) Total cumulative monthly precipitation (bars) and VPD (line with circles)..... 84

Figure 3.3. (a) Seasonal patterns of mean individual fruit volume development for C treatment trees for seven of the eight studied years over the course of the season. Each point is the average of 64 measurements. (b) Polynomial adjustment in two phases for non-limited years (2009, 2010, 2013 and 2015) corresponding to diamonds and for limited years (2012, 2014 and 2016). Vertical arrow marks turning point in the first stage for every year..... 88

Figure 3.4. Seasonal pattern of fruit growth development (green for CON and red for RDI treatment) and stem water potential (blue for CON and purple for RDI treatment) over the pre-harvest period for the eight years studied ("a" to "h" correspond to years 2009 to 2016). Data refer to degree days after full bloom for each year (DDAFB). Horizontal line represents deficit period in each year. Vertical bars at each point represent the standard deviation and asterisks significant differences in volume between treatments ($p < 0.05$). 90

Figure 3.5. (a) Relationship between minimum Ψ_s over the first irrigation deficit period and relative growth potential (RGP) for C trees (green circles) and RDI trees (red squares and triangles) for the eight years studied. Lines represent regressions for the two RDI treatments. (b) Relationship between stress integral and RGP for the eight years studied. Diamonds represent long deficit periods, triangles represent short deficit periods..... 92

Figura 4.1 Duración, en días, de cada periodo de riego en los tres años de ensayo. El tratamiento CON abarca el periodo "TOTAL" desde inicio a fin de riego, mientras que el tratamiento RDI se compone de P1+P3 y el tratamiento RDP de los periodos P2 + P3 114

Figura 4.2. Evolución estacional de la Evapotranspiración de referencia mensual de la temperatura media mensual y de la precipitación mensual para cada mes en los tres años de ensayo. 118

Figura 4.3. Variación en el contenido de agua en el suelo (agua total consumida o acumulada) a diferentes profundidades a lo largo de cuatro etapas para los tratamientos Control (CON), Riego

deficitario pre cosecha (RDP) y Riego deficitario controlado (RDI) en el año 2015. Cada conjunto horizontal de líneas corresponde a una profundidad de suelo determinada. 121

Figura 4.4. Patrón estacional del potencial hídrico de tronco a medio día (en MPa) en los tres tratamientos de riego para los tres años de estudio. Cada punto representa la media de 2 hojas por árbol en 2 árboles por parcela elemental (n=16 hojas por tratamiento) las líneas verticales indican la desviación estándar en cada punto. 123

Figura 4.5. Crecimiento relativo del tronco en los tres tratamientos de riego para los momentos seleccionados en los tres años de ensayo, expresado en tanto por ciento del valor inicial. Cada punto corresponde a la media de cuatro árboles por parcela elemental y por tratamiento (n=16 árboles por tratamiento). Las barras verticales representan la desviación estándar en cada punto. 127

Figura 4.6. Evolución estacional de la fracción de radiación interceptada PAR al mediodía solar, para los tres tratamientos de riego en los tres años de ensayo. Cada punto representa la media de 2 árboles por tratamiento. Las barras verticales representan la desviación estándar en cada punto. 128

Figura 4.7. Distribución de calibre de los frutos expresada en porcentaje del número total de frutos en cada tratamiento: CON (verde), RDI (rojo) y RDP (azul). Las letras mayúsculas A, B y C indican los años 2014, 2015 y 2016. Las barras verticales indican la desviación estándar. Diferentes letras en la parte superior indican diferencias entre los tratamientos. Las letras corresponden a CON (letra superior) RDI (letra central) y RDP (letra inferior). 131

ÍNDICE DE TABLAS

Table 2.1. Meteorological conditions for the studied years in Experiment 1 and 2; data represent the year averages. 53

Table 2.2. Plant indicators used and relationship with isohydricity observed following criteria described. * Apparent behavior from the results presented by authors; (1) A relationship of Ypd or Yst difference versus relative gs or RTr was used; (2) NC = Not clear; plant does not have a clear behavior but more anisohydric, or G = good, R = regular, B = bad; (3) LT = leaf temperature; (4) Best is daily variations in σ_s ; (5) SDV regular (RDTS required); (6) In agreement with suggestion (Marsal et al., 2002a) of combining both indexes; (7) Tends to anisohydric, towards the end of stress cycle; (8) Implicitly. 63

Table 3.1. Cumulative precipitation (P), reference evapotranspiration (ETo), and irrigation (both treatments) over different periods for each year. Periods covered: (1) from previous year leaf fall to onset of deficit irrigation period; (2) from onset to end of deficit irrigation period; (3) from previous year leaf fall to present year leaf fall; (4) from bud break to leaf fall. In (5) 2008 Dec. 25 was used as previous year leaf fall. Values with * indicate breakdowns in the irrigation system. 85

Table 3.2. Yield and fruit quality for both irrigation treatments over the eight years studied; (*) represents differences between treatments for each year ($p < 0.05$); NS=not significant. 86

Tabla 4.1. Cantidad de agua aplicada con el riego, Precipitación (P) y Evapotranspiración (ETo) en los tres tratamientos de riego para los tres años de ensayo. Todos los datos están expresados en mm para los periodos marcados. 118

Tabla 4.2. Cantidad total de agua en suelo (hasta 180 cm) en mm para cada tratamiento de riego en los tres años experimentales. La desviación estándar (números en gris) está calculada sobre los cuatro tubos por árbol en dos árboles por tratamiento (n=8) 120

Tabla 4.3. Valores de la Integral de estrés (IE) desde inicio de riego hasta recolección y hasta final de riego. Los valores están expresados en MPa* día para los tres tratamientos de riego y en los tres años de ensayo. 124

Tabla 4.4 Tasa de crecimiento del fruto en los diferentes periodos para cada tratamiento en los tres años experimentales. Cada dato es el promedio de 8 frutos por árbol en 2 árboles por bloque y tratamiento (n= 64 frutos por tratamiento). Diferentes letras significan diferencias entre los tratamientos a $p < 0,05$ 125


Tabla 4.5. Crecimiento estacional de la sección del tronco (cm²) y cantidad de madera seca en poda (kg de madera seca x árbol-1) para cada tratamiento en los tres años experimentales. Diferentes letras significan diferencias estadísticas entre los tratamientos a $p < 0.05$ 127

Tabla 4.6. Datos producción en recolección, para los tres tratamientos de riego en los tres años de ensayo, cada dato representa la media de un tamaño muestral descrito en materiales y métodos. Las letras representan las diferencias significativas entre tratamientos $p < 0.05$ 130

Tabla 4.7. Parámetros de calidad en recolección y 20 días antes de recolección para los tres tratamientos de riego en los tres años de ensayo. Cada punto representa la media de un tamaño muestral descrito en materiales y métodos. Las letras representan las diferencias significativas entre tratamientos $p < 0.05$ 132

LISTA DE ABREVIATURAS

DI	Deficit Irrigation	Riego Deficitario
Ψ	Water Potential	Potencial Hídrico
Ψ_{pd}	Predawn Water Deficit	Potencial Hídrico al Amanecer
Ψ_l	Leaf Water Potential	Potencial Hídrico de Hoja
$\Psi_{st}=\Psi_s$	Stem Water Potential	Potencial Hídrico de Tallo
SWD	Soil Water Depletion	Agotamiento de Agua de Suelo
Θ	Soil Water Content	Contenido de Agua del Suelo
SDV	Stem Diameter Variation	Variación Diámetro de Tronco
LVDT	Linear Variable Displacement Transduction	Desplazamiento Lineal Variable
K_s	Stress Coefficient	Coefficiente de Estrés
g_s	Stomatal Conductance	Conductancia Estomática
T_r	Transpiration Rate	Tasa Transpirativa
LAI	Leaf Area Index	Índice de Área Foliar
R_{Tr}	Relative Transpiration	Transpiración Relativa
VPD	Vapour Pressure Deficit	Déficit de Presión de Vapor
E_{To}	Reference Transpiration	Evapotranspiración de Referencia
E_{Tc}	Crop Evapotranspiration	Evapotranspiración de Cultivo
TGR	Trunk Growth Rate	Tasa de Crecimiento del Tronco
MDS	Maximun Daily Shrinkage	Contracción Diaria Máxima
RDTs	Relative Daily Trunk Shrinkage	Contracción de Tronco Diaria Relativa
RAW	Readily Available Water	Agua Disponible en el Suelo
RDI	Regulated Deficit Irrigation	Riego Deficitario Controlado
PDR	Preharvest déficit Irrigation	Riego Deficitario Precosecha
SDI	Sustainable Deficit Irrigation	Riego Deficitario Sostenido
PRD	Partial Root-dry Zone	Riego Parcial de Raíces
SSC	Soluble Solid Content	Contenido de Sólidos Solubles
WUE	Water Use Efficiency	Eficiencia del Uso del Agua



CAPÍTULO 1
SUMARY, RESUMEN, INTRODUCCIÓN Y
OBJETIVOS

1. CAPÍTULO 1: SUMMARY, RESUMEN, INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Summary

Extremadura is a region with a Mediterranean climate with continental influence, with cold winters and hot and dry summer periods, and despite being considered as semi-arid, it has an amount of reservoirs which makes it the Spanish region with the largest water regulation capacity. However, the concentration of the population in the cities, the establishment of new irrigation systems and the increasingly frequent periods of drought, increase the pressure on the water distribution and the agricultural sector as the main consumer, suffers restrictions in the first place. The efficient use of water by growers is not only an environmental and ethical issue, but also an economic one, since water is an input whose price is expected to have a rising trend with an uncertainty in the supply predicted by Climate Change and increasing demand.

The Japanese plum tree (*Prunus salicina* Lindl.) is a woody crop with high economic importance in the region and the cv. Angeleno is the one that takes up the largest part of the surface of this crop in Extremadura. Despite being a species and cv. established almost exclusively in irrigation conditions, there is a lack of information about its ecophysiological behaviour, which is necessary for the design of irrigation strategies focused on optimizing the water use at the time that maintaining the crop's productivity.

Chapter II deals with a detailed study designed to select the most appropriate water status indicator for this species and cv., assessing the type of behaviour of the same in situations of water stress. A typical Mediterranean climate species such as the vineyard was included for comparison. Angeleno's water behaviour follows an anisohydric trend, reducing its water potential a time when atmospheric demand is high through stomata control. The trunk water potential measured at solar midday proved to be an indicator able to detect the water status of the plant and characterize its response to periods of water deficit. This behaviour contrasts with that observed in the vineyard, which usually shows a behaviour closer to what is defined as isohydric. It was also concluded that those indicators that base their variables on volumetric changes in a plant organ are not as effective in detecting episodes of water stress and its subsequent recovery in plants with anisohydric behavior such as Angeleno.

Chapter III describes an assay in which two irrigation strategies were maintained throughout 8 years on a Japanese plum orchard of the Angeleno cv. to analyze in depth the effect of water deficit on the fruit growth development and productivity. This orchard has two treatments, a Control: covering 100% of the ETc during the entire crop cycle and a controlled deficit irrigation strategy, in which the irrigation was stopped in an intermediate stage of fruit development, identified as phase II for stone fruit trees, and 30% of the ETc were applied in the post-harvest period. The deficit irrigation strategy chosen was in line with the most successful proposals presented in the bibliography for stone fruit trees. During four years the duration of the first deficit period lasted sixty days and represented a saving of almost 40% of the irrigation water with respect to the control. While in the following four this period was reduced to 30 days with a 17% savings. As a result of the study, the pattern of fruit development was characterized, as well as the effect of variable water stress in terms of duration and intensity on the final size of the fruit. On the other hand, it confirmed the indications that, in a cultivar with these cycle characteristics,

the most evident slowdown in fruit growth occurs prior to harvest. This contrasts with the double sigmoid model, showing the way to new proposals of irrigation strategies, better adapted to these particular characteristics. The development of the fruit 'Angelino, fits a model in two polynomial phases with an inflection point between them close to 1100 Degrees-day after full flowering, the growth pattern in this first stage allows to identify the potential size of the fruit. By analysing the stress cycles to which the trees were subjected throughout these 8 years, the importance of the intensity and speed at which stress is imposed over the duration of the same, from the point of view of the effect on the final size of the fruit, becomes evident. Although production did not differ between treatments throughout the years of study, deficit irrigation caused some devaluation in the value of the crop due to the loss of size.

In Chapter IV the previous information on Angelino was used to design an irrigation strategy adapted to this cultivar. The controlled deficit irrigation strategy consisted of setting the beginning of the stress period between 19 and 28 days (beginning of the growth slowdown) before harvesting until the end of irrigation, establishing a minimum stem water potential value of -1.4MPa. This proposal was compared with the previous Deficitary Irrigation strategy and a Control treatment to cover the hydric needs of the crop. The new strategy turned out to be more " economic " (regarding irrigation), with comparable productive and quality results, being also effective for vigour control. The main advantage over the previous proposal is a smaller impact on the size of the fruit. Additionally, being a later intervention, a better adaptation to the conditions of the year is possible.

The works presented in this document represent an advance in the knowledge of the physiological behaviour of the Japanese plum cv 'Angleno and the development of the fruit. This information has been useful to propose a more effective way to manage irrigation strategies for this crop with better efficiency in the use of water, without affecting yields (kg ha^{-1}) or final fruit size. This case is an example of how the analysis of available information on the ecophysiological behaviour of a crop allows more efficient management options to be considered.

1.2. Resumen

Extremadura es una región de clima mediterráneo continental, con inviernos fríos y periodos estivales cálidos y secos, y a pesar de estar considerada como semi árida tiene una dotación de embalses que la convierte en la región española con mayor capacidad de regulación de agua. Sin embargo, la concentración de la población en las ciudades, la implementación de nuevos regadíos y los periodos cada vez más frecuentes de sequía, incrementan la presión sobre la distribución del agua y, el sector agrario como principal consumidor, sufre en primer término las restricciones. El uso eficiente del agua por parte de las explotaciones frutícolas no se trata sólo de un aspecto ambiental y ético, sino también económico, ya que el agua es un insumo cuyo precio es de esperar que tenga una tendencia creciente con la incertidumbre en el suministro que prevé el cambio climático y el incremento de la demanda.

El ciruelo japonés (*Prunus salicina* Lindl.) es un frutal con gran importancia económica en la región y el cultivar Angeleno es el que ocupa una mayor parte de la superficie de este cultivo en Extremadura. A pesar de ser una especie y cv. establecidos casi en exclusiva en condiciones de riego, apenas existe información sobre el comportamiento ecofisiológico del mismo, necesaria para el diseño de estrategias de riego dirigidas a optimizar el uso del agua manteniendo la competitividad del cultivo.

En el Capítulo II se aborda un estudio detallado dirigido a seleccionar el indicador de estado hídrico más adecuado para esta especie y cv., valorando el tipo de comportamiento de la misma frente a situaciones de estrés hídrico. En el mismo se incluyó a modo de comparación una típica especie de clima mediterráneo como es el viñedo. El comportamiento hídrico de Angeleno sigue una tendencia anisohídrica, reduciendo su potencial hídrico en aquellos momentos en que la demanda atmosférica es elevada mediante el control estomático. El potencial hídrico de tronco tomado a medio día solar demostró ser un indicador capaz de detectar el estado hídrico de la planta y caracterizar su respuesta frente a periodos de déficit hídrico. Este comportamiento contrasta con el observado en la viña que suele presentar un comportamiento más próximo a lo que se define como isohídrico. Se concluyó por otra parte que aquellos indicadores que basan sus variables en cambios volumétricos de algún órgano de la planta, no son tan efectivos para detectar episodios de estrés hídrico y su posterior recuperación en plantas con un comportamiento anisohídrico como Angeleno.

En el Capítulo III se describe un ensayo en el que se mantuvo a lo largo de 8 años dos estrategias de riego sobre una plantación de ciruelo japonés del cv. Angeleno para analizar en profundidad el efecto del déficit hídrico sobre la dinámica de crecimiento del fruto y la productividad. Esta parcela dispone de dos tratamientos, un Control: regando al 100% de la ETc durante todo el ciclo de cultivo y una estrategia de riego deficitario controlado, en la que se anularon las aportaciones de riego en una fase intermedia de desarrollo del fruto, identificada como fase II para frutales de hueso, y se aplicó un 30% de la ETc en el periodo de postcosecha. La estrategia de riego deficitario elegida estaba en línea con las propuestas más exitosas recogidas en la bibliografía para frutales de hueso. Durante cuatro años la duración del primer periodo de déficit duró sesenta días y supuso un ahorro de casi el 40% de las aportaciones de agua de riego respecto del control. Mientras que en los cuatro siguientes este periodo se redujo a 30 días con un 17% de ahorro. Como resultado del estudio se caracterizó el patrón de desarrollo del fruto, así como el efecto del estrés hídrico variable en cuanto a duración e intensidad sobre el tamaño final de los frutos. Por otra parte, confirmó los indicios de que, en un cultivar de estas características de ciclo, la ralentización más

evidente en el crecimiento del fruto se produce previo a la cosecha. Esta observación contrasta con el modelo de doble sigmoide, señalando el camino hacia nuevas propuestas de estrategias de riego, mejor adaptadas a estas particulares características. El desarrollo del fruto 'Angelino, se ajusta a un modelo en dos fases polinómicas con un punto de inflexión entre ambas cercano a los 1100 Grados-día después de plena floración; la pauta de crecimiento en esta primera etapa permite identificar el tamaño potencial del fruto. Al analizar los ciclos de estrés a los que estuvieron sometidos los árboles a lo largo de estos 8 años, se pone en evidencia la importancia de la intensidad y velocidad a la que se impone el estrés frente a la duración del mismo, desde el punto de vista del efecto sobre el calibre final de los frutos. Aunque la producción no difirió entre tratamientos a lo largo de los años de estudio, el riego deficitario provocó cierta devaluación en el valor de la cosecha debido a la pérdida de calibre.

En el Capítulo IV se utilizó la información previa sobre Angelino para diseñar una estrategia de riego adaptada a este cultivar. La estrategia de riego deficitario controlado consistió en situar el inicio del periodo de estrés entre 19 y 28 días (inicio de la ralentización del crecimiento) antes de recolección hasta final de riego, estableciendo un valor mínimo de potencial de tronco de -1.4MPa. Esta propuesta se comparó con la estrategia de Riego Deficitario previa y un tratamiento control regado para cubrir las necesidades hídricas del cultivo. La nueva estrategia resultó ser más "ahorradora", con resultados productivos y de calidad comparables, siendo también efectiva para el control del vigor. La principal ventaja frente a la anterior propuesta es un menor impacto sobre el tamaño del fruto. Adicionalmente, al ser una intervención más tardía, es posible una mejor adaptación a las condiciones del año.

Los trabajos presentados en este documento suponen un avance en el conocimiento del comportamiento fisiológico del ciruelo japonés cv 'Angleno y el desarrollo del fruto. Esta información ha sido útil para proponer una manera más eficaz de gestionar las estrategias de riego para este cultivar con mejor eficiencia en el uso del agua, sin afectar a las producciones (kg ha^{-1}) o tamaño final del fruto. Este caso es un ejemplo de cómo el análisis de la información disponible sobre el comportamiento ecofisiológico de un cultivo permite plantear opciones de gestión más eficientes.

1.3. Introducción General

1.3.1. Características e importancia económica del cultivo del ciruelo japonés en Extremadura

Dentro de la familia de las Rosáceas se encuentra el género *Prunus*, en él se incluyen el ciruelo europeo (*Prunus domestica* L.) y el ciruelo japonés (*Prunus salicina* Lindl.); este último originario de China fue introducido desde Japón en los Estados Unidos a finales del s. XIX, donde se realizaron múltiples hibridaciones con otras especies como el *P. simonii* Carrière, *P. armeniaca* Marsh, *P. cerasifera* Ehrh. o el *P. angustifolia* Marsh (Faust y Rev, 1999), confiriéndole una adaptación del cultivo a la zona de California, así como otras características organolépticas (Hancock, 2008). Continuando la labor de los programas de mejora iniciales, países como Brasil, España, Australia, Francia o Italia entre otros han seguido desarrollando nuevos cultivares con mayor tamaño del fruto, tamaño reducido del árbol, resistencia a enfermedades, color de la piel y pulpa o aptitud postcosecha entre otras, produciendo una importante renovación varietal de la especie (Hartmann y Neumüller, 2009).

En la actualidad, bajo el nombre de ciruelo japonés se recogen tanto los híbridos interespecíficos, como los cultivares del *Prunus salicina*. Se trata de uno de los frutales de hueso con mayor superficie de cultivo a nivel mundial, junto con el melocotonero y el albaricoquero. Las bajas necesidades de horas frío en invierno (500-800 horas) y su adaptación a zonas áridas y semiáridas hace que el cultivo sea económicamente viable en una gran parte del planeta, destinándose principalmente a consumo en fresco. Un aspecto interesante de este cultivo es la amplia gama de cultivares en cuanto a la duración de ciclo se refiere y características de los frutos, resultante de los programas de mejora, haciendo que este frutal tenga presencia en los mercados desde mayo con cultivares como Red Beaut o Early Queen, hasta mediados de septiembre con cultivares tardíos como Angeleno o Larry Ann.

El cultivar Angeleno se caracteriza por tener buena producción, una entrada en fructificación temprana y características organolépticas como firmeza, color y aroma, de gran calidad; la recolección se sitúa a principios de septiembre y la buena aptitud postcosecha le permite alargar su vida útil en cámara hasta 75 días, pudiendo consumirse hasta finales de año. Este cultivar representa junto con el cv. Black Diamond, el 50% de la producción a nivel nacional de ciruela con piel negra (Guerra Velo, 2011).

El mayor productor a nivel mundial de ciruelo japonés es China, con más del 70% de la producción mundial, seguido por Rumanía, los Estados Unidos y Serbia, encontrándose España en 13º puesto, después de Marruecos y superando a la Federación Rusa. La superficie dedicada a su cultivo entre 1993 y 2013 ha crecido en más de un 21% con un aumento en la producción final del 17% (FAOSTAT, 2017)

Las estadísticas oficiales no hacen distinción entre ciruelo europeo y ciruelo japonés, incluyendo además las endrinas; aunque se estima que en la actualidad el ciruelo japonés ocupa más del 65 % de la superficie destinada a la categoría de ciruelo, ocupando el resto el ciruelo europeo, principalmente el grupo de las Reina Claudia (Hueso y Cuevas, 2014).

La superficie total cultivada en España de ciruelo es de 15.278 ha., situándose en un segundo plano a favor de otros cultivos leñosos como el melocotonero, almendro, el manzano o el cerezo entre otros. A pesar de que la superficie de cultivo ha disminuido en casi 5.000 ha para el periodo 2005-2015, el valor de las producciones ha aumentado en un 44% para el mismo periodo, gracias a un considerable aumento en el precio del producto final para el productor (36,7 €/100kg en 2005 frente a los 61,1 €/100 kg en 2015). La tipología de la parcela de ciruelo en España es básicamente de regadío, con sistema de riego por goteo (80% del total), destacando el empleo de cultivares de ciclo medio (24,4%) seguido de cultivares de ciclo corto y largos (14,6% y 10,4% respectivamente) (MAPA, 2017).

En Extremadura se incrementó la superficie dedicada a frutales en más de un 50% para el periodo 2004-2016 (Extremadura, 2018), de manera similar, la superficie cultivada de ciruelo aumentó para el mismo periodo en más de un 150% dedicando 3.600 ha a este cultivo, la mayor parte en régimen de regadío (3.400 ha). En 2017, Extremadura era la principal región productora de ciruelo de España con un 33% de superficie total de este cultivo, seguida de Andalucía y Aragón (17 y 16% del total español) (MAPA, 2017). El principal destino de la producción es la exportación a otros países: en 2017, de las 78.150 Tm de ciruela producidas en Extremadura, 50.347 Tm fueron destinadas a la exportación, lo que supone más del 62% de la exportación a nivel nacional (FEPEX, 2019) de este producto.

1.3.2. Los recursos hídricos en la fruticultura actual

“The world needs to produce an estimated 60 percent more food by 2050 to ensure global food security, and it must do so while conserving and enhancing the natural resource base” (FAO, 2015).

Uno de los retos de la agricultura actual es abastecer a una población creciente y con una menor presencia en las áreas rurales. Mientras que en 1960 la población rural mundial representaba el 49%, en 2017, con un crecimiento de más de 4.300 millones de personas, el porcentaje de población rural descendió hasta el 44%. En España, el descenso ha sido más acusado, pasando de un 43,3% de población rural en 1960 a tan solo un 19,9% en 2017, creciendo en más de 16 millones la población total (Banco Mundial, 2018).

La despoblación de las áreas rurales ha ocasionado un descenso de más del 5,6% de la superficie cultivada a nivel mundial durante los años 2010-2016 (Banco Mundial, 2018). En España, la reducción para el mismo periodo, ha sido de un 8,4%, mientras que en Extremadura fue de un 1,8% (MAPA, 2018). Estos datos dibujan una realidad en la que las explotaciones han de

incrementar sus rendimientos, con menos mano de obra y en un mercado cada vez más complejo y exigente en cuestiones de calidad (Kyriacou y Rouphael, 2018).

De los más de 4 millones de hectáreas cultivadas en Extremadura en 2017, tan solo 282.622 ha se encuentran en régimen de regadío, lo que supone un 6,7%, valor por debajo de la media española (7,4%); estos porcentajes aumentan si nos centramos en el cultivo de frutales, donde la superficie en regadío asciende al 49,9%, frente al 30% en el ámbito nacional (MAPA, 2018)

“Globally, water resources will be sufficient to produce the food required in 2050, but many regions will face substantial water scarcity” (FAO, 2015)

A nivel mundial, la agricultura consume cerca del 70% total de los recursos hídricos regulados en el mundo, y hasta el 95% en algunos países en vías de desarrollo (FAO, 2017). En los últimos 30 años los periodos de sequía han afectado a un 17% del territorio europeo (Collins y cols., 2009), este fenómeno, cada vez más frecuente, unido a la pérdida de calidad de las aguas dulces, la sobreexplotación de los acuíferos o el aumento de la población entre otros, ponen de manifiesto la baja disponibilidad del recurso agua en determinadas zonas. A esto hay que añadir la concentración de la población en las grandes urbes, que hace que la competencia por el uso del agua entre sectores cobre mayor importancia, siendo el sector agrario quien sufre en primer término restricciones en los momentos de escasez (García-Vila y Fereres, 2012)

España, con una capacidad de embalse de agua de 56.074 hm³ (MITECO, 2019), es potencialmente capaz de abastecer las necesidades de agua de todos los sectores; en 2016, se estima que la agricultura en España consumió 14.984 hm³ de agua (INE, 2019), destinadas principalmente a los cultivos herbáceos, consumiendo los frutales (excluyendo olivo y viña) un 16,3% del total. Con una precipitación media anual de alrededor de 538 mm durante el periodo 2000-2018 (Redarex, 2019) Extremadura se clasifica como una zona seca (300-800 mm), a pesar de ello, es la región con mayor capacidad potencial de embalsar agua (14.219 hm³) consumiendo el sector agrario 1,57 hm³ en la campaña de 2016 (INE, 2019)

El clima predominante en buena parte de la Península Ibérica es Mediterráneo, caracterizado por unos inviernos suaves y lluviosos con veranos cálidos y secos. A pesar de, que tanto a nivel nacional como regional existe una disponibilidad de agua suficiente para abastecer a todos los sectores, la estacionalidad pluviométrica típica del clima mediterráneo hace que la supervivencia de las plantaciones de regadío dependa en buena medida del agua disponible en la cuenca.

“Innovative and more effective governance mechanisms, together with investments in water technologies and infrastructure will be required to mitigate the impacts of growing water shortages and to ensure water is allocated in a way that ensures efficient use, while protecting the natural resources base, and safeguarding access to water for household use and agricultural production” (FAO, 2015)

El éxito económico de una plantación reside en que los ingresos superen los gastos. En este sentido, la implantación de cultivos con un mayor valor en el mercado parece una buena estrategia comercial; sin embargo, cuando estos nuevos cultivos tienen unas necesidades hídricas mayores que los tradicionales, ponen en riesgo el abastecimiento de agua a nivel de cuenca y de plantación, siendo por tanto de dudosa viabilidad a largo plazo. Las plantaciones de cultivos adaptados a las condiciones agroclimáticas de la zona, como el ciruelo japonés en Extremadura, se postulan como una alternativa viable a largo plazo.

El ciruelo japonés es un frutal menos estudiado que otro frutal de hueso como el melocotonero, al que en ocasiones se asemeja desde el punto de vista de gestión de agua. Un mejor conocimiento de este cultivo permitirá no sólo optimizar el rendimiento de las plantaciones actuales, sino diseñar de una manera más eficaz las nuevas explotaciones, ajustando su dotación hídrica y desarrollando nuevas estrategias de riego.

1.3.3. Estrategias para un uso eficiente del agua en fruticultura

Conocer las necesidades hídricas de un cultivo es esencial para la planificación y el diseño de estrategias de riego. Doorenbos y Pruitt, (1977) establecieron el cálculo de las necesidades hídricas del cultivo de acuerdo a la fórmula:

$$ET_c = ET_o \times K_c$$

Donde ET_c es la Evapotranspiración de un cultivo dado, ET_o es la Evapotranspiración de referencia y K_c es el coeficiente específico del cultivo en cuestión. En esta propuesta para calcular el consumo de agua de una parcela se considera de forma conjunta los procesos de evaporación y transpiración.

Este método, conocido coloquialmente como el método FAO, ha sido el más empleado en todos los regadíos del mundo gracias a ventajas como la facilidad de cálculo, que permite hacer previsiones de las necesidades a largo plazo o la aplicación a un gran número de cultivos y

situaciones. A pesar de que el desarrollo de este método supuso un hito dentro del diseño y gestión de las estrategias de riego, presenta debilidades relacionadas, principalmente, con la determinación del coeficiente de cultivo. Desde su primera publicación en 1977, ha sido objeto de varias revisiones y mejoras, (R. Allen y cols., 1998; Doorenbos y cols., 1979), y se han propuesto métodos alternativos para el cálculo de K_c como Orgaz y cols., (2006) y Testi y cols., (2006) en olivo, Abrisqueta y cols., (2013) en melocotonero o Samperio y cols., (2014) en ciruelo japonés; mostrando así la preocupación existente por un mejor ajuste de este coeficiente para evitar el consumo excesivo de agua o aplicaciones insuficientes que repercutan negativamente en la cosecha.

Disminuir la disponibilidad de agua por debajo de las necesidades del cultivo suele ir acompañado de reducción en la producción de asimilados y por tanto de biomasa. La clave del riego deficitario es dirigir esta reducción hacia órganos vegetativos que, posteriormente se retirarán con la poda, sin comprometer así la productividad a medio y largo plazo. Esto solo es posible partiendo del conocimiento de la respuesta fisiológica del árbol frente a un déficit hídrico variable en los diferentes estados fenológicos del mismo.

Con este planteamiento se han propuesto diferentes estrategias de riego deficitario:

- Riegos de apoyo. Suele emplearse en zonas con una baja dotación de riego y consiste en aplicar un limitado número de riegos a lo largo del cultivo, coincidiendo normalmente con la época de mayor demanda o cuando hay disponibilidad de agua, con una dotación total sensiblemente más baja que las necesidades del cultivo.
- Riego deficitario sostenido (SDI). El riego aporta un porcentaje de las necesidades hídricas de la plantación (ET_c) a lo largo de todo el ciclo de cultivo (Segura, 2014; Zuazo y cols., 2014) lo que implica una reducción de las reservas de agua en el suelo y una menor disponibilidad de éstas a medida que avanza el ciclo de cultivo y la demanda hídrica es mayor. También incluye aportar una dotación fija de agua a lo largo de todo el ciclo, insuficiente para cubrir las necesidades de la plantación.
- Riego Parcial de Raíces (PRD). Consistente en regar sólo un lateral de la zona de raíces en cada evento de riego, dejando que la parte regada se seque hasta el siguiente riego (Poulsen y cols., 2010), mejorando la eficiencia en el uso del agua (Sadras, 2009). Aunque esta estrategia fue diseñada originariamente para controlar el desarrollo vegetativo en el cultivo del algodón (Grimes y cols., 1968) ha sido muy estudiada en viñedo (Sepaskhah y Ahmadi, 2010), aunque algunos autores las han aplicado en frutales como el peral (Kang y cols., 2002), el manzano (Leib y cols., 2006; Zegbe y Behboudian, 2008) y el olivo (Fernández y cols., 2006; Wahbi y cols., 2005).

- Riego deficitario controlado (RDI). Se basa en diferenciar los estados fenológicos de mayor y menor sensibilidad al déficit hídrico desde el punto de vista productivo, reducir el riego por debajo de las necesidades hídricas del cultivo en los periodos menos sensibles y procurar un estado hídrico óptimo en las fases sensibles (Mitchell y Chalmers, 1982). Se trata de una estrategia de riego ampliamente desarrollada en diversos frutales como manzano (Ebel y cols., 1995), peral (Marsal y cols., 2002b), melocotonero (Goldhammer y cols., 2015), ciruelo japonés (Samperio y cols., 2015), albaricoquero (Ruiz-Sánchez y cols., 2000), olivo (Fernández y cols., 2013) o almendro (J. Girona y cols., 2005) entre otros. Para su correcta aplicación es preciso conocer no sólo el momento para aplicar el déficit, sino su intensidad y posterior recuperación; aspectos que pueden cambiar de un cultivo a otro (Chalmers y cols., 1981; DeJong y Goudriaan, 1989) e incluso entre cultivares de la misma especie (Mitchell y Chalmers, 1982).

El seguimiento en campo del crecimiento de 9 cultivares de melocotonero con diferente longitud de ciclo (Connors, 1919), asentó las bases para afirmar que los frutales de hueso siguen un crecimiento en tres fases diferenciadas: una fase postcuajado con un rápido desarrollo del fruto en el que destaca el crecimiento de la semilla, seguido de un periodo de bajo crecimiento en el cual el hueso se endurece y, finalmente un periodo de rápido crecimiento de la pulpa acompañado de los procesos de maduración. En este estudio, Connors destacó que todos los cultivares de melocotonero poseen esas tres fases, aunque de acuerdo a la longitud total del ciclo de desarrollo del fruto, estas fases pueden variar su duración, siendo prácticamente inexistentes en cultivares de ciclo corto.

Por su parte, Chalmers y Ende, (1975), caracterizaron el patrón de acumulación de carbohidratos y las hormonas involucradas en el proceso de desarrollo de los componentes del fruto (endocarpo, mesocarpo y exocarpo), destacando que existe un desfase entre el crecimiento en fresco y seco. En función de la demandada de carbohidratos y el momento de desarrollo del fruto, Chalmers y Ende (1977) diferenciaron órganos “sumidero” o “fuente” que sirvió de base para el establecimiento de los primeros ensayos de déficit hídrico en frutales de hueso con el fin de limitar el desarrollo vegetativo en plantaciones de altas densidades de melocotonero (Chalmers y cols., 1981).

Según Chalmers y cols. (1981), una reducción en la cantidad de agua aplicada en una fase intermedia del desarrollo del fruto, reduce el crecimiento vegetativo y, por tanto los trabajos asociados al manejo de la copa, pudiendo llegar a incrementar la producción final fruta. La eficiencia de esta técnica puede verse incrementada si las raíces se encuentran confinadas en un espacio reducido (haciendo uso de barreras naturales, suelos arcillosos o riego por goteo) y se adapta al vigor de la planta la duración del ciclo de maduración del fruto y nivel de carga. Estudios posteriores (Mitchell y Chalmers, 1982) mostraron que un exceso de riego en cualquier fase de desarrollo del fruto puede ser perjudicial, si fomenta de manera significativa el desarrollo vegetativo del melocotonero. Según estos autores, un déficit hídrico, incluso severo en fase II no ocasiona pérdidas en el crecimiento del fruto y una limitación hídrica en la primera fase de desarrollo del fruto, por mínima que sea reduce su tamaño final.

En cultivares de ciclo corto donde la fase intermedia es prácticamente inapreciable (Grossman y DeJong, 1995; Pavel y DeJong, 1993), se ha propuesto la etapa de postcosecha como la más adecuada para inducir un estrés hídrico moderado mediante riego deficitario (Johnson y cols., 1994; Marsal y cols., 2010; Naor, 2006) sin afectar a la producción del año siguiente (Behboudian y Mills, 1997). Un déficit severo, por el contrario, puede producir pérdidas en la cosecha siguiente, atribuidas a un bajo cuajado de los frutos (Goldhamer y Viveros, 2000; Torrecillas y cols., 2000) o un descenso de la viabilidad del polen (Ruiz-Sanchez y cols., 1999).

El uso de un modelo de desarrollo del fruto de melocotonero en doble sigmoide, basado en la identificación de etapas de acuerdo al crecimiento relativo de los frutos y en los grados día expuesto por DeJong y Goudriaan (1989), junto con los principios del riego deficitario expuestos por Chalmers y cols. (1981), abrió un camino para el desarrollo de las estrategias de riego deficitario en frutales de hueso, no sólo para controlar el desarrollo vegetativo de las plantaciones y sus beneficios asociados, sino también para reducir el consumo de agua de las mismas. En este sentido varios autores han añadido matices importantes a este modelo de crecimiento del fruto en olivo (Rapoport y cols., 2013) o melocotonero (Yamaguchi y cols., 2009), que pueden ser de interés de cara al diseño de estrategias de riego deficitario lo que hace recomendable un estudio fisiológico previo en la especie o cultivar en cuestión.

1.3.4. Riego deficitario controlado en ciruelo japonés

El modelo de desarrollo del fruto de melocotonero en doble sigmoide, se ha comprobado que es aplicable a otras especies de frutales como el peral, el olivo, el cerezo o incluso el ciruelo japonés, llegando incluso a nombrarse con las mismas fases de desarrollo. En ciruelo japonés los trabajos de Basile y cols. (2002) y Mariscal y cols. (2001) pusieron de manifiesto pequeñas diferencias con el melocotonero, como una ralentización del crecimiento del fruto al final de la madurez comercial (próximo a la recolección) en cultivares de ciclo medio de ciruelo japonés, no observada en melocotonero.

La búsqueda del momento de aplicación del estrés hídrico y los umbrales de potencial hídrico que los árboles pueden soportar sin ocasionar pérdidas en la producción final, ha sido objeto de estudio en diversos cultivos (Taylor y cols., 1983). Un trabajo llevado a cabo en melocotoneros de ciclo largo (Li y cols., 1989) puso de manifiesto que, un estrés hídrico en una fase inmediatamente después de floración producía un aumento del tamaño final del fruto y reducía la caída natural de los frutos tras la fase de cuajado, reduciendo además el crecimiento vegetativo del árbol. En el caso del ciruelo japonés cultivado en condiciones de clima mediterráneo, las precipitaciones durante la primera etapa del crecimiento del fruto, suelen cubrir las necesidades hídricas de los árboles en esta fase, de forma que es difícil evaluar el efecto de un estrés hídrico bajo condiciones naturales de campo. La duración del ciclo de los diferentes cultivares y las características de los mismos hace que la ubicación dentro de la estación y duración de los periodos menos sensibles varíe de unos a otros. Por otra parte, la velocidad a la que se impone el estrés y los valores mínimos alcanzados también juegan un papel importante en la respuesta productiva y dependen de la interacción entre el árbol y su entorno (Intrigliolo y Castel, 2010; Samperio y cols., 2015). Según Naor y cols. (2004), el déficit hídrico en los cultivos leñosos no debe ser estudiado de manera aislada. Factores como las altas temperaturas en el desarrollo del fruto, el tipo de suelo o el nivel de carga, pueden entrar en sinergia con el déficit hídrico agravando sus efectos negativos, en

contraposición con Intrigliolo y Castel (2010) que no encontraron interacción entre el nivel de carga y el estrés hídrico, en cultivares de ciclo medio a corto plazo.

Los primeros ensayos de RDI en ciruelo japonés se llevaron a cabo en el cv. de ciclo corto 'Red Beaut' (Johnson y cols., 1994), con la finalidad de reducir la cantidad de agua aportada en postcosecha: una fase larga en este tipo de cultivares y que, *a priori*, podría no afectar al fruto. Los resultados mostraron que un estrés hídrico en esta fase, no reducía la producción final, ni en número de frutos, ni en tamaño de los mismos, coincidiendo con lo observado por Samperio y cols., (2015). Un estrés severo puede reducir el número de flores en el siguiente año, efecto no del todo negativo al tratarse de una especie que requiere aclareos severos (Intrigliolo y Castel, 2005) y un estrés moderado, aunque prolongado (6 años) puede reducir la cosecha, aunque este efecto puede revertirse en las dos campañas posteriores con un manejo adecuado del riego (Intrigliolo y Castel, 2011)

En cultivares de ciclo medio, se propone un estrés combinado entre la fase intermedia del crecimiento del fruto y la postcosecha. Intrigliolo y Castel (2010) con un déficit postcosecha moderado, no observaron descensos en el tamaño del fruto en el año posterior, así mismo, un déficit a lo largo del desarrollo del fruto con un umbral mínimo de -1.5 MPa y una recuperación posterior previa a la cosecha, tampoco comprometió la cosecha del año en curso. En estos mismos cultivares, se ha visto que un déficit hídrico en la última etapa de desarrollo del fruto, produce pérdidas de tamaño final del fruto (Intrigliolo y Castel, 2005; Naor, 2004; Naor y cols., 2004), de tal manera que un potencial hídrico inferior a -1MPa (Naor y cols., 2004) entraña inevitablemente pérdidas en la cosecha tanto en tamaño como en calidad.

En el trabajo de Zuzunaga y cols. (2014) se presenta la curva de crecimiento de los frutos de dos cultivares de ciruelo japonés (Golden Japan y Santa Rosa), interpretando que el incremento en el tamaño del fruto respondía a un patrón en doble sigmoide, aunque resultaba difícil de identificar una fase intermedia de crecimiento lento. Resultados similares se observa en los trabajos de Intrigliolo y Castel (2006) con Black Gold y Naor y cols., (2004) con Black Amber. Por su parte, Samperio y cols. (2015) en 'Angeleno' con un seguimiento en campo de la evolución del tamaño del fruto, matiza la dificultad para determinar la fase II del desarrollo del fruto y destaca que un estrés severo en un periodo intermedio de crecimiento del fruto penaliza el desarrollo del mismo ocasionando frutos de menor tamaño. Sin embargo, es importante profundizar en el efecto de estas estrategias a medio y largo plazo, ya que lo que pueden ser buenos resultados obtenidos en estudios de 2 o 3 años, pueden tener menor interés práctico si llegan a afectar a la productividad a medio, largo plazo y/o a la vida útil de la plantación. Este tipo de estudios son hasta el momento escasos a pesar de su indudable interés.

1.3.5. Indicadores del estado hídrico

Los estudios sobre la aplicación de estrategias de riego deficitario, entienden el éxito de las mismas como la ausencia de penalización de la producción final respecto a una estrategia que cubre las necesidades del cultivo; incluso aquellas estrategias planteadas en periodos en los que el fruto no está presente en el árbol, analizan las posibles penalizaciones en los años posteriores tanto en calidad como en cantidad (Johnson y cols., 1992). En aquellos casos en que la estrategia

de riego ocasiona reducciones en el tamaño de los frutos, o pérdidas de cosecha, se analizan otros aspectos relacionados con la reducción de costes de producción asociados al menor vigor: menores costes en poda y recolección, en gastos de tratamientos fitosanitarios, en energía y agua de riego; o bien beneficios medioambientales como la mejora en la eficiencia en el uso del agua.

Estudios previos sobre el balance de asimilados entre los órganos vegetativos y reproductivos ponen de manifiesto que ambos están relacionados y que, en determinados estados fenológicos compiten por los recursos (Basile y cols., 2002; Chalmers y Ende, 1977; Wareing y Patrick, 1975). El estado hídrico del árbol puede interactuar con los ritmos estacionales de fuente-sumidero del árbol y dirigir los asimilados de forma preferente hacia órganos vegetativos o frutos. Esta capacidad de redirigir los asimilados es debida a la sensibilidad diferencial al déficit hídrico de los distintos procesos fisiológicos (Bradford y Hsiao, 1982). La respuesta del árbol frente al riego deficitario depende en gran medida del momento y grado de severidad del déficit hídrico, así como la carga del cultivo (Marsal y Girona, 1997), lo que le confiere gran importancia a disponer de un indicador fiable del estado hídrico de la planta. La capacidad de un sensor para caracterizar el estado hídrico de un cultivo y su respuesta frente a situaciones de déficit dependerá de diversos factores, como la especie, el cultivar, su comportamiento fisiológico, el estado fenológico, etc.

Existen múltiples indicadores de estado hídrico que pueden ser utilizados para el diseño y seguimiento de programaciones de riego, con o sin estrategias de riego deficitario. Cada uno de ellos presenta unas ventajas e inconvenientes que hay que evaluar al considerar la aplicación o necesidad que se pretende cubrir. El método de flujo de savia, consiste en determinar el agua consumida por la planta mediante su dinámica de transpiración. El primer modelo de este sensor fue desarrollado por Huber, (1932), y tras el desarrollo de su procedimiento midiendo la “velocidad del pulso de calor” (HPV de sus siglas en inglés) han sido varios autores los que han desarrollado variantes del mismo, como: el “balance térmico de la sección de tronco” (THB de sus siglas en inglés) (Čermák y cols., 1973; Čermák y Deml, 1974), el “balance térmico de tallo” (SHB de sus siglas en inglés) (Sakuratani, 1984, 1981), la “disipación del calor” (HD de sus siglas en inglés) (Granier y Gross, 2007), la “deformación del campo térmico” (HFD de sus siglas en inglés) (Nadezhdina, 1998) o el método de “compensación de flujo de calor” (CHPM de sus siglas en inglés) (Swanson, 2014) y su posterior adaptación a flujos más lentos (Testi y Villalobos, 2009), entre otros. A pesar de la oferta disponible en cuanto al tipo de sensor y la variable medida, todos los sistemas basan su principio en la emisión de un pulso de calor en el xilema conductor del tronco del árbol y una posterior medida del mismo (grado de disipación, tiempo de movimiento del flujo calentado...), estimando el movimiento de la savia en el árbol de las raíces a las hojas y, por tanto, su transpiración. Este indicador cuantifica la dinámica de transpiración estacional del árbol, así como el valor total de la misma, lo que permite trabajar sin una calibración previa y detectar situaciones relacionadas con el déficit hídrico. La complejidad de los cálculos y la necesidad de adaptar los valores a cada especie o cultivar hacen que este indicador requiera de una gran inversión de tiempo y personal especializado para su correcto uso, además de requerir un coste de inversión elevado para una finca comercial.

La dinámica diaria de transpiración del árbol ocasiona movimientos de fluidos en su interior que expanden y contraen los tejidos del mismo, en base a este principio se han desarrollado dos indicadores: los dendrómetros y los sensores de turgor. Los dendrómetros pueden dividirse en dos grandes categorías: los que no mantienen contacto con el órgano vegetal (como los ópticos o de láser) y los de contacto (Clark y cols., 2000); estos últimos a su vez se subdividen entre dendrómetros de lámina (compuestos por bandas metálicas que abrazan al órgano sobre el que se instalan) (Keeland y Sharitz, 1993) o de desplazamiento lineal. Estos últimos están formados por pequeñas agujas fabricadas con un material poco conductor de la temperatura (normalmente

aleaciones de hierro y cobre) que se instalan sobre diversas partes del árbol como frutos, ramas y, con mayor frecuencia troncos. Las variaciones estacionales del volumen del tronco son debidas al crecimiento del mismo, sin embargo, los dendrómetros son capaces de medir de manera continua la dinámica de expansión/contracción diaria del tronco. En base a las medidas diarias tomadas se pueden emplear varios indicadores como la máxima contracción diaria, máximo diámetro de tronco diario, mínimo diámetro de tronco diario, crecimiento diario o combinaciones entre ambos. El empleo de estos sensores para la programación de riego se ha demostrado exitoso en cultivos como los cítricos (Ginestar y Castel, 1998), melocotón (Li y cols., 1989), olivo (Moriana y Fereres, 2003) o manzano (Naor y Cohen, 2003). Sin embargo, no todas las especies o incluso cultivares, muestran una respuesta volumétrica de sus órganos a las variaciones diarias de la transpiración, en casos como el níspero (Ballester y cols., 2014), granado (Intrigliolo y cols., 2011) o ciruelo japonés (de León y cols., 2013) no es factible su empleo.

Aunque en las hojas se produzca una expansión/contracción volumétrica diaria debido a la transpiración, el uso de dendrómetros en estos órganos es inviable debido a las limitaciones del diseño, para ellos se han desarrollado sensores con el mismo principio de funcionamiento que los dendrómetros pero adaptados a la hoja: los sensores de turgor (Zimmermann y cols., 2008). Su principio de funcionamiento se basa en la instalación de dos imanes en una hoja: uno por cada cara de la misma, la expansión o contracción del órgano debido a la presión de turgencia, desplaza estos imanes y registra una señal (Fernández y cols., 2011) que será relacionada con el estado hídrico de la planta. Una de las mayores ventajas de estos sensores es que proveen un indicador continuo del estado hídrico de la planta de manera remota, condicionado a la duración de la batería. Sin embargo, la aparición de estos sensores es muy actual y aunque se encuentren en fase de comercialización, el estudio de su aplicabilidad sobre diversos cultivos diferentes al olivo (Padilla-Díaz y cols., 2016) se encuentra en una etapa precoz.

La demanda hídrica de la atmósfera fuerza a que el agua existente en el suelo pase a través de las raíces y órganos de la planta hacia la atmósfera por los estomas (Ley de Darcy), este fenómeno se conoce como transpiración y puede producir un descenso en la cantidad de agua presente en la planta. La presión que ejerce el agua presente en la planta puede ser medido con una cámara de presión, este indicador se conoce como potencial hídrico (Scholander y cols., 1965). El sistema de medida se basa en introducir una parte de la planta en una cámara cerrada con una única vía de escape (rama, peciolo o raíz), la presión de la cámara se incrementa poco a poco hasta que el agua retenida en el xilema vascular es expulsada, en ese momento la presión aplicada corresponde al opuesto del potencial hídrico (Turner, 1981). La medida de potencial hídrico se puede tomar sobre diversos órganos y en diferentes momentos del día, no existe un consenso general sobre el uso de una medida u otra. La medida correcta del potencial hídrico está muy bien relacionada con el estado hídrico real de la planta y existe una amplia bibliografía en el empleo de este indicador sobre una gran variedad de cultivos e incluso sobre el diseño de estrategias de riego en base al mismo en ciruelo europeo (Lampinen y cols., 2001), viña (Girona y cols., 2006), olivo (Moriana y cols., 2012), melocotonero (W. Conejero y cols., 2011), almendro (Fereres y Goldhamer, 2003) entre otros; sin embargo, se trata de una metodología, que requiere de inversión elevada de tiempo y personal cualificado para llevarla a cabo, no siendo automatizable.

Algunos indicadores como el potencial hídrico, tienen un gran recorrido en la investigación (Scholander y cols., 1965), donde la transferencia de su conocimiento ha llegado hasta el productor final (Barajas y cols., 2006) y su uso en explotaciones frutícolas es cada vez más frecuente. Otros, como la medida del turgor de hoja (Zimmermann y cols., 2008) tienen un desarrollo más reciente gracias al avance de la tecnología asociada. En la actualidad, a pesar de que existe bibliografía comparando la respuesta de diversos indicadores ante diferentes estados

CAPÍTULO 1

hídricos de la planta en el mismo estado fenológico, existe una falta de consenso acerca del tipo de indicador que se debe emplear en un cultivo u otro o dependiendo de la estrategia de riego adoptada.

1.4. Objetivos

El ciruelo japonés es una especie de gran interés en Extremadura y el cv. Angeleno es el más cultivado en esta región, del que existe escasa información en bibliografía en lo que se refiere a la gestión del riego y en concreto al empleo de estrategias de Riego Deficitario Controlado. A la vista de este vacío de información, en este trabajo se plantean los siguientes objetivos:

- ❖ Identificar el comportamiento hídrico del *Prunus salicina* Lindl. cv ‘Angeleno’ (iso-anisohídrico). Explorar las relaciones entre variables seleccionadas y Ks (o transpiración relativa). Verificar si los indicadores empleados por los investigadores para determinar el estrés hídrico de las plantas se basan o no, en el comportamiento iso- anisohídrico de las mismas, comprobando si la elección habitual de las variables derivadas de las medidas dendrométricas están relacionadas con la isohidricidad.

- ❖ Describir el patrón de desarrollo del fruto del cultivar de ciclo largo de ciruelo japonés ‘Angeleno’, así como evaluar el efecto del estrés hídrico en una etapa intermedia del crecimiento del fruto sobre el tamaño final del mismo; empleando esta información para establecer guías de uso de estrategias de riego deficitario controlado.

- ❖ Evaluar una nueva Estrategia de Riego Deficitario Controlado propuesta para el cv. de ciruelo japonés de ciclo largo Angeleno, en la que el periodo de déficit hídrico se adapta al patrón particular de desarrollo de esta variedad. Comparar con la estrategia de RDC propuesta para otros frutales de hueso y cultivares de esta misma especie, así como con un tratamiento regado de acuerdo a sus necesidades hídricas. Esta evaluación se refiere, tanto a los aspectos ecofisiológicos del cultivo, como a las características de los frutos en cosecha.

1.5. Referencias

- Abrisqueta, I., Abrisqueta, J.M., Tapia, L.M., Munguía, J.P., Conejero, W., Vera, J., Ruiz-Sánchez, M.C., 2013. Basal crop coefficients for early-season peach trees. *Agric. Water Manag.* 121, 158–163. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.02.001>
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M., 1998. *FAO Irrigation and Drainage Paper No.56*, FAO. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.12.001>
- Ballester, C., Buesa, I., Bonet, L., Intrigliolo, D.S., 2014. Usefulness of stem dendrometers as continuous indicator of loquat trees water status. *Agric. Water Manag.* 142, 110–114. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.04.019>
- Basile, B., Mariscal, M.J., Day, K.R., Johnson, R.S., DeJong, T.M., 2002. Japanese plum (*Prunus salicina* L.) fruit growth: Seasonal pattern of source/sink limitations. *J. Am. Pomol. Soc.* 56, 86–93.
- Behboudian, M.H., Mills, T.M., 1997. Deficit irrigation in deciduous orchards. *Hortic. Rev. (Am. Soc. Hortic. Sci.)* 21, 105–131.
- Bradford, K.J., Hsiao, T.C., 1982. Physiological Responses to Moderate Water Stress, in: *Physiological Plant Ecology II*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 263–324. https://doi.org/10.1007/978-3-642-68150-9_10
- Čermák, J., Deml, M., 1974. Method of water transport measurements in woody species, especially in adult trees.
- Čermák, J., Deml, M., Penka, M., 1973. A new method of sap flow rate determination in trees. *Biol. Plant.* 15, 171–178. <https://doi.org/10.1007/BF02922390>
- Chalmers, D., Ende, B., 1975. A Reappraisal of the Growth and Development of Peach Fruit. *J. Plant Physiol.* 2, 623–634. <https://doi.org/10.1071/pp9750623>
- Chalmers, D.J., Ende, B.V. Den, 1977. The Relation Between Seed and Fruit Development in the Peach (*Prunus persica* L.). *Ann. Bot.* 41, 707–714. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a085345>
- Chalmers, D.J., Mitchell, P.D., Heek, L. van, Van Heek, L., 1981. Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density, and summer pruning. *J. Journal-American Soc. Hortic. Sci. (USA)*. 106, 307–3012.
- Clark, N.A., Wynne, R.H., Schmoldt, D.L., 2000. A review of past research on dendrometers. *For. Sci.*
- Collins, R., Kristensen, P., Thyssen, N., 2009. Water resources across Europe - confronting water scarcity and drought. *EEA Report 2/2009.*, EEA. <https://doi.org/10.2800/16803>
- Conejero, W., Mellisho, C.D., Ortuño, M.F., Galindo, A., Pérez-Sarmiento, F., Torrecillas, A., 2011. Establishing maximum daily trunk shrinkage and midday stem water potential reference equations for irrigation scheduling of early maturing peach trees. *Irrig. Sci.* 29, 299–309. <https://doi.org/10.1007/s00271-010-0238-0>
- Connors, C., 1919. Growth of fruits of peach. *Agric. Exp. Stn. Annu.* 14, 82–88.
- de León, L.B.P., Ferrer, P., Castel, J.R., Intrigliolo, D.S., 2013. Soil capacitance sensors and stem dendrometers. Useful tools for irrigation scheduling of commercial orchards? *Spanish J. Agric. Res.* 8, 52. <https://doi.org/10.5424/sjar/201008s2-1348>

- DeJong, T.M., Goudriaan, J., 1989. Modeling peach fruit growth and carbohydrate requirements: reevaluation of the double-sigmoid growth pattern. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 114, 800–804.
- Doorenbos, J., Kassam, A.H., Bentvelsen, C., Uittenbogaard, G., Doorenbos, J., & Kassam, A.H., 1979. Yield response to water. *Irrig. Drain. Pap.* 33. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-025675-7.50021-2>
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O., 1977. guidelines for predicting crop water requirements. *FAO Irrig. Drain.*
- Ebel, R.C., Proebsting, E.L., Evans, R.G., 1995. Deficit irrigation to control vegetative growth in apple and monitoring fruit growth to schedule irrigation. *HortScience* 30, 1229–1232.
- Extremadura, G. de, 2018. Base de Datos del Instituto de Estadística de Extremadura [WWW Document]. URL <https://ciudadano.gobex.es/web/ieex/inicio> (accessed 3.9.19).
- FAO, 2017. Escasez de agua: Uno de los grandes retos de nuestro tiempo [WWW Document]. URL <http://www.fao.org/zhc/detail-events/es/c/880888/> (accessed 3.9.19).
- FAO, 2015. Towards a water and food secure future: Critical perspectives for policy-makers. *FAO WWC* 14560, 62.
- FAOSTAT, 2017. [WWW Document]. URL <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC> (accessed 4.29.19).
- Faust, M., Rev, D.S., 1999. Origin and dissemination of plums. *Hort. Rev.* 23, 179–231.
- FEPEX, 2019. FEPEX [WWW Document]. *Fed. Española Asoc. Prod. Frutas, Hortalizas, Flores y Plantas Vivas*. URL <http://www.fepex.es/datos-del-sector/exportacion-importacion-espanola-frutas-hortalizas> (accessed 3.20.19).
- Fereres, E., Goldhamer, D.A., 2003. Suitability of stem diameter variations and water potential as indicators for irrigation scheduling of almond trees. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 78, 139–144. <https://doi.org/10.1080/14620316.2003.11511596>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1704-2>
- Fernández, J.E., Rodriguez-Dominguez, C.M., Perez-Martin, A., Zimmermann, U., Rüger, S., Martín-Palomo, M.J., ..., 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. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.015>
- Fernández, J.E., Villagarcía, L., Palomo, M.J., Chamorro, V., Girón, I.F., Infante, J.M., Durán, P., Díaz-Espejo, A., 2006. Water relations and gas exchange in olive trees under regulated deficit irrigation and partial rootzone drying. *Plant Soil* 284, 273–291. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-0045-9>
- García-Vila, M., Fereres, E., 2012. Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. *Eur. J. Agron.* 36, 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.08.003>
- Ginestar, C., Castel, J.R., 1998. Use of stem dendrometers as indicators of water stress in drip-irrigated citrus trees, in: *Acta Horticulturae*. pp. 209–219.
- Girona, J., Mata, M., Del Campo, J., Arbonés, A., Bartra, E., Marsal, J., 2006. The use of midday leaf water potential for scheduling deficit irrigation in vineyards. *Irrig. Sci.* 24, 115–127. <https://doi.org/10.1007/s00271-005-0015-7>

- Girona, J., Mata, M., Marsal, J., 2005. Regulated deficit irrigation during the kernel-filling period and optimal irrigation rates in almond. *Agric. Water Manag.* 75, 152–167. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2004.12.008>
- Goldhamer, D.A., Viveros, M., 2000. Effects of preharvest irrigation cutoff durations and postharvest water deprivation on almond tree performance. *Irrig. Sci.* 19, 125–131. <https://doi.org/10.1007/s002710000013>
- Goldhammer, D., Soler, M., Moriana, A., Day, K.R., Salinas, M., Crisosto, C., 2015. Effects of regulated deficit irrigation and partial root zone drying on late harvest peach tree performance. *Acta Hort.* 343–350. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2002.592.48>
- Granier, A., Gross, P., 2007. Mesure du flux de sève brute dans le tronc du Douglas par une nouvelle méthode thermique. *Ann. des Sci. For.* 44, 1–14. <https://doi.org/10.1051/forest:19870101>
- Grimes, D., Walhood, V., Dickens, W., 1968. Alternate-furrow irrigation for San Joaquin Valley Cotton. *Cal Ag* 22, 4–6.
- Grossman, Y.L.Y., DeJong, T.T.M., 1995. Maximum fruit growth potential and seasonal patterns of resource dynamics during peach growth. *Ann. Bot.* 75, 553–560. <https://doi.org/10.1006/anbo.1995.1058>
- Guerra Velo, M., 2011. Polinización y cuajado en ciruelo japonés. Universidad de Extremadura. Departamento de Biología Vegetal, Ecología y Ciencias de la Tierra.
- Hancock, J., 2008. *Temperate Fruit Crop Breeding*, Temperate Fruit Crop Breeding. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6907-9>
- Hartmann, W., Neumüller, M., 2009. *Breeding Plantation Tree Crops: Temperate Species*.
- Huber, B., 1932. Beobachtung und Messung pflanziger Saftströme. *Ber.Dtsch.Bot.Ges.* 56, 35–48.
- Hueso, J., Cuevas, J., 2014. La fruticultura del siglo XXI en España.
- INE, 2019. INEbase / Agricultura y medio ambiente / Agua / Estadística sobre el suministro y saneamiento del agua / Últimos datos [WWW Document]. Estadísticas sobre el uso del agua. URL https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176839&menu=ultiDatos&idp=1254735976602 (accessed 3.23.19).
- Intrigliolo, D.S., Castel, J.R., 2011. Long-term effects of deficit irrigation and subsequent recovery of young Japanese plum trees. *Acta Hort.* 889, 241–248. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.889.28>
- Intrigliolo, D.S., Castel, J.R., 2010. Response of plum trees to deficit irrigation under two crop levels: Tree growth, yield and fruit quality. *Irrig. Sci.* 28, 525–534. <https://doi.org/10.1007/s00271-010-0212-x>
- Intrigliolo, D.S., Castel, J.R., 2006. Performance of various water stress indicators for prediction of fruit size response to deficit irrigation in plum. *Agric. Water Manag.* 83, 173–180.
- Intrigliolo, D.S., Castel, J.R., 2005. Effects of regulated deficit irrigation on growth and yield of young Japanese plum trees. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 80, 177–182. <https://doi.org/10.1080/14620316.2005.11511913>
- Intrigliolo, D.S., Puerto, H., Bonet, L., Alarcón, J.J., Nicolas, E., Bartual, J., 2011. Usefulness of trunk diameter variations as continuous water stress indicators of pomegranate (*Punica granatum*) trees. *Agric. Water Manag.* 98, 1462–1468. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.05.001>

- Johnson, R.S., Handley, D.F., Day, K.R., 1994. Postharvest water stress of an early maturing plum. *J. Hortic. Sci.* 69, 1035–1041. <https://doi.org/10.1080/00221589.1994.11516542>
- Johnson, R.S., Handley, D.F., Dejong, T.M., 1992. Long-term Response of Early Maturing Peach Trees to Postharvest Water Deficits. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 117, 881–886.
- Kang, S.Z., Hu, X.T., Goodwin, L., Jerle, P., Zhang, J., 2002. Soil water distribution, water use and yield response to partial rootzone drying under flood-irrigation condition in a pear orchard. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 92, 277–291.
- Keeland, B.D., Sharitz, R.R., 1993. Accuracy of tree growth measurements using dendrometer bands. *Can. J. For. Res.* 23, 2454–2457. <https://doi.org/10.1139/x93-304>
- Kyriacou, M.C., Roupael, Y., 2018. Towards a new definition of quality for fresh fruits and vegetables. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.09.046>
- Lampinen, B.D., Shackel, K.A., Southwick, S.M., Olson, W.H., 2001. Deficit irrigation strategies using midday stem water potential in prune. *Irrig. Sci.* 20, 47–54. <https://doi.org/10.1007/s002710000028>
- Leib, B., Caspari, H., Redulla, C., 2006. Partial rootzone drying and deficit irrigation of 'Fuji' apples in a semi-arid climate. *Irrig. Sci.* 85–99. <https://doi.org/10.1007/s00271-005-0013-9>
- Li, Huguet, J., Bussi, C., 1989. Irrigation scheduling in a mature peach orchard using tensiometers and dendrometers. *Irrig. Drain. Syst.* 3, 1–12. <https://doi.org/10.1007/BF01102813>
- Li, S.H., Huguet, J.-G., Schoch, P.G., Orlando, P., Schochj, P.G., Orlando, P., 1989. Response of peach tree growth and cropping to soil water deficit at various phenological stages of fruit development. *J. Hortic. Sci.* 64, 541–552. <https://doi.org/10.1080/14620316.1989.11515989>
- MAPA, 2018. Encuesta sobre Superficies y Rendimientos Cultivos (ESYRCE): mapas de los principales grupos de cultivos [WWW Document]. URL <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/esyrce/default.aspx> (accessed 3.12.19).
- MAPA, 2017. Anuario de estadística [WWW Document]. URL <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica/default.aspx> (accessed 3.12.19).
- Mariscal, M., Day, K., Basile, B., T.M., D., 2001. Modeling the vegetative and reproductive growth of plums. VI Int. Symp. Comput. Model. Fruit Res. Orchard Manag. 584, 35–41.
- Marsal, J., Girona, J., 1997. Relationship between Leaf Water Potential and Gas Exchange Activity at Different Phenological Stages and Fruit Loads in Peach Trees. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 122, 415–421. <https://doi.org/10.21273/jashs.122.3.415>
- Marsal, J., Lopez, G., del Campo, J., Mata, M., Arbones, A., Girona, J., 2010. Postharvest regulated deficit irrigation in “Summit” sweet cherry: Fruit yield and quality in the following season. *Irrig. Sci.* 28, 181–189. <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0174-z>
- Marsal, J., Mata, M., Arbonés, A., Rufat, J., Girona, J., 2002. Regulated deficit irrigation and rectification of irrigation scheduling in young pear trees: An evaluation based on vegetative and productive response. *Eur. J. Agron.* 17, 111–122. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00002-3](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00002-3)
- Mitchell, P.D., Chalmers, D.J.J., 1982. The effect of reduced water supply on peach tree growth and yields. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 107, 853–856.
- MITECO, M. para la transición ecológica, 2019. Inventario de Presas y Embalses [WWW Document]. Inventar. Presas y Embalses. URL

- <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/seguridad-de-presas-y-embalses/inventario-presas-y-embalses/> (accessed 3.23.19).
- Moriana, A., Fereres, E., 2003. Plant indicators for scheduling irrigation of young olive trees. *Irrig. Sci.* 21, 83–90. <https://doi.org/10.1007/s00271-001-0053-8>
- Moriana, A., Pérez-López, D., Prieto, M.H., Ramírez-Santa-Pau, M., Pérez-Rodríguez, J.M., 2012. Midday stem water potential as a useful tool for estimating irrigation requirements in olive trees. *Agric. Water Manag.* 112, 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.06.003>
- Mundial, B., 2018. Indicadores Banco Mundial [WWW Document]. Indicadores del Banco Mund. URL <http://www.bancomundial.org/> (accessed 3.23.19).
- Nadezhkina, N., 1998. Temperature gradients around a linear heater in stems due to mowing sap., in: *Measuring Sap Flow in Intact Plants. Proceedings of 4th International Workshop.* pp. 65–71.
- Naor, A., 2006. Irrigation scheduling of peach - Deficit irrigation at different phenological stages and water stress assessment, in: *Acta Horticulturae.* pp. 339–349.
- Naor, A., 2004. The interactions of soil- and stem-water potentials with crop level, fruit size and stomatal conductance of field-grown “Black Amber” Japanese plum. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 79, 273–280. <https://doi.org/10.1080/14620316.2004.11511760>
- 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, 547–551.
- Naor, A., Peres, M., Greenblat, Y., Gal, Y., Ben Arie, R., 2004. Effects of pre-harvest irrigation regime and crop level on yield, fruit size distribution and fruit quality of field-grown “Black Amber” Japanese plum. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 79, 281–288. <https://doi.org/10.1080/14620316.2004.11511761>
- Orgaz, F., Testi, L., Villalobos, F.J., Fereres, E., 2006. Water requirements of olive orchards-II: Determination of crop coefficients for irrigation scheduling. *Irrig. Sci.* 24, 77–84. <https://doi.org/10.1007/s00271-005-0012-x>
- Padilla-Díaz, C.M., Rodríguez-Domínguez, C.M., Hernández-Santana, V., Pérez-Martín, A., Fernández, J.E., 2016. Scheduling regulated deficit irrigation in a hedgerow olive orchard from leaf turgor pressure related measurements. *Agric. Water Manag.* 164, 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.08.002>
- Pavel, E.W., DeJong, T.M., 1993. Source- and Sink-limited Growth Periods of Developing Peach Fruits Indicated by Relative Growth Rate Analysis. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 118, 820–824.
- Poulsen, R.T., Ahmadi, S.H., Andersen, M.N., Sepaskhah, A.R., Plauborg, F., Jensen, C.R., Hansen, S., 2010. Effects of irrigation strategies and soils on field-grown potatoes: Gas exchange and xylem [ABA]. *Agric. Water Manag.* 97, 1486–1494. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.05.002>
- Rapoport, H.F.F., Pérez-López, D., Hammami, S.B.M.B.M., Agüera, J., Moriana, A., 2013. Fruit pit hardening: Physical measurement during olive fruit growth. *Ann. Appl. Biol.* 163, 200–208. <https://doi.org/10.1111/aab.12046>
- Redarex, 2019. Red de Asesoramiento al regante extremadura [WWW Document]. URL <http://redarexplus.gobex.es/RedarexPlus/> (accessed 1.1.09).
- Ruiz-Sanchez, M.C., Egea, J., Galego, R., Torrecillas, A., 1999. Floral biology of “Bulida” apricot trees subjected to postharvest drought stress. *Ann. Appl. Biol.* 135, 523–528. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1999.tb00883.x>

Ruiz-Sánchez, M.C., Torrecillas, A., Pérez-Pastor, A., Domingo, R., 2000. Regulated deficit irrigation in apricot trees. *Acta Hortic.* 537, 759–766. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2000.537.90>

Sadras, V.O., 2009. Does partial root-zone drying improve irrigation water productivity in the field? A meta-analysis. *Irrig. Sci.* <https://doi.org/10.1007/s00271-008-0141-0>

Sakuratani, T., 1984. Improvement of the Probe for Measuring Water Flow Rate in Intact Plants with the Stem Heat Balance Method. *J. Agric. Meteorol.* 40, 273–277. <https://doi.org/10.2480/agrmet.40.273>

Sakuratani, T., 1981. A Heat Balance Method for Measuring Water Flux in the Stem of Intact Plants. *J. Agric. Meteorol.* 37, 9–17. <https://doi.org/10.2480/agrmet.37.9>

Samperio, A., Moñino, M.J., Marsal, J., Prieto, M.H., Stöckle, C., 2014. Use of CropSyst as a tool to predict water use and crop coefficient in Japanese plum trees. *Agric. Water Manag.* <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.019>

Samperio, A., Prieto, M., Blanco-Cipollone, F., 2015. Effects of post-harvest deficit irrigation in 'Red Beaut' Japanese plum: tree water status, vegetative growth, fruit yield, quality and economic return. *Agric. Water.*

Samperio, Moñino, M.J., Vivas, A., Blanco-Cipollone, F., Martín, A., Prieto, M., 2015. Effect of deficit irrigation during stage II and post-harvest on tree water status, vegetative growth, yield and economic assessment in "Angeleno" Japanese plum. *Agric. Water Manag.* 158, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.04.008>

Segura, L.N., 2014. Efecto del riego deficitario sostenido sobre el color y las características químicas del zumo de granada.

Sepaskhah, A.R., Ahmadi, S.H., 2010. A review on partial root-zone drying irrigation. *Int. J. Plant Prod.* 4, 241–258.

Swanson, R.H., 2014. An instrument for detecting sap movement in woody plants /, An instrument for detecting sap movement in woody plants /. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.80872>

Taylor, H.M., Jordan, W.R., Sinclair, T.R., 1983. Limitations to efficient water use in production. Madison, WI: ASA.

Testi, L., Villalobos, F.J., 2009. New approach for measuring low sap velocities in trees. *Agric. For. Meteorol.* 149, 730–734. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.10.015>

Testi, L., Villalobos, F.J., Orgaz, F., Fereres, E., 2006. Water requirements of olive orchards: I simulation of daily evapotranspiration for scenario analysis. *Irrig. Sci.* 24, 69–76. <https://doi.org/10.1007/s00271-005-0011-y>

Torrecillas, A., Domingo, R., Galego, R., Ruiz-Sánchez, M.C., 2000. Apricot tree response to withholding irrigation at different phenological periods. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 85, 201–215. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(99\)00146-6](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(99)00146-6)

Turner, N.C., 1981. Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. *Plant Soil* 58, 339–366. <https://doi.org/10.1007/BF02180062>

Wahbi, S., Wakrim, R., Aganchich, B., Tahi, H., Serraj, R., 2005. Effects of partial rootzone drying (PRD) on adult olive tree (*Olea europaea*) in field conditions under and climate - I. Physiological and agronomic responses. *Agric. Ecosyst. Environ.* 106, 289–301. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.10.015>

Wareing, P.F., Patrick, J., 1975. Source-sink relations and partition of assimilates in the plant, in: *Photosynthesis and Productivity in Different Environments*. JP Cooper, pp. 481–99.

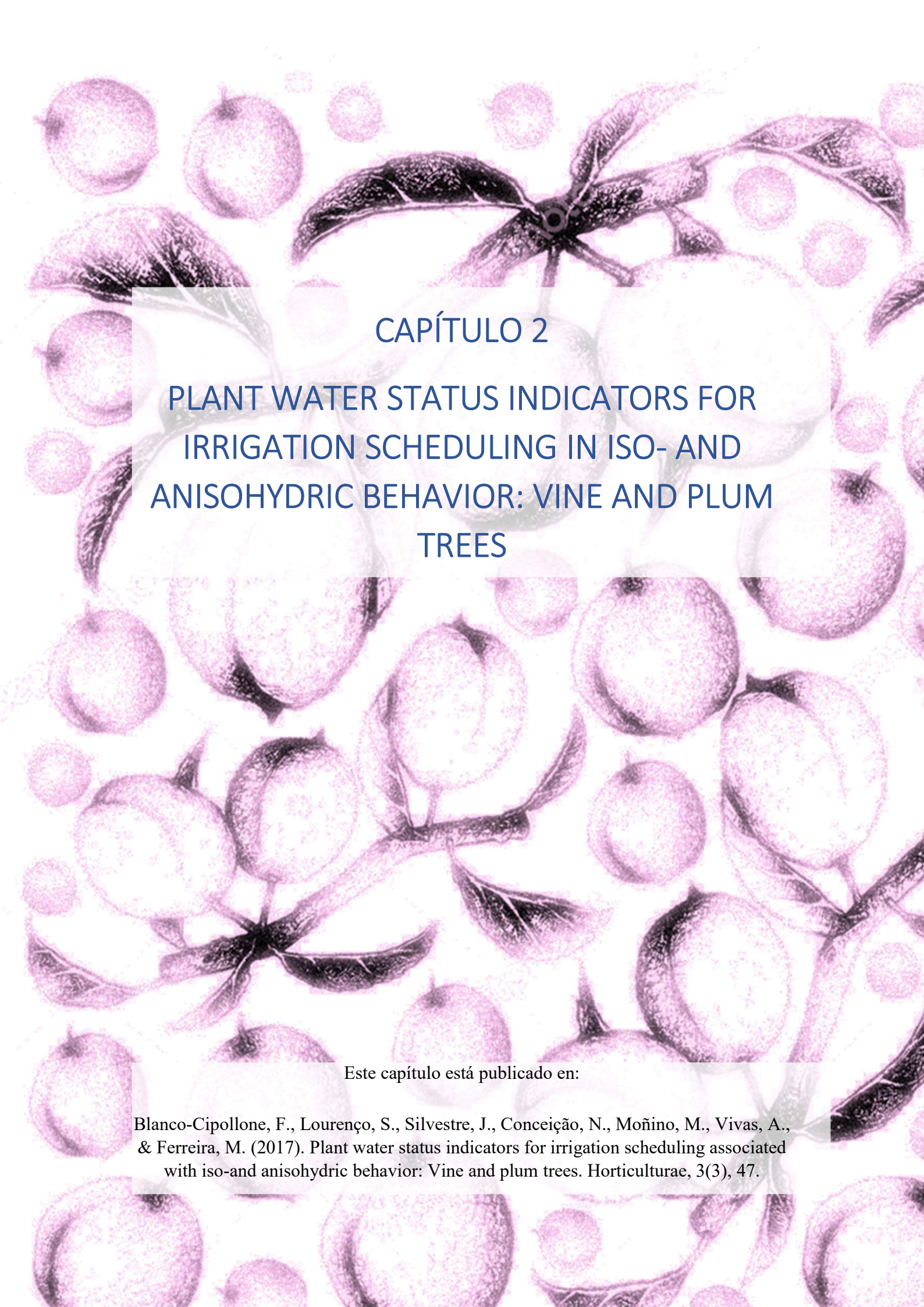
Yamaguchi, M., Haji, T., Miyake, M., Yaegaki, H., 2009. Varietal Differences in Cell Division and Enlargement Periods during Peach (*Prunus persica* Batsch) Fruit Development. *Engei Gakkai zasshi* 71, 155–163. <https://doi.org/10.2503/jjshs.71.155>

Zegbe, J.A., Behboudian, M.H., 2008. Plant water status, CO₂ assimilation, yield, and fruit quality of “Pacific Rose™” apple under partial rootzone drying. *Adv. Hortic. Sci.* 22, 27–32.

Zimmermann, D., Reuss, R., Westhoff, M., Geßner, P., Bauer, W., Bamberg, E., Bentrup, F.W., Zimmermann, U., 2008. A novel, non-invasive, online-monitoring, versatile and easy plant-based probe for measuring leaf water status. *J. Exp. Bot.* 59, 3157–3167. <https://doi.org/10.1093/jxb/ern171>

Zuazo, V., Pleguezuelo, C., Tarifa, D., Rural, I.T.-V., 2014, U., 2014. Estrategias de riego deficitario sostenido en el cultivo del mango. *Vida Rural* 381, 20–25.

Zuzunaga, M., Serrano, M., Martinez-Romero, D., Valero, D., Riquelme, F., 2001. Comparative Study of Two Plum (*Prunus salicina* Lindl.) Cultivars during Growth and Ripening. *Food Sci. Technol. Int.* 7, 123–130. <https://doi.org/10.1177/108201320100700204>



CAPÍTULO 2

PLANT WATER STATUS INDICATORS FOR IRRIGATION SCHEDULING IN ISO- AND ANISOHYDRIC BEHAVIOR: VINE AND PLUM TREES

Este capítulo está publicado en:

Blanco-Cipollone, F., Lourenço, S., Silvestre, J., Conceição, N., Moñino, M., Vivas, A., & Ferreira, M. (2017). Plant water status indicators for irrigation scheduling associated with iso-and anisohydric behavior: Vine and plum trees. *Horticulturae*, 3(3), 47.

2. CAPÍTULO 2: PLANT WATER STATUS INDICATORS FOR IRRIGATION SCHEDULING IN ISO- AND ANISOHYDRIC BEHAVIOR: VINE AND PLUM TREES

2.1. Abstract

There is an increasing use of plant water status indicators for scheduling irrigation. Different variables can be preferred depending on resources and preferences. Many studies suggest that the selection should take into account plants behavior in relation to isohydricity. In two Iberian studies, deficit irrigation (DI) was applied in grapevines and in a plum orchard, while following water stress indicators and fluxes. Literature and these case-studies, each one representing distinct behaviors, are discussed with special focus on the use of predawn leaf water potential (Ψ_{pd}) versus stem water potential (Ψ_{st}) to check if Ψ_{st} performs better and therefore is a preferred stress indicator in plants with anisohydric behavior, while in plants with isohydric behavior Ψ_{pd} is generally preferred. This hypothesis seems to be supported by results. The fact that, in this regard, cultivars and intensity of stress matter suggests that, if not specific literature information is available, previous daily courses prior to application are recommended for selecting the plant water status indicators.

KEYWORDS: water management; water stress; deficit irrigation; leaf potential; stem diameter; transpiration; orchards; drought tolerance, drought avoidance

2.2. Resumen

Cada vez se utilizan más indicadores del estado hídrico de las plantas para realizar programaciones de. Se pueden elegir diferentes variables en función de los recursos y las preferencias. Muchos estudios sugieren que la selección debe tener en cuenta el comportamiento de las plantas en relación con la isohidricidad. En dos estudios ibéricos, se aplicó el riego deficitario (DI) en viñedos y ciruelos, siguiendo indicadores y flujos de estrés hídrico. La literatura y el estudio de estos casos (cada uno de los cuales representa comportamientos distintos), discuten con especial énfasis el uso del potencial hídrico de hoja antes del amanecer (Ψ_{pd}) frente al potencial hídrico de tallo (Ψ_{st}), para comprobar si Ψ_{st} tiene un mejor comportamiento y, por lo tanto, es el mejor indicador de estrés en plantas con comportamiento anisohídrico, mientras que las plantas que tienen un comportamiento isohídrico, Ψ_{pd} es, por lo general el preferido. Esta hipótesis parece estar respaldada por los resultados. En este sentido, los cultivares y la intensidad del estrés sugieren que, si no se dispone de información bibliográfica específica, se recomiendan curvas de potencial para seleccionar los indicadores del estado hídrico de las plantas.

PALABRAS CLAVE: gestión del agua; estrés hídrico; riego deficitario; potencial de hoja; diámetro del tallo; transpiración; plantación; tolerancia a la sequía, prevención de sequías.

2.3. Introduction

Scheduling deficit irrigation (DI) in commercial fields traditionally requires knowledge of stress coefficient functions (K_s) in order to estimate soil water depletion (SWD) via the water balance, using estimated actual evapotranspiration (ET_a) as input. This enables users to anticipate the required irrigation depths (how much water to apply). The use of water stress indicators to schedule irrigation requires the selection of which variables should be used as well as their threshold values for different objectives concerning marketable yields (when to irrigate). Finally, the coordinated use of these approaches or steps can lead to a self-learning process, as proposed by Ferreira (Ferreira, 2017). The use of soil water content (Θ_s) can directly serve both purposes (when and how much), and is considered the ideal variable in low continuous crops though it presents several challenging difficulties when applied to woody crops. Application to woody crops is especially critical when plants present a significantly active part of their root systems in deep layers, as in agroecosystems found in regions with Mediterranean type climates. Under such conditions, plant water status has often been preferred.

The use of plant water status to schedule irrigation has been advocated since the 1980s by many researchers (Chalmers et al., 1981; Katerji and Hallaire, 2007) and has seen a continuous rise in its use (Bonany et al., 2009; Goldhamer and Fereres, 2004, 2001). A risk of using this approach in DI is that water status needs to be accurately maintained within a fairly narrow range as described by Jones (Jones and Hamlyn, 2004). Any excess application loses the benefit of the regulated deficit applied and any sub-application can lead to severe losses in yield or quality. Indeed, if water stress indicators, such as those based on plant water status, are used without estimating SWD, the exact amounts of water to be applied must be calculated from various tests that may result in an excessive or deficient amount of irrigation water, until the desired amount is found (trial and error (Bonany et al., 2009; Chalmers et al., 1981; Fernández, 2017; Ferreira, 2017; Goldhamer and Fereres, 2004; Jones and Hamlyn, 2004; Katerji and Hallaire, 2007)).

In both situations mentioned above, i.e., either estimating SWD or not, plant water status [see Fernández, (2017)] is often quantified by using leaf water potential (Ψ_l), generally at predawn (Ψ_{pd}), or stem water potential, measured generally around or shortly after solar noon (Ψ_{st}). A common alternative is the use of stem diameter variations (SDV) and derived indexes. These last indexes are calculated based on easy, affordable and automatable measurements made with linear variable displacement transducers (LVDT, e.g., (Conejero et al., 2011; Cuevas and Ferna, 2010; De Schepper et al., 2011; Ferrer et al., 2010; Marsal et al., 2002)).

The values of K_s have been related to either soil or plant water status. The variables generally used include (i) SWD (Allen et al., 1998; Stegman et al., 2013), usually expressed in total depth (mm) or (ii) plant water potential (Ψ_{pd} or Ψ_{st}) (Hinkley et al., 1980; Jarvis, 2006). Though numerous studies have used SDV, results relating K_s with SDV-derived indexes are unfortunately not frequent or have not been successful. Plant water status does not depend solely on atmospheric conditions and the availability of water in the soil, in general. Plants are able to modify the architecture of their canopies to acclimate to the environment (Hugalde and Vila, 2014) and have several strategies to deal with it including the avoidance of excessive losses by dehydration (Jones, 1990). In this sense, lowering stomatal conductance (g_s) is one of the most effective mechanisms (Chaves et al., 2010; Domec and Johnson, 2012; Lovisolo et al., 2010).

Plants that preferentially put into action effective mechanisms to regulate their water content have a behavior known as isohydric (Konings and Gentine, 2017; Stocker, 2012), whereas those in which the mechanisms referred to above are less effective or non-existent are called anisohydric. Several studies based mainly on forest species have considered two categories in which species can be classified (e.g., related to xylem type). In this paper, we prefer to use the word “behavior”, which can be ‘more’ or ‘less’ isohydric, or speak about levels of isohydricity. Indeed, many cases have been observed with cultivars displaying different behaviors, notably with grapevines (*Vitis vinifera* L.) (Chaves et al., 2010; Domec and Johnson, 2012; Hugalde and Vila, 2014; Jones, 1990; Konings and Gentine, 2017; Lovisolo et al., 2010; Schultz, 2003; Stocker, 2012), or even different behaviors for the same cultivar depending on environmental conditions (Domec et al., 2009; Lovisolo et al., 2002; Rogiers et al., 2011) or crop stage (Intrigliolo and Castel, 2006).

Physiological mechanisms associated with isohydricity have been analyzed, as well as their consequences for SDV and plant water potential or the role of stomatal closure. Simonneau et al., (1993), when studying SDV in different organs in relation to the water storage rate in 3- to 5-year-old peach (*Prunus persica*) trees, showed that SDV is closely related to total water stored in the shoots, without any important lag. In spite of changes in the volume of water stored (capacitance), which are more or less proportional to the changes in organ volume depending on tissue elasticity (Jarvis, 1975; Scholz et al., 2008), the changes in plant organ capacitance have been related to SDV, either in the trunk or in branches.

It might be expected that organs from plants with less effective stomatal closure would tend to exhibit anisohydric behavior and change their volume more expressively than plants under conditions of isohydric behavior. However, according to Meinzer et al., (2009), such an analysis requires consideration of the effect of using stored water (plant capacitance) in preventing decreases in Ψ_l .

Meinzer et al., (2014) found contrasting behaviors of *Juniperus monosperma* and *Passiflora edulis* which reflect differences in their capacity for homeostatic regulation of turgor that could represent aniso- and isohydric behavior. Furthermore, Meinzer et al., (2016) evaluated metrics of stomatal regulation of Ψ_l during soil drying in eight woody species and assessed whether easily determined leaf pressure—volume traits could serve as proxies for their degree of iso- vs. anisohydric behaviour. According to Garcia-Forner et al., (2016), and contrary to their expectations, both of these species (*J. monosperma* and *P. edulis*) exhibited similar stomatal temporal dynamics in response to drought, with little embolism in *J. monosperma* due to its conservative stomatal regulation. This contributed to refuting the concept that very low water potentials during drought are associated with loose stomatal control and with the hypothesis that anisohydric species are more prone to hydraulic failure than isohydric species.

In a review on the relationship between stomatal behaviour, water potential regulation and hydraulic transport, in relation to isohydric and anisohydric classification, Martínez-Vilalta and Garcia-Forner, (2017) also observed that a tight regulation of Ψ_l (isohydric) is not necessarily associated with greater stomatal control during drought. A continuous range of stomatal sensitivities to water stress in grapevines, closely linked with rootstock, was observed by Lavoie-Lamoureux et al., (2017). They found that isohydric and anisohydric behavior defined in terms of Ψ_l regulation cannot be used as an indicator of a specific mechanism of drought-induced mortality or as a proxy for overall plant vulnerability to drought.

In spite of the controversy on the importance of stomatal control in this regard, or even the controversy as to which type of behavior corresponds to less drought vulnerability, the analysis by McDowell et al., (2008) supports a connection between isohydric behaviour and tighter stomatal control. In addition, their analysis reinforces the hypothesis that the so-called “isohydric species are more likely to die of carbon starvation than hydraulic failure, and that partitioning of mortality between isohydric and anisohydric plants is a function of drought intensity and duration” (McDowell et al., 2008).

Martínez-Vilalta et al., (2014) showed that the response of the plant's water potential gradient to declining Θ_s (meaning here soil water availability) is not determined directly by stomatal sensitivity to drought but by the ratio between this sensitivity and the vulnerability of the plant hydraulic system. In their view and words, a plant with highly sensitive stomata closing at relatively high water potentials (less negative) could still show a strict anisohydric behavior, provided its hydraulic system is even more sensitive than its stomata to declining water availability. The same authors also provided a quantitative framework for interpretation of the coordination between stomatal regulation and plant hydraulics in terms of an analysis of isohydricity. Phillips et al., (2015) described a continuum of isohydric to anisohydric regulation of leaf water potential and Klein, (2014) also argued that species-specific curves form a continuum, rather than a dichotomy, between isohydric and anisohydric behavior, and suggested the use of water potential at 50% of the maximum g_s (Ψ_{gs50}) for a quantitative comparison between species.

In the context of irrigation science, given the sometimes limited information directly available on such vulnerabilities and given the restricted aim of identifying critical variables and their thresholds, we hypothesized that the daily or seasonal courses of Ψ_{pd} or Ψ_{st} in plants under different conditions, together with the relative degree of stomatal closure, can give hints about the behavior of the species or cultivar under given circumstances. When g_s is not measured, the transpiration rate (Tr) may often be available, due to possible automated monitoring. Reductions in Tr could then be used as proxies of g_s reductions, even if they are not strictly proportional, due to possible differences in the driving forces. In this context, the daily or seasonal course of Ψ_{pd} or Ψ_{st} in plants submitted to stress compared to well-watered controls is often a good indication of whether plant behavior is isohydric or anisohydric. This article has the following aims: (1) to identify these two behaviors (isohydric and anisohydric), providing examples that explore relationships between the selected variables and K_s (or relative transpiration, RTr) using two case studies; (2) to use the discussion to verify whether the frequent choice made by researchers of plant stress indicators to express water status is related to the isohydric or anisohydric behavior of plants; and (3) to check whether the usual choice of SDV-derived indexes is related with isohydricity.

We hypothesized that, from this analysis, the arguments for possible orientation in the selection of water stress indicators will be reinforced. The examples shown also serve to explain the criteria used in this study to distinguish between the two behaviors.

2.4. Material and Methods

2.4.1. Experimental sites, Meteorological conditions and crop characteristics.

2.4.1.1. Experiment 1

Experiment 1 was conducted in a commercial drip-irrigated vineyard, planted with the grape (*Vitis vinifera* L.) ‘Tempranillo’, grafted on 1103P rootstock, with an area of 6.0 ha (“Herdade de Monte Novo e Figueirinha”), at 38.04972 N, 7.9208W, 200 m above sea level (a. s. l.), located in the Alentejo region near the city of Beja, the warmest and driest region of Portugal (annual 30-year average for precipitation is 572 mm, 5% of which falls during summer; the climate is temperate of Mediterranean type Csa (<http://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/1971-2000/002/>). The grapevines were planted in 2002 (2350 vines ha⁻¹, row orientation ~N-S). The training system was vertical shoot positioning. The vines were spur pruned on a bilateral Royat cordon with 16 buds per vine. There was tillage between the rows and no tillage beneath the canopy. The soil type was a shallow clay vertisol with abundant gravel and few stones. Available water capacity in the soil was low. The soil depth was about 0.6 m, but only a very few fine roots could have explored rock fissures down to a depth of 1.5 m. The leaf area index (LAI) measured at veraison was 2.15, and ground cover was 42%. The meteorological conditions for the location and years of Experiment 1 are summarized in Table 2.1.

Table 2.1. Meteorological conditions for the studied years in Experiment 1 and 2; data represent the year averages.

	Year	P (mm)	T_{average} (°C)	HR_{max} (%)	HR_{min} (%)	ET_o (mm)
Experiment 1	2009	418.0	17.66	93.33	40.53	1311.50
Beja (Portugal)	2010	734.6	17.08	94.01	45.44	1222.99
Experiment 2 Vegas Bajas (Spain)	2010	738.7	16.31	88.04	40.56	1317.70
	2011	506.7	16.33	95.74	42.72	1230.79
	2012	328.0	16.45	93.03	38.56	1310.50
	2013	546.0	16.35	99.25	42.96	1236.98

2.4.1.2. Experiment 2

(Cicytex), in the “Vegas Bajas” area (Badajoz, Spain) at 38.8507 N, 6.6709 W, 184 m a.s.l. The soil type is an alfisol characterized as a young soil with low organic matter and a texture of 19.4% clay, 40.2% silt and 40.4% sand. The climate is temperate of Mediterranean type with Atlantic influence (Csa); annual evapotranspirative demand is 1295 mm, with 428 mm annual rainfall. The plant material was *Prunus salicina* ‘Angelino’, a late season plum variety grafted on Marianna pattern 2624 rootstock. The orchard was established during 2005, and the tree formation system is in open-beaker with four branches per tree. The arrangement of the trees was in rows in a 6 x 4 m plantation frame, east-west oriented. The meteorological conditions for the location and years of Experiment 2 are summarized in Table 2.1.

These two Experiments (1 grapevine, 2 plum orchard) were selected for their respective representation of isohydric and anisohydric behavior.

2.4.2. Measurements and Irrigation Treatments

2.4.2.1. Experiment 1

Irrigation treatments. The experimental work reported took place during 2009 and 2010. Irrigation started when vegetative growth stopped and was usually applied once a week, on average. DI treatments were imposed after day of the year (DOY) 175 (approximately two weeks before veraison) until harvest (DOY 238).

During 2009, three DI treatments with three completely randomized repetitions each were applied in the long term. Threshold values of Ψ_{pd} defined for the vineyard (Chone et al., 2001; Riou and Payan, 2001) were used to control stress levels corresponding to irrigation depths applied of approximately 70%, 40% and 25% of estimated crop evapotranspiration (ET_c). The aim was for the treatments to correspond in the long term roughly to weak ($\Psi_{pd} > -0.4$ MPa), mild (-0.4 MPa $< \Psi_{pd} < -0.6$ MPa) and severe water stress ($\Psi_{pd} < -0.6$ MPa).

In the following year (August 2010), a short water stress cycle (eight days) was conducted for a more detailed characterization of Ψ_l and stomatal conductance behavior between irrigation events. A control (without water stress (CT), mild water stress (MS) and moderate water stress (HS) treatments were imposed under field conditions, as follows. Before the beginning of the drought stress (8th August), an irrigation event of 22 mm was applied to CT and MS and of 14 mm to HS. During the water stress period, two irrigation events of 13 mm each were applied to CT (11th and 13th August). Measurements of Ψ_{pd} were taken at predawn, and of Ψ_{st} and g_s in the middle of the morning (10 h), 15 min after solar noon (14 h) and at mid-afternoon (18 h).

Measurements. For the long-term experiment of 2009, meteorological data from a nearby station (<http://www.cotr.pt/ema.asp?id=1007>, 38. 0375 N, 7.8850W, ca. 206 m a.s.l.) were used to calculate ETo with the Penman-Monteith equation, using reference crop parameters (grass with a height of 0.12 m, surface resistance of 70 s m⁻¹ and albedo of 0.23 (Allen et al., 1998). ETc was initially established with the crop coefficient as a function of leaf area index (LAI).

All measurements of Ψ_{pd} and Ψ_{st} were performed the day immediately before irrigation with a pressure chamber (Scholander type, PMS Instrument Company, Albany, OR, USA, Model 600) with each leaf for Ψ_{st} wrapped in an aluminum bag two hours prior to measurements. The leaves were removed from the vines and measured in a pressure chamber with the precautions described by Shackel et al., (1997). Stomatal conductance was measured with a LI-1600 steady state porometer (LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA). At least three measurements were performed per replicate (9 per irrigation treatment). Due to the soil nature (gravel), Θ_s was not measurable.

2.4.2.2. Experiment 2

Irrigation treatments. For the first part of the experiment, in 2010, two irrigation treatments were established: a Control treatment (C) which was irrigated with 100% of estimated ETc and a Deficit Irrigation (DI) treatment irrigated as C, except from the 7th of June to the 26th of July (48 days) during which there was no irrigation at all (functioning as a stress cycle). The experimental design was four random blocks per treatment, four trees per block. During three consecutive years (2014, 2015, 2016), the same irrigation treatments were maintained. The periods in which irrigation was removed in the stressed (DI) treatment were from 12th May to 11th June in 2014 (30 days), 13th May to 15th June in 2015 (32 days) and 13th May to 22nd June in 2016 (40 days).

Measurements. In 2010, ETc was estimated as the product of ETo obtained with the Penman-Monteith equation and a single Kc according to the values proposed in Allen et al. (Allen et al., 1998). In 2014, 2015 and 2016, a soil water balance was used to determine ETc (for C or equivalent). It (ETc WB) was calculated using the law of mass conservation (water balance) as:

$$ETc\ WB = P + I - D - R - DS \quad (1)$$

$$DS = S (\Theta_i - \Theta_{i-1}) z \quad (2)$$

where P is effective rainfall, I is irrigation, D is drainage, R is runoff, DS is the change in soil water storage between two consecutive dates, and z is the depth of each layer. The values of R were considered negligible because the orchard was levelled and no runoff was observed. D was considered null at the maximum observed depth (1.8 m). The values of Θ_s were obtained from neutron probe measurements (CPN 503DR Hydroprobe, CPN International, Inc., Port Chicago Highway, CA, USA), carried out once a week, early in the morning, throughout the irrigation season in the root zone of representative trees of each cultivar. Four access tubes were installed on both sides of a tree at 0.5 m and 1.5 m in a line and, perpendicularly, at 0.5 m and 1.5 m from that line, respectively. Each tube was 3 m long, and measurements were made at intervals of 30 cm, from 30 to 270 cm. The neutron probe readings were calibrated in loco.

In 2010, four times during the season, Ψ_{st} was measured from predawn to sunset at different hours. The measurements were taken for eight trees per treatment corresponding to four trees per block, in two blocks. Two leaves per tree were selected from a branch located in the lower part near the trunk and facing north. The same technique was used as in Experiment 1 except that the aluminum bags were placed in the first hour of the morning and the leaves of the first measurement were bagged in the last hour of the previous day.

On the same trees, during 2014, 2015 and 2016 throughout the periods of the water stress cycles, water supply measurements were recorded for both treatments, confirming that the DI treatment did not receive any irrigation water during the stress cycles. The measures of Ψ_{st} were also taken at solar noon, using two leaves per tree, two trees per block and per treatment, which resulted in a total of 16 measures per treatment.

On two trees of each treatment, canopy transpiration was measured with a sap-flow system device which was developed and assembled at the IAS in Cordoba and described in Testi and Villalobos, (2009). The system uses the compensation heat-pulse method plus the calibrated average gradient technique. Sap velocity was measured following the procedure of Green and Clothier, (1988), using the theoretical calibrations of Swanson and Whitfield, (1981), to account for the probe-induced effects of wounding. The temperature signals and the corresponding heat pulse velocities were recorded at 15 min intervals using heat-pulse instrumentation connected to a data logger (CR1000, with a multiplexer AM16/32, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA).

The value of R_{Tr} (similar to K_s) is expressed as the ratio of transpiration of treatment DI to transpiration of treatment C (see irrigation treatments). The value observed in the control treatment the day before the stress cycle started was taken as the baseline reference (for normalization).

2.4.3. Data Analysis and Statistics

The statistical techniques employed to analyze these data were mainly linear regression and summary statistics. One-way ANOVA was also used (Experiment 1), and significant differences among treatments were evaluated with the Student-Newman-Keuls test with $p = 0.05$ using the CoStat Statistics Software (CoHort Software, Monterey, CA, USA). This type of analysis is considered not applicable when the aim is only to locate the moment for which the treatments have the largest absolute differences for the variable under analysis (as for data shown from Experiment 2), not to establish when differences between treatments appear

2.5. Results

2.5.1. Experiment 1

Over the experimental period, the different irrigation treatments applied during 2009 to the Beja vineyard could be clearly discriminated by using Ψ_{pd} (Figure 2.1a); statistically significant differences at $p = 0.01$ and $p = 0.0001$ were observed respectively after DOY 203 and 217. Conversely, statistically significant differences at $p = 0.01$ and $p = 0.0001$ were observed using Ψ_{st} only after DOY 226 and DOY 230 (Figure 2.1b). These results suggest isohydric behavior.

The relationships between Ψ_{pd} and g_s (Figure 2.1c) and between Ψ_{st} and g_s (Figure 2.1d) also reveal a larger relative variation in the values observed at predawn compared to those observed at noon. A single line can be considered for Ψ_{pd} , though with high scattering for upper values of Ψ_{pd} which can be explained by the strong influence of atmospheric conditions on g_s , when atmospheric stress (atmosphere causing plant stress) dominates edaphic-based stress (Ferreira and Katerji, 1992). As for Ψ_{st} , there is a larger scattering of g_s for average values, suggesting that initially atmospheric conditions affect both variables

(Ψ_{st} and g_s) but, when edaphic-based stress dominates, Ψ_{st} no longer expresses the proportion of the stomatal closure occurring (discrete distance between treatments, Figure 1d). If the degree of isohydricity can also be defined through the slope of the curve Ψ_l versus g_s (Patakas et al., 2005), the high slope in Figure 1d (with Ψ_{st}) supports our interpretation.

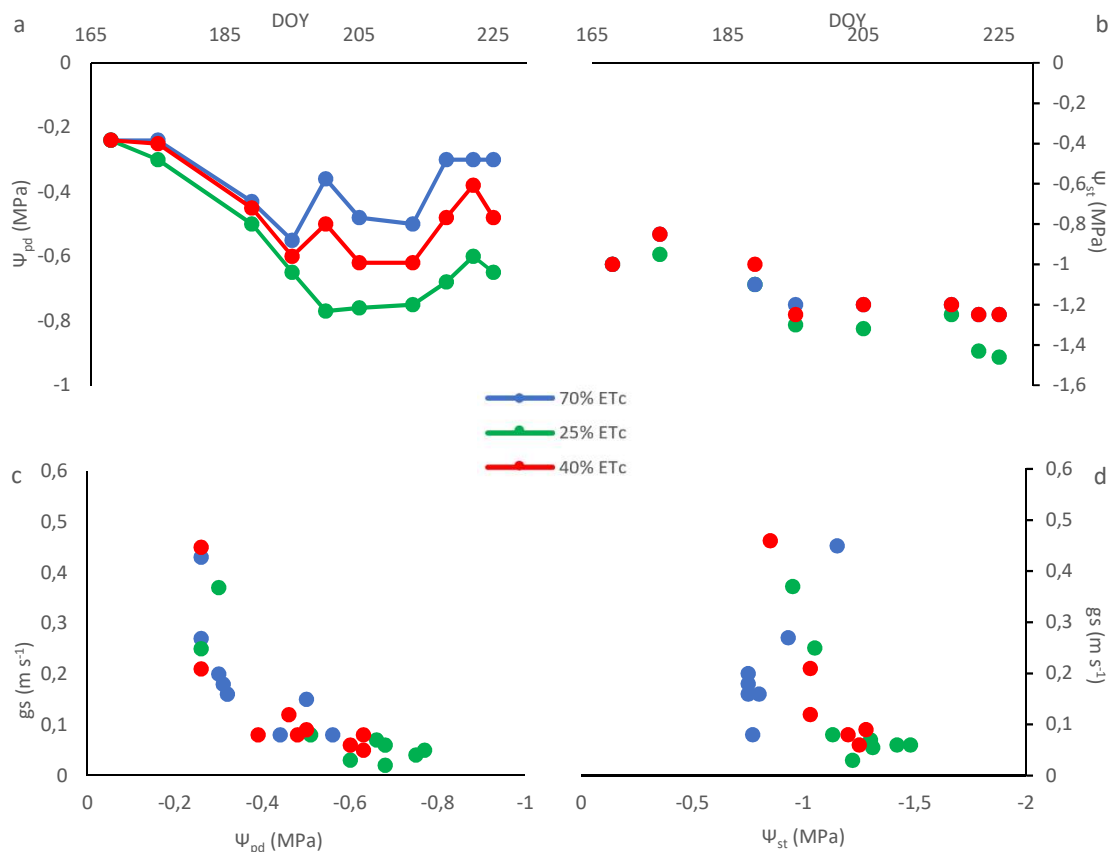


Figure 2.1. Seasonal course (2009) of (a) Ψ_{pd} and (b) Ψ_{st} , with the relationships between those variables and noon stomatal conductance (g_s); respectively (c,d), for the three treatments developing approximately to a weak, mild and severe water stress (see text for corresponding Ψ_{pd} ranges). The standard deviations of means are approximately within symbol width. Vineyard (Beja, Portugal).

During the short stress cycle that was imposed in 2010, the range of measured Ψ_{pd} (figure 2.2a) was in agreement with values found in the literature either in the absence of water stress or with mild and severe water stress. Moreover, Ψ_{pd} was very sensitive to any irrigation applied. A strong decrease in Ψ_{pd} occurred on 10th August, possibly due to unusually hot and dry conditions during the night (min air temperature = 24.1 °C, min VPD = 1.35 kPa), which may have contributed to nocturnal transpiration.

The evolution of Ψ_{st} immediately before and during the drought stress cycle measured at 10 h, 14 h and 18 h (clock or legal time = solar time + ≈ 1.75 h, during summer) is presented in Figure 2.2b–d, respectively. Although Ψ_{st} at noon is often considered a good indicator of grapevine water status (Chone et al., 2001; Olivo et al., 2009; Patakas et al., 2005), this experiment suggested that this is not the case for this cultivar and under the conditions of this study, possibly due to isohydric behavior, since (again) Ψ_{st} could not discriminate between the treatments that were shown to differ by Ψ_{pd} . A similar result was found by Intrigliolo and Castel, (2007) for the same grapevine cultivar.

The evolution of Ψ_{st} during the day and its recovery during the afternoon were faster in CT, as expected. The range of Ψ_{st} observed is in strong disagreement with the thresholds indicated by Myburgh, (2011) for absence and mild water stress intensities. This can be partly attributed to the VPD influence on Ψ_{st} (Olivo et al., 2009; Williams and Baeza, 2007). In this case, the average VPD at solar noon during the drought cycle was approximately 4.95 kPa. Moreover the high Ψ_{st} values observed during 8th August can be attributed not only to a lower VPD (3.10 kPa) but also to the heavy cloud cover observed (with $ET_o = 4.1$ mm, whereas the average ET_o during the drought cycle was 6.8 mm

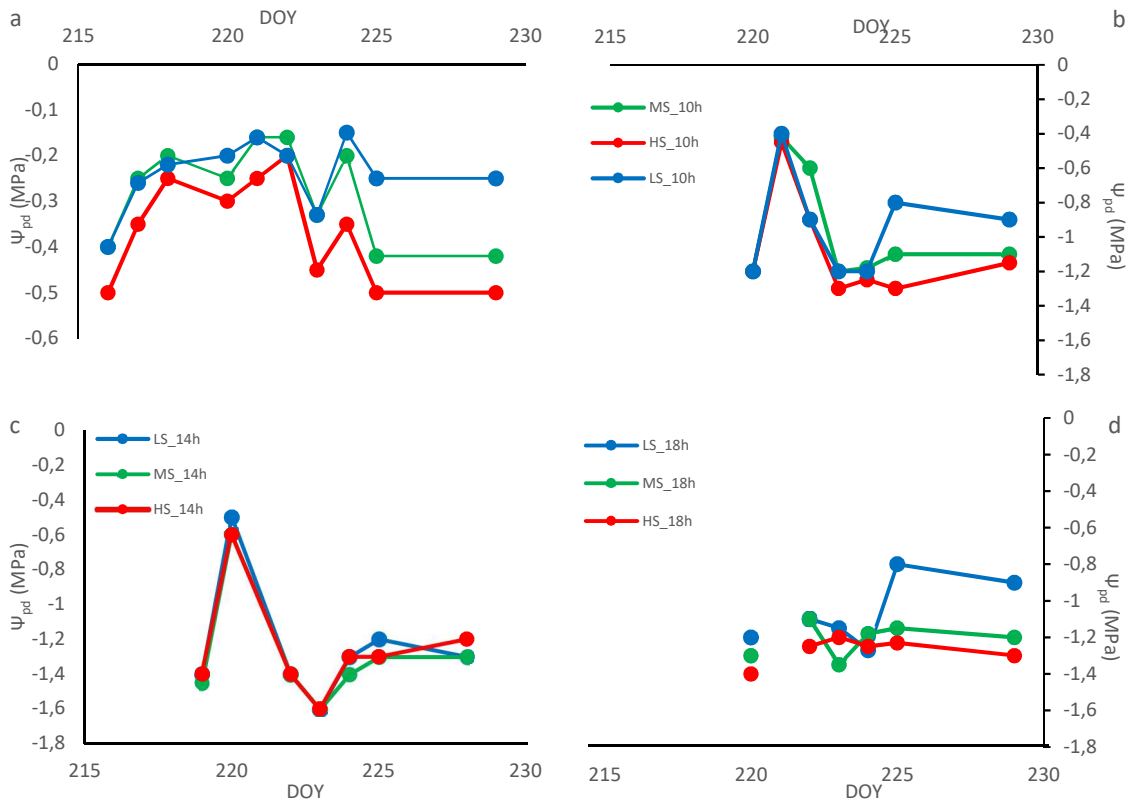


Figure 2.2. Observed Ψ_{pd} (a) and Ψ_{st} of grapevines at 10:00 a.m. (b); 2:00 p.m. (c) and 6:00 p.m. (d) (solar noon at ~ 1:45 p.m.) for the treatments described (Low Stress, Medium Stress and High Stress, see text) immediately before and during the 2010 stress cycle (8th to 16th August 2010). Irrigation events during the stress cycle: see text. The standard deviations of means are within symbol width. Vineyard (Beja, Portuga).

Transpiration rates and Kc values as well as the relationship between RTr and Ypd (Ks function) were already presented and discussed in comparison with three other vineyards, mostly rainfed (Ferreira et al., 2012b; Ferreira, 2017), where the vineyard described here was the one suffering more stress in spite of being irrigated, with the Ks function ($K_s = 1.0011 \exp -1.829 \Psi_{pd}$, $r_2 = 0.73$) distinct from other functions obtained for the rainfed situations (lower Ks for the same Ψ_{pd}). In parallel with this Ks function for grapevines, a Ks function from Ψ_{st} for the plum orchard of Experiment 2 will be presented below.

2.5.2. Experiment 2

In the plum orchard at Badajoz, Spain, the minimum Ψ_{st} attained was -1.2 MPa for the DI treatment (Figure 2.3). Although both treatments showed the same trend in Ψ_{st} , the differences between both, around -0.2 MPa in the morning, almost doubled at noon. Other authors studying similar situations of water deficit (Girona et al., 1993; Rodríguez et al., 2012) observed that the hours for which the differences in Ψ_{st} were more varied from day to day depended on the weather, but were usually observed roughly 1–2 h after solar noon. This greater difference does not necessarily correspond to the minimum values. In this case, we distinguished $\Psi_{st,noon}$ from Ψ_{st} because some Ψ_{st} measurements were performed during the day.

Consequently, for this cultivar, Ψ_{pd} did not seem to be as useful as Ψ_{st} as an indicator of water status. We consider that this example illustrates anisohydric behavior, due to the fact that differences in Ψ_{st} at noon were much higher than at pre-dawn, the main criteria we considered.

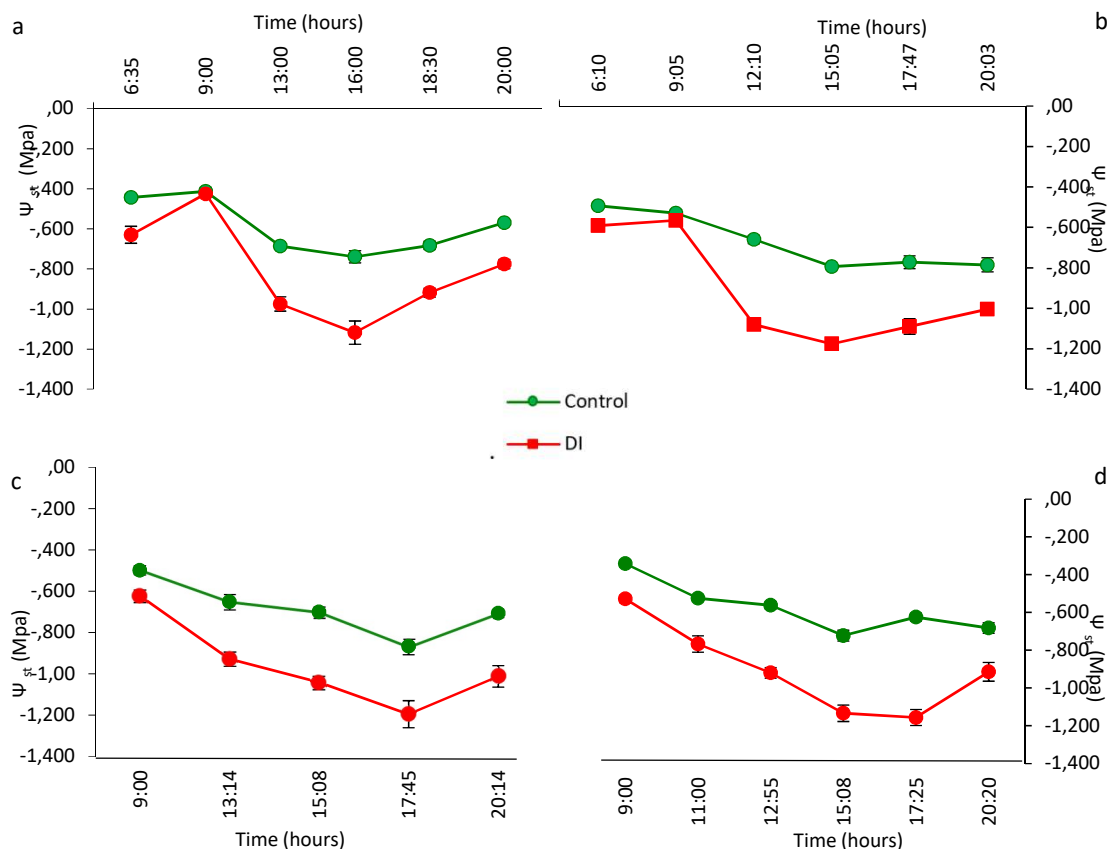


Figure 2.3. Plum stem water potential along the day in the control (green) and stressed plots (red) for four dates: (a) 1 July; (b) 8 July; (c) 14 July; (d) 22 July. Each point represents the average of 8 trees; the vertical bars represent the standard error of each mean. Hours are legal time (solar time \sim legal time - 2.7 h). Plum orchard (Badajoz, Spain).

A strong relationship between $\Psi_{st,noon}$ and RTr was observed (Figure 2.4). The relationship between RTr and $\Psi_{st,noon}$ measured in the three years of the study developed between a maximum RTr (=1) until a threshold of -1.0 MPa was attained and, as $\Psi_{st,noon}$ decreased to -2.5 MPa, RTr decreased to 20% ($RTr = 2.3767 \exp -0.874 \Psi_{st}$, $r^2 = 0.87$). If a linear relation was applied, $\Psi_{st,noon}$ would decrease from -1.1 MPa ($K_s = 1$) to around -2.7 MPa ($K_s=0$).

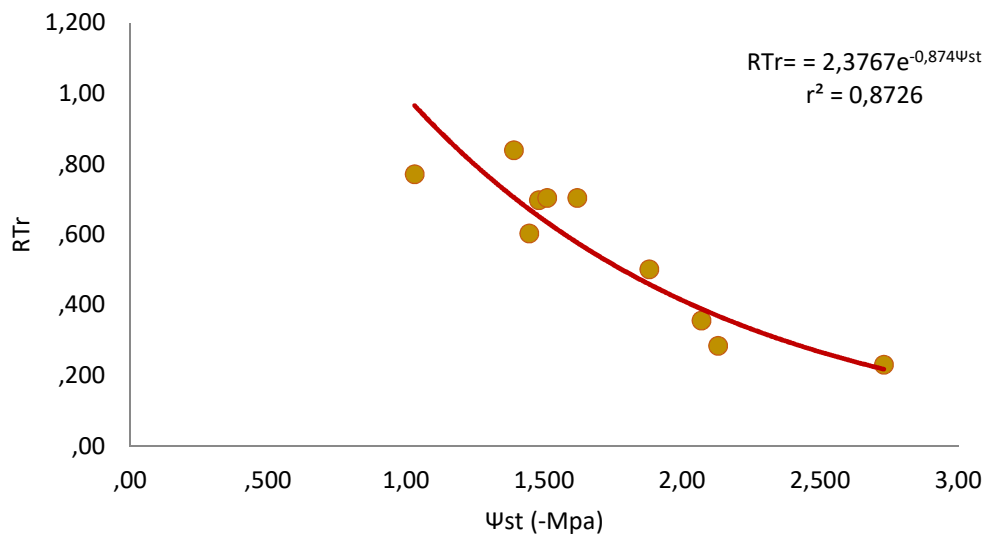


Figure 2.4. Relationship between Ψ_{st} measured after solar noon and daily relative transpiration (RTr) of plum. Each point is the average of two trees only for the days when Ψ_{st} was measured during the last period of each stress cycle (2014–2016).

2.6. Discussion

The results shown, with grapevines and plum trees, illustrated two distinct behaviors. They described the behavior of these cultivars under the environmental conditions and stress levels they experienced. In addition, the examples served to explain the criteria used in this study to distinguish between these two behaviors, isohydric versus anisohydric, which we relate to the level of isohydricity.

In order to have a general perspective of the choices made by researchers about plant stress indicators used to express water status, and their relationship with identified iso/anisohydric behavior of plants, representative studies performed with a perspective relevant for our aims, of perennial, woody agricultural crops, mostly under Mediterranean climate conditions are shown in Table 2.2. We focused mainly on the variables which are predominantly used in both behaviours, Ψ_{pd} , $\Psi_{l,noon}$, and $\Psi_{st,noon}$. Complementary information is provided on SDV-derived variables (measured with LVDT sensors), such as the maximum daily shrinkage (MDS) or its relative value—the relative daily trunk shrinkage (RDTS), the minimum trunk diameter (MNTD), the maximum trunk diameter (MXTD), the trunk or, more generally, organ growth rate (TGR or OGR)—which is the difference between two consecutive MXTD. These are the most common SDV-derived variables, though some variations or combinations thereof have also been used. Other variables considered in these studies are mentioned. Their comparison encourages a general description, identification of general trends and inspires specific comments.

Table 2.2. Plant indicators used and relationship with isohydricity observed following criteria described. * Apparent behavior from the results presented by authors; (1) A relationship of Ypd or Yst difference versus relative gs or RTr was used; (2) NC = Not clear; plant does not have a clear behavior but more anisohydric, or G = good, R = regular, B = bad; (3) LT = leaf temperature; (4) Best is daily variations in θ_s ; (5) SDV regular (RDTs required); (6) In agreement with suggestion (Marsal et al., 2002a) of combining both indexes; (7) Tends to anisohydric, towards the end of stress cycle; (8) Implicitly.

Specimen	Behaviour			Plant water potential		SDV derived indexes			RTr	Other s	Reference
	Isoph.	Anisoh.	Doubts ¹	Ψ_p	Ψ_{st}	MDS or RDTs	TGR	Other			
<i>Prunus persica</i> 'Fire-Red'		ncl ₂		reg	goo	goo	goo				(Sellés and Berger, 2015)
<i>Prunus persica</i> 'French'			ncl	ba	goo				gs ¹		(Mccutchan et al., 1992)
<i>Prunus persica</i> 'Cal Red'	*			goo	ba					gs, LT ³	(Girona et al., 1993)
<i>Prunus persica</i> 'H30'	*			goo		RDTs				Tr, gs relat, θ_s	(Ferreira et al., 1996)
<i>Actinidia deliciosa</i> 'Deliciosa'	*			goo						gs, A, Tr	(Gucci et al., 1996)
<i>Prunus persica</i> 'O'Henry'			*	goo	goo	reg		MXTD MNTD		θ_s ⁴	(Goldhamer et al., 1999)
<i>Vitis vinifera</i> 'Trincadeira'	*			goo	ba					Tr, gs,	(Silvestre and Ferreira, 2000)
<i>Prunus persica</i> 'Andros'		*		goo	goo	goo	goo				(Marsal et al., 2002a)
<i>Malus domestica</i> 'Golden delicious'	*			ba	goo	goo			goo	gs relat	(Naor and Cohen, 2003)
<i>Vitis vinifera</i> 'Aragonez'	*			goo	ba					gs	(Malheiro et al., 2011)
<i>Prunus salicina</i> 'Black Gold'			ncl		goo	(5)					(Intrigliolo and Castel, 2005)
<i>Diospyros kaki</i> 'Rojo Brillante'		*	ncl	reg	reg					gs	(Ferrer et al., 2010)
<i>Punica granatum</i> 'Mollar de Elche'	*			goo	reg	ba					(Intrigliolo et al., 2011)
<i>Prunus persica</i> 'Flordastar'			ncl	ba	goo						(W Conejero et al., 2011)
<i>Actinidia deliciosa</i> 'Hayward'		*		ba	goo	reg		MDS (1-OGR) ⁶		gs, θ_s	(Silva and Ferreira, 2014)
<i>Olea europea</i> 'Arbequina'	*			goo		ba ⁸	ba ⁸	D _{MXTD} /MXTD		Tr, θ_s	(Ferreira et al., 2012a)
<i>Punica granatum</i> 'Mollar de Elche'	* ⁷			goo	ba					gs	(Rodríguez et al., 2012)
<i>Prunus persica</i> 'Silver King'	*			goo						Tr	(Paço et al., 2013)

In general, it is claimed that the variables (indicators) most closely related with important biological processes should be selected as they are better indicators in relation to growth processes (e.g., (Marsal et al., 2002a)). Ψ_{st} in this respect is often recommended. MDS was shown to depend on seasonal changes in trunk growth and both MDS and Ψ_{st} were valued by Marsal et al., (2002a) for accounting for day-to-day variations in diurnal atmospheric demand, expressed in general by E_{To} .

2.6.1. Plant Water Status Indicators Versus Water Stress

An increase in E_{To} , which can possibly cause atmospheric stress, can hardly be solved by irrigation except when there is an important percentage of wet soil surface (e.g., by mini sprinklers), and in stands with low aerodynamic conductance (Ferreira and Katerji, 1992). If Ψ_{st} decreases due to changes in E_{To} , wetting the soil in a drip-irrigated orchard would apparently have a negligible effect on decreasing VPD anyway (and increasing g_s and carbon exchanges).

Irrigation aims first at decreasing or preventing edaphic-based stress. Consequently, the value of any variable considered for scheduling irrigation that is heavily influenced by diurnal atmospheric stress can be controversial in its effectiveness for irrigation scheduling decisions.

Several researchers (e.g., (W Conejero et al., 2011)) have compared the earliness of water stress detection by different indicators versus soil water content (Θ_s) but have sometimes not related it to the readily available water (RAW) concept. This possibly leads to misinterpreting apparent late reactions of several indicators versus Θ_s (since no water stress is expected while the soil water is within the RAW limits).

Like peach trees, kiwi (*Actinidia deliciosa*), grapevines, and olive (*Olea europea*) trees also displayed different behaviors (isohydricity) depending on the particular cultivar in question. However, the simple criteria used here for irrigation scheduling would seem inadequate for the complex interpretation required when dealing with olive tree cultivars. According to Ennajeh et al. (Ennajeh et al., 2008), even if transpiration can also be significantly reduced under stress due to stomatal closure, Ψ_l can be extremely low in relation to most other tree species as a result of the ability of olive trees to transfer water from tissues to the xylem sap.

2.6.2. Use of Water Stress Indicators

A study with peach (Goldhamer et al., 1999) with an intermediate behavior showed important variations in TGR and MDS, Ψ_{st} , Ψ_l and Ψ_{pd} . The authors did not report any stomatal conductance measurements. The way in which these authors and others that followed valued the different indicators was based on relative values. Relative values were relevant in some cases and will be used in this discussion only for flux, conductance and SDV derived variables, but not for potentials. However, there is a limitation in that they require a well-watered control used as

reference. For instance, due to the observed effects of environmental atmospheric conditions on MDS, Ferreira et al. (Ferreira et al., 1996) did not use MDS directly but RDTS to evaluate water stress in peach.

Some studies (Bonany et al., 2009; Fereres and Goldhamer, 2003; Intrigliolo and Castel, 2005) have demonstrated that atmospheric conditions have significant effects on Ψ_{st} and/or especially MDS, with relationships that change with the carbon status of the plant, dependent for instance on the pre- or postharvest condition. Intrigliolo and Castel, (2005) also concluded that MDS should be considered only in relative terms (as RDTS).

A review of a large collection of Spanish studies on the use of SDV, Ψ_{st} and Ψ_l for irrigation scheduling related to different environmental variables (Cuevas and Ferna, 2010) also implicitly supported this perspective, even suggesting that MDS (or RDTS, later called in that study the MDS signal intensity) should be combined with other water stress indicators. Intrigliolo et al., (2011) showed that the MDS difference between treatments, with pomegranate, increased with stress and then tended to stabilize or even decrease. This was also observed by other research (Fernández et al., 2013; Ferreira et al., 1996) The values of $\Psi_{st,noon}$ were closely related to other indicators of plant stress (Jorba et al., 2015; Lankes, 1985; Rieger, 1992; Tan and Buttery, 1982). In some cases, this indicator has been related to the reduction in transpiration (R_{Tr} or K_s), as in Figure 2.4. Anisohydric mechanisms apparently caused greater Tr rates at noon, which was reflected in the fact that the most commonly used indicators of stress were expected to be involved with changes in plant tissue volume. The SDV-derived indicators were widely described in the literature as being the most suitable for determination of the water status of plant with anisohydric behavior and therefore for irrigation scheduling (Cuevas and Ferna, 2010; Doltra et al., 2007; Velez et al., 2007). These indexes seem to be among the most popular plant water stress indicators, with the advantage of providing a continuous data-set over time (Goldhamer and Fereres, 2001; Huguet et al., 2007). This applies especially to young trees where OGR is one of the earliest responses to plant water stress (Nortes et al., 2005). The literature suggests that in plants with anisohydric behavior, MNTD and MDS are the most commonly used indexes, although a combination of trunk and tree organ measurements is also effective (Silva and Ferreira, 2014). However, MXTD seems inadequate for this purpose (Goldhamer et al., 1999; Li et al., 1989). By contrast, tests performed on isohydric species showed a lack of use of this type of indicator. Intrigliolo et al., (2011) showed how the use of TGR was unsuitable as a measure to determine plant water status in pomegranate (Intrigliolo and Castel, 2005). The same conclusion was reached for peach (Remorini and Massai, 2003).

In summary, water potential measurements have been widely used in many studies. The high levels of measurement repeatability and reliability have made them popular for irrigation scheduling, although some authors (Goldhamer et al., 1999; Marsal et al., 2002a) have pointed out that in anisohydric species these indicators are not as reliable as SDV-derived indexes, especially Ψ_{pd} , where no differences were found between species under deficit irrigation treatment. Conversely, Ψ_{pd} is the most commonly used and most highly valued variable to quantify plant water status in plants with isohydric behaviour.

The present discussion focused on authors who use stress indicators for irrigation management (Table 2.2) and showed that there has been a tendency to use a certain type of indicator according to the behavior of the case-studies considered: (1) all the studies on plants with isohydric behavior

whereby were measured Ψ_{pd} showed this variable performed well as a water stress indicator; (2) all the studies on species with isohydric behavior which measured Ψ_{st} reported that this indicator did not perform well; (3) a few studies on species with isohydric behavior which analyzed SDV reported satisfactory results with RDTS or DMXTD/MXTD (difference of MXTD divided by the value observed for a well-watered control). In relation to anisohydric behavior, there has been a tendency to obtain a better performance using SDV-derived indexes than with isohydric cultivars, especially with MDS. In general, Ψ_{st} also performs well with all anisohydric species or in cases where the behavior is not clear. However, Ψ_{st} performs badly with isohydric species, with the sole exception of pomegranate (Intrigliolo et al., 2011). These results confirm our hypothesis. We should stress that apparently the choices made by researchers for measurements or the presentation of results often seem to be made having already taken this concept into account, even when not explicitly.

K_s functions where K_s is estimated from SWD have been used but, there are no studies of relationships between K_s and plant indicators. This may be attributed to the use of plant water status indicators which are often linked to a feed-back approach which does not usually require K_s estimates. Consequently, it is difficult to provide a summary of the use of such K_s functions from plant indicators.

2.6.3. When to Use Predawn or Noon Stem Water Potential

In conclusion, our results and those of others suggested that Ψ_{st} performs better and therefore is a preferred stress indicator in plants with anisohydric behavior, while in plants with isohydric behavior, Ψ_{pd} is generally preferred.

It is important to stress that the validity of these indicators depends not only on isohydric versus anisohydric behavior, but also on the stress level to which plants are subjected, as several authors (Goldhamer et al., 1999; Rodríguez et al., 2012; Silvestre and Ferreira, 2000) have demonstrated. Although SDV seemed to provide more interesting indicators for anisohydric species, the sensitivity of the derived indicator also changed as the range of water stress level varied.

It is clear from these observations that the behavior also depends on the cultivar in question, as demonstrated for instance for grapevines and peach (Table 1.2). Associating isohydricity with species (e.g., ring-porous versus diffuse-porous wood) is apparently not supported by these results.

If the choice of SDV-derived indexes is related to isohydricity, possible guidelines for these indicators could be determined from further in-depth analyses in future studies.

The differences between isohydric and anisohydric behavior complicate the choice and use of a stress indicator in a particular cultivar. A prior study of plant behavior with environmental changes is recommended to establish which variable provides the best information, unless a collection of data on different indicators is already available.

2.7. References

- Allen, Pereira, Raes, Smith, 1998. Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56, FAO-Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome (<http://www.fao.org/docrep>) ARPAV (2000), La caratterizzazione climatica della Regione Veneto, Quade. Geophysics 156, 178.
- Bonany, J., Ortuño, M.M.F., Conejero, W., Domingo, R., Moreno, F., Biel, C., Moriana, A., Intrigliolo, D.S., Casadesus, J., Pérez-Pastor, A., Torrecillas, A., Mellisho, C.D., Ruiz-Sánchez, M.C., Biel, C., Mellisho, C.D., Pérez-Pastor, A., Domingo, R., Ruiz-Sánchez, M.C., Casadesus, J., Bonany, J., Torrecillas, A., 2009. Could trunk diameter sensors be used in woody crops for irrigation scheduling? A review of current knowledge and future perspectives. *Agric. Water Manag.* 97, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.09.008>
- Chalmers, D.J., Mitchell, P.D., Heek, L. van, Van Heek, L., 1981. Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density, and summer pruning. *J. Journal-American Soc. Hortic. Sci. (USA)*. 106, 307–3012.
- Chaves, M.M., Zarrouk, O., Francisco, R., Costa, J.M., Santos, T., Regalado, A.P., Rodrigues, M.L., Lopes, C.M., 2010. Grapevine under deficit irrigation: hints from physiological and molecular data. *Ann. Bot.* <https://doi.org/10.1093/aob/mcq030>
- Chone, X., Cornelis, Van Leeuwen, Denis Dubordieu, Gaudille, J.P., 2001. Stem Water Potential is a Sensitive Indicator of Grapevine Water Status. *Ann. Bot.* 87, 477±483. <https://doi.org/doi:10.1006/anbo.2000.136>
- Conejero, W., Mellisho, C.D., Ortuño, M.F., Moriana, A., Moreno, F., Torrecillas, A., 2011. Using trunk diameter sensors for regulated deficit irrigation scheduling in early maturing peach trees. *Environ. Exp. Bot.* 71, 409–415. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.02.014>
- Cuevas, M. V, Ferna, J.E., 2010. Irrigation scheduling from stem diameter variations : A review. *Agric. For. Meteorol.* 150, 135–151. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.11.006>
- De Schepper, V., van Dusschoten, D., Copini, P., 2011. MRI links stem water content to stem diameter variations. *academic.oup.com* 1–38.
- Doltra, J., Oncins, J.A., Bonany, J., Cohen, M., 2007. Evaluation of plant-based water status indicators in mature apple trees under field conditions. *Irrig. Sci.* 25, 351–359. <https://doi.org/10.1007/s00271-006-0051-y>
- Domec, J.C., Johnson, D.M., 2012. Does homeostasis or disturbance of homeostasis in minimum leaf water potential explain the isohydric versus anisohydric behavior of *Vitis vinifera* L. cultivars? *Tree Physiol.* <https://doi.org/10.1093/treephys/tps013>
- Domec, J.C., Noormets, A., King, J.S., Sun, G., McNulty, S.G., Gavazzi, M.J., Boggs, J.L., Treasure, E.A., 2009. Decoupling the influence of leaf and root hydraulic conductances on stomatal conductance and its sensitivity to vapour pressure deficit as soil dries in a drained loblolly pine plantation. *Plant, Cell Environ.* 32, 980–991. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.01981.x>
- Ennajeh, M., Tounekti, T., Vadel, A.M., Khemira, H., Cochard, H., 2008. Water relations and drought-induced embolism in olive (*Olea europaea*) varieties “Meski” and “Chemlali” during severe drought. *Tree Physiol.* 28, 971–976. <https://doi.org/10.1093/treephys/28.6.971>

- Fereres, E., Goldhamer, D.A., 2003. Suitability of stem diameter variations and water potential as indicators for irrigation scheduling of almond trees. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 78, 139–144. <https://doi.org/10.1080/14620316.2003.11511596>
- Fernández, J., 2017. Plant-Based Methods for Irrigation Scheduling of Woody Crops. *Horticulturae* 3, 35. <https://doi.org/10.3390/horticulturae3020035>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1704-2>
- Ferreira, Conceição, N., Pacheco, C.A., Häusler, M., 2012a. Análise de indicadores de desconforto hídrico durante ciclos de stress num olival intensivo no Alentejo. VI Actas do Simpósio Nac. Olivicultura 207–2015.
- Ferreira, M., 2017. Stress Coefficients for Soil Water Balance Combined with Water Stress Indicators for Irrigation Scheduling of Woody Crops. *Horticulturae* 3, 38. <https://doi.org/10.3390/horticulturae3020038>
- Ferreira, M.I., Katerji, N., 1992. Is stomatal conductance in a tomato crop controlled by soil or atmosphere? *Oecologia* 92, 104–107. <https://doi.org/10.1007/BF00317269>
- Ferreira, M.I., Valancogne, C., Daudet, F. a, Ameglio, T., Pacheco, C. a, Michaelsen, J., 1996. Evapotranspiration and crop-water relations in a peach orchard. *Evapotranspiration Irrig. Sched.* 61–68.
- Ferreira, Silvestre, J., Conceição, N., Malheiro, A.C., 2012b. Crop and stress coefficients in rainfed and deficit irrigation vineyards using sap flow techniques. *Irrig. Sci.* <https://doi.org/10.1007/s00271-012-0352-2>
- Ferrer, P., Badal, E., Guerra, D., Intrigliolo, D.S., Buesa, I., Bonet, L., 2010. Maximum diurnal trunk shrinkage is a sensitive indicator of plant water, stress in *Diospyros kaki* (Persimmon) trees. *Agric. Water Manag.* 98, 143–147. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.08.007>
- Garcia-Forner, N., Adams, H.D., Sevanto, S., Collins, A.D., Dickman, L.T., Hudson, P.J., Zeppel, M.J.B., Jenkins, M.W., Powers, H., Martínez-Vilalta, J., Mcdowell, N.G., 2016. Responses of two semiarid conifer tree species to reduced precipitation and warming reveal new perspectives for stomatal regulation. *Plant Cell Environ.* 39, 38–49. <https://doi.org/10.1111/pce.12588>
- Girona, J., Mata, M., Goldhamer, D.A., Johnson, R.S., DeJong, T.M., Girona, J., Goldhamer, D.A., Johnson, R.S., Mata, M., Goldhamer, D.A., Johnson, R.S., DeJong, T.M., 1993. Patterns of Soil and Tree Water Status and Leaf Functioning during Regulated Deficit Irrigation Scheduling in Peach. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 118, 580–586. <https://doi.org/10.21273/jashs.118.5.580>
- Goldhamer, D.A., Fereres, E., 2004. Irrigation scheduling of almond trees with trunk diameter sensors. *Irrig. Sci.* 23, 11–19. <https://doi.org/10.1007/s00271-003-0088-0>
- Goldhamer, D.A., Fereres, E., 2001. Scheduling fruit irrigation using continuously recorded trunk diameter measurements. *Irrig. Sci.* 21, 115–125.
- Goldhamer, D.A., Fereres, E., Mata, M., Girona, J., Cohen, M., Girona, J., Goldhamer, D.A., Fereres, E., 1999. Sensitivity of Continuous and Discrete Plant and Soil Water Status Monitoring in Peach Trees Subjected to Deficit Irrigation. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 124, 437–444. <https://doi.org/10.21273/jashs.124.4.437>
- Green, S.R., Clothier, B.E., 1988. Water use of kiwifruit vines and apple trees by the heat-pulse technique. *J. Exp. Bot.* 39, 115–123. <https://doi.org/10.1093/jxb/39.1.115>

Gucci, R., Massai, R., Xiloyannis, C., Botany, J.F.-A. of, 1996, U., 1996. The effect of drought and vapour pressure deficit on gas exchange of young kiwifruit vines.pdf. Elsevier.

Hinkley, T.M., Duhme, F., Hinckley, A.R., Richter, H., 1980. Water relations of drought hardy shrubs: osmotic potential and stomatal reactivity. *Plant. Cell Environ.* 3, 131–140. <https://doi.org/10.1111/1365-3040.ep11580919>

Hugalde, I.P., Vila, H.F., 2014. Comportamiento isohídrico o anisohídrico en vides.... ¿Una controversia sin fin? *Rev. Investig. Agropecu.* 40, 75–82.

Huguet, J.-G., Jaussely, B., Orlando, P., 2007. Appréciation de l'état hydrique d'une plante à partir des variations micrométriques de la dimension des fruits ou des tiges au cours de la journée. *Agronomie* 5, 733–741. <https://doi.org/10.1051/agro:19850809>

Intrigliolo, D.S., Castel, J.R., 2007. Evaluation of grapevine water status from trunk diameter variations. *Irrig. Sci.* 26, 49–59. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0071-2>

Intrigliolo, D.S., Castel, J.R., 2006. Usefulness of diurnal trunk shrinkage as water stress. *Tree Physiol.* 26, 303–311. <https://doi.org/10.1093/treephys/26.3.303>

Intrigliolo, D.S., Castel, J.R., 2005. Effects of regulated deficit irrigation on growth and yield of young Japanese plum trees. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 80, 177–182. <https://doi.org/10.1080/14620316.2005.11511913>

Intrigliolo, D.S., Puerto, H., Bonet, L., Alarcón, J.J., Nicolas, E., Bartual, J., 2011. Usefulness of trunk diameter variations as continuous water stress indicators of pomegranate (*Punica granatum*) trees. *Agric. Water Manag.* 98, 1462–1468. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.05.001>

Jarvis, P., 1975. Water transfer in plants. In 'Heat and Mass Transfer in the Biosphere'. Part 1. Transfer processes in the plant environment. (Eds DA deVries and N. H. Afgan.) pp.

Jarvis, P.G., 2006. The Interpretation of the Variations in Leaf Water Potential and Stomatal Conductance Found in Canopies in the Field. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 273, 593–610. <https://doi.org/10.1098/rstb.1976.0035>

Jones, H.G., 1990. Physiological aspects of the control of water status in horticultural crops. *HortScience* 25, 19–26.

Jones, H.G., Hamlyn, G., 2004. Irrigation scheduling: Advantages and pitfalls of plant-based methods, in: *Journal of Experimental Botany*. pp. 2427–2436. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh213>

Jorba, J., Tapia, L., Sant, D., 2015. Photosynthesis, leaf water potential and stomatal conductance in *olea europea* under wet and drought conditions. *Acta Hortic.* 237–246. <https://doi.org/10.17660/actahortic.1985.171.21>

Katerji, N., Hallaire, M., 2007. Les grandeurs de référence utilisables dans l'étude de l'alimentation en eau des cultures. *Agronomie* 4, 999–1008. <https://doi.org/10.1051/agro:19841011>

Klein, T., 2014. The variability of stomatal sensitivity to leaf water potential across tree species indicates a continuum between isohydric and anisohydric behaviours. *Funct. Ecol.* 28, 1313–1320. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12289>

Konings, A.G., Gentine, P., 2017. Global variations in ecosystem-scale isohydricity. *Glob. Chang. Biol.* 23, 891–905. <https://doi.org/10.1111/gcb.13389>

Lankes, C., 1985. Effect of water stress on transpiration and CO₂ gas exchange of the apple leaf and fruit, in: *Acta Horticulturae*. pp. 305–314.

- Lavoie-Lamoureux, A., Sacco, D., Risse, P.A., Lovisolo, C., 2017. Factors influencing stomatal conductance in response to water availability in grapevine: a meta-analysis. *Physiol. Plant.* 159, 468–482. <https://doi.org/10.1111/ppl.12530>
- Li, Huguet, J., Bussi, C., 1989. Irrigation scheduling in a mature peach orchard using tensiometers and dendrometers. *Irrig. Drain. Syst.* 3, 1–12. <https://doi.org/10.1007/BF01102813>
- Lovisolo, C., Hartung, W., Schubert, A., 2002. Whole-plant hydraulic conductance and root-to-shoot flow of abscisic acid are independently affected by water stress in grapevines. *Funct. Plant Biol.* 29, 1349–1356. <https://doi.org/10.1071/FP02079>
- Lovisolo, C., Perrone, I., Carra, A., Ferrandino, A., Flexas, J., Medrano, H., Schubert, A., 2010. Drought-induced changes in development and function of grapevine (*Vitis* spp.) organs and in their hydraulic and non-hydraulic interactions at the whole-plant level: a physiological and molecular update. *Funct. Plant Biol.* 37, 98. <https://doi.org/10.1071/fp09191>
- Malheiro, A.C.C., Gonçalves, I.N.N., Fernandes-Silva, A.A.A., Silvestre, J.C.C., Conceição, N.S.S., Paço, T.A.A., Ferreira, M.I.I., 2011. Relationships between relative transpiration of grapevines and plant and soil water status in Portugal's Douro wine region, in: *Acta Horticulturae*. pp. 261–267. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.922.34>
- Marsal, J., Gelly, M., Mata, M., Arbonés, A., Rufat, J., Girona, J., 2002. Phenology and drought affects the relationship between daily trunk shrinkage and midday stem water potential of peach trees. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 77, 411–417. <https://doi.org/10.1080/14620316.2002.11511514>
- Martínez-Vilalta, J., Garcia-Forner, N., 2017. Water potential regulation, stomatal behaviour and hydraulic transport under drought: deconstructing the iso/anisohydric concept. *Plant Cell Environ.* <https://doi.org/10.1111/pce.12846>
- Martínez-Vilalta, J., Poyatos, R., Aguadé, D., Retana, J., Mencuccini, M., 2014. A new look at water transport regulation in plants. *New Phytol.* 204, 105–115. <https://doi.org/10.1111/nph.12912>
- Mccutchan, H., Shackel, K.A., Kenneth, 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, 607–611. <https://doi.org/10.21273/jashs.117.4.607>
- McDowell, N., Pockman, W.T., Allen, C.D., Breshears, D.D., Cobb, N., Kolb, T., Plaut, J., Sperry, J., West, A., Williams, D.G., Yezzer, E.A., 2008. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: Why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytol.* <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02436.x>
- Meinzer, F.C., Johnson, D.M., Lachenbruch, B., McCulloh, K.A., Woodruff, D.R., 2009. Xylem hydraulic safety margins in woody plants: Coordination of stomatal control of xylem tension with hydraulic capacitance. *Funct. Ecol.* 23, 922–930. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2009.01577.x>
- Meinzer, F.C., Woodruff, D.R., Marias, D.E., McCulloh, K.A., Sevanto, S., 2014. Dynamics of leaf water relations components in co-occurring iso- and anisohydric conifer species. *Plant Cell Environ.* 37, 2577–2586. <https://doi.org/10.1111/pce.12327>
- Meinzer, F.C., Woodruff, D.R., Marias, D.E., Smith, D.D., McCulloh, K.A., Howard, A.R., Magedman, A.L., 2016. Mapping 'hydroscares' along the iso- to anisohydric continuum of stomatal regulation of plant water status. *Ecol. Lett.* <https://doi.org/10.1111/ele.12670>
- Myburgh, P.A., 2011. Response of *Vitis vinifera* L. cv. Merlot to Low Frequency Irrigation and Partial Root Zone Drying in the Western Cape Coastal Region – Part II. Vegetative Growth, Yield and Quality. *South African J. Enol. Vitic.* 32, 104–116.

- 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, 547–551.
- Nortes, P.A., Pérez-Pastor, A., Egea, G., Conejero, W., Domingo, R., 2005. Comparison of changes in stem diameter and water potential values for detecting water stress in young almond trees, in: *Agricultural Water Management*. pp. 296–307. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.09.034>
- Olivo, N., Girona, J., Marsal, J., 2009. Seasonal sensitivity of stem water potential to vapour pressure deficit in grapevine. *Irrig. Sci.* 27, 175–182. <https://doi.org/10.1007/s00271-008-0134-z>
- Paço, T., Ferreira, M., Pacheco, C., 2013. Scheduling peach orchard irrigation in water stress conditions: use of relative transpiration and predawn leaf water potential. *Fruits* 68, 147–158. <https://doi.org/10.1051/fruits/2013061>
- Patakas, A., Noitsakis, B., Chouzouri, A., 2005. Optimization of irrigation water use in grapevines using the relationship between transpiration and plant water status. *Agric. Ecosyst. Environ.* 106, 253–259. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.10.013>
- Phillips, R.P., Rahman, F., Roman, D.T., Dragoni, D., Novick, K.A., Brzostek, E.R., Dragoni, D., Rahman, F., Phillips, R.P., 2015. The role of isohydric and anisohydric species in determining ecosystem-scale response to severe drought. *Oecologia* 179, 641–654. <https://doi.org/10.1007/s00442-015-3380-9>
- Remorini, D., Massai, R., 2003. Comparison of water status indicators for young peach trees. *Irrig. Sci.* 22, 39–46. <https://doi.org/10.1007/s00271-003-0068-4>
- Rieger, M., 1992. Comparison of Drought tolerance among *Prunus* species from divergent habitats. *HortScience* 27, 572g – 572. <https://doi.org/10.21273/hortsci.27.6.572g>
- Riou, C., Payan, J., 2001. Outils de gestion de l'eau en vignoble méditerranéen, in: *Compte Rendu Des 12es Journées Du GESCO*. pp. 3–7.
- Rodríguez, P., Mellisho, C.D., Conejero, W., Cruz, Z.N., Ortuño, M.F., Galindo, A., Torrecillas, A., 2012. Plant water relations of leaves of pomegranate trees under different irrigation conditions. *Environ. Exp. Bot.* 77, 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.08.018>
- Rogiers, S.Y., Greer, D.H., Hutton, R.J., Clarke, S.J., 2011. Transpiration efficiency of the grapevine cv. Semillon is tied to VPD in warm climates. *Ann. Appl. Biol.* 158, 106–114. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2010.00446.x>
- Scholz, F.G., Bucci, S.J., Goldstein, G., Meinzer, F.C., Franco, A.C., Miralles-Wilhelm, F., 2008. Temporal dynamics of stem expansion and contraction in savanna trees: Withdrawal and recharge of stored water. *Tree Physiol.* 28, 469–480. <https://doi.org/10.1093/treephys/28.3.469>
- Schultz, H.R., 2003. Differences in hydraulic architecture account for near-isohydric and anisohydric behaviour of two field-grown *Vitis vinifera* L. cultivars during drought. *Plant, Cell Environ.* 26, 1393–1405. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2003.01064.x>
- Sellés, G., Berger, A., 2015. Physiological indicators of plant water status as criteria for irrigation scheduling. *Acta Hort.* 87–100. <https://doi.org/10.17660/actahortic.1990.278.6>
- Shackel, K., Ahmadi, H., Biasi, W., ... R.B.-, 1997, U., 1997. plant water status as an index of irrigation need.pdf. journals.ashs.org.
- Silva, R.M., Ferreira, M.I., 2014. A new microdendrometric index to quantify water status in kiwifruit, in: *Acta Horticulturae*. pp. 43–50. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1038.3>

- Silvestre, J., Ferreira, M.I., 2000. Effects of irrigation on transpiration and water relations of vineyards, in the Tejo Valley (Central Portugal). *Acta Hortic.* 537, 305–312. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2000.537.35>
- Simonneau, T., Habib, R., Goutouly, J.P., Huguet, J.G., 1993. Diurnal changes in stem diameter depend upon variations in water content: Direct evidence in peach trees. *J. Exp. Bot.* 44, 615–621. <https://doi.org/10.1093/jxb/44.3.615>
- Stegman, E.C., Schiele, L.H., Bauer, A., 2013. Plant Water Stress Criteria for Irrigation Scheduling. *Trans. ASAE* 19, 0850–0855. <https://doi.org/10.13031/2013.36133>
- Stocker, O., 2012. Die Abhängigkeit der Transpiration von den Umweltfaktoren, in: *Pflanze Und Wasser / Water Relations of Plants*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 436–488. https://doi.org/10.1007/978-3-642-94678-3_24
- Swanson, R.H., Whitfield, D.W.A., 1981. {A} numerical analysis of heat pulse velocity and theory. *J. Exp. Bot* 32, 221–239.
- Tan, C.S., Buttery, B.R., 1982. Response of stomatal conductance, transpiration, photosynthesis, and leaf water potential in peach seedlings to different watering regimes. *HortScience* 17, 222–223.
- Testi, L., Villalobos, F.J., 2009. New approach for measuring low sap velocities in trees. *Agric. For. Meteorol.* 149, 730–734. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.10.015>
- Velez, J.E., Intrigliolo, D.S., Castel, J.R., 2007. Scheduling deficit irrigation of citrus trees with maximum daily trunk shrinkage. *Agric. Water Manag.* 90, 197–204. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.03.007>
- Williams, L.E., Baeza, P., 2007. Relationships among ambient temperature and vapor pressure deficit and leaf and stem water potentials of fully irrigated, field-grown grapevines *Vitis vinifera* responses to light quality: towards sustainable agricultural practices View project. *Am. J. Enol. Vitic.* 58, 173–181.



CAPÍTULO 3

LONG-TERM EFFECTS OF IRRIGATION
REGIME ON FRUIT DEVELOPMENT PATTERN
OF THE LATE-MATURING 'ANGELENO'
JAPANESE PLUM

Este capítulo está publicado en:

Blanco-Cipollone, F., Moñino, M. J., Vivas, A., Samperio, A., & Prieto, M. H. (2019). Long-term effects of irrigation regime on fruit development pattern of the late-maturing 'Angeleno' Japanese plum. *European Journal of Agronomy*, 105, 157-1673

3. CAPÍTULO 3: LONG-TERM EFFECTS OF IRRIGATION REGIME ON FRUIT DEVELOPMENT PATTERN OF THE LATE-MATURING 'ANGELENO' JAPANESE PLUM

3.1. Abstract

A regulated deficit irrigation (RDI) strategy can be used to ensure efficient water use in fruit orchards under different agro-ecological conditions. However, adapting RDI to specific crop conditions is essential for its successful implementation. To date, very few studies have provided information on its long-term effects. This paper presents an 8 year study assessing the fruit development pattern of Japanese plum cv. 'Angelino' under two different water regimes: a control (C) treatment with crop evapotranspiration (ET_c) replacement, and an RDI treatment which had no irrigation in the middle of the fruit growth stage. This unirrigated period was executed for 60 days from 2009 to 2012 and for 30 days from 2013 to 2016; a 30% reduction in ET_c was also applied during the post-harvest period in both cases. The results obtained in this study allowed characterisation of the fruit growth pattern of this cultivar under non-water stress conditions and an assessment of the effects of the duration and severity of water stress on the fruit. The swiftness and intensity of the water stress were crucial factors in terms of final fruit size, whereas precise determination of the initiation of RDI played only a secondary role. After eight years applying these RDI strategies, no carry-over effects on orchard yield were observed. Based on these results, RDI appears to be a sustainable practice for this cultivar and growing conditions.

KEYWORDS: stem water potential, *Prunus salicina*, dry weight, water stress, crop load

3.2. Resumen

Para asegurar un uso eficiente del agua en plantaciones frutales bajo diferentes condiciones agroecológicas, se puede implementar una estrategia de riego deficitario controlado (RDI). Sin embargo, la adaptación de la RDI a las condiciones específicas de los cultivos es esencial para el éxito de su aplicación. Hasta la fecha, muy pocos estudios han proporcionado información sobre sus efectos a largo plazo. Este trabajo presenta un estudio de 8 años que evalúa el patrón de desarrollo del fruto del ciruelo japonés cv. 'Angeleno' bajo dos regímenes de riego diferentes: un tratamiento de control (CON) con un reemplazo total de la evapotranspiración del cultivo (ETc), y un tratamiento de RDI al que se le suprimió el riego en una etapa intermedia de crecimiento del fruto. Este periodo de déficit se prolongó por 60 días de 2009 a 2012 y por 30 días de 2013 a 2016; en ambos casos también se aplicó una reducción del 30% de la ETc durante el periodo postcosecha. Los resultados obtenidos en este estudio permitieron caracterizar el patrón de desarrollo del fruto de este cultivar bajo condiciones de estrés y evaluar los efectos de la duración y severidad del estrés hídrico en el fruto. La rapidez e intensidad del estrés hídrico fueron factores esenciales en el tamaño final del fruto, mientras que la identificación precisa del inicio del RDI sólo tuvo un papel secundario. Tras ocho años de aplicación de la estrategia RDI, no se observaron penalizaciones en el rendimiento de la plantación. De acuerdo a estos resultados, la estrategia RDI parece ser una práctica sostenible para este cultivar y sus condiciones de cultivo.

PALABRAS CLAVE: potencial hídrico del tallo, *Prunus salicina*, peso seco, estrés hídrico, carga frutal.

3.3. Introduction

Despite improvements in irrigation techniques and water distribution mechanisms, water remains a scarce resource. This is especially true in places where traditional crops are being replaced by others which have a higher water demand (Steduto et al., 2012). In addition, the rising water consumption by the urban, industrial and environmental sectors (Fererres and Soriano, 2007), combined with mid- and short-term predictions of a decrease in global rainfall events (Change, 2013), underline the need for efficient water management. Irrigation is essential to maintain the productivity of commercial orchards. In this respect, the application of regulated deficit irrigation (RDI) in stone fruit orchards is an essential practice for enhancing water use efficiency. However, the success of the technique depends on whether it can be correctly adapted to the specific characteristics of the crop species and cultivar and on whether its application is feasible over a sustained number of years.

Numerous studies have shown that irrigation rates can be reduced without negative effects on orchard productivity. Additional agronomic benefits can also be obtained with RDI through the control of vigour in intensive orchards (Chalmers et al., 1981; Mills et al., 1997; Mitchell and Chalmers, 1982). This technique involves reducing the water supply in physiological stages in which a water deficit does not cause a decrease in crop yield or quality and fully satisfying water demand throughout the rest of the crop cycle (Mitchell et al., 1984). The correct application of RDI requires knowledge of the phenology and seasonal sensitivity to water deficit of a given crop. It is also necessary to determine the water stress thresholds that the crop can tolerate without irreversible negative effects. The impact of RDI needs to be assessed not only in terms of the yield in the current season, but also in the medium and long term, as this can affect the productive life of the orchard.

The general pattern of stone tree fruit growth has been described as a double sigmoid with three stages: an initial stage of rapid growth (stage I) until the onset of pit hardening, identified as a stage of rapid cell division; a fruit growth cessation and stone hardening (stage II); and finally, the resumption of rapid growth until harvesting (stage III). This last stage is dominated by cell expansion, with the fruit acquiring its final size. This model, described in late-maturing peach trees (Addoms et al., 1930), has been validated by other authors in peach (Mercier et al., 2009; Pavel and DeJong, 1993), as well as nectarine (Handley, D.F.; Johnson et al., 2000; Larson et al., 1988; Naor et al., 2005), apricot (Pérez-Pastor et al., 2009; Torrecillas et al., 2000) and Japanese plum (Khan, 2016; Zuzunaga et al., 2001). In cultivars with a double sigmoid growth pattern, Basile et al. (2002) observed differences between assimilate demand patterns in peach and plum fruits of similar cycle lengths; these were most notable at the end of stage III, when there was lower assimilate demand in plum.

Final fruit size is one of the aspects that determine the economic value of a harvest. In various species this mainly depends on cell numbers (Harada et al., 2005; Olmstead et al., 2007; Scorzal et al., 1991; Yamaguchi et al., 2009; Zhang et al., 2006). Although there is a strong genetic factor, it can also be affected by factors such as temperature, water stress and/or load level (Austin et al., 1999; Bergh, 1990; Warrington, I. J., Fulton, T. A., Halligan, E. A., & De Silva, 1999).

The critical stages for RDI application are those during which water stress may negatively affect the commercial value of the harvest (Zapata and Segura., 1995). According to Hsiao (1990), both cell multiplication and cell expansion are physiological processes that are highly sensitive

even to slight water stress. Accordingly, the initial and final fruit growing stages can be considered critical periods for the establishment of a water deficit. However, according to studies on Japanese plum (Gennai et al., 2015), avocado (Schroeder et al., 1953) and olive (Hammami et al., 2013), cell multiplication is not always concentrated in the first stage of fruit development, like in grapevines (Ojeda et al., 2002), but can also take place in subsequent stages, albeit with less intensity. Deficient crop water status in stage I can have negative effects on fruit size in peach (Girona et al., 2004, 2001) and nectarine (Naor et al., 2005), though there are circumstances in which increases in final fruit size have been observed (Chalmers et al., 1984, 1981; Mitchell and Chalmers, 1982). Stage II and the post-harvest period are usually considered less sensitive to water stress. Accordingly, a combined strategy of applying moderate stress during these two periods has often been recommended for mid- and late-maturing crops and this has given good medium- and long-term results (Naor et al., 2005). In some species, the concurrence of stage II with active bud growth gives rise to trees with a smaller leaf area. As in the case of peach (Girona et al., 2003; S. H. Li et al., 1989), this implies a consequent reduction in water requirements in the following stages.

Determining the start and the end of a period less sensitive to water stress can be essential to the successful implementation of RDI. Although determination of the initiation of such a stage in late-maturing crops appears to be simple, identification of the end of this stage and hence the moment at which fruit growth is reactivated is not always so clear (Intrigliolo and Castel, 2010; Samperio et al., 2015). In many cases it is determined posteriori (Naor, 2006), as this stage can vary in length between years (Girona et al., 2003; Naor, 2006). It has been shown in peach trees that imprecise determination of the end of stage II of fruit growth can lead to reductions in final yield (Girona et al., 1990; Gomis, 1989; Ruiz-Sánchez and Girona, 1995). In some cases, compensatory growth has been described in fruits when irrigation has been re-introduced in the pre-harvest rapid growth stage (Caspari et al., 1994; Mitchell and Chalmers, 1982). Extending the water deficit period can not only take the water stress period to a critical point but can even increase the severity of the stress. In mid- and late-maturing Japanese plum cultivars, a threshold has been proposed of around -1.0 MPa at the start of stage II, decreasing to -1.3 MPa at the end of this period (Intrigliolo and Castel, 2010; Naor et al., 2004; Prieto et al., 2014).

An important issue from the perspective of the commercial application of RDI is its long-term effect. RDI may decrease available reserves in the tree year-on-year, as well as a reduction in tree vegetation cover, as observed by Naschitz and Naor (2005) in a 2-year experiment on apple trees. Both processes can lead to a reduction in final fruit size, as observed by Marsal et al. (2016) in mid-maturing peach in a 4-year study and by Intrigliolo et al. (2013) in Japanese plum in a 7-year study. This contrasts with the observations of Johnson et al. (1992) in early-maturing cultivars of *Prunus salicina* subjected to RDI in the post-harvest period during 4 years. However, there are insufficient long-term (more than 4 years) studies on the application of RDI in fruit trees to determine the impact of the technique on orchard longevity.

To date, no long-term study has been made on the fruit development of a late-maturing Japanese plum cultivar subjected to water stress during its cycle. Consequently, the objectives of this study are: (i) to provide proper characterization of the fruit development of a late-maturing Japanese plum cultivar; (ii) to clarify the effects of different water stress treatments in an intermediate fruit growth stage plus postharvest; (iii) to suggest, based on the information obtained from the experiment, an RDI strategy for cultivars with a similar fruit development pattern; and (iv) to provide information about the effects of long-term RDI strategies on yield (fruit number and fruit size) with a view to promoting implementation of this technique.

3.4. Material and Methods

3.4.1. Experimental site

The study was carried out between 2009 and 2016 on a 1 ha experimental plot located at the CICYTEX-La Orden research site in “Vegas Bajas del Guadiana” (Badajoz, Spain) at an altitude of 184 m. The orchard was planted in 2005 with late-maturing Japanese plum trees cv. ‘Angeleno’. They were grafted onto ‘Marianna 2624’ rootstock, trained to an open-vase system, and had a 6 x 4 m spacing with an east-west orientation. An appropriate number of cvs. ‘Fortune’ and ‘Larry Ann’ trees were distributed throughout the plot as pollinators and bee hives were used at flowering to ensure appropriate pollination. Fruit thinning was only performed in 2011 and 2016, on May 8 and 16, respectively.

The climate is Mediterranean with an Atlantic influence and hot dry summers. The reference annual evapotranspiration rate (E_{To}) is around 1300 mm. The average annual temperature and total annual rainfall were 16°C and 588 mm, respectively, for the period 1997-2016.

The soil is an Alfisol, belonging to the Xeral suborder (Soil Survey Staff, 1999), with loamy texture and low structural level. Soil water content at field capacity (-33 kPa) and permanent wilting point (-1500 kPa) were 0.261 and 0.213 $m^3 m^{-3}$, respectively. More information about the soil characteristics is available in Samperio et al. (2015a). Crop practices, including ferti-irrigation, were carried out following commercial criteria.

A drip irrigation system was employed using 4 pressure-compensating emitters with a 4l h⁻¹ discharge rate per tree each meter along the emitter line. The amount of water applied to each basic plot was measured with a volumetric metering device.

3.4.2. Irrigation treatments

Two irrigation treatments were initiated in 2009: a control treatment (C) and a regulated deficit irrigation (RDI) treatment. In the C treatment, daily irrigation doses were applied to meet crop evapotranspiration (E_{Tc}) minus effective rainfall (P_e). The RDI treatment began with the same water contribution as the C treatment, but irrigation was suspended at the onset of stone-hardening. The RDI treatment was initiated each year after natural fruit drop, which in cv. ‘Angeleno’ occurs between the 2nd and 4th week after full bloom (Guerra Velo, 2011). This was determined weekly by detecting increased resistance due to stone lignification when cutting perpendicular to the fruit suture of randomly chosen fruit samples. During the first 4 years of the study, the non-irrigation period was 60 days. As this triggered long periods of stress with a systematic decrease in fruit size, it was decided to reduce the deficit period to 30 days during the second 4 years. The same irrigation regime used for the C treatment was re-established after this period and until harvesting. A 30% E_{Tc} replacement rate was applied in the post-harvest period.

The ETC was calculated by multiplying the reference evapotranspiration (ET_o) by the crop coefficient (K_c) (Allen et al., 1998). The ET_o value was taken from official data provided by the regional government of Extremadura (Redarex, 2019) and calculated following the Penman-Monteith method. In 2009 and 2011, the K_c was obtained from Allen et al. (1998). In the other years of the study, crop water needs were determined using soil water content measurements. The K_c was calculated on a weekly basis using the soil water balance method with neutron probe measurements. The tube arrangement and sampling design system are described in Samperio et al. (2015a).

A randomized block design was used with 4 replicates. Each plot consisted of 4 rows of 4 trees, with measurements being taken on the 4 central trees.

3.4.3. Monitoring of seasonal fruit evolution

Every year, 8 fruits per tree were selected from 2 trees on each plot within the 4 blocks (64 fruits per treatment). Fruits were picked from the middle of clusters growing at eye level along the canopy. The diameter of the equatorial section perpendicular to the suture was measured periodically using a digital calliper (Mitutoyo 500-196-30; precision ± 0.01 mm).

In 2011, a destructive sampling was performed which involved picking fruits representative of the calibre at the sampling time. Each sampling date, a total of 30 fruits per treatment were individually weighted and measured volume and diameter; establishing a relationship between them. They were then fresh-weighed using Sartorius AX4202 scales (precision ±0.01 g) and dried to a constant weight at 65°C in a forced-air oven (DryBig 250, Borel Fours Industriels & Etuves, S.A., Neuchâtel, Switzerland). Subsequently, the sample and mean fruit dry weights were determined. In 2012, in addition to monitoring seasonal fruit evolution on the tree, fruit dry matter was also determined following the procedure used in 2011.

3.4.4. Plant water status

Midday stem water potential (Ψ_s) was measured on a weekly basis, between 12:00 and 13:00 solar time, using a pressure chamber (Soil Moisture Equip. Corp. mod. 3005, Santa Barbara, CA, USA) following procedures described by Turner (1981). Determinations were carried out on two trees per replicate. Two mature shaded leaves per tree, taken from near the lower part of the trunk, were covered with silver foil and enclosed in plastic bags at least 2 h prior to measuring Ψ_s.

The water stress integral was calculated as follows:

$$\Sigma\Psi_s = \Sigma(\Psi_{si,i+1} - c)n \text{ (MPa*day)} \text{ (Myers, 1988)}$$

where $\Psi_{s,i+1-c}$ are the potential values during the fruit development stage, “c” is the maximum Ψ s attained during this period for each year, and “n” is the number of days that this period lasted.

3.4.5. Crop phenology

The phenological states were determined according to the Baggiolini scale (Baggiolini, 1952). They were then expressed using the concept of degree-days after full bloom (DDAFB). The DDAFB were calculated following the model developed by Tabuenca and Herreros (1966). The upper and lower temperature limits were 6°C and 25°C, respectively. In the 2009-2013 period, zinc sulphate was used to force leaf fall.

3.4.6. Yield determinations

Fruits were harvested in one picking, carried out between the end of August and beginning of September, after attaining commercial ripeness. The total yield of each tree was weighed, and the number of fruits counted to obtain the mean fruit weight.

The mean fruit weight was recalculated, in all years, for both treatments and expressed as a function of the number of fruits per tree. This was done considering their potential size if no limit was placed on their growth. We then calculated the ratio between the actual mean fruit weight and the mean fruit weight following this regression. This ratio was called the relative growth potential (RGP).

3.4.7. Statistical analysis

The effect of irrigation treatments, experimental year and their interactions were calculated using an analysis of variance (ANOVA) split-plot in time design to take into account the repeated measures structure. No statistical differences were found at a 95% confidence level.

ANOVAs were performed for each sampling day to test for differences between treatments in various parameters including fruit volume and fruit dry matter, and each year separately for yield components with a 95% confidence level.

The statistical analyses were performed using the IBM SPSS statistical software v. 20; regressions were done with the Microsoft Excel program v. 2016.

3.5. Results

3.5.1. Climatic conditions and irrigation volumes applied

The seasonal temperature pattern was similar (Fig. 1) over the 8 years of the study. July and August were the warmest months, with average maximum temperatures of between 33.7 and 33.5°C; December and January were the coldest, with average minimum temperatures of between 3.9 and 3.1°C. The coldest winter was that of 2011-2012, with a mean average temperature for December, January and February 2°C lower than in the other years studied. The vapour pressure deficit (VPD) patterns were also similar each year, although notably higher than average values were recorded in 2009, 2010 and 2015. Rainfall was highest between October and May (Table 3.1), with almost no precipitation during the rest of the year. Total rainfall for the crop season ranged between 315 and 760 mm. The values were very low in 2009, 2012 and 2015, with hardly any cumulative precipitation during the period immediately prior to the initiation of the deficit period (less than 201 mm). Total ETo during the tree growth cycle was around 1250 mm each year, except 2013 when it fell to 1137 mm. Year-on-year differences in ETo were related to rainfall during the crop cycle.

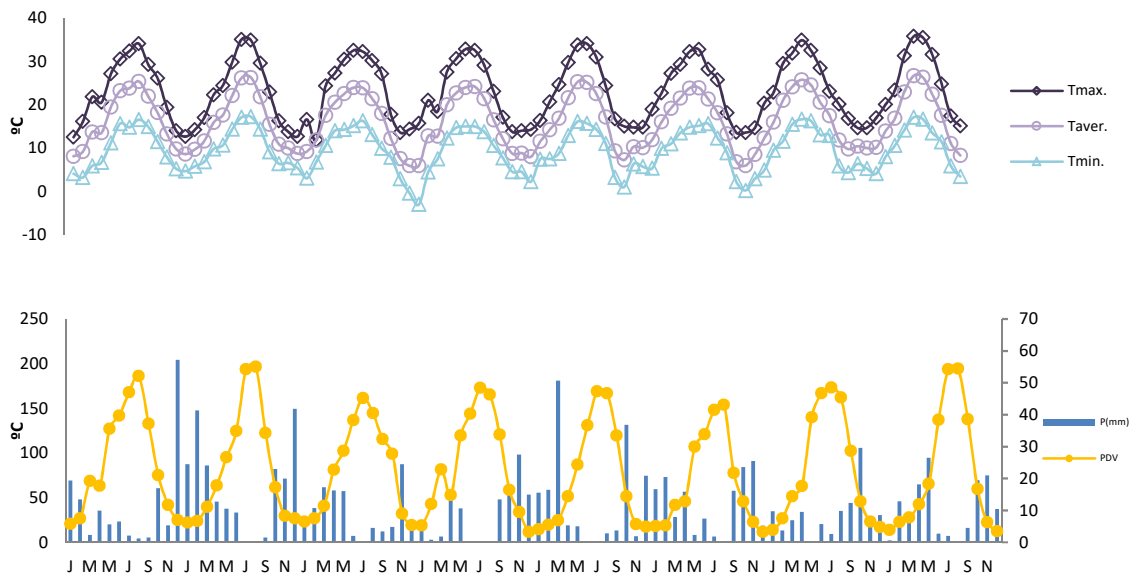


Figure 3.1. Meteorological conditions for the orchard over the eight years studied; (a) Average monthly temperatures, (b) Total cumulative monthly precipitation (bars) and VPD (line with circles).

The total irrigation volume (Table 3.1) in treatment C ranged from 591 mm in 2009 (the first year of production) to 806 mm in 2015. In the first 4 years of the study, 39% less water was applied in the RDI treatment than in treatment C. In the final 4 years, only 17% less water was applied because the length of the unirrigated period was reduced by half.

Table 3.1. Cumulative precipitation (P), reference evapotranspiration (ETo), and irrigation (both treatments) over different periods for each year. Periods covered: (1) from previous year leaf fall to onset of deficit irrigation period; (2) from onset to end of deficit irrigation period; (3) from previous year leaf fall to present year leaf fall; (4) from bud break to leaf fall. In (5) 2008 Dec. 25 was used as previous year leaf fall. Values with * indicate breakdowns in the irrigation system.

		P (mm)	ETo (mm)	Irrigation		Number of days
				C (mm)	RDC (mm)	
2009	pre-deficit (1)	201,1	336,4	5,6	5,6	118
	deficit (2)	43,4	376,3	199,4	4,9	64
	Total Anual(3)	315,6	1361,1	591,0	316,0	365
	ciclo vegetativo (4)	251,6	1331,1	591,0	316,0	309
2010	pre-deficit	607,1	527,9	41,2	44,3	158
	deficit	33,6	314,7	211,4	2,7	49
	Total Anual	760,2	1315,3	643,0	417,8	365
	ciclo vegetativo	469,2	1236,6	643,0	417,8	294
2011	pre-deficit	370,2	370,4	29,8	31,4	127
	deficit	62,8	381,8	230,5	4,5	63
	Total Anual	561,2	1339,6	674,7	375,1	365
	Total ciclo vegetativo	360,8	1251,6	674,7	375,1	300
2012	pre-deficit	124,6	369,8	83,2	82,7	128
	deficit	10,8	413,5	274,0	35.0 *	64
	Total Anual	339,8	1339,2	776,3	524,5	365
	ciclo vegetativo	299,4	1260,2	776,3	524,5	285
2013	pre-deficit	372,2	281,1	16,4	25,2	127
	deficit	16,3	177,5	139,6	7,3	35
	Total Anual	548,9	1199,7	770,7	668,4	365
	ciclo vegetativo	431,9	1137,6	770,7	668,4	295
2014	pre-deficit	297,5	384,6	19,1	20,1	132
	deficit	7,9	169,6	80,4	25.7 *	31
	Total Anual	588,4	1284,1	615,7	565,7	399
	ciclo vegetativo	457,5	1225,6	615,7	565,7	337
2015	pre-deficit	108,2	360,5	37,2	26,3	133
	deficit	20,2	206,7	139,8	0,0	34
	Total Anual	357,7	1309,4	806,1	595,7	366
	ciclo vegetativo	325,8	1282,3	806,1	595,7	332
2016	pre-deficit	306,4	305,6	4,2	3,9	133
	deficit	22,4	227,7	83,2	2,2	41
	Total Anual	532,7	1250,1	762,8	628,7	366
	ciclo vegetativo	450,0	1217,8	762,8	628,7	333

3.5.2. Yield components

There were important differences between crop loads over the 8 years of the study (Table 3.2). The highest number of fruits per tree was recorded in 2014 and the lowest fruit load in 2009, the first year of production. Fruit thinning was only performed in 2011 and 2016. In 2011 a total of 215 and 293 fruits/tree were removed in treatments C and RDI, respectively, and 994 and 1307 fruits/tree in treatments C and RDI in 2016, respectively. Significant differences in numbers of fruits per tree were recorded in 2010, 2012 and 2016. Alternate bearing cycles were observed in both treatments, that is a year with a high load level was followed by a year with a significantly lower load level. This alternation was most marked in the C treatment. In all the years of the study, the fruit mass in C treatment was significantly higher than in RDI treatment; the only exception was in 2013 when no differences were found. There were statistical differences in yield in 2009 (lower in RDI), the first year of entry into production, and 2012 (lower in C).

It can be seen in Figure 3.2 how average fruit weight in both treatments decreased linearly with higher tree load level. The straight line corresponding to RDI is below that corresponding to C, with a lower-level slope and a greater dispersion of points. For similar load levels, water stress was associated with smaller fruits; however, these differences tended to be smaller with higher load levels.

Table 3.2. Yield and fruit quality for both irrigation treatments over the eight years studied; (*) represents differences between treatments for each year ($p < 0.05$); NS=not significant.

		<u>2009</u>	<u>2010</u>	<u>2011</u>	<u>2012</u>	<u>2013</u>	<u>2014</u>	<u>2015</u>	<u>2016</u>	Average 8 years
Fruit number per tree	C	121	620	591	666	542	2152	293	1158	709
	RDI	116	822	833	1097	595	2437	331	1382	802
		ns	*	ns	*	ns	ns	ns	*	ns
Average fruit weight (g)	C	95	105	98	94	110	77	103	89	97
	RDI	78	90	81	73	106	69	83	80	82
		*	*	*	*	ns	*	*	*	*
Yield (kg tree ⁻¹)	C	11.7	65.1	58.0	62.2	58.7	162.9	29.6	102.4	68.80
	RDI	8.6	74.1	67.8	78.4	62.4	166.3	27.0	108.7	74.16
		*	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns

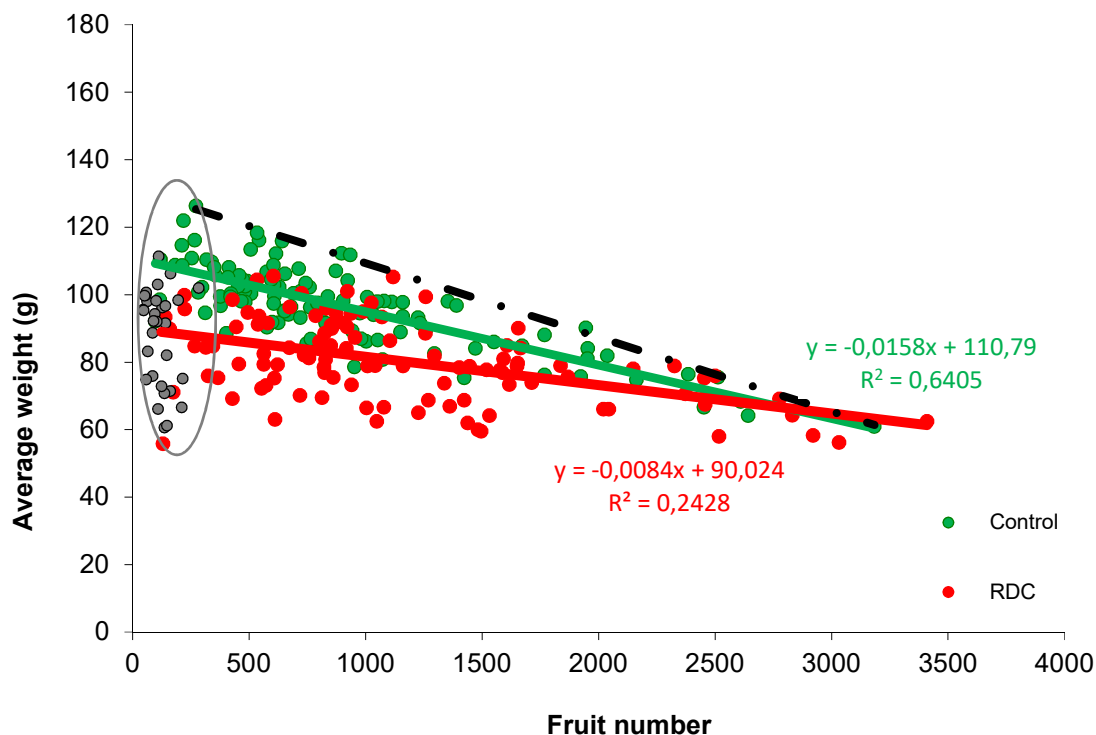


Figure 3.2. Relationship between fruit number per tree and average fruit weight at harvest for the eight years studied; each point represents one tree. Green dots correspond to the C treatment and red figures to the RDI treatment. Grey points inside the ellipse correspond to the year 2009. Regression for C treatment (green line) is located above the regression for DI (red line). Dash-dot line corresponds to the base line created using the maximum values.

3.5.3. Phenology and fruit development pattern

Each year, bud burst took place between January 21 and 30; the only exception was in 2012, when it occurred on February 8. The pit-hardening period started between April 28 and May 13, and harvesting was carried out between August 27 and September 19.

The evolution of fruit volume in treatment C is shown in Figure 3.3a. This shows the 7 years in which non-destructive sampling (considered in terms of DDAFB) was performed. A similar fruit development pattern can be seen between fruit set and picking in the years 2009, 2010, 2013 and 2015 (which for the purposes of this study, and on the basis of final fruit size, have been referred to as 'years without limitations' or N-L years). However, in comparison to this N-L group, fruit growth slowed down in 2012, 2014 and 2016 (which for the purposes of this study, we have called 'years with limitations' or L years) from 600 DDAFB onwards. The difference in fruit volume between these two groups of years increased as the season advanced to harvest time, when a markedly lower fruit size could be observed in the L years. In addition, it is possible to observe a first phase in the L years, in which fruit growth was similar up to 1100 DDAFB (Fig. 3.3b), and

then a second phase, after 1100 DDAFB, in which the rate of fruit growth differed between years but was always below that of the N-L group.

Both phases exhibited polynomial behaviour, with an initial period of rapid growth being followed by a subsequent slowdown. The L group fruits followed a similar two-phase growth pattern, with phases of a similar length and a more marked change of phase than in the N-L group.

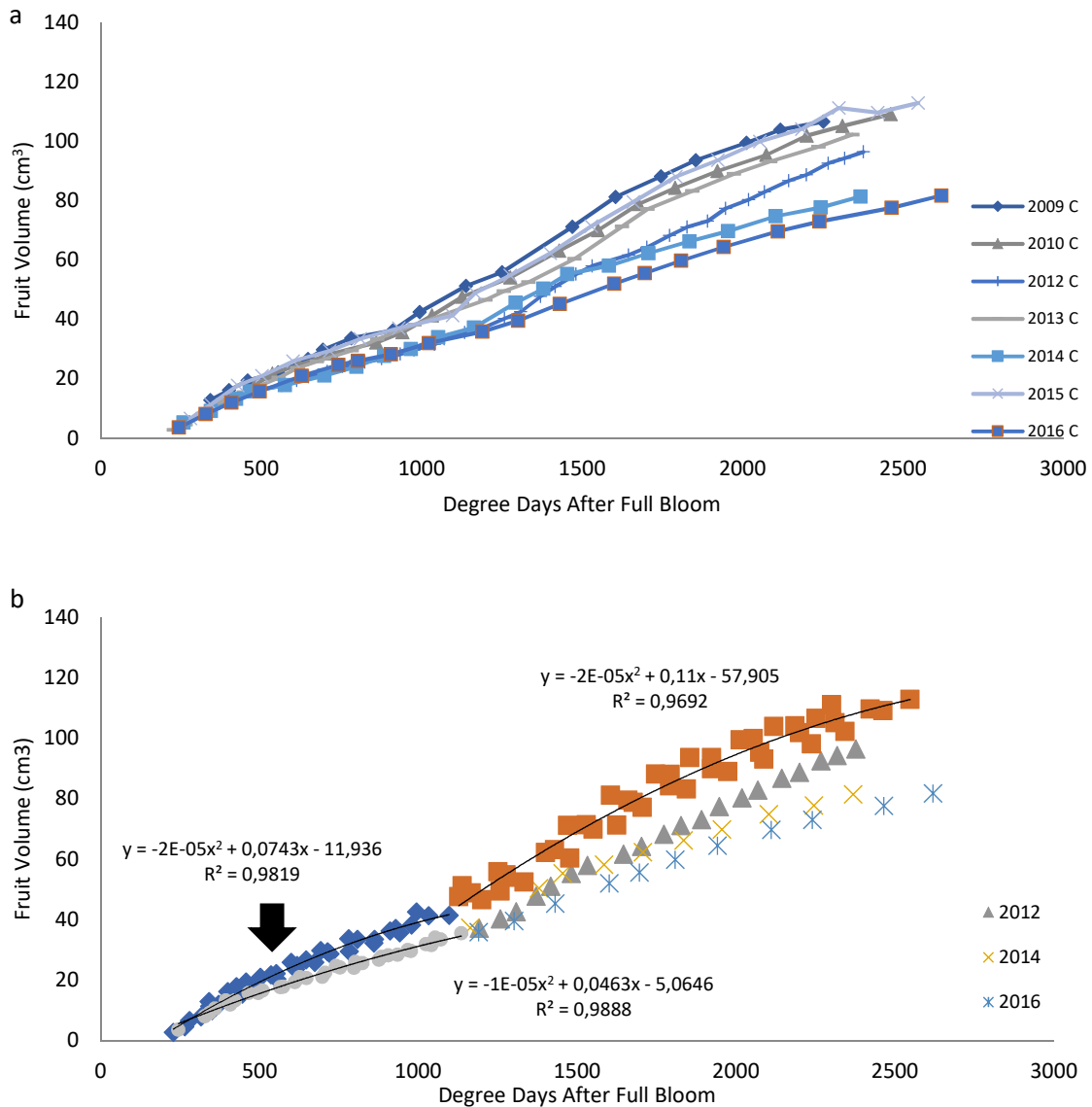
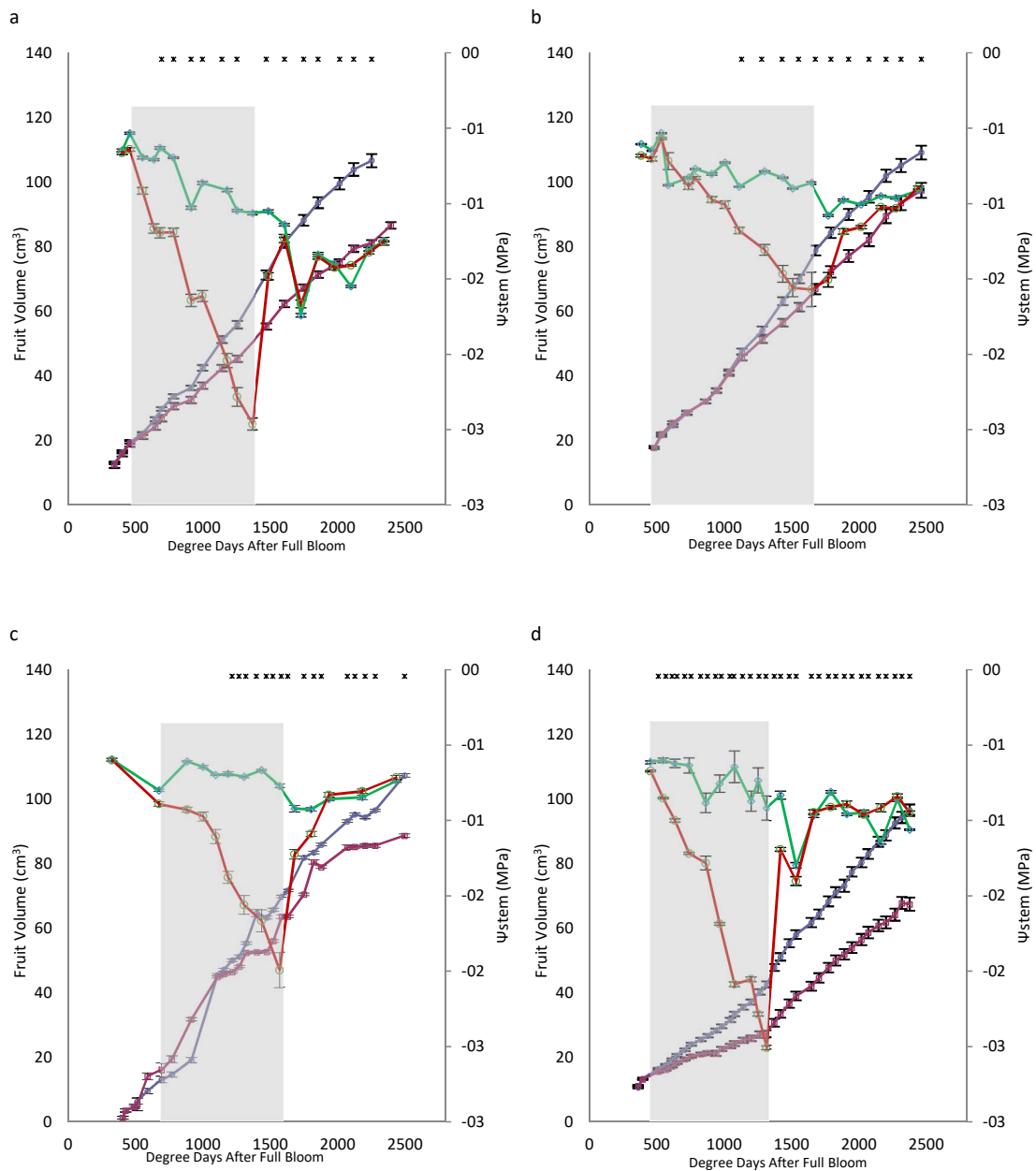


Figure 3.3. (a) Seasonal patterns of mean individual fruit volume development for C treatment trees for seven of the eight studied years over the course of the season. Each point is the average of 64 measurements. (b) Polynomial adjustment in two phases for non-limited years (2009, 2010, 2013 and 2015) corresponding to diamonds and for limited years (2012, 2014 and 2016). Vertical arrow marks turning point in the first stage for every year.

3.5.4. Tree water status and the influence of stress on fruit growth

The evolution of fruit volume and Ψ_s in the pre-harvest period in treatments C and RDI over the 8-year study period are shown in Figures 4a-h. In 2009, 2010, 2011 and 2012, applying the RDI treatment entailed a prolonged water deficit (Figs. 3.4 a, b, c, d), with a shorter one in 2013, 2014, 2015 and 2016 (Figs. 3.4 e, f, g, h). In all cases, the deficit period began at the onset of pit-hardening, which coincided with a slowdown of growth at around 430-672 DDAFB.



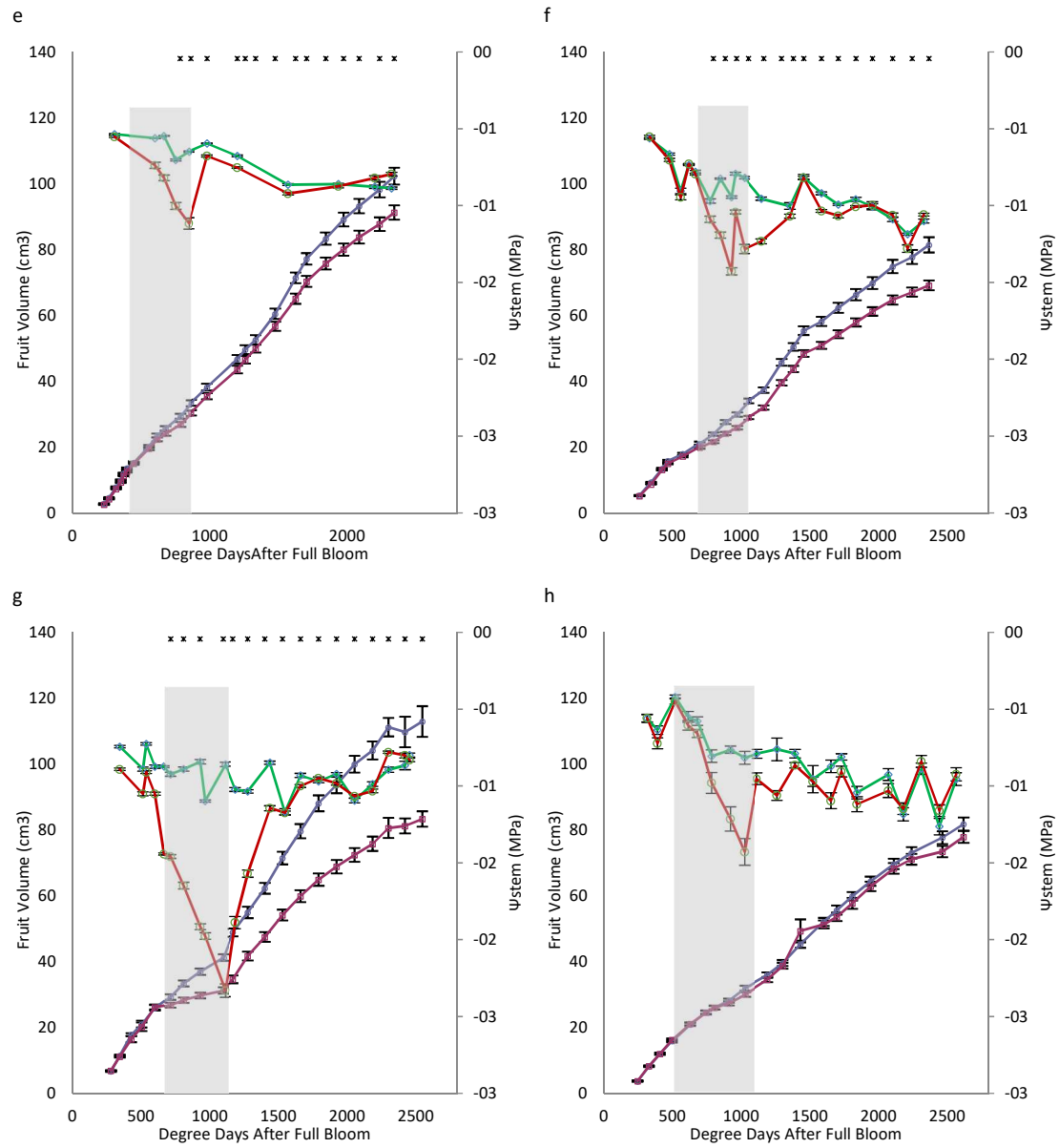


Figure 3.4. Seasonal pattern of fruit growth development (green for CON and red for RDI treatment) and stem water potential (blue for CON and purple for RDI treatment) over the pre-harvest period for the eight years studied ("a" to "h" correspond to years 2009 to 2016). Data refer to degree days after full bloom for each year (DDAFB). Horizontal line represents deficit period in each year. Vertical bars at each point represent the standard deviation and asterisks significant differences in volume between treatments ($p < 0.05$).

On cessation of irrigation, the values of Ψ_s corresponding to the RDI treatment fell below those of the C treatment. This fall was rapid in 2009, 2012 and 2015 (to values of -2.5, -2.5 and -2.3 MPa, respectively), slower in 2010 and 2011 (with values of -1.6 and -1.9 MPa, respectively), and only slight in 2013, 2014 and 2016 (with values of -1.1, -1.4 and -1.4 MPa, respectively). After re-initiating irrigation, the recovery of Ψ_s took place rapidly in all of the years studied, reaching the C treatment values within an average of 14 days. In the C treatment, Ψ_s remained above -1 MPa in all years except 2009 when there was a progressive decrease throughout the crop cycle. Fruit volume was lower in the RDI treatment than in the C treatment in 7 of the 8 years studied. In the years in which there was a rapid decrease in Ψ_s , significant differences in fruit size appeared less than a week after suspending irrigation in the RDI treatment (years 2012 and 2015). However, when the decrease was progressive, these differences appeared 10 and 50 days after suspending irrigation (2014 and 2010, respectively), and in one year (2016) these differences did not appear at all. In no case was any compensatory growth observed in the RDI fruits after irrigation restarted, despite the equalling of the water status in the two treatments. The mean minimum Ψ_s values attained during the post-harvest period were -1.2 MPa for the C treatment and -1.7 MPa for the RDI treatment.

The stress severity, represented in Figure 3.5a by the minimum Ψ_s value attained during that period, was associated with a linear decrease of fruit weight at harvest. This relationship did not change with longer or shorter durations of stress. Accordingly, the RDI treatments were fitted to the same straight line relating to a more prolonged or shorter period of stress. The progressive increase in the stress integral during the fruit growth period (Fig. 3.5b) was accompanied by a progressive reduction in fruit weight. This was fitted to the same logarithmic-type relation for the 8 years of the study. The loss of fruit volume caused by the period of stress was therefore influenced more by the intensity of the stress and by cumulative stress than by the duration of the stress.

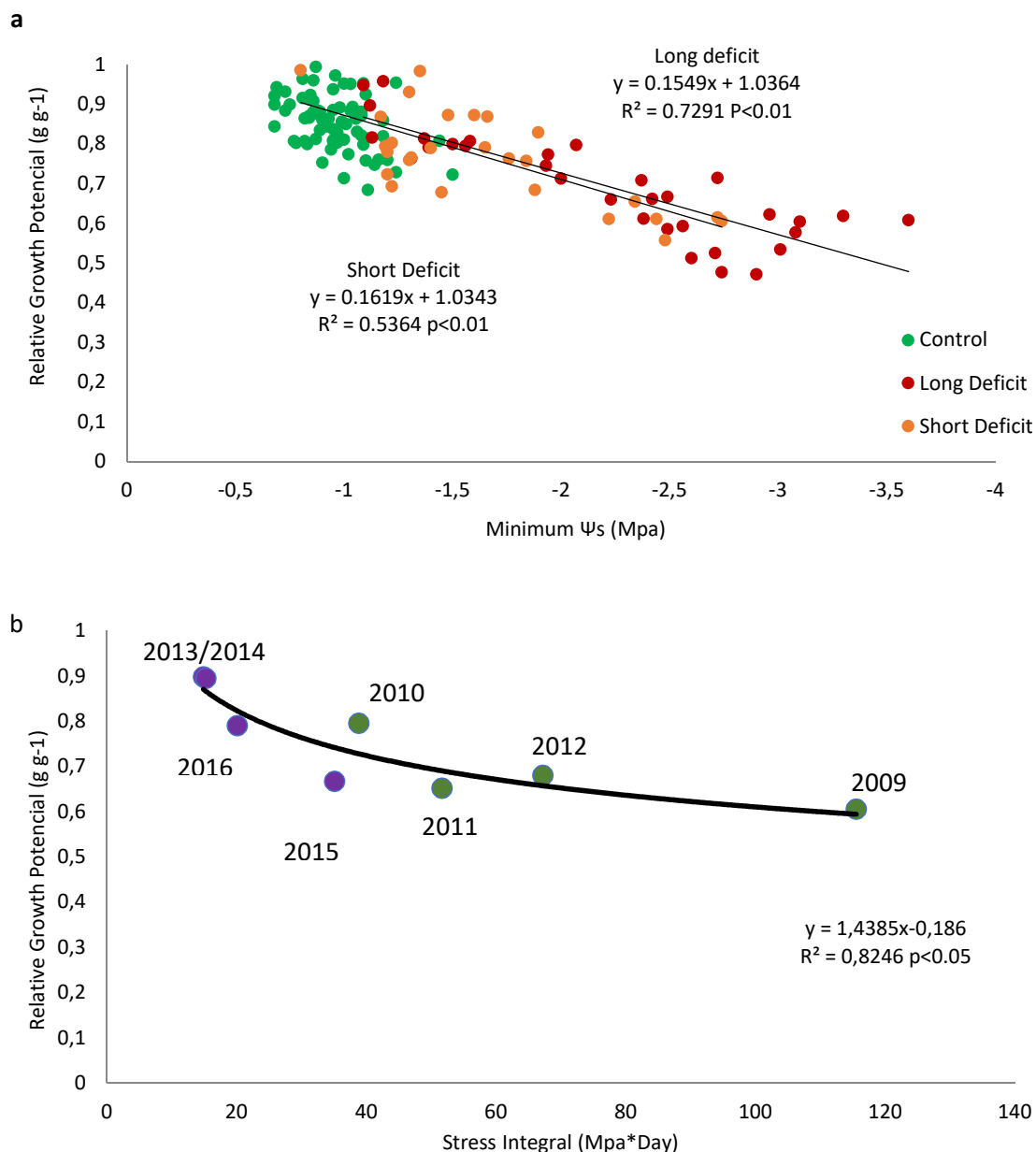


Figure 3.5. (a) Relationship between minimum Ψs over the first irrigation deficit period and relative growth potential (RGP) for C trees (green circles) and RDI trees (red squares and triangles) for the eight years studied. Lines represent regressions for the two RDI treatments. (b) Relationship between stress integral and RGP for the eight years studied. Diamonds represent long deficit periods, triangles represent short deficit periods.

The seasonal evolution of the average dry weight fruit in 2011 and 2012 is shown in Figure 6. Both were years of prolonged stress, though this was introduced gradually in 2011 and more rapidly in 2012. In both years, the RDI fruits reached harvest with a higher dry weight than the C fruits. In the same two years, the C fruits had higher fresh weights (Fig. 3.6) than the RDI fruits, with significant differences appearing at 736 DDAFB (2011) and 2087 DDAFB (2012). Figure 7 shows that the water received by the orchard (rainfall and irrigation) between leaf fall and the onset of the deficit period influences the Ψs rate of decrease after the suspension of irrigation and the minimum value attained.

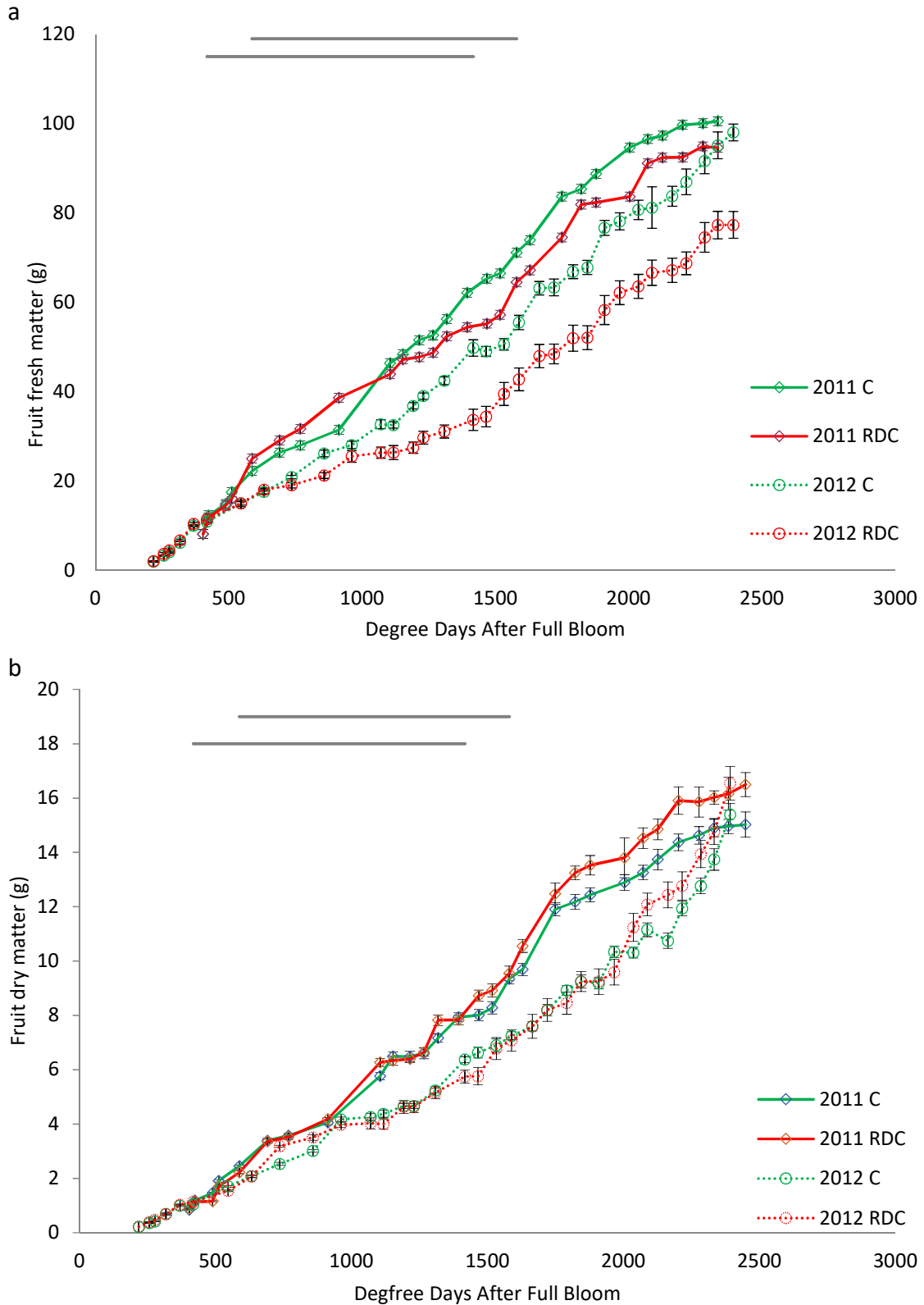


Figure 3. 6. Seasonal pattern of mean individual fresh fruit weight (a) and dry fruit weight (b) for C and RDI treatments for the years 2011 (continuous lines) and 2012 (dotted lines). Each point is an average value for 30 fruits and vertical bars indicate the standard deviation for each measurement day; Upper and lower horizontal lines represent deficit period in 2011 and 2012, respectively.

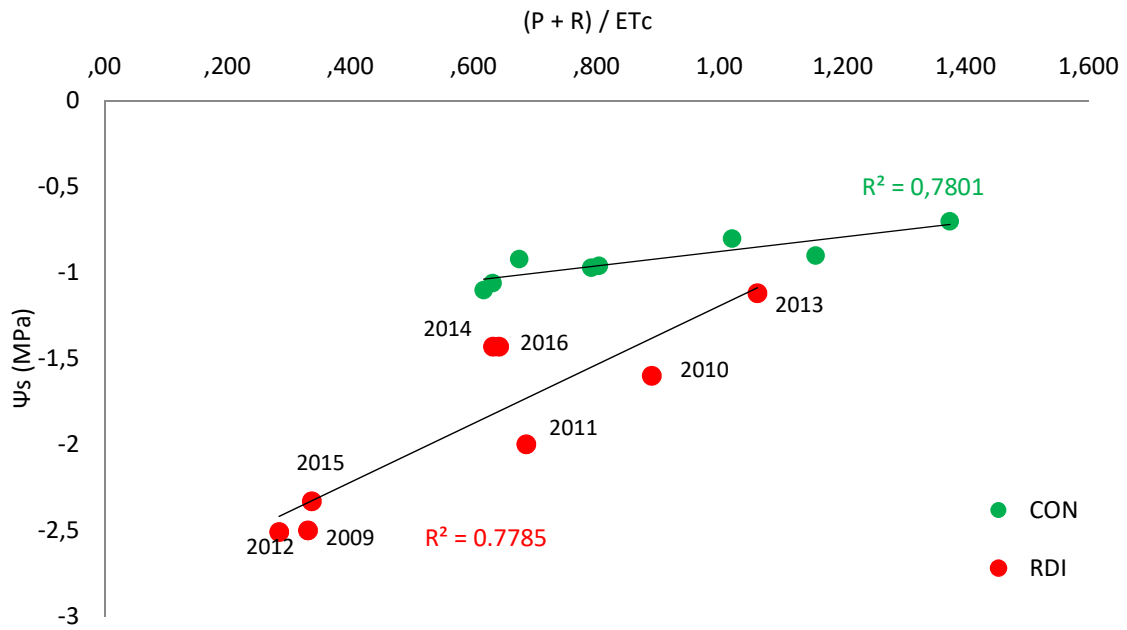


Figure 3.7. Relationship between minimum Ψ_s reached in the first deficit period and ET_c replacement expressed by $(P+R) / ET_c$; P is cumulative precipitation between previous year leaf fall to end of the second deficit period; R is the amount of irrigation applied during the same period as P; and ET_c is the cumulative evapotranspiration between bud burst and the end of the deficit period. Green squares represent the C treatment and red squares the RDI treatment.

3.6. Discussion

The fruit growth model described in the present work concurs with observations by Naor (2004) for mid-cycle cv. 'Black Amber' and by Díaz-Mula et al. (2008) for cv. 'Golden Globe.' However, given no detention in growth, the change between phases is difficult to determine by external examination of the fruit (Naschitz and Naor, 2005), while using the degree of stone-hardening as an indicator is complex (Rapoport et al., 2013). In the present study, in all the years studied the onset of stone-hardening occurred at around 600 DDAFB, coinciding with the change in dynamic of the fruit growth pattern at the end of the first growth phase. Moderate stress prior to the detention of fruit growth can result in increases in final fruit size (Chalmers et al., 1984, 1981; S. H. Li et al., 1989; Mitchell and Chalmers, 1982). Although 600 DDAFB could serve as a reference for the beginning of a regression in growth, spring rainfall and soil water reserves usually meet tree water requirements after bud burst and it is therefore not usual for water stress conditions to appear. In these conditions, the precise determination of this moment does not, therefore, appear to be critical. The second growth phase which begins at 1100 DDAFB -between June 13 and 29- signifies the beginning of a more stress-sensitive stage. The lack of a marked critical stage throughout fruit development suggests that sustained deficit irrigation could be an interesting option in this cv., as long as a correct Ψ_s threshold is applied.

When considering the application of RDI strategies, crop conditions like soil depth (Girona et al., 2003; J Girona et al., 2005; Lampinen et al., 1995) or evaporative demand are crucial. Consequently, it is important to establish guidelines adapted to local conditions which can be implemented by farmers (Naor, 2006). Using the relationship showed in Fig. 7, the amount of water that would have to be made available before suspending irrigation can be determined as a function of the year's rainfall. This could be used to avoid a sharp decrease in Ψ_s and to maintain a minimum Ψ_s value that would not compromise fruit calibre at harvest under these crop conditions. Likewise, this relationship could be used to establish whether a reduction in irrigation would be recommendable as opposed to its total suspension.

Although the fruit growth dynamic does not allow detection of the most appropriate time to re-establish the optimum water status of the tree, this work shows that final fruit weight depends more on the intensity of the stress applied than on the length of the deficit period. The relationship between minimum Ψ_s and the decrease in fruit size was similar between the first 4 years and the last 4 years of the study, despite a difference of around 30 days in the length of the water stress period. Thus, in 2010, when stress was slight and prolonged, there was a 14% loss of mass in the RDI fruits with respect to the C fruits, while in 2015, with a briefer but more intensive stress period, the loss of mass was 19.4%.

Intrigliolo and Castel (2004) recommend a minimum Ψ_s threshold value of -1.5 MPa at the end of the pit-hardening stage when applying RDI to Japanese plum crops, while Samperio et al. (2015a) recommend a value of -1.75 MPa, with a maximum decrease of 0.019 MPa day⁻¹, but assuming a loss of fruit size. However, this loss would be economically compensated by an increase in fruit number. In our case, there was a linear relationship between minimum Ψ_s and loss of weight in relation to C fruits (Fig. 5a), with Ψ_s values always remaining above -1.5 MPa. The same figure also shows a cloud of points which would seem to indicate that water stress was not the main determinant of final fruit weight, with Ψ_s values above -1.5 MPa. Intrigliolo and Castel (2006) used the -1.5 MPa value to re-establish irrigation in treatments after suspending irrigation in stage II, assuming losses in fruit size. However, their study used the mid-maturing

cv. 'Black Gold', whose fruit growth duration is markedly shorter than that of cv. 'Angeleno' but which produces a similar fruit fresh weight at harvest. The fresh weight accumulation rate must therefore be lower in cv. 'Angeleno' and this could explain the disparity between the results. As seen in Figure 5b, the stress integral during the deficit period had a smaller influence on the reduction in fruit weight than the severity of the stress. Consequently, in years in which the decrease in Ψ_s is slower, it is possible to prolong the stress period. In other words, the Ψ_s threshold (-1.5 MPa) can be used as a signal of when to re-establish irrigation in cases in which subsequent recovery can be rapid.

As previously mentioned, according to the fruit growth model for the absence of water stress described in the present study (Fig. 3a), it is possible to distinguish two groups of years. In one group (2009, 2010, 2013 and 2015), all the years followed the same growth pattern and produced the highest final fruit volumes (N-L). In the second group (2012, 2014 and 2016), fruit growth evolved similarly in all years during the first phase of growth, but differently in the second (L). Different final fruit volumes were obtained, but these were always lower than those of the first group. The two groups coincided in terms of initial rapid growth, but differed when the first slow phase began, with the L group falling behind the N-L group and the differences increasing even further during the subsequent phase. The "limitation" observed in 2014 and 2016 may have been due to a high load level with high assimilate competition between fruits at a time of high demand (Basile et al., 2002). In 2012, it may have been related to abnormally low temperatures during this initial phase. Other authors have reported the influence of spring temperatures on fruit development and final fruit size, with both high temperatures (Day et al., 2008; Lopez et al., 2011) and low ones (Tromp, 1997; Warrington, I. J., Fulton, T. A., Halligan, E. A., & De Silva, 1999) producing reductions in final fruit size. Knowing the type of year involved (L or N-L) at an early stage could prove useful for adapting the agronomic practices applied. These could include the level of fruit thinning, or even that of RDI, which would entail an additional restriction on final fruit calibre. As L group fruits would have different development rates in the second phase, intervention could be possible to improve final fruit calibre (Fig. 3.3a).

Another notable aspect of the fruit development pattern of this cultivar is that commercial maturity usually takes place when the growth slowdown of the second phase has started. It is therefore possible that stress sensitivity is lower in this second phase after growth slowdown commences. Such behaviour has also been observed in other cultivars belonging to this species (Díaz-Mula et al., 2008) and could be related to lower assimilate demand compared to other cultivars and stone fruit trees (Basile et al., 2002). This behaviour creates the possibility of initiating the deficit period before harvest, and continuing it postharvest. This could be used to modify the characteristics of the fruit or to increase water savings accompanied by a smaller loss of fruit calibre than in other cases (Gelly et al., 2003; Mercier et al., 2009; Naor et al., 2004, 2001). In a review conducted by Naor (2006), the existence of this slowdown phase was highlighted along with the importance of adapting irrigation strategies to a specific working context based on species, cultivar and crop conditions.

No carry-over effects of RDI on tree productivity were observed over the 8 years of the study. Although the RDI treatment produced more fruits than the C treatment in 7 of the 8 years studied, fruit size was smaller. This was due to a combination of a higher crop load and the high stress endured during the season; in no case was it due to a cumulative effect of previous years. The year-to-year variations in yield followed similar patterns for the two treatments. Figure 5b shows that the relationship between RGP and the stress integral was maintained over the last few years of the study, with no evidence to suggest a cumulative effect. Using the fruit growth model presented in Figure 3b as a reference, the limitation in fruit growth potential can be observed from

600 DDAFB onwards. In all the years studied, this was prior to the establishment of differences in water status between the C and RDI treatments. Moreover, and as can be seen in Figure 3b, there were no significant differences in fruit growth during this phase, which always began during the stress period. Intrigliolo et al. (2013) detected a loss of productivity in Japanese plum trees subjected to RDI over a period of 7 years, and Marsal et al. (2016) reported losses of fruit calibre compared to the C treatment after applying RDI for 3 consecutive years. Authors including Intrigliolo et al. (2013), working with plums, and Marsal et al. (2016), with peaches, have reported negative effects on fruit size after several years of RDI application. In the present study, although a loss of fruit calibre was observed in the RDI treatment, this effect did not increase year-to-year (Fig. 5b). This disparity between results may have been due to the different conditions under which the experiments were performed. These differences were not only agro-climatic, but also related to the timing of the onset and end of stage II, and to the harvest criteria. Unfortunately, such aspects are not usually described in detail in the Materials and Methods section of published papers. With respect to harvest criteria, the timing and form of harvesting (one or various picking sessions) could also have a significant impact on fruit size. This is especially true if harvesting is performed during a rapid growth stage, as occurs in peaches and other varieties of mid-maturing Japanese plums (Naor, 2004), or during a slow growth stage (Prieto et al., 2014). Intrigliolo and Castel (2010) proposed crop load reduction as a means of accelerating the recovery of orchards subjected to RDI. In this work, the years of low fruit load could have favoured the recovery of RDI trees and prevented premature exhaustion. Likewise, the post-harvest stress was brief and slight and so the pre- and post-harvest stress strategies applied would have had a smaller impact on the level of crop reserves.

The results obtained seem to indicate that, for this variety and under the crop conditions of this study, RDI is a strategy that is sustainable over the long term, provided that a slight loss of fruit calibre is acceptable. As observed by other authors (Naor, 2004; Samperio et al., 2015), an increase in crop load reduced fruit volume. In this work, a load level effect was observed for both treatments (Fig. 3.2), with this having a greater impact in the RDI treatment due to the water stress. However, according to Figure 2, it would also seem that when the load level is high the two treatments will tend to produce similar results. This contradicts other studies in which the effect of stress was noted to be more marked when loads are high (Naor, 2004), with thinning being considered a recommendable practice to reduce the effects of water stress and obtain a larger fruit size (Naschitz and Naor, 2005). This apparent discrepancy was due to the slight water stress suffered in the years with the highest load levels (2014 and 2016). The fruit calibre was lower for the RDI treatment than for the C treatment in 7 of the 8 years studied, with this being offset by an increase in the number of fruits. To maintain productivity and the value of the harvest, RDI strategies must be conditioned by a slight increase in the number of fruits but a decrease in fruit calibre or by a strict control of the number of fruits (thinning) and of the stress level.

Compensatory growth was not observed in any of the study years in the RDI fruits after re-establishment of the optimum water stress level following the period without irrigation. The differences in fruit fresh weight resulting from the period of water stress were evident in all years. In the case of cumulative fruit dry weight, moderate stress favoured more dry matter accumulation in the RDI fruits than in the C fruits. Only when severe stress was applied was the evolution of fruit dry weight similar in the two treatments. Fruit ripening is brought forward by RDI and the concentration of soluble solids increases because the loss of fruit fresh weight is accompanied by an increase in the proportion of dry weight, which affects the organoleptic evaluation of the fruits (Ebel et al., 1993; Gelly et al., 2004; Intrigliolo and Castel, 2010).

RDI strategies have led to water savings in numerous types of fruit trees. In the present study, its application over the 8 years of the study enabled a water saving of 39.2% (the four first years) and 16.8% (the second four years) compared to the C treatment, without any progressive decrease in final yield (fruit number or calibre). The year-to-year variations that were observed in terms of both fruit number and calibre affected both treatments.

3.7. Conclusions

In the light of the results of this work, we can affirm that the fruit development of Japanese plum cv. 'Angeleno' is described by a two-phase model in terms of DDAFB, which is consistent year-to-year. The first phase extends up to 1100 DDAFB, and the second from this point to harvest. This model allows prediction of potential final fruit size from early stages of growth and can be a guideline for thinning practices in high crop load level years.

The results obtained indicate that to avoid fruit size losses in deficit irrigation strategies it is important to avoid a Ψ s drop below -1.5 MPa and, especially a fast drop of that value, depending on the weather conditions each year. Moreover, it is necessary to adjust the tree crop load level at the precise moments of the start and finish of the deficit irrigation period.

For the climatic conditions of the experiment, no carry-over effects were observed after application of RDI strategies during 8 consecutive years. Therefore, this is a practice that could be adopted in the mid-long term.

The absence of a clearly marked phase of low sensitivity to water deficit differentiates the 'Angeleno' cultivar from other stone fruits. This indicates the need to explore other ways of applying RDI treatments. The RDI strategies must be adapted to a specific cultivar as well as different crop conditions. In this respect, the final growth slowdown prior to harvesting suggests the possibility of exploring the effects of applying water deficit during this period, or a light sustained deficit irrigation along fruit growth.

3.8. References

- Addoms, R.M., Nightingale, G.T., Blake, M.A., 1930. Development and ripening of peaches as correlated with physical characteristics, chemical composition, and histological structure of the fruit flesh.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56, FAO-Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome (<http://www.fao.org/docrep>)
- ARPAV (2000), La caratterizzazione climatica della Regione Veneto, Quade. *Geophysics* 156, 178.
- Austin, P.T., Hall, A.J., Gandar, P.W., Warrington, I.J., Fulton, T.A., Halligan, E.A., 1999. A compartment model of the effect of early-season temperatures on potential size and growth of 'Delicious' apple fruits. *Ann. Bot.* 83, 129–143.
- Baggiolini, M., 1952. Les stades repères des arbres fruitiers a noyau. *Rom. Agric. Vitic. Arboric* 8, 3–4.
- Basile, B., Mariscal, M.J., Day, K.R., Johnson, R.S., DeJong, T.M., 2002. Japanese plum (*Prunus salicina* L.) fruit growth: Seasonal pattern of source/sink limitations. *J. Am. Pomol. Soc.* 56, 86–93.
- Bergh, O., 1990. Effect of temperature during the first 42 days following full bloom on apple fruit growth and size at harvest. *South African J. Plant Soil* 7, 11–18.
- Caspari, H.W., Behboudian, M.H., Chalmers, D.J., 1994. Water Use , Growth , and Fruit Yield of ' Hosui ' Asian Pears under Deficit Irrigation. *J. AMER. SOC. HORT. SCI* 119, 383–388.
- Chalmers, D.J., Mitchell, P.D., Jerie, P.H., 1984. The relation between irrigation, growth and productivity of peach trees, in: *International Conference on Peach Growing* 173. pp. 283–288.
- Chalmers, D.J., Mitchell, P.D., Van Heek, L., 1981. Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density, and summer pruning. *J. Journal-American Soc. Hortic. Sci. (USA)*. 106, 307–3012.
- Change, C., 2013. *The Physical Science Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change.*
- Day, K., Lopez, G., Dejong, T., 2008. Using Growing Degree Hours Accumulated Thirty Days after Bloom to Predict Peach and Nectarine Harvest Date. *Acta Hortic.* 803, 163–166.
- Díaz-Mula, H.M., Zapata, P.J., Guillén, F., Castillo, S., Martínez-Romero, D., Valero, D., Serrano, M., Díaz-Mula, H.M., Zapata, P.J., Guillén, F., Castillo, S., Martínez-Romero, D., Valero, D., Serrano, M., 2008. Changes in physicochemical and nutritive parameters and bioactive compounds during development and on-tree ripening of eight plum cultivars: A comparative study. *J. Sci. Food Agric.* 88, 2499–2507. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3370>
- Ebel, R.C., Proebsting, E.L., Patterson, M.E., 1993. Regulated deficit irrigation may alter apple maturity, quality, and storage life. *HortScience* 28, 141–143.
- Fereres, E., Soriano, M.A.M.A.M.A., 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *J. Exp. Bot.* 58, 147–159. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl165>
- Gelly, M., Recasens, I., Girona, J., Mata, M., Arbones, A., Rufat, J., Marsal, J., 2004. Effects of stage II and postharvest deficit irrigation on peach quality during maturation and after cold storage. *J. Sci. Food Agric.* 84, 561–568.

- Gelly, M., Recasens, I., Mata, M., Arbones, A., Rufat, J., Girona, J., Marsal, J., 2003. Effects of water deficit during stage II of peach fruit development and postharvest on fruit quality and ethylene production. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 78, 324–330.
- Gennai, C., Prieto, M.H.H., Blanco-Cipollone, F., Gucci, R., Rapoport, H.F.H.F., 2015. The effect of irrigation regime on histological parameters of Japanese plum fruits ('Angeleno'), in: VIII International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops 1150. pp. 233–238. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1150.32>
- Girona, J., Gelly, M., Mata, M., Arbones, A., Rufat, J., Marsal, J., 2005. Peach tree response to single and combined deficit irrigation regimes in deep soils. *Agric. Water Manag.* 72, 97–108.
- Girona, J., Marsal, J., Arbones, A., Dejong, T.M., 2004. A comparison of the combined effect of water stress and crop load on fruit growth during different phenological stages in young peach trees. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 79, 308–315.
- Girona, J., Marsal, J., Mata, M., Arbonés, A., Mata, A., 2001. The combined effect of fruit load and water stress in different peach fruit growth stages (*Prunus persica* L.). *Acta Hort.* 149–152.
- Girona, J., Mata, M., Arbonès, A., Alegre, S., Rufat, J., Marsal, J., 2003. Peach tree response to single and combined regulated deficit irrigation regimes under shallow soils. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 128, 432–440.
- Girona, J., Ruiz-Sánchez, M.C., Goldhamer, D., Johnson, S., DeJong, T., 1990. Late maturing peach response to controlled deficit irrigation: seasonal and diurnal pattern of fruit growth, plant and soil water status, CO₂ uptake and yield 2 years results. *XXIII Int. Hort. Cong. Firezen, Italy* 1, 284.
- Gomis, J. i, 1989. Physiological, growth and production responses of late maturing peach (*Prunus persica* L. Batsch) to controlled deficit irrigation.
- Guerra Velo, M., 2011. Polinización y cuajado en ciruelo japonés.
- Hammami, S.B.M., Costagli, G., Rapoport, H.F., 2013. Cell and tissue dynamics of olive endocarp sclerification vary according to water availability. *Physiol. Plant.* 149, 571–582.
- Handley, D.F., Johnson, R., Handley, D.F., Johnson, R.S., 2000. Late summer irrigation of water-stressed peach trees reduces fruit doubles and deep sutures. *HortScience* 35, 771.
- Harada, T., Kurahashi, W., Yanai, M., Wakasa, Y., Satoh, T., 2005. Involvement of cell proliferation and cell enlargement in increasing the fruit size of *Malus* species. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 105, 447–456. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2005.02.006>
- Hsiao, T.C., 1990. Measurements of plant water status. *Agronomy* 30, 243–279.
- Intrigliolo, D.S., Ballester, C., Castel, J.R., 2013. Carry-over effects of deficit irrigation applied over seven seasons in a developing Japanese plum orchard. *Agric. Water Manag.* 128, 13–18. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.06.009>
- Intrigliolo, D.S., Castel, J.R., 2010. Response of plum trees to deficit irrigation under two crop levels: Tree growth, yield and fruit quality. *Irrig. Sci.* 28, 525–534. <https://doi.org/10.1007/s00271-010-0212-x>
- Intrigliolo, D.S., Castel, J.R., 2006. Usefulness of diurnal trunk shrinkage as a water stress indicator in plum trees. *Tree Physiol.* 26, 303–311. <https://doi.org/10.1093/treephys/26.3.303>
- Intrigliolo, D.S., Castel, J.R., 2004. Continuous measurement of plant and soil water status for irrigation scheduling in plum. *Irrig. Sci.* 23, 93–102. <https://doi.org/10.1007/s00271-004-0097-7>

Johnson, R.S., Handley, D.F., Dejong, T.M., 1992. Long-term Response of Early Maturing Peach Trees to Postharvest Water Deficits. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 117, 881–886.

Khan, A.S., 2016. Differences in fruit growth and ripening of early-, mid- and late-season maturing Japanese plum cultivars. *Fruits* 71, 329–338. <https://doi.org/10.1051/fruits/2016023>

Lampinen, B.D., Shackel, K.A., Southwick, S.M., Olson, B., Yeager, J.T., Goldhamer, D., 1995. Sensitivity of yield and fruit quality of French prune to water deprivation at different fruit growth stages. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 120, 139–147.

Larson, K., Dejong, T.M.T., Johnson, R.S.R., 1988. Physiological and growth responses of mature peach trees to postharvest water stress. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 113, 296–300.

Li, S., Huguet, J., Schochj, P.G., Orlando, P., 1989. Response of peach tree growth and cropping to soil water deficit at various phenological stages of fruit development. *J. Hortic. Sci.* 64, 541–552. <https://doi.org/10.1080/14620316.1989.11515989>

Lopez, G., Day, K.R., De Jong, T.M., 2011. Why do early high spring temperatures reduce peach fruit size and yield at harvest?, in: *Acta Horticulturae*. pp. 1055–1062. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.903.147>

Marsal, J., Casadesus, J., Lopez, G., Mata, M., Bellvert, J., Girona, J., 2016. Sustainability of regulated deficit irrigation in a mid-maturing peach cultivar. *Irrig. Sci.* 34, 201–208. <https://doi.org/10.1007/s00271-016-0498-4>

Mercier, V., Bussi, C., Lescourret, F., Génard, M., 2009. Effects of different irrigation regimes applied during the final stage of rapid growth on an early maturing peach cultivar. *Irrig. Sci.* 27, 297–306. <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0146-3>

Mills, T.M., Behboudian, M.H., Clothier, B.E., 1997. The diurnal and seasonal water relations, and composition, of “Braeburn” apple fruit under reduced plant water status. *Plant Sci.* 126, 145–154. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(97\)00105-2](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(97)00105-2)

Mitchell, P.D., Chalmers, D.J., 1982. The effect of reduced water supply on peach tree growth and yields. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 107, 853–856.

Mitchell, P.D., Jerie, P.H., Chalmers, D.J., 1984. The effects of regulated water deficits on pear tree growth, flowering, fruit growth, and yield [Regulated deficit irrigation, plant physiology, Australia]. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*

Myers, B.J., 1988. Water stress integral--a link between short-term stress and long-term growth. *Tree Physiol.* 4, 315–323. <https://doi.org/10.1093/treephys/4.4.315>

Naor, A., 2006. Irrigation scheduling of peach - Deficit irrigation at different phenological stages and water stress assessment, in: *Acta Horticulturae*. pp. 339–349.

Naor, A., 2004. The interactions of soil- and stem-water potentials with crop level, fruit size and stomatal conductance of field-grown “Black Amber” Japanese plum. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 79, 273–280. <https://doi.org/10.1080/14620316.2004.11511760>

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. Amer. Soc. Hort. Sci.* 126, 140–143.

Naor, A., Peres, M., Greenblat, Y., Gal, Y., Ben Arie, R., 2004. Effects of pre-harvest irrigation regime and crop level on yield, fruit size distribution and fruit quality of field-grown “Black Amber” Japanese plum. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 79, 281–288. <https://doi.org/10.1080/14620316.2004.11511761>

Naor, A., Stern, R., Peres, M., Greenblat, Y., Gal, Y., Flaishman, M.A., 2005. Timing and severity of postharvest water stress affect following-year productivity and fruit quality of field-grown "Snow Queen" nectarine. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 130, 806–812.

Naschitz, S., Naor, A., 2005. The effect of crop load on tree water consumption of "Golden Delicious" apples in relation to fruit size: An operative model. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 130, 7–11.

Ojeda, H., Andary, C., Kraeva, E., Carbonneau, A., Deloire, A., 2002. Influence of pre- and postveraison water deficit on synthesis and concentration of skin phenolic compounds during berry growth of *Vitis vinifera* cv. Shiraz. *Am. J. Enol. Vitic.* 53, 261–267.

Olmstead, J.W., Iezzoni, A.F., Whiting, M.D., 2007. Genotypic Differences in Sweet Cherry Fruit Size are Primarily a Function of Cell Number. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 132, 697–703.

Pavel, E.W., DeJong, T.M., 1993. Source- and Sink-limited Growth Periods of Developing Peach Fruits Indicated by Relative Growth Rate Analysis. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 118, 820–824.

Pérez-Pastor, A., Domingo, R., Torrecillas, A., Ruiz-Sánchez, M.C., 2009. Response of apricot trees to deficit irrigation strategies. *Irrig. Sci.* 27, 231–242. <https://doi.org/10.1007/s00271-008-0136-x>

Rapoport, H.F., Pérez-López, D., Hammami, S.B.M., Agüera, J., Moriana, A., 2013. Fruit pit hardening: Physical measurement during olive fruit growth. *Ann. Appl. Biol.* 163, 200–208. <https://doi.org/10.1111/aab.12046>

Redarex, 2009. Red de Asesoramiento al regante extremadura. URL <http://redarexplus.gobex.es/RedarexPlus/> (accessed 1.1.09).

Ruiz-Sánchez, M., Girona, J., 1995. Investigaciones sobre riego deficitario controlado en melocotonero, in: *Riego Deficitario Controlado En Frutales*. pp. 69–95.

Samperio, A., Moñino, M.J., Vivas, A., Blanco-Cipollone, F., Martín, A.G., Prieto, M.H., 2015a. Effect of deficit irrigation during stage II and post-harvest on tree water status, vegetative growth, yield and economic assessment in 'Angeleno' Japanese plum. *Agric. Water Manag.* 158, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.04.008>

Samperio, A., Prieto, M.H., Blanco-Cipollone, F., Vivas, A., Moñino, M.J., 2015b. Effects of post-harvest deficit irrigation in "Red Beaut" Japanese plum: Tree water status, vegetative growth, fruit yield, quality and economic return. *Agric. Water Manag.* 150, 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.12.006>

Schroeder, C.A., Sci, C.S.-P.A.S.H., 1953, U., 1953. Growth and Development of the Fuerte Avocado Fruit. 209.143.153.251 61, 103–109.

Scorzal, R., May, L.G., Purnell, B., Upchurch, B., 1991. Differences in Number and Area of Mesocarp Cells between Small- and Large-fruited Peach Cultivars. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 116, 861–864.

Soil Survey Staff, 1999. Soil Survey Staff 1999, Soil Taxonomy A basic system of soil classification for making and Agricultural Handbook 436; Natural Resources. Wiley Online Libr. <https://doi.org/10.1079/SUM200057>

Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., Raes, D., 2012. Crop yield response to water. fao Rome.

Tabuenca, M.C., Herreros, J., 1966. Influence of the temperature on the time of blossoming in fruit trees. *An. Aula Dei* 8, 115–153.

Torrecillas, A., Domingo, R., Galego, R., Ruiz-Sánchez, M.C., 2000. Apricot tree response to withholding irrigation at different phenological periods. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 85, 201–215. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(99\)00146-6](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(99)00146-6)

Tromp, J., 1997. Maturity of apple cv. Elstar as affected by temperature during a six-week period following bloom. *J. Hortic. Sci.* 72, 811–819. <https://doi.org/10.1080/14620316.1997.11515575>

Turner, N.C., 1981. Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. *Plant Soil* 58, 339–366. <https://doi.org/10.1007/BF02180062>


Warrington, I., ... T.F.-J. of the, 1999, U., 1999. Apple fruit growth and maturity are affected by early season temperatures. journal.ashspublications.org.

Yamaguchi, M., Haji, T., Miyake, M., Yaegaki, H., 2002. Varietal Differences in Cell Division and Enlargement Periods during Peach (*Prunus persica* Batsch) Fruit Development. *Engei Gakkai zasshi* 71, 155–163. <https://doi.org/10.2503/jjshs.71.155>

Zapata, M., Segura, P., 1995. Riego deficitario controlado. *Fundamentos y Aplicaciones*.

Zhang, C., Tanabe, K., Wang, S., Tamura, F., Yoshida, A., Matsumoto, K., 2006. The impact of cell division and cell enlargement on the evolution of fruit size in *Pyrus pyrifolia*. *Ann. Bot.* 98, 537–543. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl144>

Zuzunaga, M., Serrano, M., Martinez-Romero, D., Valero, D., Riquelme, F., 2001. Comparative Study of Two Plum (*Prunus salicina* Lindl.) Cultivars during Growth and Ripening. *Food Sci. Technol. Int.* 7, 123–130. <https://doi.org/10.1177/108201320100700204>



CAPÍTULO 4
EVALUACIÓN DE DIFERENTES ESTRATEGIAS
DE RIEGO DEFICITARIO EN EL CULTIVAR DE
CICLO LARGO DE CIRUELO JAPONÉS
'ANGELENO'.

4. CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN DE DIFERENTES ESTRATEGIAS DE RIEGO DEFICITARIO EN EL CULTIVAR DE CICLO LARGO DE CIRUELO JAPONÉS 'ANGELENO'.

4.1. Resumen

El estudio de la evolución estacional del crecimiento del fruto en el cv. de ciruelo japonés Angeleno (Capítulo 3) mostró una ralentización en el crecimiento del mismo previo al momento de cosecha, señalando este periodo como una posible etapa de menor sensibilidad al déficit hídrico. En base a estos resultados, en este capítulo se planteó evaluar una estrategia de Riego Deficitario Controlado adaptada a este patrón de crecimiento comparándola con dos estrategias previamente establecidas. El ensayo de campo realizado a lo largo de tres años en este mismo cv. consistió en tres estrategias de riego: una estrategia control (CON), aportando con el riego el agua necesaria para cubrir necesidades de evapotranspiración del cultivo, una estrategia de riego deficitario con dos periodos diferenciados: uno en pre y otro en postcosecha (RDI), eliminando los aportes de riego en un momento intermedio de crecimiento del fruto y reduciéndolos al 30% en postcosecha, y una segunda estrategia de riego deficitario (RDP) con un único periodo deficitario que se inició antes de la cosecha, prolongándose después de la misma, manteniendo el potencial hídrico de tronco por encima de los -1.4MPa . El ahorro de agua de RDP respecto al CON fue de un 24% para el conjunto de los tres años, sin afectar a la calidad ni a la producción final. El tratamiento RDI, con un ahorro del 18% respecto a CON, mantuvo una producción similar a este, con mayor número de frutos por árbol y menor tamaño de los mismos. La acidez y firmeza finales no se vieron influenciados por las estrategias de riego. Hubo diferencias en el Contenido de Sólidos Solubles el año con poca carga, siendo los valores de RDI los más altos. La saturación del color de la piel de los frutos CON fue mayor y no hubo diferencias en el tono. En los tratamientos deficitarios se observó una reducción significativa tanto del vigor de los árboles como de la madera de poda en ambos con respecto al CON. A la vista de estos resultados, se puede afirmar que la estrategia de riego propuesta ofrece ventajas frente al RDI y CON en cuanto al ahorro de agua y con mayores calibres que RDI.

PALABRAS CLAVE: estrés hídrico, calidad de la fruta, poda, *Prunus salicina*, control vegetativo

4.2. Abstract

The study of the seasonal evolution of fruit growth pattern in the Japanese plum cv. Angeleno (Chapter 3) revealed a slowdown in fruit growth prior to harvest, showing this period as a possible stage less sensitive to water deficit. Based on these results, in this chapter it was proposed to evaluate a Regulated Deficit Irrigation strategy adapted to this growth pattern by comparing it with two previously established strategies. The assay was carried out over three years in this same cv. consisted of three irrigation strategies: a Control strategy (CON), providing the irrigation water necessary to cover the evapotranspiration of the crop, a Regulated Deficit Irrigation strategy (RDI) with two separate phases: one at preharvest, where irrigation was stopped in an intermediate growth phase development and a second on postharvest reducing until 30% of Etc at postharvest. A Regulated Deficit Preharvest Strategy (RDP) was set up with a just one deficit period, it started before harvest throughout the end of the irrigation, maintaining the stem water potential over MPa. The water savings of the RDP strategy in relation to CON were 24% for the total of the three years, with no penalty over quality or final yield. The RDI strategy, with a water saving of 18% in relation to CON, keep a similar yield than it, with large number of fruits per tree and smaller final size. Acidity and firmness have not been affected because of the deficit strategies. There were differences in the Soluble Solid Content the year with low crop load, being the higher values the RDI strategy. The skin colour saturation of the CON fruits was higher and there were no differences regarding tone. In the deficit strategies a significative reduction in tree vigour was observed as well as the wood pruning, both in relation with CON treatment. At sight of the results, the irrigation strategy proposed offers benefits against RDI and CON strategies, in regarding water savings and with larger final fruit sizes than RDI

Key words: water stress, fruit quality, pruning, *Prunus salicina*, vegetative control.

4.3. Introducción

La agricultura sostenible es un objetivo clave en la investigación agrícola. En agronomía, a pesar de que la productividad y la calidad del rendimiento son objetivos importantes, desde hace décadas, cada vez más los costes de producción desde un enfoque tanto económico, como medio ambiental juegan un papel fundamental en la rentabilidad de las explotaciones. En este contexto, la gestión eficiente de los recursos hídricos implica ambos aspectos (Geerts y Raes, 2009). Por otra parte, el agua es un recurso escaso, por el que compiten diferentes sectores y, aunque la agricultura de regadío es la principal consumidora, no es el sector con mayor capacidad de pago por su utilización. Esta competencia por el agua se ha visto agravada por el aumento de la demanda por parte de las nuevas áreas cultivadas y su dificultad para abastecerlas, así como por los períodos de sequía más frecuentes que generan incertidumbre en las programaciones de riego (Fereris y González-Dugo, 2009). Entre las consecuencias del Cambio Climático, en las zonas mediterráneas del sur de Europa se observa un retraso en las precipitaciones otoñales que agravan las sequías y puede afectar de forma más severa a los cultivos permanentes. Las proyecciones climáticas en el área mediterránea a corto- medio plazo sugieren más eventos con temperaturas muy elevadas y de mayor duración, menor pluviometría, pero sobre todo, con un desplazamiento de la pluviometría de la primavera al otoño (Aragón–Durand y cols., 2018), lo que aumentaría las restricciones hídricas.

En frutales de hoja caduca, una vez recolectado el fruto y hasta la caída de hoja, aunque las necesidades hídricas van disminuyendo, sigue siendo un periodo en el que se dan lugar procesos fisiológicos que van a afectar a la producción del siguiente año (Glew y cols., 2003; Holzapfel y cols., 2006). Por tanto, si las previsiones son de un aumento en la frecuencia e intensidad de los periodos de sequía, junto con años más calurosos, la estación otoñal cobrará mayor importancia en la demanda de agua hasta la caída de hojas del árbol, tanto en los frutales de maduración temprana como en los de maduración tardía. El período postcosecha ha sido identificado como un período menos sensible para un estrés hídrico en frutas de hueso de forma que, un estrés moderado puede evitar brotaciones indeseables y favorecer la entrada en reposo del árbol sin perjudicar la productividad (Crisosto y cols., 1994; Johnson y Handley, 2000; Larson y cols., 1988) incluso en una aplicación a largo plazo (Johnson y cols., 1992). Sin embargo, un estrés severo en este período puede producir pérdidas en la cosecha debido a: reducción del número de flores o aumento de los problemas de cuajado del fruto, como se observó en albaricoquero (Brown, 1953; Ruiz-Sanchez y cols., 1999; Torrecillas y cols., 2000; Uriu y cols., 1964) melocotonero (Girona y cols., 2003; Naor, 2006) o ciruelo japonés (Crisosto y cols., 1994).

Las técnicas de riego deficitario (DI de sus siglas en inglés) han sido estudiadas en profundidad en una amplia gama de cultivos, como estrategia para alcanzar los objetivos productivos con un menor consumo hídrico (Fereris y Soriano, 2007; Maatallah y cols., 2015; Ripoll y cols., 2014; Ruiz-Sanchez y cols., 2010). Paralelamente, se pueden conseguir otros beneficios adicionales como el control del vigor en plantaciones intensivas o superintensivas y/o la mejora en la calidad de los frutos (Behboudian y Mills, 1997; C. H. Crisosto y cols., 1994; Mpelasoka y cols., 2000), lo que implica un aumento de la rentabilidad económica de las plantaciones.

Para el diseño de estrategias de riego deficitario es fundamental conocer la sensibilidad del cultivo frente al déficit hídrico en los diferentes estados fenológicos, discriminando entre los periodos más o menos sensibles, estableciendo los niveles de estrés soportables en cada caso. De este análisis, surgen diferentes propuestas como son: el Riego por Déficit Controlado (RDI de sus siglas en inglés) (Chalmers y cols., 1981; Mitchell y Chalmers, 1982), Riego Deficitario Sostenido (SDI de sus siglas en inglés) (Sadras y Connor, 1991; Soriano, 2001) o Riego Parcial de Raíces (PRD de sus siglas en inglés) (Dodd, 2005; Dos Santos y cols., 2003; Girona y cols., 2006; McCarthy y cols., 2005; Passioura y Gardner, 1990).

De acuerdo con el modelo de tres etapas para el desarrollo del fruto en frutales de hueso (Addoms y cols., 1930), en la etapa intermedia se produce una ralentización del crecimiento, que coincide con el endurecimiento del hueso. Un déficit hídrico moderado en este período puede no afectar el tamaño final del fruto, pero sí el crecimiento vegetativo (Gelly y cols., 2003; Naor y cols., 2005). A pesar de ello, la identificación de esta etapa no siempre es clara (Samperio y cols., 2015), y tiene cierta variabilidad interanual (Girona y cols., 2003; Naor, 2006), pudiendo provocar reducciones en el calibre del fruto debido a situaciones de estrés excesivo (en tiempo o intensidad) como las que se observaron en el melocotonero (Girona y cols., 2001; Naor y cols., 2005) y nectarina (Naor y cols., 2005). En los cultivares de ciclo corto, esta etapa prácticamente no existe, por lo que las estrategias de DI se centran en la etapa postcosecha. Desde que aparecieron los primeros trabajos sobre Riego Deficitario Controlado en frutales, diferentes autores han tratado de definir tanto el momento más adecuado para inducir estrés hídrico, como el efecto de la intensidad del estrés en diferentes especies y cultivares, prestando siempre especial importancia al efecto sobre la producción y sus componentes (número de frutos y calibre) (Behboudian y Mills, 1997; Fereres y Soriano, 2007; Junquera y cols., 2016; Naor, 2006; Ruiz-Sanchez y cols., 2010); (Intrigliolo y Castel, 2010; Samperio y cols., 2015). Sin embargo, es mucho menor el número de trabajos que hacen referencia al efecto sobre las características de la fruta, aunque en otros cultivos como el viñedo, el impacto sobre la calidad ha sido siempre un aspecto clave en el análisis de cualquier estrategia de riego. En este sentido, en viticultura, se reconoce el potencial de las estrategias de riego deficitario para mejorar las características de uva para vinificación.

El cultivar de ciruelo japonés 'Angelino' surge de un cruce interespecífico con ancestros desconocidos, que le confieren características particulares, diferentes a las de otras frutas de hueso e incluso a otros cultivares de la misma especie (Guerra Velo, 2011). Se trata de un cultivar tardío con un periodo entre floración y recolección muy prolongado de más de 6 meses para las condiciones de cultivo de Extremadura. Un conocimiento más profundo sobre el desarrollo del fruto en este cultivar ha mostrado la dificultad de establecer un periodo definido de menor sensibilidad al estrés hídrico con el fruto presente en el árbol (Samperio y cols., 2015), teniendo más importancia la velocidad a la que se establece el estrés hídrico y la intensidad, sobre el calibre final de los frutos (Capítulo 3). Por otra parte, se ha observado una reducción en la tasa de crecimiento del fruto próximo a recolección, que llega a ser una parada total de crecimiento en algunos años. Esta información abre la puerta al proponer nuevas estrategias de estrés, mejor adaptadas a este cultivar.

La producción frutal ha estado estrechamente ligada al aspecto externo de la fruta, especialmente el calibre, mientras que otros parámetros como el contenido de sólidos solubles o la firmeza han sido utilizados como parámetros para establecer la fecha de cosecha. La importancia del calibre de la fruta ha justificado, en algunos casos la realización de prácticas costosas como el aclareo. Sin embargo, existe la tendencia de poner en valor otros aspectos como los parámetros organolépticos de los frutos cuando llegan al consumidor, lo que implica controlar el comportamiento postcosecha, e incluso modificar las prácticas de cultivo. En este contexto, las prácticas sostenibles y su impacto sobre la calidad de la fruta adquieren importancia.

Las frutas de hueso desarrollan las características organolépticas en la última fase de desarrollo de la fruta, como se ha descrito en melocotonero (Berman y Dejong, 1996; Chalmers y Wilson, 1978), nectarina (Naor y cols., 2001) o ciruelo japonés (Díaz-Mula y cols., 2008). Estudios previos en cultivares de ciruelo japonés de ciclo medio indican que un estrés en un período cercano a la cosecha causa reducciones en el tamaño del fruto, así como en el vigor vegetativo (Intrigliolo y Castel, 2005, 2004; Naor, 2004), manteniendo una calidad de la fruta similar (Intrigliolo y cols., 2013), aunque un riego excesivo causa reducciones en el contenido de sólidos solubles (Naor y cols., 2004). Los frutos del ciruelo japonés son muy perecederos (Abdi y cols., 1997), siendo esencial conocer el comportamiento agronómico del fruto durante el período previo a la cosecha, con el fin de asegurar una calidad final óptima del mismo (Mitchell y cols., 1995; Taylor y cols., 1993), aunque existe algún cultivar como Angeleno con buena aptitud para conservación en periodos prolongados.

El objetivo de este trabajo es evaluar una nueva Estrategia de Riego Deficitario Controlado propuesta adaptada al cv. de ciruelo japonés de ciclo largo Angeleno, en la que el periodo de déficit hídrico se adapta al patrón particular de desarrollo de esta variedad, comparándola con la estrategia de RDC propuesta para otros frutales de hueso y cultivares de esta misma especie, así como con un tratamiento regado de acuerdo a sus necesidades hídricas. Esta evaluación se refiere, tanto a los aspectos ecofisiológicos del cultivo, como a las características de los frutos en cosecha.

4.4. Materiales y métodos

4.4.1. Características de la plantación y tratamientos de riego

El estudio se realizó en los años 2014, 2015 y 2016 en una parcela experimental situada en Badajoz (España) en el centro de investigación CICYTEX-La Orden. La plantación fue establecida en 2005 con ciruelo japonés cv 'Angeleno' injertada sobre patrón Mariana 2624' y con formación tipo vaso abierto con 4-5 ramas por árbol, con marco de 6 x 4 m en orientación este-oeste. A lo largo de la plantación, se situaron polinizadores de los cvs. 'Fortune' y 'Larry Ann' en cantidad suficiente para asegurar una correcta polinización, además de colmenas de abejas en el periodo de floración. Todas las prácticas culturales se realizaron siguiendo criterios comerciales. El sistema de riego fue por goteo, con una línea por fila de árboles, con goteros separados en 1 m a lo largo de la línea de 4 l h⁻¹.

El clima es mediterráneo con influencia atlántica, caracterizado por veranos calurosos y secos e inviernos cálidos. La precipitación media y la Evapotranspiración de Referencia (ET_o) entre 2010-2016 fue de 487 y 1278 mm respectivamente. El suelo (tipo Alfixol) presentó una textura franco-limosa con 40,4% de arena, 19,4% arcilla y un 40,2% de limo. El contenido de agua del suelo a capacidad de campo (-33kPa) y punto de marchitamiento permanente (-1500 kPa) fue de 0,261 cm³ cm⁻³ y 0,123 cm³ cm⁻³ respectivamente.

En el año anterior, a lo largo del período postcosecha en 2013, todos los árboles fueron regados cubriendo la demanda evapotranspirativa, con el fin de eliminar las diferencias potenciales causadas por los anteriores tratamientos de riego deficitario en los mismos árboles. La demanda evapotranspirativa del cultivo (ET_c) se determinó utilizando un balance hídrico del suelo, de acuerdo con la ley de conservación de masas como:

$$ET_c, WB = P + I - D - R - \Delta S$$

$$\Delta S = \sum (\theta_i - \theta_{i-1}) z$$

Donde P es la precipitación efectiva (mm), I es el riego (mm), D es el drenaje (mm), R es la escorrentía (mm), ΔS es el cambio en el almacenamiento de agua del suelo entre dos fechas consecutivas (mm), θ es el contenido de agua del suelo (mm), y z es la profundidad de cada capa de suelo (mm). Los valores de R se consideraron insignificantes porque la plantación estaba nivelada y no se observó escorrentía. D se consideró nulo a la profundidad máxima observada (1,8 m). Los valores de θ_s se obtuvieron a partir de mediciones con sonda de neutrones (CPN 503DR Hydroprobe, CPN International, Inc., Port Chicago Highway, CA, USA), realizadas una vez por semana, durante toda la temporada de riego en la zona radicular. En el año anterior, las lecturas de la sonda de neutrones se calibraron en la misma plantación para obtener el contenido volumétrico de agua y se seleccionaron las posiciones de los tubos de acceso más representativas del movimiento de agua en el suelo (Samperio y cols., 2014). Se seleccionó un árbol en dos parcelas experimentales para cada tratamiento y en cada uno de ellos se instalaron cuatro tubos de acceso de la siguiente manera: dos tubos a 1,5 m del árbol a ambos lados perpendiculares a las líneas de goteo; los otros dos en dos puntos situados a 2 m del árbol siguiendo la línea de goteo a 0,5 m a cada lado de la línea de goteo; cada uno de los tubos tenía una profundidad de 2,1 m y las mediciones se realizaron a intervalos de 0,3 m desde 0,3 a 1,80 m..

Para establecer los diferentes tratamientos de riego, se consideraron tres períodos: Período 1 (P1): entre 28-40 días de duración y coincidiendo con una desaceleración en el desarrollo del crecimiento del fruto; Período 2 (P2) entre 19-28 días antes de la cosecha hasta recolección y Período 3 (P3) desde la cosecha hasta el final del riego (Fig. 4.1)

Inicio de riego	Recolección	Fin de riego
TOTAL		
2014, 212 días		
2015, 184 días		
2016, 170 días		
P1	P2	P3
2014, 28 días	2014, 22 días	2014, 36 días
2015, 35 días	2015, 19 días	2015, 42 días
2016, 40 días	2016, 28 días	2016, 30 días

Figura 4.1 Duración, en días, de cada periodo de riego en los tres años de ensayo. El tratamiento CON abarca el periodo “TOTAL” desde inicio a fin de riego, mientras que el tratamiento RDI se compone de P1+P3 y el tratamiento RDP de los periodos P2 + P3

Los tratamientos de riego realizados fueron: un control (CON) que fue regado para cubrir el 100% de la ETc estimada. Riego Deficitario Controlado (RDI): regado como CON, excepto en el periodo P1 que se suprimió el riego (excepto fertirrigación), y una aplicación de 30% ETc durante P3. El tercer tratamiento fue un Riego Deficitario Precosecha (PDR) regado como CON excepto en P2 y P3, donde el suministro de agua fue suficiente para mantener un estado hídrico de los árboles por encima de -1,4 MPa. Durante el experimento se mantuvieron los mismos tratamientos de riego, y la cantidad total de agua aplicada fue controlada por caudalímetros digitales. El diseño del ensayo era de bloques al azar con 4 repeticiones. Cada bloque estaba formado por cuatro filas consecutivas con cuatro árboles. La parcela elemental tenía un total de 16 árboles, los cuatro árboles interiores de las dos líneas centrales fueron los árboles donde se efectuaron las medidas, siendo el resto árboles guarda.

4.4.2. Estado hídrico de planta

El potencial hídrico del tallo (Ψ_s) se midió al mediodía solar en dos hojas por árbol en dos árboles por bloque, seleccionando un total de 16 hojas sombreadas por tratamiento en las partes inferiores del árbol. Se cubrieron con papel de aluminio por lo menos 2 horas antes de que se introdujeran en una cámara de presión (Modelo 3005; Soil Moisture, Santa Bárbara, CA, EE.UU.), midiéndose siguiendo el procedimiento descrito por Turner, (1981).

La integral de estrés hídrico se calculó cada año en cada tratamiento siguiendo lo descrito por Myers, (1988) :

$$\Sigma\Psi_s = \Sigma(\Psi_{si,i+1-c})n \text{ (MPa*day)}$$

Donde $\Psi_{si,i+1-c}$ son los valores de potencial hídrico desde el inicio del riego hasta la cosecha, y desde el inicio del riego hasta el final del riego, "c" es el máximo alcanzado durante cada período para cada año, y "n" es el número de días que duró cada período.

4.4.3. Desarrollo vegetativo y productivo y determinaciones de calidad de la fruta

Cada año se marcaron 8 frutos por árbol, en dos árboles por parcela elemental; en un total de 64 frutos por tratamiento se midió en árbol su diámetro ecuatorial semanalmente desde cuajado hasta la cosecha, utilizando un calibre digital (Mitutoyo, Tokio, Japón). Se calcularon las tasas de crecimiento del fruto, dividiendo el crecimiento total del fruto (mm) por el número de días de cada período. Los árboles fueron aclarados en 2016 el 16 de mayo, eliminando 994, 1307 y 1147 frutos en los tratamientos CON, RDI y RDP respectivamente.

El Índice de Área Foliar (LAI) se obtuvo a partir de 40 mediciones por parcela elemental realizadas en posiciones fijas por ceptómetros (Accupar LP-80, Meter Group), obteniéndose el PAR (cantidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida por la planta) con un sensor solar externo situado en el área de radiación total acoplado al ceptómetro; las mediciones se realizaron a nivel del suelo entre el primer y el segundo árbol de la hilera, cubriendo toda la cubierta vegetal en un árbol por tratamiento y siguiendo el protocolo descrito por Auzmendi y cols., (2011). Para la calibración del aparato, en 2012 se defoliaron completamente dos árboles por tratamiento, midiendo el área de cada hoja con un planímetro (Li-3100C Area Meter, LI-COR), posteriormente las hojas se secaron y pesaron en una estufa con ventilación forzada a 65°C hasta peso constante, pesándose en seco. Con esta información se obtuvo la relación de área foliar por peso seco de hoja.

El volumen del dosel se calculó a partir de mediciones "in situ" con varas telescópicas, asumiendo una forma tronco-cónica y utilizando dos diámetros en ángulo recto (diámetro S-N y diámetro E-W) y la altura del dosel.

La sección del tronco, se obtuvo a partir de la medida del perímetro del tronco con una cinta flexible, a unos 10 cm sobre el nivel del suelo, evitando el nudo del injerto; La medida se efectuó antes de la plena floración, en cosecha y al final del período de caída de las hojas para obtener el crecimiento total del tronco en todos los árboles (n=16 árboles por tratamiento). El crecimiento relativo del tronco se obtuvo dividiendo el incremento en la sección de tronco para cada periodo por la superficie inicial calculada en caída de hoja del 2013.

Cada año se realizan dos podas, una en primavera y otra en parada vegetativa de los árboles en invierno. Se pesó en fresco la madera total de poda y se determinó el contenido en materia seca sobre una submuestra por parcela elemental pesado en fresco y en seco tras pasar por una estufa de ventilación forzada a 65°C hasta peso constante.

La fecha de recolección se estableció cuando los frutos alcanzaron los 3,5 Kg cm⁻² de firmeza y contenido en sólidos solubles (SSC) igual o superior a 12 °Brix. En recolección, la cosecha de cada uno de los cuatro árboles centrales se pesó de forma individualizada (n=16 por tratamiento). De cada árbol se tomó una muestra de 100 frutos clasificándolos por tamaño (<53, 53-56, 56-59, 59-61, >61 mm). El peso medio del fruto se determinó como peso medio de esos 100 frutos. El peso seco de los frutos se cuantificó a partir de una muestra de diez frutos por parcela elemental (n=16 por tratamiento). El número de frutos por cm² se calculó dividiendo el número de frutos totales obtenidos en recolección en cada árbol por la sección del tronco del mismo en el momento de la recolección. Sobre una muestra de 10 frutos por árbol de control se midió individualmente el contenido de sólidos solubles (SSC) (refractómetro digital PAL-1, Atago), la Firmeza (medidor de presión de fruta FT-327 con una punta de 8mm) y el color en ambas caras del fruto (n=80 medidas por tratamiento) empleando un colorímetro (Konica minolta CM-600D). La acidez se midió sobre un triturado de los 10 frutos con un titulador (Excellence T50, Mettler Toledo) hasta la valoración total del ácido málico (pH 8,1) con NaOH 0,1N. Estas determinaciones analíticas sobre los frutos se realizaron entre 18 y 20 días antes de la recolección y el día de recolección. En el muestreo prerecolección se tomaron los 40 frutos al azar de los árboles borde de cada parcela elemental para las analíticas.

La eficiencia en el uso del agua (WUE) se obtuvo de acuerdo a la ecuación:

$$WUE = (I + (\theta_i - \theta_f) + Pe) / (Pr + H + L)$$

Donde "I" representa la cantidad total de agua aplicada por el riego (mm) en todo el ciclo; Pe es la precipitación efectiva a lo largo del ciclo (mm); ($\theta_i - \theta_f$) es el balance hídrico del suelo desde el comienzo hasta el final del período de riego (mm). "Pr" es la cantidad total de madera seca retirada en los dos períodos de poda (kg). H son los kg de materia seca en el momento de la cosecha para el total de frutos y los frutos aclarados. "L" es el peso de las hojas secas al máximo valor LAI (kg).

4.4.4. Análisis de datos

Los datos se analizaron mediante el análisis de varianza (ANOVA). Las medias que diferían significativamente se separaron de acuerdo con la nueva prueba de rango múltiple de Duncan a $P < 0,05$. Se utilizó el software estadístico de IBM SPSS v. 20.

4.5. Resultados

4.5.1. Climatología y agua aplicada

El inicio de la campaña de riego fue el 12 marzo, 14 abril y 3 mayo en 2014, 2015 y 2016 respectivamente, con una duración media de 189 días. La disponibilidad inicial de lluvia (considerando el inicio de P1) estuvo entre los 401 mm del año 2016 y los 247 mm de 2015 (Tabla 4.1). Este último resultó ser el año más seco, teniendo con una precipitación acumulada desde el final del periodo de riego de 2014 hasta final de periodo de riego de 2015 fue un 36% inferior a los otros años, coincidiendo además con una mayor ETo acumulada (Tabla 4.1). Así, el volumen de agua aplicado en el tratamiento CON en 2015 fue de 806 mm, superior al volumen medio para la zona (≈ 720 mm).

El ahorro hídrico medio de los tratamientos deficitarios con respecto al CON fue del 18% en RDI y 23% en RDP, destacando el año 2015 con ahorros entre el 26% en RDI y el 30% en RDP. Las características climáticas de los periodos deficitarios P1, P2 y P3 presentaron importantes diferencias entre años (Figura 4.2) y, aunque la duración del periodo deficitario fue en RDP 59 días de media frente a los 70 días de RDI, el volumen de agua de riego de RDP (P2+P3) fue inferior al aplicado en RDI (P1+P3).

CAPÍTULO 4

Tabla 4.1. Cantidad de agua aplicada con el riego, Precipitación (P) y Evapotranspiración (ETo) en los tres tratamientos de riego para los tres años de ensayo. Todos los datos están expresados en mm para los periodos marcados.

		Agua aplicada			P (mm)	ETo (mm)
		CON	RDI	RDP		
		Año 2014				
	Inicio / fin					
Fin riego año anterior a inicio de P1	21-10-13 / 12-05-14	24	26	27	365	421
Periodo P1	13-3-14 / 10-06-14	70	4	68	8	161
De fin de P1 a inicio P2	11-6-14 / 11-08-14	291	302	288	12	381
(Periodo P2) + (Periodo P3)	(12-8-14 / 3-9-14) + (4-9-14 / 10-10-14)	230	221	122	136	247
Total		615	553	504	520	1209
		Año 2015				
Fin riego año anterior a inicio de P1	10-11-14 / 12-05-15	37	26	26	247	453
Periodo P1	13-05-15 / 17-06-15	140	0	125	20	213
De fin de P1 a inicio P2	18-06-15 / 13-08-15	374	392	345	9	385
(Periodo P2) + (Periodo P3)	(14-8-15 / 2-9-15) + (3-9-14 / 15-10-15)	255	177	67	58	269
Total		806	595	562	333	1320
		Año 2016				
Fin riego año anterior a inicio de P1	16-10-15 / 12-05-16	4	4	3	401	395
Periodo P1	13-5-16 / 17-06-16	89	2	74	29	228
De fin de P1 a inicio P2	23-6-16 / 21-8-16	369	392	341	41	399
(Periodo P2) + (Periodo P3)	(22-8-16 / 19-9-16) + (20-9-16 / 20-10-16)	301	231	172	54	241
Total		763	629	590	524	1263

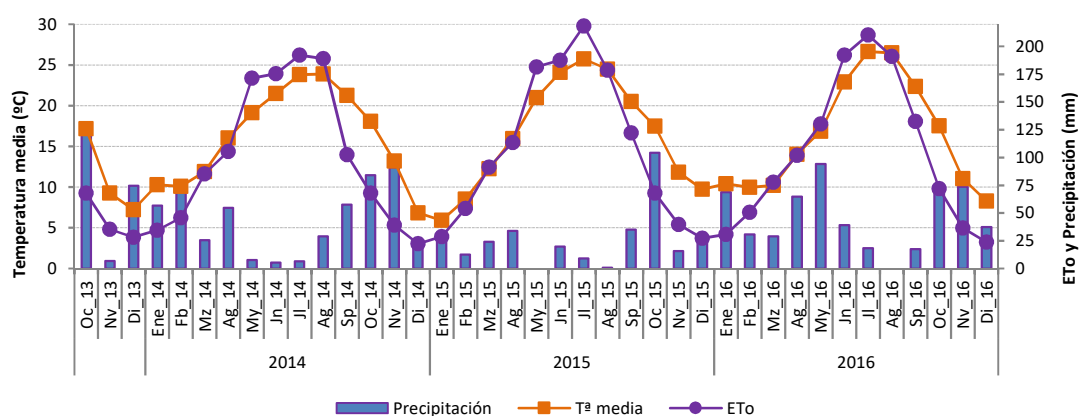


Figura 4.2. Evolución estacional de la Evapotranspiración de referencia mensual de la temperatura media mensual y de la precipitación mensual para cada mes en los tres años de ensayo.

4.5.2. Humedad del suelo

El contenido de humedad del suelo antes de iniciar el riego fue similar el primer y último año de ensayo, con un θ medio de 218 mm (Tabla 4.2). En el año 2015, aunque la situación de partida fue más desfavorable (menor contenido de agua) y con marcadas diferencias entre tratamientos, el contenido de humedad durante P1 se mantuvo estable en los tratamientos sin estrés y descendió 27 mm en RDI al final de P1. En el año 2016 cuando el consumo de agua por el cultivo fue mayor durante P1 desde 71 mm en RDI hasta 26 mm en CON y RDP.

En 2015, y 2016 en todos los tratamientos se produjo un aumento del θ desde el final del P1 hasta el inicio de P2. En 2014 hubo un descenso ligero en los tres tratamientos en este mismo periodo. Este comportamiento continuó durante P2 para CON y RDI. Sin embargo, en el tratamiento RDP, al coincidir con el comienzo del periodo deficitario, hubo una disminución del θ medio durante P2 de 17 mm.

Todos los años de ensayo, al inicio de P3, el θ del tratamiento RDP fue inferior, y 15 días antes de terminar la campaña de riego se mantuvo o aumentó respecto a la situación en recolección. Sin embargo, en el resto de tratamientos se produjo el efecto contrario, disminuyendo el θ desde inicio hasta fin de P3.

Como se puede observar en la Figura 4.3, el agua movilizada en las sucesivas etapas en que se ha dividido el ciclo de vegetación a diferentes profundidades del suelo, fue diferente en cada tratamiento, destacando que en el caso de RDI los cambios de humedad fueron mayores a lo largo de todo el perfil. En CON la etapa previa a P1, tuvo un consumo ligero del agua del perfil, y en P3 este consumo fue sensiblemente más alto, sobre todo de 0-90 cm de profundidad, mientras que en la etapa de P1 a P2 y P2 se acumuló agua en el perfil, detectándose más movimiento de agua en los 30 cm superiores. Por el contrario, en RDI el movimiento de agua fue considerable en los 180 cm de profundidad medidos. La extracción de agua del perfil se produjo también en los tres primeros periodos, siendo P3 el cuantitativamente más importante. De la misma forma, el agua se acumuló a lo largo de todo el perfil de P1 a P2 y en P2 en mayor abundancia que en CON. En RDP los periodos de consumo fueron principalmente el anterior a P1 y P2 destacando respecto de los otros dos tratamientos, la acumulación de agua en P3 en los primeros 60 cm.

Tabla 4.2. Cantidad total de agua en suelo (hasta 180 cm) en mm para cada tratamiento de riego en los tres años experimentales. La desviación estándar (números en gris) está calculada sobre los cuatro tubos por árbol en dos árboles por tratamiento (n=8)

	C	RDI	RDP
2014			
Initial situation	220 ± 22	222 ± 50	216 ± 40
P1 onset	205 ± 17	205 ± 32	202 ± 32
P1 end	185 ± 20	193 ± 44	194 ± 30
P2 onset	180 ± 15	192 ± 41	180 ± 25
P3 onset	191 ± 24	222 ± 47	161 ± 9
Before end irrigation*	197 ± 23	191 ± 46	168 ± 19
2015			
Initial situation	208 ± 18	197 ± 38	178 ± 20
P1 onset	198 ± 20	178 ± 32	170 ± 14
P1 end	192 ± 18	162 ± 23	180 ± 17
P2 onset	203 ± 17	199 ± 45	189 ± 42
P3 onset	230 ± 64	226 ± 56	172 ± 27
Before end irrigation*	199 ± 28	183 ± 36	197 ± 23
2016			
Initial situation	224 ± 21	223 ± 45	204 ± 16
P1 onset	232 ± 25	246 ± 48	202 ± 26
P1 end	204 ± 24	175 ± 35	177 ± 19
P2 onset	206 ± 43	190 ± 50	196 ± 37
P3 onset	224 ± 45	207 ± 55	182 ± 27
Before end irrigation*	213 ± 35	180 ± 37	182 ± 27

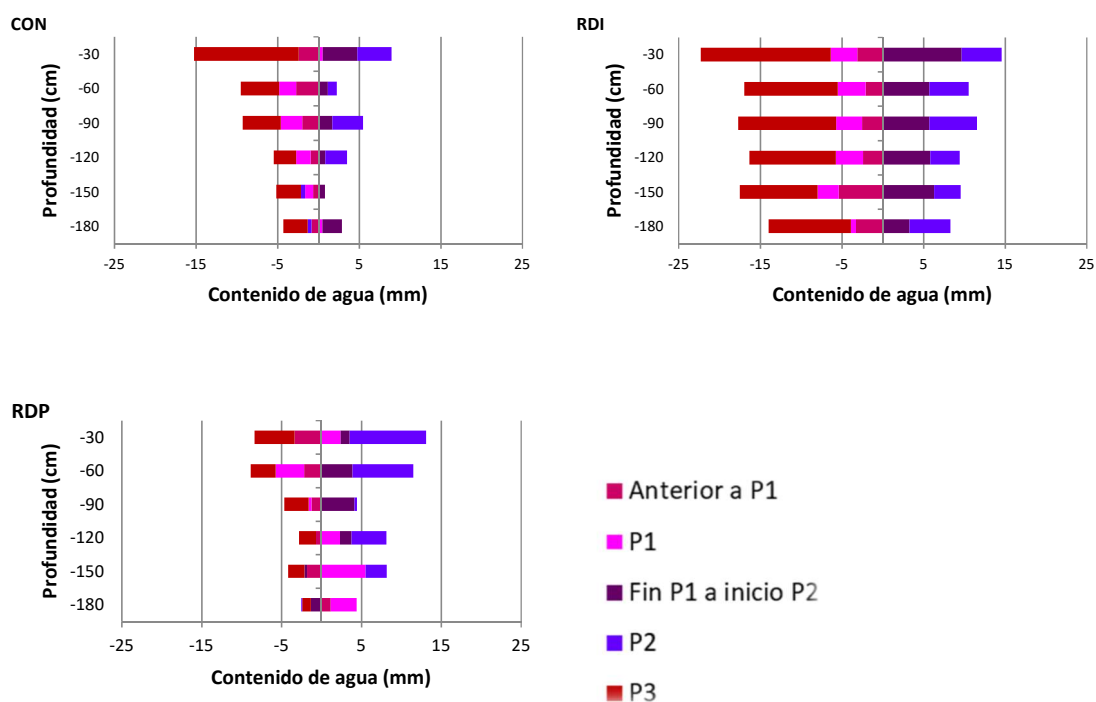


Figura 4.3. Variación en el contenido de agua en el suelo (agua total consumida o acumulada) a diferentes profundidades a lo largo de cuatro etapas para los tratamientos Control (CON), Riego deficitario precosecha (RDP) y Riego deficitario controlado (RDI) en el año 2015. Cada conjunto horizontal de líneas corresponde a una profundidad de suelo determinada.

4.5.3. Estado hídrico

El estado hídrico de los árboles al comenzar la campaña de riego se situó en torno a $-0,55$ MPa, excepto en el año 2015 que partió de valores ligeramente más altos (Figura 4.4). En los 3 años de ensayo, el Ψ_s medio del tratamiento CON fue de $-0,90$ MPa, con valores inferiores a $-1,00$ MPa la mayor parte del ciclo de cultivo. Los árboles de RDI respondieron al corte de riego durante P1, descendiendo Ψ_s hasta un mínimo de $-2,33$ MPa en 2015. Una vez restablecido el riego en RDI la recuperación del estado hídrico fue rápida todos los años igualándose con los tratamientos CON y RDP y manteniéndose hasta el inicio de P2. Durante P2, el valor medio de Ψ_s en el tratamiento RDP fue de $-1,22$ MPa, alcanzando en el año 2014 el valor mínimo con $-1,43$ MPa. Al llegar a cosecha, no hubo diferencias entre CON y RDI, pero el RDP presentó un Ψ_s medio más bajo que los otros tratamientos ($0,32$ MPa).

Una vez recogido el fruto, la respuesta de Ψ_s de los árboles en RDP y RDI durante el P3 fue diferente. En RDI, los valores se mantuvieron iguales o similares a los del CON hasta aproximadamente 20 días después de reducir la dotación hídrica en 2015 y 2016, y sin diferencias en 2014 hasta finalizar el P3. En 2014 y 2015 RDP continuó con un Ψ_s más bajo que los otros tratamientos hasta el último tramo de P3 donde, al igual que en CON y RDI se observó una mejoría del estado hídrico.

La integral de estrés en todos los tratamientos de riego fue mayor en el año 2016, tanto en el periodo calculado hasta cosecha, como en el considerado hasta final de riego (Tabla 4.3). En general, las diferencias entre RDI y RDP fueron mayores que entre el CON y el RDI, las cuales fueron ligeras, especialmente en los 2 últimos años de ensayo.

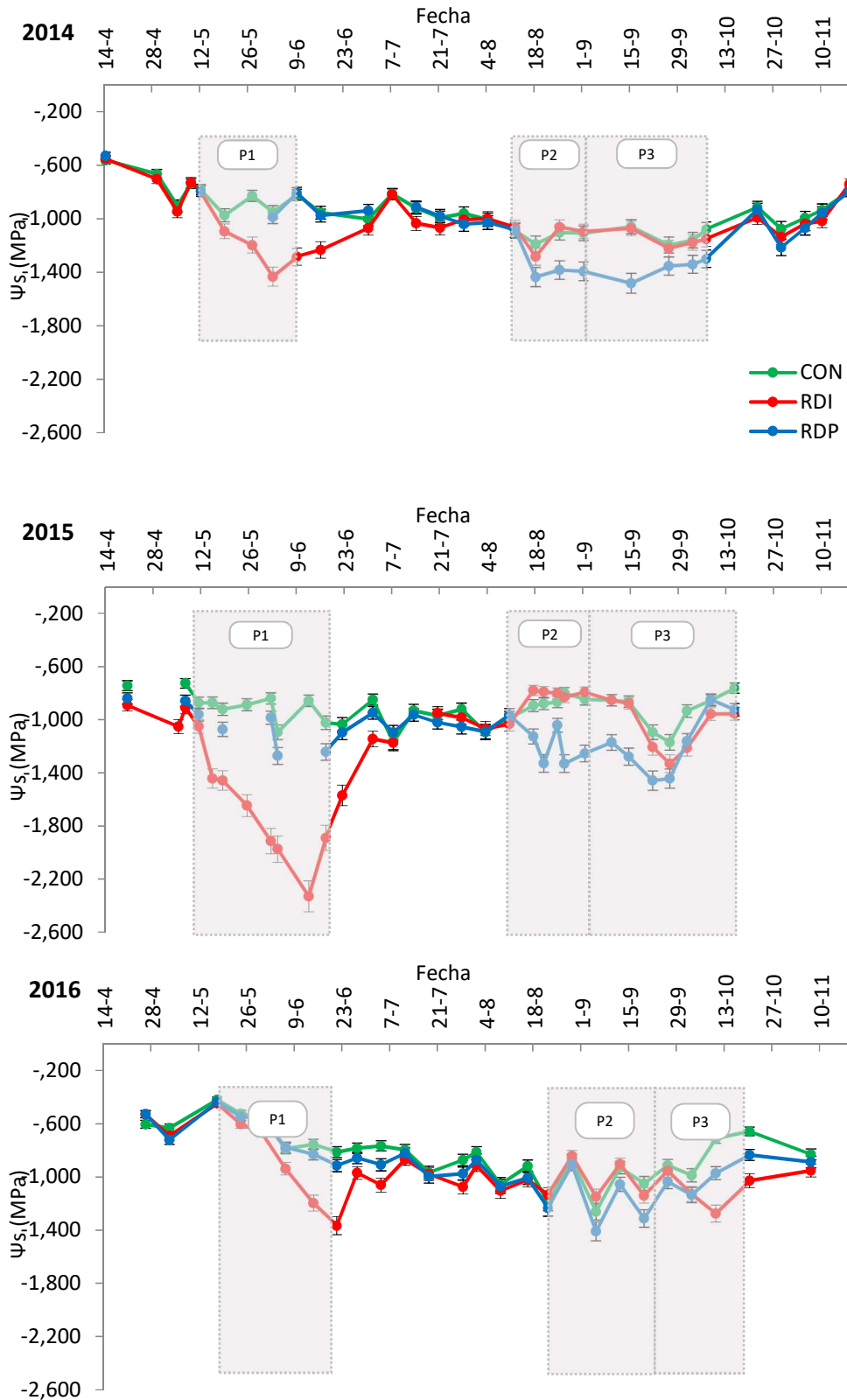


Figura 4.4. Patrón estacional del potencial hídrico de tronco a medio día (en MPa) en los tres tratamientos de riego para los tres años de estudio. Cada punto representa la media de 2 hojas por árbol en 2 árboles por parcela elemental (n=16 hojas por tratamiento) las líneas verticales indican la desviación estándar en cada punto.

Tabla 4.3. Valores de la Integral de estrés (IE) desde inicio de riego hasta recolección y hasta final de riego. Los valores están expresados en MPa* día para los tres tratamientos de riego y en los tres años de ensayo.

AÑO	IE hasta recolección			IE hasta fin de riego		
	CON	RDI	RDP	CON	RDI	RDP
2014	49	65	48	69	85	79
2015	25	71	44	34	84	65
2016	58	73	67	71	95	86

4.5.4. Desarrollo reproductivo

Como se puede ver en la Tabla 4.4 las tasas de crecimiento del fruto son más altas tras el cuajado, hasta el inicio de P1, en que se ralentizan, y siguen descendiendo en las dos etapas posteriores (entre P1 y P2, y P2). De los tres años del estudio, el crecimiento del fruto fue más rápido en 2015, alcanzando mayores tamaños finales de fruto, situándose en el lado opuesto 2014.

Comparando los tres tratamientos, tras el cuajado todos ellos crecen al mismo ritmo. (Tabla 4.4). En P1, CON y RDP se mantienen al mismo ritmo, por encima de RDI. En la fase intermedia entre P1 y P2 RDI vuelve a recuperar las mismas tasas de crecimiento que los otros tratamientos para, en P2 diferenciarse los dos tratamientos deficitarios de CON, significativamente en los dos primeros años.

	Anterior a P1		P1	Fin P1 a inicio P2		P2		
2014								
CON	0,47	n.s.	0,24	a	0,18	n.s.	0,10	a
RDI	0,46	n.s.	0,19	b	0,18	n.s.	0,08	b
RDP	0,46	n.s.	0,25	a	0,18	n.s.	0,07	b
2015								
CON	0,62	n.s.	0,27	a	0,24	n.s.	0,11	a
RDI	0,61	n.s.	0,12	b	0,23	n.s.	0,08	b
RDP	0,61	n.s.	0,25	a	0,22	n.s.	0,08	b
2016								
CON	0,59	n.s.	0,27	a	0,20	n.s.	0,09	n.s.
RDI	0,59	n.s.	0,23	b	0,21	n.s.	0,07	n.s.
RDP	0,60	n.s.	0,28	a	0,20	n.s.	0,08	n.s.

Tabla 4.4 Tasa de crecimiento del fruto en los diferentes periodos para cada tratamiento en los tres años experimentales. Cada dato es el promedio de 8 frutos por árbol en 2 árboles por bloque y tratamiento (n= 64 frutos por tratamiento). Diferentes letras significan diferencias entre los tratamientos a p<0,05.

4.5.5. Desarrollo vegetativo

Los árboles del tratamiento CON fueron más vigorosos ya que, partiendo de una mayor sección de tronco inicial (datos no mostrados), mantuvieron también una mayor tasa de crecimiento. Así el incremento total de la sección de tronco en los tres años fue de 207 cm², frente a los 149 y 147 de RDI y RDP respectivamente (Tabla 4.5). El año 2014 fue el de menor crecimiento de tronco en todos los tratamientos y 2015 el de mayor, a pesar de ser el año más seco y soportar los árboles los mayores niveles de estrés hídrico. La Fig. 4.5 muestra la evolución a lo largo de los tres años de estudio del crecimiento relativo de la sección de tronco y se aprecia como en el primer año no se establecen diferencias entre CON y RDI, pero en años posteriores se separan los tres tratamientos situándose RDI con un vigor intermedio entre CON y RDP. En esta figura y en la tabla 4.5, se aprecia cómo el déficit hídrico provocó una mayor reducción del vigor en RDP a pesar de “sufrir” el periodo de estrés “a priori” en un periodo con menor crecimiento vegetativo. El crecimiento relativo del tronco de RDP fue inferior a los otros tratamientos en el tramo de cosecha a caída de hojas en todos los años (Figura 4.5).

La radiación interceptada fue ligeramente más baja en RDI en los dos primeros años, mientras que no se observaron diferencias claras entre CON y RDP en ninguno de los casos (Figura 4.6). Las mayores diferencias entre tratamientos se obtuvieron en 2015.

A pesar de que el año 2015 es cuando se produjo un mayor incremento en el vigor de los árboles, se retiró una mayor cantidad de madera de poda en el año 2016. En ningún caso el tratamiento de riego afectó a la cantidad de madera retirada con la poda de verano, aunque sí en la invernada y en la total. (Tabla 4.5). En los tres años, la poda de invierno del CON fue significativamente mayor, llegando en 2015 a producir 7 kg más de madera por árbol que RDI. La poda total retirada, considerando la poda de verano más la poda de invierno, fue de un 24 % y un 17% menor en RDI y RDP respectivamente en relación a CON.

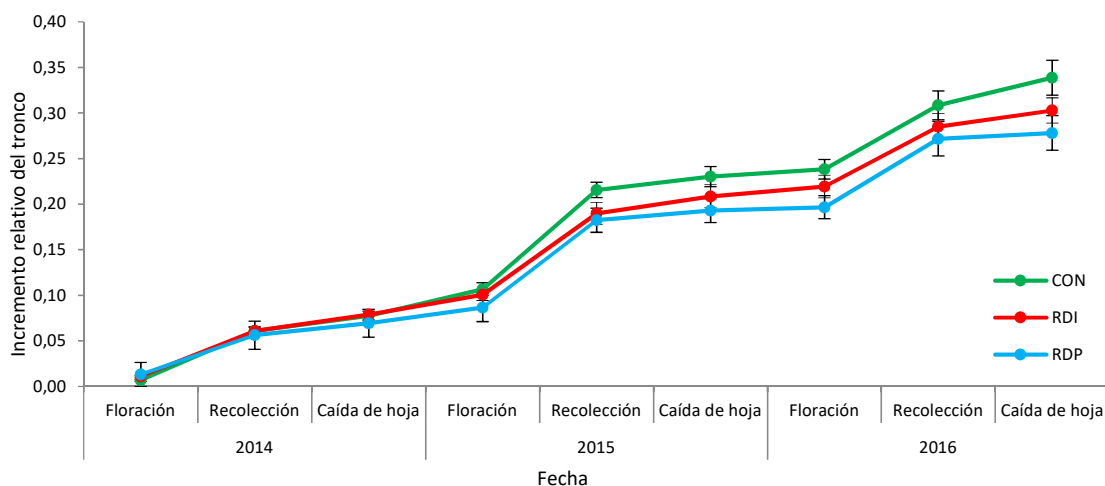


Figura 4.5. Crecimiento relativo del tronco en los tres tratamientos de riego para los momentos seleccionados en los tres años de ensayo, expresado en tanto por ciento del valor inicial. Cada punto corresponde a la media de cuatro árboles por parcela elemental y por tratamiento (n=16 árboles por tratamiento). Las barras verticales representan la desviación estándar en cada punto.

Tabla 4.5. Crecimiento estacional de la sección del tronco (cm²) y cantidad de madera seca en poda (kg de madera seca x árbol⁻¹) para cada tratamiento en los tres años experimentales. Diferentes letras significan diferencias estadísticas entre los tratamientos a p<0.05.

Año	Tratamiento	Crecimiento total de la sección del tronco (cm ²) de caída de hoja de año anterior a caída de hoja del siguiente año	Poda de verano (kg de madera seca x árbol ⁻¹)	Poda de invierno (kg de madera seca x árbol ⁻¹)	Poda total de madera seca (kg de materia seca x árbol ⁻¹)
2014			12-05-14	22-01-15	
	CON	47,2 a	4,0 n.s.	16,4 a	20,4 a
	RDI	37,7 ab	3,6 n.s.	12,3 b	15,9 b
	RDP	34,0 b	3,9 n.s.	12,9 b	16,8 b
2015			06-05-15	13-01-16	
	CON	93,7 a	3,0 n.s.	19,3 a	22,3 a
	RDI	64,7 b	3,1 n.s.	11,7 c	14,8 c
	RDP	68,3 b	3,3 n.s.	15,4 b	18,6 b
2016			30-05-16	19-01-17	
	CON	66,1 a	6,7 n.s.	17,5 a	24,2 a
	RDI	46,4 ab	6,3 n.s.	13,9 b	20,2 b
	RDP	45,0 b	6,4 n.s.	13,7 b	20,0 b

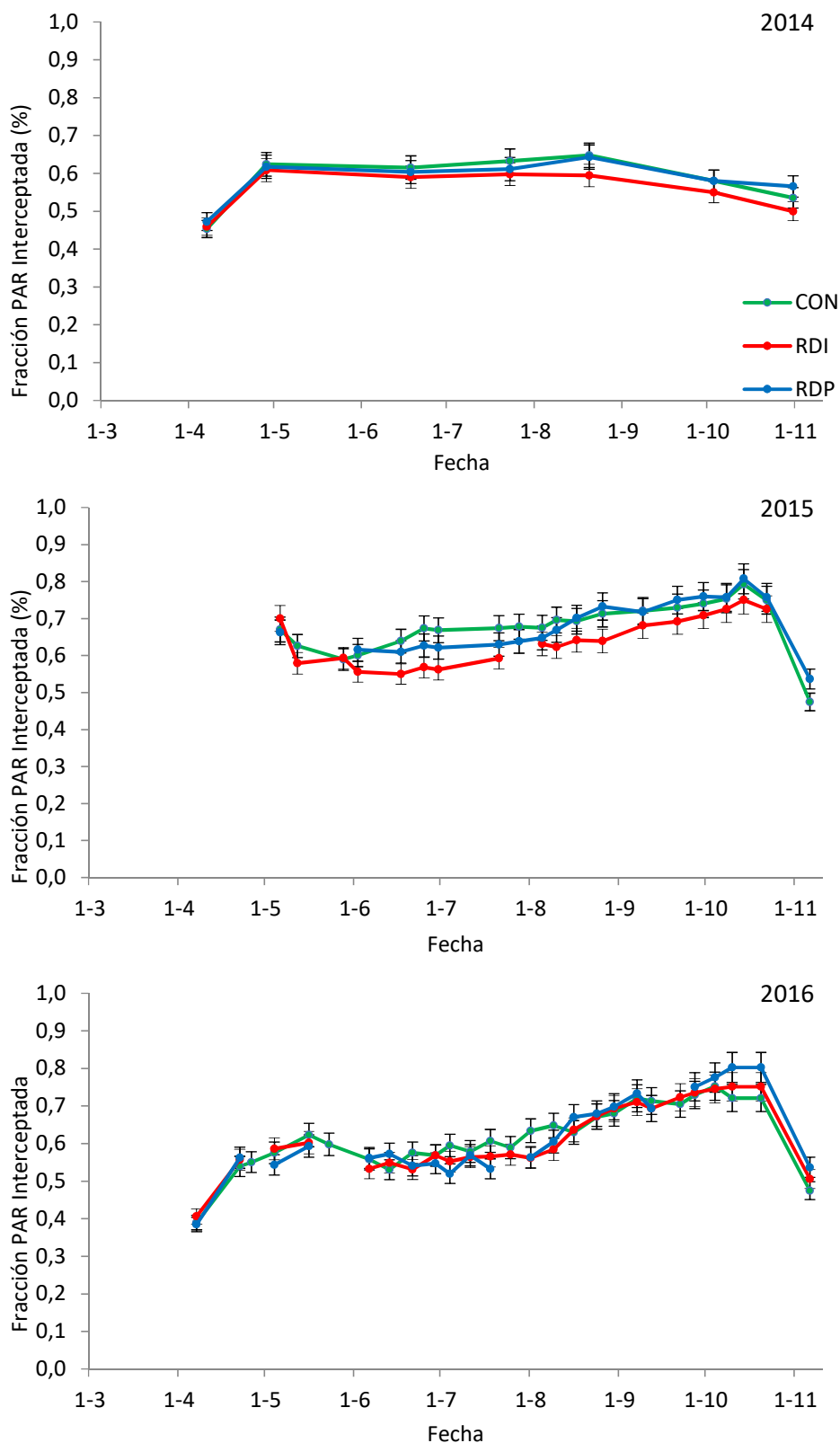


Figura 4.6. Evolución estacional de la fracción de radiación interceptada PAR al mediodía solar, para los tres tratamientos de riego en los tres años de ensayo. Cada punto representa la media de 2 árboles por tratamiento. Las barras verticales representan la desviación estándar en cada punto.

4.5.6. Recolección

En los tres años de estudio hubo diferencias cuantitativas importantes en la producción de ciruela, con una producción alta, superior a 68 t/ha de media, en 2014 y muy baja en 2015 con 12 t/ha, con valores intermedios en 2016 (44 t/ha) (Tabla 4.6). A pesar de estas considerables diferencias interanuales, en ningún caso hubo diferencias entre tratamientos en la producción por árbol, ya que en 2014 el mayor número de frutos/árbol de RDI quedó compensado por un menor tamaño de los frutos. Estas diferencias en carga del primer año no pueden ser atribuidas a los tratamientos sino a la historia previa de los árboles, ya que los tratamientos se iniciaron tras el establecimiento definitivo de los frutos. En el año 2016 el número de frutos cuajados fue superior en los tratamientos deficitarios (2152, 2689 y 2400 frutos/árbol en 2014, 2015 y 2016 respectivamente), pero se igualó con el aclareo. Al expresar la carga en función de la sección de tronco esta tendencia a incrementar la carga con el déficit hídrico fue más evidente en RDI. El menor calibre de los frutos en RDI en relación con los otros dos tratamientos (Figura 4.7) podría explicarse por la mayor carga frutal, aunque solo en 2014 y 2016, ya que 2015 fue un año con una carga tan baja que no es de esperar que penalizara el calibre. En general, ambos tratamientos deficitarios presentaron cierta tendencia a reducir el calibre en relación al control en 2015 y 2016.

En todos los años la distribución de calibres de CON y RDP fue similar entre sí y diferente de RDI. El calibre más representado en 2014 fue el inferior a 53 para los tres tratamientos, aunque con menor proporción de frutos de RDI en el calibre 56-59. En 2015 CON y RDP tuvieron la mayor proporción en el intervalo 56-59, mientras que en RDI siguió siendo el menor que 53. En 2016 los calibres mayoritarios están en las tres categorías inferiores para CON y RDP mientras que RDI se sigue manteniendo solo en la inferior.

El RDI provocó cierto adelanto en la maduración que se aprecia en el muestreo efectuado previo a la cosecha (Tabla 4.7), con tendencia a concentraciones más altas de sólidos solubles, pero estas diferencias entre tratamientos se reducen al avanzar hacia recolección, de forma que solo llegan a ser significativas en 2015 con el estrés más severo. Los valores de acidez y firmeza disminuyeron progresivamente hasta recolección donde sólo en 2015 el valor de firmeza del tratamiento RDP fue mayor al resto de tratamientos, manteniéndose similares el resto de los años. El parámetro SSC en los días previos a recolección aumentó su valor. En recolección, el valor de SSC varió de un año a otro, así en 2015, estos valores se situaron en torno a los 17-19 °Brix siendo los frutos RDI los que tuvieron mayor contenido.

La EUA varió considerablemente entre años dependiendo estas diferencias principalmente de la productividad (Tabla 4.6). Dado que no se encontraron diferencias significativas en producción, la EUA más alta se obtuvo en los tratamientos deficitarios (significativamente en 2014 y 2016), sin diferencias entre RDI y RDP.

CAPÍTULO 4

Tabla 4.6. Datos producción en recolección, para los tres tratamientos de riego en los tres años de ensayo, cada dato representa la media de un tamaño muestral descrito en materiales y métodos. Las letras representan las diferencias significativas entre tratamientos $p < 0.05$

		Kg árbol ⁻¹		nº frutos árbol ⁻¹		nº frutos (cm ² tronco) ⁻¹		P medio fresco (g)		kg/m ³	
2014	CON	163	n.s.	2153	ab	3,4	a	77,1	a	11,0	b
	RDI	166	n.s.	2437	a	4,8	b	69,4	b	12,5	a
	RDP	162	n.s.	2086	b	3,7	a	78,1	a	13,4	a
2015	CON	30	n.s.	293	n.s.	0,4	n.s.	103,1	a	1,5	ns
	RDI	27	n.s.	331	n.s.	0,6	n.s.	82,7	b	1,9	ns
	RDP	28	n.s.	289	n.s.	0,5	n.s.	98,8	a	2,1	ns
2016	CON	102	n.s.	1158	n.s.	1,5	a	88,6	a	5,6	a
	RDI	109	n.s.	1382	n.s.	2,3	b	79,8	b	7,2	b
	RDP	105	n.s.	1253	n.s.	1,9	ab	84,3	ab	7,4	b

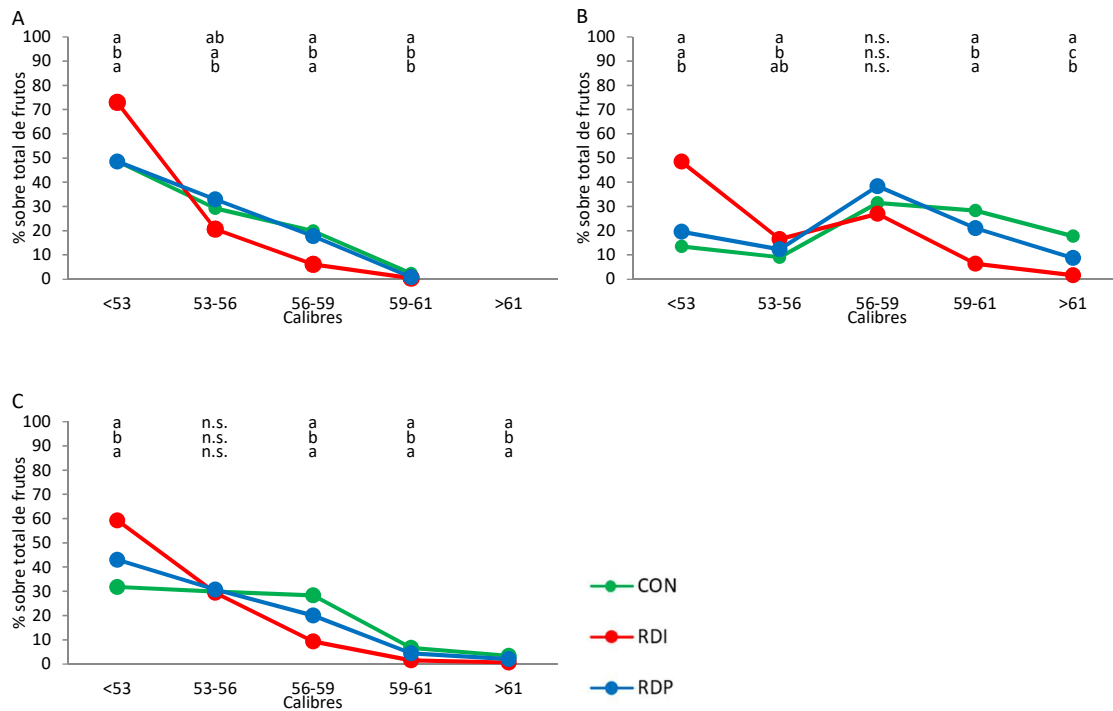


Figura 4.7. Distribución de calibre de los frutos expresada en porcentaje del número total de frutos en cada tratamiento: CON (verde), RDI (rojo) y RDP (azul). Las letras mayúsculas A, B y C indican los años 2014, 2015 y 2016. Las barras verticales indican la desviación estándar. Diferentes letras en la parte superior indican diferencias entre los tratamientos. Las letras corresponden a CON (letra superior) RDI (letra central) y RDP (letra inferior).

Tabla 4.7. Parámetros de calidad en recolección y 20 días antes de recolección para los tres tratamientos de riego en los tres años de ensayo. Cada punto representa la media de un tamaño muestral descrito en materiales y métodos. Las letras representan las diferencias significativas entre tratamientos $p < 0.05$.

20 días antes de recolección												
	Acidez		Firmeza		SSC		L		C*		h*	
2014												
CON	1,4	n.s.	4,4	a	15	n.s.	37	a	15	n.s.	0,5	b
RDI	1,4	n.s.	4,2	ab	15	n.s.	32	b	14	n.s.	0,9	a
RDP	1,3	n.s.	4,0	b	15	n.s.	35	a	15	n.s.	0,7	ab
2015												
CON	0,8	n.s.	4,7	c	15	b	42	a	17	n.s.	0,7	n.s.
RDI	0,8	n.s.	5,9	a	18	a	37	b	18	n.s.	0,7	n.s.
RDP	0,8	n.s.	5,4	b	15	b	44	a	19	n.s.	0,7	n.s.
2016												
CON	0,9	n.s.	4,3	b	13	b	42	a	22	n.s.	0,4	n.s.
RDI	0,9	n.s.	4,4	b	14	a	39	b	22	n.s.	0,6	n.s.
RDP	1	n.s.	4,9	a	13	ab	42	ab	23	n.s.	0,4	n.s.

Recolección												
	Acidez		Firmeza		SSC		L		C*		h*	
2014												
CON	0,9	n.s.	3,6	n.s.	16	n.s.	29	n.s.	10	n.s.	1,4	n.s.
RDI	0,9	n.s.	3,6	n.s.	16	n.s.	30	n.s.	11	n.s.	1,4	n.s.
RDP	0,8	n.s.	3,6	n.s.	16	n.s.	30	n.s.	12	n.s.	1,4	n.s.
2015												
CON	0,8	n.s.	3,5	b	17	c	28	n.s.	10	a	1,4	n.s.
RDI	0,9	n.s.	3,5	b	19	a	28	n.s.	12	b	1,4	n.s.
RDP	0,8	n.s.	3,7	a	18	b	29	n.s.	12	ab	1,4	n.s.
2016												
CON	0,7	n.s.	3,0	n.s.	15	n.s.	30	a	11	b	1,4	n.s.
RDI	0,7	n.s.	3,1	n.s.	15	n.s.	29	b	10	b	1,4	n.s.
RDP	0,8	n.s.	3,1	n.s.	15	n.s.	30	a	13	a	1,3	n.s.

4.6. Discusión

El objetivo de este trabajo es el cv. de ciclo largo de ciruelo japonés Angeleno. Se trata de evaluar una estrategia de riego deficitario adaptada a las características fisiológicas y de ciclo productivo de este cultivar frente a la estrategia propuesta con carácter general para frutales de hueso de ciclo medio, y ambas con un tratamiento regado de acuerdo a las necesidades hídricas del cultivo. La comparación se ha realizado bajo diferentes puntos de vista: volumen de agua de riego, utilización del agua en el perfil del suelo y desarrollo vegetativo y reproductivo. En estudios de campo, las condiciones meteorológicas, junto con el carácter interanual de los cultivos leñosos, suelen jugar un papel protagonista en la respuesta obtenida. En este sentido, los tres años de estudio han sido marcadamente diferentes lo que ha hecho posible dar más solidez a los resultados obtenidos, tanto por las condiciones meteorológicas, como por el nivel de carga de los árboles.

Comparando las dos estrategias de riego deficitario, el desplazamiento del periodo en que se induce el estrés en RDP en relación con RDI no solo modifica el estado fenológico en el que se incide, sino que también actúa bajo unas condiciones meteorológicas diferentes. El efecto que se observó de forma más evidente es que, al situar el periodo deficitario en un momento con mayor demanda evaporativa (RDP) la reducción en volumen de agua aplicado en relación a CON fue superior a RDI, a pesar de ser 12 días más corto el conjunto de P1 + P3 (media de los tres años). Pero también pudo alterar la fisiología de la planta con consecuencias más difíciles de evaluar. Un aspecto observado es que, en dos de los tres años se incrementó el nivel de estrés soportado por los árboles en RDI tras la cosecha, pudiendo desencadenar mecanismos que favorecen la entrada en reposo del árbol. De esta forma la menor actividad del árbol explicaría la mayor acumulación de agua en el suelo procedente de las lluvias del otoño. Un mayor estrés debe también conducir a una reducción en las tasas de fotosíntesis foliares y por tanto la productividad de la cubierta en una fase en la que se produce la acumulación de reservas. Sin embargo, las medidas de contenido de almidón en raíces (datos no presentados) no muestran menor nivel de reservas del árbol, ni se observaron diferencias en la brotación, floración y cuajado de frutos en relación con el control, que pudieran interpretarse como indicios de un agotamiento progresivo del árbol.

En el año 2015, la escasez de precipitaciones en el periodo previo a P1 ocasionó el nivel más bajo de θ al inicio del P1, con los valores más bajos de Ψ_s observados en el tratamiento RDI para los tres años de estudio, por debajo del umbral de -1,8 MPa propuesto por Intrigliolo y Castel, (2010). Ese mismo año, el tratamiento CON, a pesar de recibir el doble de agua que los otros años para el periodo P1, mostró los valores más bajos de Ψ_s e inferiores los valores de referencia de “no estrés” para este cv. (Samperio y cols., 2015). En los años más lluviosos (2014 y 2016), los valores de Ψ_s en RDI llegaron a -1,4 MPa, que podemos considerar como moderado de acuerdo a las referencias para melocotonero (Girona y cols., 2004) y ciruelo (Naor y cols., 2004).

La estrategia de riego cambió el patrón de utilización de agua en el suelo, ya que al suprimir totalmente el riego en RDI el árbol realizó una mayor extracción del agua almacenada a lo largo de todo el perfil. Por el contrario, cuando disminuyó el agua de riego en RDP se observó una mayor acumulación de agua en el perfil próximo a la caída de hojas; dado que los aportes de riego en esta época eran inferiores y las necesidades del cultivo no estaban siendo cubiertas (peor estado hídrico), la causa debió de estar en las lluvias de otoño que no pudieron ser aprovechadas por los árboles al tener la cubierta en un estado más avanzado de senescencia. Para confirmar esta hipótesis sería necesario verificar los niveles de intercambio de gases en hojas y el porcentaje de

hojas senescentes. El contenido de agua en el suelo fue similar en los dos tratamientos deficitarios al finalizar P1 en 2014 y 2016 sin embargo, se mantuvieron diferencias significativas en los valores de potencial entre ellos. Situaciones similares de discrepancia entre disponibilidad de agua y estado hídrico se han detectado en diferentes momentos del ciclo a lo largo de los tres años, ya que, aunque existe cierta relación entre los valores de Ψ_s y θ , en viña (Williams y Araujo, 2002) o en ciruelo europeo (Mccutchan y cols., 1992), la recuperación de ambos no siempre se realizó al mismo ritmo.

El año 2015 la pluviometría anual estuvo por debajo de la media de la zona, además el ciclo de cultivo se inició con un bajo contenido de agua en el perfil del suelo, provocando un descenso acusado de Ψ_s en el tratamiento RDI situación que, como se ha descrito en el Capítulo 3 suele afectar de forma irreversible al crecimiento del fruto, incluso en un año con un nivel muy bajo de carga. En los otros dos años, con carga más alta, partiendo con un perfil de suelo con más agua, también se observó la tendencia a reducir el calibre, pero en este caso sí que hubo interferencia con una mayor carga de los árboles en este tratamiento. La interacción entre estado hídrico y nivel de carga ya había sido observada en este cv. por Samperio y cols., (2015) en relación con el efecto sobre el calibre final del fruto. El estrés hídrico soportado por RDP en un estado avanzado de crecimiento del fruto tuvo menores repercusiones sobre el calibre del fruto ya que, aunque afectó a la tasa de crecimiento, ésta era inferior a las etapas anteriores de desarrollo. Por otra parte, las tasas de crecimiento en P2 fueron iguales en RDI y RDP e inferiores a CON.

Las repercusiones del tratamiento hídrico en RDP sobre el proceso de maduración en relación con el tratamiento CON, en cuanto a acumulación de azúcares, fueron inferiores a RDI, similares en el color y no afectaron al resto de los parámetros medidos; es decir, se obtienen frutos con características similares en recolección al control. Teniendo en cuenta que la distribución de calibres puede afectar al valor de la producción, el RDI dio lugar a una ligera depreciación de la cosecha, posiblemente compensado por la reducción en gastos de cultivo en comparación CON (Samperio y cols., 2015), mientras que en RDP no se produjo esta devaluación disminuyendo la madera de poda, con menor volumen de agua utilizada e incrementando la EUA (similar a RDI).

Los valores de acidez y firmeza del fruto siguieron en todos los casos un patrón de descenso en los días previos a recolección, coincidiendo con lo descrito por (Crisosto y cols., 2004) en cultivares de ciruelo japonés de ciclo medio. Autores como El-Sharkawy y cols. (2007) o Trainotti y cols. (2003) destacan que en la fase previa a recolección es donde el fruto de *Prunus salicina* adquiere su madurez comercial, sin embargo, una reducción de los potenciales en esta fase en el tratamiento RDP sólo afectó a la firmeza en el año 2015, aunque pudo estar más relacionada con el bajo nivel de carga que con el déficit hídrico soportado (Cheng y Crisosto, 1997; Crisosto y cols., 1994a; Intrigliolo y Castel, 2010; Mpelasoka y Hossein Behboudian, 2002; Naor, 2004). En todos los casos el valor de firmeza fue superior a 3.4 kg cm^{-2} , valor límite para reducir el daño por rozamiento (Crisosto y cols., 2001). El tratamiento RDI mantuvo estos parámetros similares al tratamiento CON, en concordancia con lo observado en manzana (Mpelasoka y Hossein Behboudian, 2002), melocotonero (Crisosto y cols., 1994a) y ciruelo japonés (Naor, 2004), pero contrario a otros estudios donde la acidez decrece en situaciones de estrés (Behboudian y Mills, 1997; Gelly y cols., 2004).

Los valores de SSC en recolección se sitúan en un rango marcado como bueno por Crisosto y cols. (2007) y sin diferencias entre tratamientos, excepto en 2015. La acumulación de azúcares en la fase de crecimiento y maduración del fruto se debe principalmente a la asimilación de carbono producido por la fotosíntesis de las hojas en una etapa intermedia del desarrollo del fruto (Díaz-

Mula y cols., 2011). Un menor número de frutos por cm² de tronco permitió un mayor suministro de asimilados a los frutos, otorgando valores de SSC más altos en 2015 (Crisosto y cols., 1994b; Intrigliolo y Castel, 2010; Wünsche, J. N., Ferguson, 2005), diferenciando en 2015 los tratamientos.

Los resultados obtenidos en cuanto al número de frutos cuajados en cada tratamiento aportan información sobre cómo afecta el momento en que el árbol sufre el estrés hídrico a los procesos que deciden el número potencial de frutos del año siguiente. El tratamiento RDI, que soportó un déficit hídrico de moderado a severo en una etapa en torno al endurecimiento del hueso, experimentó un incremento considerable en el número de frutos cuajados en relación con CON, mientras que cuando el estrés incidió próximo a la recolección (RDP) el efecto no fue tan evidente.

Según Marsal y cols., (2016) las estrategias de RDC prolongadas a lo largo de los años pueden tener un efecto negativo a medio-largo plazo sobre la productividad de los árboles de melocotonero al reducir el tamaño de las copas. La estrategia RDP disminuyó el vigor de los árboles cuantificado como el incremento en la sección de tronco en relación con CON, pero la incidencia del estrés sobre la radiación interceptada por la copa fue inferior a RDI, ya que en este último el estrés hídrico afectó en un periodo con crecimiento vegetativo más activo, por lo que cabe esperar que sea menos propenso a un decaimiento prematuro. Por otra parte, en RDP el incremento en la carga de los árboles en relación a CON fue menos acusado que en RDI, lo que supone un menor consumo de asimilados en fases iniciales, hasta el establecimiento de la carga definitiva.

La aplicación de RDP en principio, parece aportar ventajas frente a RDI en cuanto a los resultados obtenidos, tal y como se ha planteado el control del estado hídrico del árbol para mantener un estrés moderado, ya que se ha asumido que un estrés severo en un periodo de demanda evaporativa tan alta podría poner en riesgo la cosecha. En RDI la supresión total del riego sometió al árbol a un nivel de estrés variable entre años. Aunque esta última es más fácil de aplicar a nivel comercial, genera mayor incertidumbre en cuanto a los resultados obtenidos dependiendo principalmente de la pluviometría, nivel de reservas del suelo, y la carga de los árboles, debiendo asumir el riesgo de pérdida de calibre. La aplicación de un periodo de déficit hídrico en una etapa final del fruto (P2) permite tomar decisiones con mayor conocimiento de la situación particular de cada año, pudiendo modificar la intensidad del estrés en función de las reservas de agua disponibles en el perfil.

El establecimiento de niveles de referencia de estado hídrico para gestionar las estrategias de RDC es recomendable para evitar niveles de estrés tan severos que puedan llegar a afectar negativamente, incluso en estados fenológicos menos sensibles. Pero al igual que sucede en una especie tan vecera como el olivo (Martín-Vertedor y cols., 2011) el nivel de carga de los árboles afecta a los niveles de potencial hídrico. En 2015, al ser un año de carga muy reducida, el tratamiento CON mantuvo Ψ_s por encima de -1 MPa, mientras que en los otros dos años los valores descendieron por debajo de este límite a pesar de mantener el mismo criterio de riego y ser años más húmedos. A nivel práctico es necesario aceptar cierta flexibilidad en cuanto a los niveles de referencia y ajustar a las condiciones de la plantación en ese año. Por otra parte, si se atiende a otro de los potenciales beneficios de esta técnica: el control del vigor, en los resultados se observa que en años de poca carga puede ser recomendable permitir niveles de estrés más severos para contener la vegetación. En este sentido resultó más efectiva la estrategia RDI que RDP, al actuar en un momento con mayores tasas de crecimiento de la vegetación.

4.7. Conclusiones

La combinación de periodos de déficit en el tratamiento RDI acumuló una duración media de 73 días y supuso un ahorro en las aportaciones de agua de hasta un 26% respecto al tratamiento CON, aumentando los valores de la eficiencia en el uso del agua, sin diferencias en la producción final (kg - ha⁻¹), aunque comprometiendo el tamaño del fruto. En el tratamiento RDP, el déficit iniciado en precosecha y continuado en postcosecha supuso ahorros de hasta un 30% respecto al tratamiento CON en una duración media de 58 días de aplicación con un efecto similar a RDI en la eficiencia del uso del agua.

La estrategia de riego adoptada modificó el patrón estacional de utilización del agua en el suelo, así como la distribución en profundidad. Las dos estrategias de RDC incrementaron la utilización de las reservas de agua en el suelo en relación con el tratamiento control.

En RDP la aplicación de un periodo de déficit hídrico en una etapa final del desarrollo del fruto (P2) ofrece un mayor margen de tiempo para ajustar la intensidad del estrés a las condiciones particulares de la campaña.

El mayor calibre de fruto se obtuvo en el tratamiento CON con tamaños similares en RDP, mientras que un descenso acusado de Ψ_s durante el primer periodo de estrés provocó pérdidas de calibre y como consecuencia del valor de la cosecha.

Los parámetros de calidad de los frutos no se vieron afectados por ninguna de las estrategias de déficit hídrico, aunque si lo hizo el tamaño de los frutos, las reducciones en la tasa de crecimiento de los frutos RDI tuvieron una repercusión en la cosecha final, mostrando calibres más pequeños que los otros tratamientos, sin embargo, la reducción de tamaño de los frutos RDP no tuvo consecuencias significativas en la distribución final de calibres.

A la vista de los resultados obtenidos, la estrategia de riego deficitario controlado RDP ofrece notables ventajas frente a RDI, con resultados productivos equiparables al tratamiento CON, pero con menores necesidades de inputs.

4.8. Referencias

- Abdi, N., Holford, P., McGlasson, W.B., Mizrahi, Y., 1997. Ripening behaviour and responses to propylene in four cultivars of Japanese type plums. *Postharvest Biol. Technol.* 12, 21–34. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(97\)00041-0](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(97)00041-0)
- Addoms, R.M., Nightingale, G.T., Blake, M.A., 1930. Development and ripening of peaches as correlated with physical characteristics, chemical composition, and histological structure of the fruit flesh.
- Aragón-Durand, F., Cramer, W., Humphreys, S., Kainuma, M., Kala, J., Mahowald, N., Mulugetta, Y., Perez, R., Wairiu, M., Zickfeld, K., 2018. Global Warming of 1.5 °C Chapter 1 2.
- Auzmendi, I., Mata, M., Lopez, G., Girona, J., Marsal, J., 2011. Intercepted radiation by apple canopy can be used as a basis for irrigation scheduling. *Agric. Water Manag.* 98, 886–892. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.01.001>
- Behboudian, M.H., Mills, T.M., 1997. Deficit irrigation in deciduous orchards. *Hortic. Rev. (Am. Soc. Hortic. Sci.)* 21, 105–131.
- Berman, M.E., Dejong, T.M., 1996. Water stress and crop load effects on fruit fresh and dry weights in peach (*Prunus persica*). *Tree Physiol.* 16, 859–864. <https://doi.org/10.1093/treephys/16.10.859>
- Blanco-Cipollone, F., Moñino, M.J., Vivas, A., Samperio, A., Prieto, M.H., 2019. Long-term effects of irrigation regime on fruit development pattern of the late-maturing ‘Angeleno’ Japanese plum. *Eur. J. Agron.* 105, 157–167. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.02.015>
- Brown, D.S., 1953. The effects of irrigation on flower bud development and fruiting in apricot. *Proc. Am. Soc. Hortic. Sci.* 61, 119–134.
- Chalmers, D.J., Mitchell, P.D., Heek, L. van, Van Heek, L., 1981. Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density, and summer pruning. *J. Journal-American Soc. Hortic. Sci. (USA)* 106, 307–3012.
- Chalmers, D.J., Wilson, I.B., 1978. Productivity of peach trees: tree growth and water stress in relation to fruit growth and assimilate demand. *Ann. Bot.* 42, 285–294.
- Cheng, G.W., Crisosto, C.H., 1997. Iron--Polyphenol Complex Formation and Skin Discoloration in Peaches and Nectarines. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 122, 95–99.
- Crisosto, C., Slaughter, D., Garner, D., Boyd, J., 2001. Stone Fruit Critical Bruising Tresholds. *Am. Pomol. Soc.* 55, 76–81.
- Crisosto, C.H., Garner, D., Crisosto, G.M., Bowerman, E., 2004. Increasing “Blackamber” plum (*Prunus salicina* Lindell) consumer acceptance. *Postharvest Biol. Technol.* 34, 237–244. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2004.06.003>
- Crisosto, Crisosto, G.M., Echeverria, G., Puy, J., 2007. Segregation of plum and pluot cultivars according to their organoleptic characteristics. *Postharvest Biol. Technol.* 44, 271–276. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.12.005>
- Crisosto, Johnson, Luza, Crisosto, 1994a. Irrigation Regimes Affect Fruit Soluble Solids Concentration and Rate of Water Loss of ‘ O ’ Henry ’ Peaches. *Hortic. Sci.* 29, 1169–1171.

Crisosto, Johnson, Luza, Crisosto, 1994b. Irrigation regimes affect fruit soluble solids concentration and rate of water loss of “O’Henry” peaches. *HortScience* 29, 1169–1171. <https://doi.org/10.1111/j.1743-6109.2010.02171.x>

Díaz-Mula, H.M., 2011. Bioactive Compounds, Antioxidant Activity and Quality of Plum and Sweet Cherry Cultivars as Affected by Ripening On-Tree, Cold Storage and Postharvest Treatments. Universidad Miguel Hernández de Elche.

Díaz-Mula, H.M., Zapata, P.J., Guillén, F., Castillo, S., Martínez-Romero, D., Valero, D., Serrano, M., Díaz-Mula, H.M., Zapata, P.J., Guillén, F., Castillo, S., Martínez-Romero, D., Valero, D., Serrano, M., Díaz-Mula, H.M., Zapata, P.J., Guillén, F., Castillo, S., Martínez-Romero, D., Valero, D., Serrano, M., 2008. Changes in physicochemical and nutritive parameters and bioactive compounds during development and on-tree ripening of eight plum cultivars: A comparative study. *J. Sci. Food Agric.* 88, 2499–2507. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3370>

Dodd, I.C., 2005. Root-to-shoot signalling: Assessing the roles of “up” in the up and down world of long-distance signalling in planta. *Plant Soil.* <https://doi.org/10.1007/s11104-004-0966-0>

Dos Santos, T.P., Lopes, C.M., Rodrigues, M.L., De Souza, C.R., Maroco, J.P., Pereira, J.S., Silva, J.R., Chaves, M.M., 2003. Partial rootzone drying: Effects on growth and fruit quality of field-grown grapevines (*Vitis vinifera*). *Funct. Plant Biol.* 30, 663–671. <https://doi.org/10.1071/FP02180>

El-Sharkawy, I., Kim, W.S., El-Kereamy, A., Jayasankar, S., Svircev, A.M., Brown, D.C.W., 2007. Isolation and characterization of four ethylene signal transduction elements in plums (*Prunus salicina* L.). *J. Exp. Bot.* 58, 3631–3643. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm213>

Fereres, E., González-Dugo, V., 2009. Improving Productivity to Face Water Scarcity in Irrigated Agriculture, in: *Crop Physiology*. pp. 122–143. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374431-9.00006-2>

Fereres, E., Soriano, M.A., 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *J. Exp. Bot.* 58, 147–159. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl165>

Geerts, S., Raes, D., 2009. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agric. water Manag.* 96, 1275–1284. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.009>

Gelly, M., Recasens, I., Girona, J., Mata, M., Arbones, A., Rufat, J., Marsal, J., 2004. Effects of stage II and postharvest deficit irrigation on peach quality during maturation and after cold storage. *J. Sci. Food Agric.* 84, 561–568.

Gelly, M., Recasens, I., Mata, M., Arbones, A., Rufat, J., Girona, J., Marsal, J., 2003. Effects of water deficit during stage II of peach fruit development and postharvest on fruit quality and ethylene production. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 78, 324–330.

Girona, J., Marsal, J., Arbones, A., Dejong, T.M., 2004. A comparison of the combined effect of water stress and crop load on fruit growth during different phenological stages in young peach trees. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 79, 308–315.

Girona, J., Marsal, J., Mata, M., Arbonés, A., Mata, A., 2001. The combined effect of fruit load and water stress in different peach fruit growth stages (*Prunus persica* L.). *Acta Hort.* 149–152.

Girona, J., Mata, M., Arbonès, A., Alegre, S., Rufat, J., Marsal, J., 2003. Peach tree response to single and combined regulated deficit irrigation regimes under shallow soils. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 128, 432–440.

- Girona, J., Mata, M., Del Campo, J., Arbonés, A., Bartra, E., Marsal, J., 2006. The use of midday leaf water potential for scheduling deficit irrigation in vineyards. *Irrig. Sci.* 24, 115–127. <https://doi.org/10.1007/s00271-005-0015-7>
- Glew, R.H., Ayaz, F.A., Sanz, C., VanderJagt, D.J., Huang, H.S., Chuang, L.T., Strnad, M., 2003. Effect of postharvest period on sugars, organic acids and fatty acids composition in commercially sold medlar [*Mespilus germanica* 'Dutch'] fruit. *Eur. Food Res. Technol.* 216, 390–394. <https://doi.org/10.1007/s00217-002-0654-3>
- Guerra Velo, M., 2011. Polinización y cuajado en ciruelo japonés. Universidad de Extremadura. Departamento de Biología Vegetal, Ecología y Ciencias de la Tierra.
- Holzappel, B.P., Smith, J.P., Mandel, R.M., Keller, M., 2006. Manipulating the Postharvest Period and Its Impact on Vine Productivity of Semillon Grapevines. *Am. J. Enol. Vitic.* 57.
- Intrigliolo, D.S., Ballester, C., Castel, J.R., 2013. Carry-over effects of deficit irrigation applied over seven seasons in a developing Japanese plum orchard. *Agric. Water Manag.* 128, 13–18. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.06.009>
- Intrigliolo, D.S., Castel, J.R., 2010. Response of plum trees to deficit irrigation under two crop levels: Tree growth, yield and fruit quality. *Irrig. Sci.* 28, 525–534. <https://doi.org/10.1007/s00271-010-0212-x>
- Intrigliolo, D.S., Castel, J.R., 2005. Effects of regulated deficit irrigation on growth and yield of young Japanese plum trees. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 80, 177–182. <https://doi.org/10.1080/14620316.2005.11511913>
- Intrigliolo, D.S., Castel, J.R., 2004. Continuous measurement of plant and soil water status for irrigation scheduling in plum. *Irrig. Sci.* 23, 93–102. <https://doi.org/10.1007/s00271-004-0097-7>
- Johnson, R.S., Handley, D.F., 2000. Using Water Stress to Control Vegetative Growth and Productivity of Temperate Fruit Trees. *Hortscience* 35, 1048–1050.
- Johnson, R.S., Handley, D.F., Dejong, T.M., 1992. Long-term Response of Early Maturing Peach Trees to Postharvest Water Deficits. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 117, 881–886.
- Junquera, P., Hueso, A., Gomez-del-Campo, M., 2016. Effect of deficit irrigation during the oil synthesis period on yield, in hedgerow olive orchards cv. "Arbequina." *Vii Congr. Iber. Agroingeniería Y Ciencias Hortic. Innovar Y Prod. Para El Futur. Innov. Prod. Futur.* 1463–1468.
- Larson, K., Dejong, T.M.T., Johnson, R.S.R., 1988. Physiological and growth responses of mature peach trees to postharvest water stress. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 113, 296–300.
- Maatallah, S., Guizani, M., Hjlouai, H., Boughattas, N.E.H., Lopez-Lauri, F., Ennajeh, M., 2015. Improvement of fruit quality by moderate water deficit in three plum cultivars (*Prunus salicina* L.) cultivated in a semi-arid region. *Fruits* 70, 325–332. <https://doi.org/10.1051/fruits/2015023>
- Marsal, J., Casadesus, J., Lopez, G., Mata, M., Bellvert, J., Girona, J., 2016. Sustainability of regulated deficit irrigation in a mid-maturing peach cultivar. *Irrig. Sci.* 34, 201–208. <https://doi.org/10.1007/s00271-016-0498-4>
- Martín-Vertedor, A.I., Rodríguez, J.M.P., Losada, H.P., Castiel, E.F., 2011. Interactive responses to water deficits and crop load in olive (*olea europaea* L., cv. Morisca) I. - Growth and water relations. *Agric. Water Manag.* 98, 941–949. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.01.002>
- McCarthy, M.G., Loveys, B.R., Dry, P.R., Stoll, M., 2005. Regulated deficit irrigation and partial rootzone drying as irrigation management techniques for grapevines. *Deficit Irrig. Pract.* 79–87.

- Mccutchan, H., Shackel, K.A., Kenneth, 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, 607–611. <https://doi.org/10.21273/jashs.117.4.607>
- Mitchell, F.G., Crisosto, C.H., Johnson, R.S., 1995. Postharvest quality in fresh market stone fruits. *Pennsylvania Fruit News* 75, 70–79. <https://doi.org/10.1057/palgrave.ijme.9100026>
- Mitchell, P.D., Chalmers, D.J.J., 1982. The effect of reduced water supply on peach tree growth and yields. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 107, 853–856.
- Mpelasoka, B.S., Behboudian, M.H., Dixon, J., Neal, S.M., Caspari, H.W., 2000. Improvement of fruit quality and storage potential of “Braeburn” apple through deficit irrigation. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 75, 615–621. <https://doi.org/10.1080/14620316.2000.11511296>
- Mpelasoka, B.S., Hossein Behboudian, M., 2002. Production of Aroma volatiles in response to deficit irrigation and to crop load in relation to fruit maturity for “Braeburn” apple. *Postharvest Biol. Technol.* 24, 1–11. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(01\)00110-7](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(01)00110-7)
- Myers, B.J., 1988. Water stress integral--a link between short-term stress and long-term growth. *Tree Physiol.* 4, 315–323. <https://doi.org/10.1093/treephys/4.4.315>
- Naor, A., 2006. Irrigation scheduling of peach - Deficit irrigation at different phenological stages and water stress assessment, in: *Acta Horticulturae*. pp. 339–349.
- Naor, A., 2004. The interactions of soil- and stem-water potentials with crop level, fruit size and stomatal conductance of field-grown “Black Amber” Japanese plum. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 79, 273–280. <https://doi.org/10.1080/14620316.2004.11511760>
- 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. Amer. Soc. Hort. Sci.* 126, 140–143.
- Naor, A., Peres, M., Greenblat, Y., Gal, Y., Ben Arie, R., 2004. Effects of pre-harvest irrigation regime and crop level on yield, fruit size distribution and fruit quality of field-grown “Black Amber” Japanese plum. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 79, 281–288. <https://doi.org/10.1080/14620316.2004.11511761>
- Naor, A., Stern, R., Peres, M., Greenblat, Y., Gal, Y., Flaishman, M.A., 2005. Timing and severity of postharvest water stress affect following-year productivity and fruit quality of field-grown “Snow Queen” nectarine. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 130, 806–812.
- Passioura, J.B., Gardner, P.A., 1990. Control of leaf expansion in wheat seedlings growing in drying soil. *Aust. J. Plant Physiol.* 17, 149–157. <https://doi.org/10.1071/PP9900149>
- Ripoll, J., Urban, L., Staudt, M., Lopez-Lauri, F., Bidel, L.P.R., Bertin, N., 2014. Water shortage and quality of fleshy fruits-making the most of the unavoidable. *J. Exp. Bot.* <https://doi.org/10.1093/jxb/eru197>
- Ruiz-Sanchez, M.C., Domingo, R., Castel, J.R., Ruiz Sánchez, M.C., Domingo Miguel, R., Castel Sánchez, J.R., Ruiz-Sanchez, M.C., Domingo, R., Castel, J.R., 2010. Deficit irrigation in fruit trees and vines in Spain. *Spanish J. Agric. Res.* 8, 5–20. <https://doi.org/10.5424/sjar/201008S2-1343>
- Ruiz-Sanchez, M.C., Egea, J., Galego, R., Torrecillas, A., 1999. Floral biology of “Bulida” apricot trees subjected to postharvest drought stress. *Ann. Appl. Biol.* 135, 523–528. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1999.tb00883.x>

Sadras, V.O., Connor, D.J., 1991. Physiological basis of the response of harvest index to the fraction of water transpired after anthesis: A simple model to estimate harvest index for determinate species. *F. Crop. Res.* 26, 227–239. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(91\)90001-C](https://doi.org/10.1016/0378-4290(91)90001-C)

Samperio, A., Moñino, M.J., Marsal, J., Prieto, M.H., Stöckle, C., 2014. Use of CropSyst as a tool to predict water use and crop coefficient in Japanese plum trees. *Agric. Water Manag.* <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.019>

Samperio, Moñino, M.J., Vivas, A., Blanco-Cipollone, F., Martín, A., Prieto, M., 2015. Effect of deficit irrigation during stage II and post-harvest on tree water status, vegetative growth, yield and economic assessment in “Angeleno” Japanese plum. *Agric. Water Manag.* 158, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.04.008>

Soriano, M.A.J., 2001. Influencia de los factores ambientales en el reparto de carbono y en la determinación del número de granos en el girasol: experimentación, modelización y aplicación al sistema de cultivo de andalucía 1.

Taylor, M.A., Rabe, E., Dodd, M.C., Jacobs, G., 1993. Influence of sampling date and position in the tree on mineral nutrients, maturity and gel breakdown in cold stored “Songold” plums. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 54, 131–141. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(93\)90061-T](https://doi.org/10.1016/0304-4238(93)90061-T)

Torrecillas, A., Domingo, R., Galego, R., Ruiz-Sánchez, M.C., 2000. Apricot tree response to withholding irrigation at different phenological periods. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 85, 201–215. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(99\)00146-6](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(99)00146-6)


Trainotti, L., Zanin, D., Casadoro, G., 2003. A cell wall-oriented genomic approach reveals a new and unexpected complexity of the softening in peaches. *J. Exp. Bot.* 54, 1821–1832. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg198>

Turner, N.C., 1981. Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. *Plant Soil* 58, 339–366. <https://doi.org/10.1007/BF02180062>

Uriu, K., Werenfels, L., Post, G., Retan, A., Fox, D., 1964. Cling peach irrigation. *Calif. Agric.* 18, 10–11.

Williams, L.E., Araujo, F.J., 2002. Correlations among predawn leaf, midday leaf, and midday stem water potential and their correlations with other measures of soil and plant water status in *Vitis vinifera*. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 127, 448–454. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2009.07.010>

Wünsche, J. N., Ferguson, I.B., 2005. Crop load interactions in apple. *Hort. Rev* 31, 231–290.



CAPÍTULO 5
DISCUSIÓN GENERAL Y CONCUSIONES
GENERALES.

5. CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES

5.1. Discusión General

Un aspecto incuestionable en la agricultura actual es la importancia de una gestión eficiente de los recursos hídricos para garantizar la supervivencia de las explotaciones y del suministro de alimentos a la población, en un futuro incierto debido a los efectos del Cambio Climático que empiezan ya a afectar a buena parte de las zonas agrícolas del Mundo. La fruticultura intensiva de climas templados es altamente dependiente de la disponibilidad de agua para riego y aunque originalmente se planteaba el establecimiento de plantaciones exclusivamente en zonas en las que los recursos hídricos estuvieran garantizados, surgen nuevos escenarios: plantaciones establecidas que tienen que afrontar limitaciones más o menos periódicas en el agua de riego y expansión de zonas de regadío con dotaciones inferiores a las necesidades hídricas.

Las estrategias de riego deficitario se presentan como una solución a esta problemática, ya que suponen un incremento en la eficiencia del uso del agua sin pérdidas de cosecha o pérdidas limitadas (Ferreeres y Soriano, 2007). Este tipo de propuestas han sido ampliamente validadas en condiciones experimentales en algunos cultivos como la viña (Bravdo y Naor, 1996), el limonero (Domingo y cols., 1996), el almendro (Goldhamer y Viveros, 2000) u olivo (Moriani y cols., 2003). Sin embargo, en ciruelo japonés, los trabajos son más escasos ya que se trata de un cultivo de menor importancia a nivel mundial. A esta situación se añade la complejidad varietal, con amplias diferencias genéticas entre cultivares originadas por cruces interespecíficos, frutos de programas de mejora realizados en diferentes partes del Mundo (Guerra Velo, 2011). Esta variabilidad pone en cuestión la generalización de la información obtenida para un determinado tipo de cultivar.

Los trabajos previos con el cv. de ciruelo japonés de ciclo largo "Angelino", que tenían como objetivo el diseño de estrategias de riego deficitario controlado para este tipo de cv. suscitaron algunas dudas. En principio se plantearon las estrategias de acuerdo a la información disponible en frutales de hueso, que se había demostrado válidas para melocotonero (Li y cols., 1989), en albaricoquero (Pérez-Sarmiento y cols., 2016) o cerezo (Marsal y cols., 2010), incluso de pepita, como manzano (Ebel y cols., 1995) o peral (Marsal y cols., 2002); pero resultó complejo definir la fase intermedia de menor crecimiento "a priori" la más indicada para reducir el aporte de agua, junto con la postcosecha. Por otra parte, se observó que era importante controlar los niveles de estrés ya que, tras el periodo deficitario no se producía un crecimiento compensatorio del fruto, existiendo un elevado riesgo de pérdida de calibre (Samperio y cols., 2015). En base a estos trabajos, se planteó un estudio más profundo de dos aspectos relevantes: los indicadores de estado hídrico más adecuados para esta especie y cv. (Capítulo 2) y el patrón de desarrollo del fruto y el efecto del estrés hídrico sobre el mismo (Capítulo 3).

En 2001, el ensayo llevado a cabo en dos fincas, una de *Prunus Salicina* Lindl. cv 'Angelino' y otra de *Vitis vinífera* L. cv 'Tempranillo' (Capítulo 2), mostró que en el ciruelo japonés Angelino el comportamiento diario del potencial hídrico en árboles del tratamiento bien regado y sometidos a estrés hídrico fue similar: alcanzando los valores mínimos a medio día solar, coincidiendo con una mayor demanda atmosférica y valores máximos a primera hora de la mañana, tras una rehidratación del árbol nocturna. Este comportamiento se asocia a plantas anisohídricas (Konings y Gentine, 2017; Meinzer y cols., 2009). Los valores mínimos de Ψ alcanzados a medio día solar para el tratamiento deficitario fueron de hasta dos veces más bajos que los alcanzados para el

tratamiento control, incrementándose esta diferencia cuanto más largo era el periodo de déficit. Por el contrario, ambos tratamientos tenían valores similares de Ψ a primera hora de la mañana, incluso tras 43 días sin aportaciones de riego. Estos resultados confirmaban la medida de Ψ a mediodía como un buen indicador del estado hídrico en ciruelo japonés cv 'Angeleno y por ende de Ψ s como una medida de significado equivalente a Ψ pero que caracteriza mejor el estado hídrico del árbol (Lampinen y cols., 2001).

Un análisis llevado a cabo sobre trabajos en los que se comparan indicadores y su respuesta al estado hídrico de la planta reveló que aquellas plantas que tienen un comportamiento más anisohídrico manifiestan mejor su estado con indicadores como el potencial hídrico a medio día (Cuevas y Ferna, 2010; Jorba y cols., 2015; Rieger, 1992; Tan y Buttery, 1982) que con otros indicadores como los dendrómetros que basan su variable en cambios volumétricos de la planta o sus órganos.

En el Capítulo 3, un análisis detallado del patrón de desarrollo estacional de los frutos del cv. Angeleno a lo largo de 8 años en condiciones de no estrés, confirmó una pauta de crecimiento que hacía difícil detectar una fase intermedia de crecimiento ralentizado, ya que no se identificaron cambios claros en las tasas de crecimiento, ni una relación clara con el proceso de endurecimiento del hueso. Se trata, por tanto, de un criterio completamente subjetivo (Intrigliolo y Castel, 2010; Samperio y cols., 2015), dependiente del operario en campo y variable año a año (Girona y cols., 2003; Naor, 2006). Sin embargo, en la última fase de desarrollo del fruto, próxima a recolección, el fruto mostró un descenso en sus tasas de crecimiento, en contraposición con lo observado en melocotonero, donde se considera una fase de crecimiento exponencial (Girona y Fereres, 2014; Pérez-Pastor y cols., 2014). Por otra parte, los resultados obtenidos en 4 años de estudio mostraron una reducción sistemática del tamaño final del fruto como consecuencia del estrés hídrico, llegando incluso a detener el desarrollo en los años en que el estrés llegaba a ser severo. A la vista de estos resultados, se plantea la duda de si este comportamiento es singular de este cv. o si guarda relación con la larga duración del periodo de formación del fruto desde cuajado, hasta recolección. Esto último invita a realizar comprobaciones en otros frutales con características similares ya que existen muy pocas referencias de estudios de RDC en cultivares de ciclo tan largo. El cv. de melocotonero O'Henry citado en varios artículos sobre estrategias de riego como "ciclo largo" (Crisosto y cols., 1994), es un mes más corto que Angeleno. El poco interés científico por estos cv. es probablemente debido a su menor interés comercial, al acceder a los mercados en un periodo con una oferta abundante y variada de fruta, quedando variedades de tipo tradicional como el melocotón de Calanda (primera decena de octubre), Jesca (tercera decena de septiembre) o Evaisa (segunda decena de octubre) en un segundo plano.

En este estudio, al modificar la duración del primer periodo deficitario y gracias a la variabilidad interanual en la pluviometría se dispuso de un amplio rango en cuanto a intensidad y duración de este periodo de estrés. Como consecuencia se pudo establecer que la reducción del tamaño final del fruto está más afectada por la intensidad del estrés que por la duración del mismo; así años con una caída de Ψ_{st} lenta durante el periodo de déficit, debido a la alta reserva de agua en el suelo, pudieron alcanzar valores de hasta $-1,5\text{MPa}$ sin observarse reducciones en el tamaño final del fruto, coincidiendo con lo observado en otros cv. de ciclo medio (Intrigliolo y Castel, 2006).

La estrategia RDC ocasionó frutos de menor tamaño los primeros años donde el estrés fue más severo, aunque la producción final (Kg ha^{-1}) fue similar al tratamiento Control debido al incremento en el número de frutos, fenómeno observado previamente en la misma especie (Intrigliolo y Castel, 2006; Samperio y cols., 2015), demostrando la viabilidad de esta estrategia

en el ahorro de agua en aquellas circunstancias en las que el calibre no sea el principal criterio de calidad de la producción.

La Estrategia de Riego Deficitario Controlado propuesta para el cv. Angeleno (Capítulo 4) consiste en un único periodo de riego deficitario que se inicia antes de la recolección (al ralentizarse el crecimiento del fruto) y se prolonga hasta la caída de hojas, manteniendo un estrés moderado. De la comparación con la estrategia de RDC previa y un CON regado de acuerdo a necesidades hídricas, se ha demostrado el interés de la misma. La estrategia RDP no ocasionó reducción de la producción (kg ha^{-1}) ni del tamaño final de los frutos, por lo que gracias a los ahorros en el agua de riego se obtuvo una mayor eficiencia en el uso del agua que el tratamiento CON y RDI, acorde con otros autores en los que se destaca que las estrategias de déficit hídrico mejoran este indicador (Geerts y Raes, 2009).

Parte de la clave del éxito de una estrategias de RDC depende de que el estrés hídrico no afecte al desarrollo del fruto, para lo que debe coincidir con un periodo de menor demanda como sumidero, que en melocotonero de ciclo medio se asocia a la fase II (Chalmers y cols., 1981, Mitchell y Chalmers 1982). DeJong y cols., (1987) en un estudio realizado sobre cultivares de ciclo corto y largo de melocotonero observó que, sin existir una fase plana en el desarrollo del fruto en los cultivares de ciclo corto, el patrón de desarrollo vegetativo fue similar entre ambos. En ciruelo japonés, también en ciclos cortos y medios Basile y cols., (2002) apuntan a la existencia de ciertas discrepancias con el melocotonero relacionadas con la fase final de crecimiento del fruto. En ambos tratamientos deficitarios (RDC y RDP) se produjo una reducción en las tasas de crecimiento del fruto en los respectivos periodos de déficit hídrico respecto a los frutos del tratamiento Control, pero en el caso de RDI la tasa también fue menor inmediatamente antes de la cosecha, igualándose a RDP, siendo por tanto más propenso a pérdidas de calibre. El primer periodo de estrés en RDI, en condiciones severas dio lugar a una limitación irreversible del tamaño potencial fruto.

Otro aspecto relevante en las estrategias de RDC es analizar el efecto sobre el crecimiento vegetativo, siendo en los primeros estudios el objetivo principal de las mismas (Chalmers y cols., 1981). Aunque estas condiciones de cultivo a la reducción de costes se le presta una importancia secundaria frente a la producción, es un aspecto a valorar. El tratamiento RDI, al situar el primer periodo deficitario en un momento de crecimiento vegetativo más activo, tuvo una respuesta más evidente de reducción del crecimiento, observable en la evolución estacional de la radiación interceptada, sin embargo, los dos tratamientos deficitarios tuvieron un efecto similar sobre el control del vigor en relación con el control, a la vista de la evolución de la sección de tronco.

El ciruelo japonés de ciclo corto exhibe una dinámica de producción del etileno típica de los frutos climatéricos: con un incremento final de esta hormona que favorece los procesos de maduración organolépticas (Abdi y cols., 1997). Cultivares de ciclo tardío exhiben un climaterio suprimido, consistente en la acumulación de etileno (tanto de producción endógena como exógena) hasta que, una vez alcanzado un mínimo, desencadena la maduración del fruto en un periodo corto de tiempo (El-Sharkawy y cols., 2007). El estrés hídrico en el periodo de maduración del fruto (RDP) (Trainotti y cols., 2003) no ocasionó diferencias en la composición final de los frutos con respecto al Control, los valores de acidez, dureza y sólidos solubles se mantuvieron en rangos aceptables por el consumidor (Crisosto y cols., 2007) aunque influenciados interanualmente por el nivel de carga, donde el año 2015 un bajo número de frutos por árbol permitió una mayor suministro de asimilados en el fruto incrementando los sólidos solubles (Díaz-Mula y cols., 2011).

Los resultados obtenidos avalan el interés de la estrategia propuesta, presentando algunas ventajas frente a la previamente utilizada. Adicionalmente, dado que una de las características singulares de Angeleno es un buen comportamiento en postcosecha (admitiendo un almacenamiento prolongado), se sugiere un análisis más detallado de las características de los frutos y su comportamiento en cámara.

El proceso que se ha planteado en este estudio ha hecho posible proponer una forma más "racional" para la programación del riego en las plantaciones de un cultivar concreto de ciruelo japonés, a través de un mejor conocimiento ecofisiológico del mismo en relación con la respuesta del árbol frente a episodios de sequía y su recuperación posterior. Disponer de un ensayo de larga duración, ha sido sin duda la clave para garantizar la fiabilidad y alcance de los resultados, además de su efecto a largo plazo, aspecto fundamental para la aplicación práctica de este tipo de estrategias y que pocas veces puede ser abordado en los trabajos de campo. Aunque el estudio se ha centrado en un solo cultivar, algunos de los resultados y conclusiones tienen un alcance mayor que el propio caso de estudio, ya que la respuesta al estrés hídrico de las especies se suele ajustar a modelos que se repiten en diferentes especies y tipos varietales. Estos resultados abren la puerta replantearse los modelos generalmente aceptados con un objetivo claro de proponer mejoras abordables en la práctica para un mejor uso del agua en la agricultura..

5.2. Conclusiones Generales

La medida de potencial hídrico de tallo tomada a mediodía solar es un mejor indicador de estado hídrico en plantas con comportamiento anisohídrico, mientras que en plantas con comportamiento isohídrico, la medida de potencial hídrico de tallo tomada al amanecer resulta más adecuada.

la validez de estos indicadores no sólo depende de la isohidricidad, también del nivel de estrés al que están sometidas las plantas y del cultivar en cuestión

Las diferencias entre el comportamiento isohídrico y anisohídrico complican la elección y el uso de un indicador de estrés en un cultivar en particular. Se recomienda un estudio previo del comportamiento de la planta con cambios ambientales para establecer qué variable proporciona la mejor información, a menos que ya se disponga de una colección de datos sobre diferentes indicadores.

El desarrollo del fruto del ciruelo japonés cv. `Angelino se describe mediante un modelo de dos fases en términos de DDAFB, que es consistente año tras año. La primera fase se extiende hasta 1100 DDAFB, y la segunda desde este punto hasta la cosecha. Este modelo permite predecir el tamaño final potencial del fruto desde las primeras etapas de crecimiento y puede ser una guía para las prácticas de raleo en años de alta carga de cultivo.

Para evitar pérdidas en el tamaño de los frutos en las estrategias de riego deficitario es importante evitar una caída por debajo de -1,5 MPa y, especialmente, una rápida caída de ese valor, dependiendo de las condiciones climáticas de cada año. Además, es necesario ajustar el nivel de carga de cultivos arbóreos en los momentos precisos del inicio y final del período de riego deficitario.

La combinación de periodos de déficit en el tratamiento RDI acumuló una duración media de 73 días y supuso un ahorro en las aportaciones de agua de hasta un 26% respecto al tratamiento CON, aumentando los valores de la eficiencia en el uso del agua, sin diferencias en la producción final (kg ha⁻¹), aunque comprometiendo el tamaño del fruto.

En el tratamiento RDP, el déficit iniciado en precosecha y continuado en postcosecha supuso ahorros de hasta un 30% respecto al tratamiento CON en una duración media de 58 días de aplicación con un efecto similar a RDI en la eficiencia del uso del agua.

La estrategia de riego adoptada modificó el patrón estacional de utilización del agua en el suelo, así como la distribución en profundidad. Las dos estrategias de RDC incrementaron la utilización de las reservas de agua en el suelo en relación con el tratamiento control.

En RDP la aplicación de un periodo de déficit hídrico en una etapa final del fruto (P2) ofrece un mayor margen de tiempo para ajustar la intensidad del estrés a las condiciones particulares de la campaña.

El mayor calibre de fruto se obtuvo en el tratamiento CON con tamaños similares en RDP, mientras que un descenso acusado de Ψ_s durante el primer periodo de estrés provocó pérdidas de calibre y como consecuencia del valor de la cosecha.

Los parámetros de calidad de los frutos no se vieron afectados por ninguna de las estrategias de déficit hídrico, aunque sí lo hizo el tamaño de los frutos: las reducciones en la tasa de crecimiento de los frutos RDI tuvieron una repercusión en la cosecha final, mostrando calibres más pequeños que los otros tratamientos, sin embargo, la reducción de tamaño de los frutos RDP no tuvo consecuencias significativas en la distribución final de calibres.

A la vista de los resultados obtenidos, la estrategia de riego deficitario controlado RDP ofrece notables ventajas frente a RDI, con resultados productivos equiparables al tratamiento CON, pero con menores necesidades de inputs

5.3. General Conclusions

The stem water potential measurement taken at solar midday is a better tree water status in the plants with good anisohydric behavior, while plants with isohydric behavior stem water potential taken at predawn fits better.

The robustness of these indicators depends not only on the isohydricity behaviour, but also on the level of stress to which the plants are exposed and, on the cultivar, studied

Differences between isohydric and anisohydric behavior complicate the choice and use of a stress indicator in a specific cultivar. A previous study of plant behaviour with environmental changes is recommended to establish which variable provides the best information, unless a collection of data on different indicators is already available.

Fruit Development of the Japanese plum cv. `Angelena is described by a two-phase model in terms of DDAFB, which is consistent year after year. The first phase extends to 1100 DDAFB, and the second phase from this point to harvest. This model allows predicting the potential final size of the fruit from the earliest stages of growth and can be a guide for thinning practices in years of high crop load.

To avoid losses in fruit size in deficit irrigation strategies it is important to avoid a drop below -1.5 MPa and, especially, a rapid fall in that value, depending on the weather conditions of each year. In addition, it is necessary to adjust the crop load of tree at the specific moments of the beginning and end of the deficit irrigation period.

The combination of deficit periods in the RDI treatment accumulated an average duration of 73 days and meant saving in water contributions up to 26% regarding the CON treatment, increasing the efficiency in the use of water, without differences in the final yield (kg ha⁻¹), although compromising the final fruit size.

In RDP treatment, the deficit started in pre-harvest and continued in post-harvest resulted in savings up to 30% in comparison the CON treatment with an average duration of 58 days of application with a similar effect to RDI on the efficiency of the use of water.

The irrigation strategy adopted modified the seasonal pattern of water use in the soil, as well as the depth distribution. The two RDC strategies increased the use of soil water reserves in relation to control treatment.

In RDP the use of a period of water deficit in a final stage of the fruit (P2) offers a greater timeframe to adjust the intensity of stress to the particular conditions of the season.

The largest fruit size was obtained in the CON treatment with similar sizes in RDP, whereas a severe drop of Ψ_s during the first period of stress caused losses of fruit calibre and as a consequence of the value of the harvest.

Fruit quality parameters were not affected by any of the water deficit strategies, although fruit size was affected: reductions in the RDI fruit growth rate had an impact on the final harvest, showing smaller calibers than the other treatments; however, RDP fruit size reduction did not have significant consequences on the final calibre distribution.

In the light of the obtained results , the RDP deficit irrigation strategy offers notable advantages over RDI, with productive results comparable to the CON treatment, but with lower input requirements

5.4. Referencias

- Abdi, N., Holford, P., McGlasson, W.B., Mizrahi, Y., 1997. Ripening behaviour and responses to propylene in four cultivars of Japanese type plums. *Postharvest Biol. Technol.* 12, 21–34. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(97\)00041-0](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(97)00041-0)
- Basile, B., Mariscal, M.J., Day, K.R., Johnson, R.S., DeJong, T.M., 2002. Japanese plum (*Prunus salicina* L.) fruit growth: Seasonal pattern of source/sink limitations. *J. Am. Pomol. Soc.* 56, 86–93.
- Bravdo, B.A., Naor, A., 1996. Effect of water regime on productivity and quality of fruit and wine. *Acta Hort.* 427, 15–26.
- Chalmers, D.J., Mitchell, P.D., Heek, L. van, Van Heek, L., 1981. Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density, and summer pruning. *J. Journal-American Soc. Hortic. Sci. (USA)*. 106, 307–3012.
- Crisosto, Crisosto, G.M., Echeverria, G., Puy, J., 2007. Segregation of plum and pluot cultivars according to their organoleptic characteristics. *Postharvest Biol. Technol.* 44, 271–276. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.12.005>
- Crisosto, Johnson, Luza, Crisosto, 1994. Irrigation regimes affect fruit soluble solids concentration and rate of water loss of “O’Henry” peaches. *HortScience* 29, 1169–1171. <https://doi.org/10.1111/j.1743-6109.2010.02171.x>
- Cuevas, M. V, Ferna, J.E., 2010. Irrigation scheduling from stem diameter variations : A review. *Agric. For. Meteorol.* 150, 135–151. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.11.006>
- DeJong, T.M., Doyle, J.F., Day, K.R., 1987. Seasonal patterns of reproductive and vegetative sink activity in early and late maturing peach (*Prunus persica*) cultivars. *Physiol. Plant.* 71, 83–88. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1987.tb04621.x>
- Díaz-Mula, H.M., 2011. Bioactive Compounds, Antioxidant Activity and Quality of Plum and Sweet Cherry Cultivars as Affected by Ripening On-Tree, Cold Storage and Postharvest Treatments. Universidad Miguel Hernández de Elche.
- Domingo, R., Ruiz-Sánchez, M.C., Sánchez-Blanco, M.J., Torrecillas, A., 1996. Water relations, growth and yield of Fino lemon trees under regulated deficit irrigation. *Irrig. Sci.* 16, 115–123. <https://doi.org/10.1007/BF02215619>
- Ebel, R.C., Proebsting, E.L., Evans, R.G., 1995. Deficit irrigation to control vegetative growth in apple and monitoring fruit growth to schedule irrigation. *HortScience* 30, 1229–1232.
- El-Sharkawy, I., Kim, W.S., El-Kereamy, A., Jayasankar, S., Svircev, A.M., Brown, D.C.W., 2007. Isolation and characterization of four ethylene signal transduction elements in plums (*Prunus salicina* L.). *J. Exp. Bot.* 58, 3631–3643. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm213>
- Fereres, E., Soriano, M.A., 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *J. Exp. Bot.* 58, 147–159. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl165>
- Geerts, S., Raes, D., 2009. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agric. water Manag.* 96, 1275–1284. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.009>
- Girona, J., Fereres, E., 2014. Yield response to water of fruit trees and vines: guidelines, in: *Crop Yield Response to Water on Peach*. fao Rome, p. 501.

- Girona, J., Mata, M., Arbonès, A., Alegre, S., Rufat, J., Marsal, J., 2003. Peach tree response to single and combined regulated deficit irrigation regimes under shallow soils. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 128, 432–440.
- Goldhamer, D.A., Viveros, M., 2000. Effects of preharvest irrigation cutoff durations and postharvest water deprivation on almond tree performance. *Irrig. Sci.* 19, 125–131. <https://doi.org/10.1007/s002710000013>
- Guerra Velo, M., 2011. Polinización y cuajado en ciruelo japonés. Universidad de Extremadura. Departamento de Biología Vegetal, Ecología y Ciencias de la Tierra.
- Intrigliolo, D.S., Castel, J.R., 2010. Response of plum trees to deficit irrigation under two crop levels: Tree growth, yield and fruit quality. *Irrig. Sci.* 28, 525–534. <https://doi.org/10.1007/s00271-010-0212-x>
- Intrigliolo, D.S., Castel, J.R., 2006. Performance of various water stress indicators for prediction of fruit size response to deficit irrigation in plum. *Agric. Water Manag.* 83, 173–180.
- Jorba, J., Tapia, L., Sant, D., 2015. Photosynthesis, leaf water potential and stomatal conductance in *olea europea* under wet and drought conditions. *Acta Hortic.* 237–246. <https://doi.org/10.17660/actahortic.1985.171.21>
- Konings, A.G., Gentine, P., 2017. Global variations in ecosystem-scale isohydricity. *Glob. Chang. Biol.* 23, 891–905. <https://doi.org/10.1111/gcb.13389>
- Lampinen, B.D., Shackel, K.A., Southwick, S.M., Olson, W.H., 2001. Deficit irrigation strategies using midday stem water potential in prune. *Irrig. Sci.* 20, 47–54. <https://doi.org/10.1007/s002710000028>
- Li, S.H., Huguot, J.-G., Schoch, P.G., Orlando, P., Schochj, P.G., Orlando, P., 1989. Response of peach tree growth and cropping to soil water deficit at various phenological stages of fruit development. *J. Hortic. Sci.* 64, 541–552. <https://doi.org/10.1080/14620316.1989.11515989>
- Marsal, J., Lopez, G., del Campo, J., Mata, M., Arbones, A., Girona, J., 2010. Postharvest regulated deficit irrigation in “Summit” sweet cherry: Fruit yield and quality in the following season. *Irrig. Sci.* 28, 181–189. <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0174-z>
- Marsal, J., Mata, M., Arbonés, A., Rufat, J., Girona, J., 2002. Regulated deficit irrigation and rectification of irrigation scheduling in young pear trees: An evaluation based on vegetative and productive response. *Eur. J. Agron.* 17, 111–122. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00002-3](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00002-3)
- Meinzer, F.C., Johnson, D.M., Lachenbruch, B., McCulloh, K.A., Woodruff, D.R., 2009. Xylem hydraulic safety margins in woody plants: Coordination of stomatal control of xylem tension with hydraulic capacitance. *Funct. Ecol.* 23, 922–930. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2009.01577.x>
- Mitchell, P.D., Chalmers, D.J.J., 1982. The effect of reduced water supply on peach tree growth and yields. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 107, 853–856.
- 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, 425–431. <https://doi.org/10.21273/jashs.128.3.0425>
- Naor, A., 2006. Irrigation scheduling of peach - Deficit irrigation at different phenological stages and water stress assessment, in: *Acta Horticulturae*. pp. 339–349.

Pérez-Pastor, A., Ruiz-Sánchez, M.C., Domingo, R., 2014. Effects of timing and intensity of deficit irrigation on vegetative and fruit growth of apricot trees. *Agric. Water Manag.* 134, 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.12.007>

Pérez-Sarmiento, F., Mirás-Avalos, J.M., Alcobendas, R., Alarcón, J.J., Mounzer, O., Nicolas, E., 2016. Effects of regulated deficit irrigation on physiology, yield and fruit quality in apricot trees under Mediterranean conditions. *Spanish J. Agric. Res.* 14, e1205. <https://doi.org/10.5424/sjar/2016144-9943>

Rieger, M., 1992. Comparison of Drought tolerance among *Prunus* species from divergent habitats. *HortScience* 27, 572g – 572. <https://doi.org/10.21273/hortsci.27.6.572g>

Samperio, Moñino, M.J., Vivas, A., Blanco-Cipollone, F., Martín, A., Prieto, M., 2015. Effect of deficit irrigation during stage II and post-harvest on tree water status, vegetative growth, yield and economic assessment in “Angeleno” Japanese plum. *Agric. Water Manag.* 158, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.04.008>

Tan, C.S., BATTERY, B.R., 1982. Response of stomatal conductance, transpiration, photosynthesis, and leaf water potential in peach seedlings to different watering regimes. *HortScience* 17, 222–223.

Trainotti, L., Zanin, D., Casadoro, G., 2003. A cell wall-oriented genomic approach reveals a new and unexpected complexity of the softening in peaches. *J. Exp. Bot.* 54, 1821–1832. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg198>