



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE
CARTAGENA

Departamento de Producción Vegetal

**Viabilidad de la utilización de los indicadores
de estado hídrico de la planta como
herramienta para la programación del riego
deficitario en nectarinos extra-tempranos**

Tesis Doctoral

Presentada por
José María de la Rosa Sánchez
Ingeniero Agrónomo

Dirigida por
Dr. Alejandro Pérez Pastor
Prof. departamento Producción Vegetal
Cartagena, 2018

El trabajo de tesis doctoral que se presenta se acoge a la modalidad de tesis por compendio de publicaciones del Departamento de Producción Vegetal de la escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica de la Universidad Politécnica de Cartagena. Consta de cinco artículos publicados en las revistas: i) “Agricultural Water Management” publicados en 2013, 2015 y 2016 con un factor de impacto de 2.33, 2.60 y 2.85, respectivamente; ii) “Scientia Horticulturae” publicado en 2014 con un factor de impacto de 1.36; iii) Irrigation Science” publicado en 2016 con un factor de impacto de 1.82.

El nexo común de estos trabajos es la utilización de indicadores de estado hídrico en cultivo en nectarino extratemprano con el fin de aumentar la eficiencia en el uso del agua de riego.

Los artículos incluidos son los siguientes:

Artículo 1. De la Rosa, JM., MR Conesa, R. Domingo, R. Torres, A. Pérez-Pastor. 2013. *Feasibility of using trunk diameter fluctuation and stem water potential reference lines for irrigation scheduling of early nectarine trees.* Agricultural Water Management 127: 31-39. DOI: 10.1016/J.AGWAT.2013.05.009

Artículo 2. De la Rosa, JM., Conesa MR., Domingo, R., Pérez-Pastor A. 2014. *A new approach to ascertain the sensitivity to water stress of different plant water indicators in extra-early nectarine trees.* Scientia Horticulturae 169, 147-153. DOI: 10.1016/j.scienta.2014.02.021

Artículo 3. De la Rosa, JM., Domingo, R., Pérez-Pastor A. 2015. *Implementing deficit irrigation scheduling through plant water stress indicators in early nectarine trees.* Agricultural Water Management 152: 207-216. Doi: 10.1016/j.agwat.2015.01.018

Artículo 4. De la Rosa, JM., IC. Dodd., Domingo, R., Pérez-Pastor A. 2016. *Early morning fluctuations in trunk diameter are highly sensitive to water stress in nectarine trees.* Irrigation Science 34: 117-128. DOI: 10.1007/s00271-016-0491-y

Artículo 5. De la Rosa, JM., Conesa MR., Domingo, R., Aguayo, E., Falagan, N., Pérez-Pastor A. 2016. *Combined effects of deficit irrigation and crop level on early nectarine trees.* Agricultural Water Management 170: 120-132. Doi:10.1016/j.agwat.2016.01.012

**CONFORMIDAD DE SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN DE DEPÓSITO DE
TESIS DOCTORAL POR EL/LA DIRECTOR/A DE LA TESIS**

D./D^a. Alejandro Pérez Pastor, Director/a de la Tesis doctoral “VIABILIDAD DE LA UTILIZACIÓN DE LOS INDICADORES DE ESTADO HÍDRICO DE LA PLANTA COMO HERRAMIENTA PARA LA PROGRAMACIÓN DEL RIEGO DEFICITARIO EN NECTARINOS EXTRA-TEMPRANOS”

INFORMA:

Que la referida Tesis Doctoral, ha sido realizada por D/D^a JOSE MARÍA DE LA ROSA SÁNCHEZ, dentro del programa de doctorado “Técnicas Avanzadas en Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario”, dando mi conformidad para que sea presentada ante la Comisión de Doctorado para ser autorizado su depósito.

La rama de conocimiento en la que esta tesis ha sido desarrollada es:

- Ciencias
- Ciencias Sociales y Jurídicas
- Ingeniería y Arquitectura

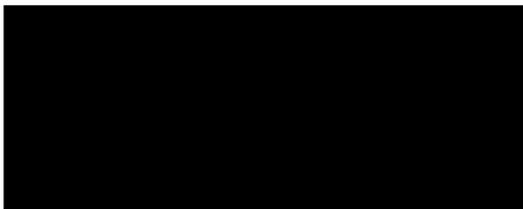
En Cartagena, a 7 de diciembre de 2017

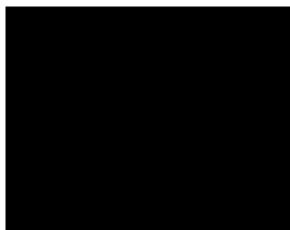
EL/LA DIRECTOR/A DE LA TESIS

ALEJANDRO|
PEREZ|PASTOR

Firmado digitalmente por ALEJANDRO|
PEREZ|PASTOR
Nombre de reconocimiento (DN):
cn=ALEJANDRO|PEREZ|PASTOR,
serialNumber=1234567890,
givenName=ALEJANDRO, sn=PEREZ-
PASTOR, ou=Ciudadanos, o=ACCV, c=ES
Fecha: 2017.12.08 13:56:03 +01'00'

Fdo.: Alejandro Pérez Pastor





Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas e instituciones que directa o indirectamente han ayudado a realizar esta tesis doctoral:

A la Universidad Politécnica de Cartagena por acogerme y facilitarme las infraestructuras y conocimientos que he necesitado durante este periodo.

A la empresa Frutas Esther S.A., por facilitarme las parcelas de nectarinos para los ensayos y por ayudarme siempre que lo necesité. No puedo dejar pasar la ocasión para agradecer a Jordi Montiel, director técnico de Frutas Esther, por ayudarme en todo lo que en su mano estuvo para hacer más fácil mi trabajo. También quiero agradecer a Ramón, Carlos y Pepe porque siempre nos ayudaron cuando necesitábamos algo en la parcela. Y también a las cuadrillas de trabajadores, para los que éramos los “chicos de las pruebas”, que siempre nos ayudaron y trataron con agrado a pesar de que nuestras medidas a veces ralentizaba y complicaban su trabajo.

Al Dr. Alejandro Pérez Pastor, por abrirme las puertas a la investigación y por dirigir mi tesis doctoral.

Al Dr. Rafael Domingo Miguel, que me ha dado buenos consejos y a quien considero un referente como investigador, siempre preocupado por la honestidad y calidad de su producción científica.

A la Dra. Charo Conesa, con la que pasé mucho tiempo en el que compartimos todo lo bueno y lo malo de este mundo de investigación.

Al ingeniero agrónomo Abdel porque siempre estuvo dispuesto a todo, siempre contento y optimista incluso en los momentos difíciles. Siempre dio y nunca pidió nada a cambio.

Al ingeniero agrónomo Jesús Carlos porque me ayudó en los momentos de más trabajo y con el que he aprendido muchas sobre el cultivo de frutales y uva de mesa.

Y al resto de compañeros de la universidad (Cristina, Pedro, Miguel y Víctor) que me ayudaron de diferentes formas, principalmente animándome cuando perdía la alegría.

A mis padres (Joaquín y Emilia) y hermanos (Joaquín, Lucía, Carlos, Alfonso, María, Pablo, Ana, José Luis y Emilia) por apoyarme y transmitirme las herramientas y valores necesarios para afrontar los retos de la vida.

A mi futura esposa, Alicia, porque siempre ha estado ahí. Cuando perdí la ilusión por el doctorado ella me obligó a terminar lo empezado y por tanto esta tesis doctoral se defenderá gracias a ella.

INDICE

Abreviaturas	15
Simbolos	16
Resumen.....	17
Abstract.....	19
1.- Introducción y objetivos.....	21
1.1.- Introducción	21
1.2.- Objetivos.....	22
2.- Estado del arte	22
2.1.- Situación actual del cultivo de melocotonero y nectarino.....	22
2.2.- Optimización del riego en frutales	24
2.2.- Riego deficitario controlado	25
2.3.- Indicadores de estado hídrico de la planta	26
2.3.1.- Cualidades deseables de los indicadores de estado hídrico de la planta	26
2.3.2.- Tipos de indicadores	27
• Indicadores no automatizables.....	27
• Indicadores automatizables	28
2.3.3.- Programación del riego en base al estado hídrico de la planta	30
3.- Resumen de artículos	31
<i>Artículo 1: Utilidad del uso de las líneas de referencia de la fluctuaciones de diámetro de tronco y el potencia hídrico de tallo para la programación del riego de nectarino temprano.....</i>	31
<i>Artículo 2: Un nuevo enfoque para evaluar la sensibilidad de los indicadores de estado hídrico de la planta en nectarino temprano.....</i>	34
<i>Artículo 3: Establecimiento de un protocolo de programación del riego deficitario a partir de indicadores de estado hídrico de la planta en nectarino temprano</i>	36
<i>Artículo 4: Las contracciones tempranas de diámetro de tronco son altamente sensibles al estrés hídrico de nectarinos</i>	39
<i>Artículo 5: Efecto combinado del déficit hídrico y la carga productiva en nectarino temprano.....</i>	41
4. Conclusiones generales	43
5. Bibliografía.....	44
6- Artículos completos.....	49

<i>Artículo 1.- Feasibility of using trunk diameter fluctuation and stem water potential reference lines for irrigation scheduling of early nectarine trees. De la Rosa, JM., MR Conesa, R. Domingo, R. Torres, A. Pérez-Pastor. 2013. Agricultural Water Management 127: 31-39.....</i>	50
<i>Artículo 2.- A new approach to ascertain the sensitivity to water stress of different plant water indicators in extra-early nectarine trees. De la Rosa, JM., Conesa MR., Domingo, R., Pérez-Pastor A. 2014. Scientia Horticulturae 169, 147-153.</i>	60
<i>Artículo 3.- Implementing deficit irrigation scheduling through plant water stress indicators in early nectarine trees. De la Rosa, JM., Domingo, R., Pérez-Pastor A. 2015. Agricultural Water Management 152: 207-216.</i>	68
<i>Artículo 4.- Early morning fluctuations in trunk diameter are highly sensitive to water stress in nectarine trees. De la Rosa, JM., IC. Dodd., Domingo, R., Pérez-Pastor A. 2016. Irrigation Science 34: 117-128.....</i>	79
<i>Artículo 5.- Combined effects of deficit irrigation and crop level on early nectarine trees. De la Rosa, JM., Conesa MR., Domingo, R., Aguayo, E., Falagan, N., Pérez-Pastor A. 2016. Agricultural Water Management 170: 120-132.....</i>	92
Apéndice I: Indices de impacto de las publicaciones.....	106
Apéndice II: Producción científica en periodo predoctoral	110

Abreviaturas

- ABA: Ácido abscísico
- CRA: Contenido relativo de agua
- CV: Coeficiente de variación
- CWSI: Índice de estrés hídrico del cultivo
- DPV: Déficit de presión de vapor
- DPV_m : Déficit de presión de vapor medio diario
- DPV_{md} : Déficit de presión de vapor al mediodía
- EDS: Contracción temprana de diámetro de tronco
- ET_0 : Evapotranspiración potencial de cultivo de referencia
- ET_c : Evapotranspiración potencial de cultivo
- EUA: Eficiencia en el uso del agua de riego
- FDT: Fluctuaciones de diámetro de tronco
- FS: Flujo de savia
- IMIDA: Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario
- IS: Intensidad de señal
- LDS: Contracción tardía de diámetro de tronco
- MCD: Máxima contracción diaria de diámetro de tronco
- MNDT: Mínimo diámetro de tronco
- MXDT: Máximo diámetro diario de tronco
- RDC: Riego deficitario controlado
- RS: Radiación solar diaria
- S: Sensibilidad
- SIAM: Sistema de Información Agraria de la Región de Murcia
- STT: Sección transversal de tronco
- SST: Sólidos solubles totales
- T_a : temperatura del aire
- TCD: Tasa de crecimiento diaria de diámetro de tronco
- T_{CTL} : Tratamiento control
- T_D : Tratamiento de riego deficitario
- T_{fa} : Temperatura foliar actual del cultivo.
- T_{fCTL} : Temperatura foliar en árboles control
- T_{fe} : Temperatura foliar en árboles muy estresados (sin transpiración)
- T_{FINC} : Tratamiento finca

- T_m : Temperatura del aire media diaria
- T_{md} : Temperatura del aire al mediodía.
- T_{mx} : Temperatura del aire máxima diaria
- T_{RDC} : Tratamiento de riego deficitario controlado

Simbolos

- G_s : Conductancia estomática
- K_c : Coeficientes de cultivo
- P_n : Fotosíntesis neta
- $S\Psi_T$: integral de estrés.
- θ_v : Humedad volumétrica
- Ψ : Potencial hídrico foliar.
- Ψ_m : potencial matricial.
- Ψ_T : potencial hídrico de tallo.
- ΔSTT : incremento anual de sección transversal de tronco.

Resumen

El tema principal de la presente tesis doctoral es el estudio de la viabilidad de la utilización de los indicadores de estado hídrico del cultivo como herramienta para la programación de riego deficitario controlado de nectarinos tempranos. En esta línea se realizaron cinco ensayos:

Utilidad del uso de las líneas de referencia de la fluctuaciones de diámetro de tronco y el potencia hídrico de tallo para la programación del riego de nectarino temprano

Se realizó un estudio durante tres años en nectarino temprano (cv Flanoba). El objetivo fue estudiar líneas de referencia con las que estimar valores del potencial hídrico de tallo al mediodía (Ψ_T), tasa de crecimiento diaria de tronco (TCD) y máxima contracción diaria de tronco (MCD), en condiciones no limitantes de agua en el suelo a partir de diferentes variables meteorológicas. MCD presentó el mejor ajuste con el déficit de presión de vapor en el periodo comprendido entre las 11:00 y las 15:00 hora solar, periodo en el que la contracción del tronco era más rápida. Se discute el hecho de la baja correlación de MCD con ET_0 . Las ecuaciones eran diferentes para cada periodo fenológico pero estables en los tres años de estudio.

Un nuevo enfoque para evaluar la sensibilidad de los indicadores de estado hídrico de la planta en nectarino temprano

Se evaluó la sensibilidad de diferentes indicadores de estado hídrico de la planta (MCD, TCD, Ψ_T , conductancia estomática $-G_s-$ y fotosíntesis neta $-P_n-$) durante la poscosecha de nectarinos tempranos (cv Viowhite). Se propuso un tratamiento control (T_{CTL}), regado a 120% de la evapotranspiración del cultivo a fin de evitar condiciones limitantes de agua en el suelo, y un tratamiento deficitario (T_D), regado al 50% de T_{CTL} . Las mayores intensidades de señales (IS, relación de los valores de T_D y T_{CTL}) fueron alcanzadas por TCD, G_s y P_n (2.6, 3 y 2.9, respectivamente): Sin embargo, la sensibilidad (S) – calculada a partir de la relación entre IS y el coeficiente de variación (CV) de las medidas – fue mayor en Ψ_T y MCD (14 y 11.4 respectivamente) debido a que los CV fueron menores (11 y 14%, respectivamente). Un nuevo enfoque (S^*) se propone para calcular la sensibilidad de los indicadores de estado hídrico de la planta, ya que el método estándar puede presentar valores altos de sensibilidad sin que dicho indicador presente diferencias entre tratamientos de riego.

Establecimiento de un protocolo de programación del riego deficitario a partir de indicadores de estado hídrico de la planta en nectarino temprano

El experimento realizado en nectarino temprano (cv Flanoba) se prolongó durante tres años (2009-2012). Se evaluaron diferentes metodologías de programación del riego llevadas a cabo en 3 tratamientos: un control (T_{CTL} , regado sin condiciones limitantes de agua en el suelo); un tratamiento basado en la práctica habitual del agricultor (T_{FINC}); y un tratamiento de riego deficitario controlado (T_{RDC}), con el mismo riego que T_{CTL} durante los periodos críticos del primer año y al 60% de T_{CTL} durante la poscosecha de este mismo año. En los dos años posteriores, este tratamiento fue programado para mantener una IS de MCD con diferentes niveles de estrés (IS=1 durante los periodos críticos y IS =1.4 y 1.5 durante la poscosecha de 2010 y 2011, respectivamente). Los valores de IS obtenidos se ajustaron a los valores umbral durante gran parte del periodo de estudio.

Los parámetros productivos no presentaron diferencias significativas entre tratamientos de riego. La disminución de agua aplicada en T_{RDC} fue del 17, 15 y 37% respecto

al riego aplicado en T_{CTL} en los tres periodos de estudio. En contra, T_{FINC} aplicó más agua (20 y 5% más que T_{CTL}) durante los dos primeros años y un 10% menos que T_{CTL} durante el tercer año.

Las contracciones tempranas de diámetro de tronco son altamente sensibles al estrés hídrico de nectarinos

La sensibilidad de diferentes indicadores de estado hídrico del cultivo fue evaluada durante dos años consecutivos. Los indicadores de estado hídrico estudiados fueron: Ψ_T , indicadores tradicionales derivados de las fluctuaciones de diámetro de tronco (MCD y TCD) y dos nuevos indicadores propuestos por primera vez en este trabajo (contracción temprana del tronco -EDS- y contracción tardía del tronco -LDS-). Las medidas se realizaron durante la poscosecha en un tratamiento control (T_{CTL} , regado sin condiciones limitantes de agua en el suelo) y en un tratamiento de riego deficitario (T_D , con déficit hídrico variable que promedió una reducción de riego de 37% respecto a T_{CTL}). Los indicadores más sensibles fueron Ψ_T y EDS. IS fue mayor en EDS que en Ψ_T pero este último tenía CV menores. A diferencia de MCD, EDS presentó relaciones lineales con Ψ_T y mantuvo la sensibilidad al final del periodo de poscosecha.

Efecto combinado del déficit hídrico y la carga productiva en nectarino temprano

Durante tres años se evaluó el efecto del déficit hídrico y diferentes cargas productivas en el crecimiento vegetativo, el estado hídrico del cultivo, la producción y la calidad de la cosecha. Los parámetros productivos y de calidad no presentaron diferencias claras entre tratamientos de riego en ninguna de las cargas frutales estudiadas. Solamente la firmeza se vio reducida en T_{CTL} cuando los niveles de carga frutal fueron bajos. Como era de esperar, T_{RDC} presentó mayor eficiencia en el uso del agua (EUA) y menor crecimiento vegetativo. La relación entre la producción y el incremento anual de sección transversal de tronco se incrementó en T_{RDC} respecto a los otros tratamientos conforme avanzaba el experimento, alcanzando diferencia del 53%.

Abstract

The main topic of the present doctoral thesis is the study of the viability of the use of indicators of water status of the crop as a tool for the scheduling of regulated deficit irrigation of early nectarines. In this way, five trials were carried out:

Feasibility of using trunk diameter fluctuation and stem water potential reference lines for irrigation scheduling of early nectarine trees

A three-year experiment on early nectarine trees (cv. Flanoba) was carried out with the aim of studying the impact of environmental variables on the trunk diameter fluctuation parameters and the usefulness of the reference-lines derived from the relationship between different meteorological variables and plant water status indicators for sustainable irrigation scheduling. Plants were drip-irrigated and submitted to non-limiting soil water conditions. Measurements of stem water potential at midday (Ψ_{stem}), trunk daily growth rate (TGR) and maximum daily trunk shrinkage (MDS) were related with meteorological variables. MDS presented the best fitting line-regressions with both the average air temperature and vapour pressure deficit during the period 11.00–15.00 h solar time, since the most important fraction of trunk shrinkage occurred during that period of time, reaching 74% of MDS (on average over the three years studied), and sometimes 90%.

Despite the continuous trunk growth of the trees during the experimental period and slight difference in crop load, inter-annual differences were not observed for the three reference lines obtained in any given year (fruit growth, early and late postharvest period).

A new approach to ascertain the sensitivity to water stress of different plant water indicators in extra-early nectarine trees

The sensitivity to water stress of different plant water indicators was evaluated during the late postharvest period of extra-early nectarine trees growing in a commercial orchard and submitted to two irrigation treatments: (i) a control (TC), irrigated at 120% of crop evapotranspiration, and (ii) a water deficit treatment (TD), irrigated at 50% of TC. The plant indicators studied were: MDS, TGR, Ψ_{stem} , leaf conductance (Gs); and net photosynthesis (Pn). Although the highest signal intensity (SI) values -the ratio of deficit irrigation treatment values to control values- were reached by TGR, Gs and Pn (2.6, 3 and 2.9, respectively), the sensitivity (S) values calculated as the ratio of SI to coefficient of variation ($SI CV^{-1}$) were higher in Ψ_{stem} and MDS (14 and 11.4, respectively), since their CV values were the lowest (11 and 14%, respectively). A new approach (S*) is proposed to calculate the sensitivity of the plant water indicators, since the standard method can result in high sensitivity values without identifying differences between irrigation treatments. While S is more influenced by the CV values, S* would be influenced by both the SI and CV values.

Implementing deficit irrigation scheduling through plant water stress indicators in early nectarine trees

A three-year experiment on early nectarine (cv. Flanoba) trees was carried out with the aim of increasing water use efficiency through applying a sustained irrigation treatment. Experiments compared irrigation scheduling using conventional micrometeorology (110% of crop evapotranspiration, ETc) as a control treatment (T_{CTL}), a treatment based on the normal practice of the farmer (T_{FINC}) and a regulated deficit irrigation treatment (T_{RDI}), which involved irrigating the crop at the same level as the control (T_{CTL}) during the critical periods of the first year (second rapid fruit growth period and 2 months after harvest) and at 60% T_{CTL} during postharvest. In the last two years (2010 and 2011), the irrigation was scheduled

to maintain SI of the maximum daily shrinkage of the trunk at different water stress levels depending on the phenological stage SI = 1.0 (non-water stress) and SI = 1.4 (moderate water stress). Most of the time that irrigation scheduling was based on MDS SI, this parameter varied only slightly around the pre-established threshold values. The information given by the stem diameter sensors and stem water potential (Ψ_{stem}) gave -1.5 MPa and MDS SI 1.5 as threshold values not to be exceeded during postharvest, since MDS and Ψ_{stem} SI values were only linear down to 1.5. The water saved amounted to 17, 15 and 37% of the amount used in the control in the three seasons, respectively. In contrast, the T_{FINC} treatment applied more water (about 20 and 5% more than T_{CTL}) during the first 2 years, and 10% less than T_{CTL} during the third season.

Early morning fluctuations in trunk diameter are highly sensitive to water stress in nectarine trees

The sensitivity to water stress of different plant water status indicators was evaluated during two consecutive years in early nectarine trees. Measurements were made post-harvest and two irrigation treatments were applied: a control treatment (CTL), irrigated at 120 % of crop evapotranspiration, and a deficit irrigation treatment, that applied around 37 % less water than CTL during late postharvest. The plant water status indicators evaluated were Ψ_{stem} and indices derived from trunk diameter fluctuations (MDS and TGR) and early daily shrinkage measured between 0900 and 1200 hours solar time (EDS), and late daily shrinkage (LDS) that occurred between 1200 hours solar time and the moment that minimum trunk diameter was reached (typically 1600 hours solar time). The most sensitive [highest ratio of signal intensity (SI) to noise] indices to water stress were Ψ_{stem} and EDS. The SI of EDS was greater than that of Ψ_{stem} , although with greater variability. EDS was a better index than MDS, with higher SI and similar variability. Although MDS was linearly related to Ψ_{stem} down to -1.5 MPa, it decreased thereafter with increasing water stress. In contrast, EDS was linearly related to Ψ_{stem} , although the slope of the regression decreased as the season progressed, as in the case of MDS. Further studies are needed to determine whether EDS is a sensitive index of water stress in a range of species.

Combined effects of deficit irrigation and crop level on early nectarine trees

A three-year long experiment was implemented in an early nectarine (cv. Flanoba) commercial orchard to evaluate the effects of deficit irrigation and different crop levels on vegetative growth, plant water status, and fruit yield and quality. Three irrigation treatments were assessed: (i) control, (T_{CTL}); (ii) normal practice of the farmer (T_{FRM}); and (iii) regulated deficit irrigation (T_{RDI}). Besides, during the last two seasons, the interactions between T_{CTL} and T_{RDI} were studied at five different crop levels, which were obtained by controlling the distance between fruits left on the branches: from very low (16 cm between fruits) to very high (8 cm between fruits). Crop water use efficiency (WUE) of T_{RDI} was higher than in T_{CTL} and T_{FRM}, increasing by around 25% in 2010 and 2011, and around 74% the final year. Interestingly, T_{FRM} increased the WUE from the first year by more than 30%. The yield/annual increase in trunk-cross-sectional area (Δ TCSA) ratio increased in T_{RDI} with respect to the other treatments as the experiment progressed, reaching differences of 53%. Vegetative growth was clearly sensitive to deficit irrigation with a strong correlation between the increase in the water stress integral obtained by midday stem water potential (Ψ_{stem}) and the reduction in TCSA. In contrast, fruit production and quality were not affected by water deficit. As regards the interaction between crop level and water deficit, fruit firmness was the only fruit quality parameter studied that presented significant differences, the highest values corresponding to the fruits from T_{RDI} trees and the lowest crop level.

1.- Introducción y objetivos

1.1.- Introducción

El melocotonero y nectarino (*Prunus persica* L. Batsch) son frutales de hueso muy extendidos en España, con una producción promedio de 1.8 millones de toneladas en el periodo 2010-2014 (FAO-STAT, 2015). Las variedades extratempranas se dedican principalmente a la exportación dentro de países de la Unión Europea y se caracterizan por su alto valor en el mercado (Alcobendas *et al.*, 2012).

El clima cálido de la región de Murcia es idóneo para el cultivo de frutales de hueso, pero al mismo tiempo genera grandes necesidades hídricas en los cultivos debido a la elevada demanda evaporativa característica de este clima. Los recursos hídricos disponibles en estas regiones áridas son insuficientes para saciar la totalidad de las necesidades hídricas de los cultivos, por esta razón los agricultores están obligados a optimizar el uso del agua de riego.

A pesar de los avances en lo referente a la determinación precisa de las necesidades hídricas del cultivo, todavía resulta difícil predecir con precisión los requerimientos hídricos en cultivos frutales (Naor y Cohen., 2003). En la actualidad, la programación del riego se realiza en base a dos criterios: i) el balance hídrico basado en la evapotranspiración potencial de referencia (ET_0) y los coeficientes de cultivo (Kc) (Allen *et al.*, 1998); y ii) contenido y estado energético del agua en el suelo (Hanson *et al.*, 2000). Ambos métodos han conseguido aumentar la eficiencia en el uso del agua de riego (EUA) respecto a la metodología tradicional que se basaba solamente en la experiencia del agricultor. En cambio, la incertidumbre que tienen asociada los Kc y la gran variabilidad que presentan las medidas de suelo ha llevado a investigar nuevos métodos de programación del riego.

En este sentido, la programación del riego en base al estado hídrico de la planta se postula como una herramienta útil para aumentar la EUA ya que las medidas del estado hídrico del cultivo integran variables meteorológicas, del suelo y de la propia planta (Jones, 2004). Esta metodología es especialmente útil cuando se aplican estrategias de riego deficitario ya que se pueden utilizar valores umbrales de estado hídrico del cultivo a fin de reducir el riego sin incurrir en estrés hídrico excesivo, el cual podría afectar a los parámetros productivos y de calidad de la cosecha.

La alta sensibilidad al déficit hídrico del potencial hídrico de tallo (Ψ_T) mostrada en diversos cultivos (Shackel *et al.*, 1997) lo convierten en el indicador de referencia aunque presenta el inconveniente de su medida manual, imposible de automatizar (Naor y Cohen, 2003; Ortuño *et al.*, 2009). En ese sentido, las fluctuaciones de diámetro de tronco (FDT) presentan la ventaja de su medida continua fácilmente automatizables. Los indicadores derivados de FDT habitualmente utilizados son la máxima contracción diaria de diámetro de tronco (MCD) y la tasa de crecimiento diaria de diámetro de tronco (TCD). Mientras MCD ha mostrado alta sensibilidad en frutales adultos (Intrigliolo y Castel, 2006; Ortuño *et al.*, 2006), TCD parece ser más sensible en frutales jóvenes (Goldhamer y Fereres, 2001; Moriana y Fereres, 2002; Nortes *et al.*, 2005).

Los valores de MCD son altamente dependientes con las variables climáticas, por lo que para su correcta interpretación se necesitan valores de referencia obtenidos en árboles regados sin condiciones limitantes de agua en el suelo. Por esta razón se utiliza habitualmente la intensidad de señal (IS), entendida como la relación de los valores de MCD actuales y los de referencia.

Para obtener los valores de MCD correspondientes a árboles regados sin condiciones limitantes de agua en el suelo se puede mantener en la parcela árboles sobrerregados y monitorizados con sensores LVDT, pero resulta costoso. Otra opción es estimar estos valores en base a variables meteorológicas, mediante ecuaciones de referencia previamente determinadas.

La intensidad de señal de MCD (IS_{MCD}) se ha utilizado en diferentes estudios como herramienta para programar el riego (Fernández y Cuevas, 2010). El procedimiento consiste en establecer valores umbrales de IS_{MCD} para cada periodo fenológico y regular la dosis de riego según IS_{MCD} sea mayor o menor $IS_{MCDumbral}$.

1.2.- Objetivos

El objetivo global de la presente tesis fue evaluar la utilidad del uso de indicadores de estado hídrico del cultivo bajo riego deficitario controlado (RDC) como herramienta para incrementar la eficiencia del agua de riego en nectarino extratemprano. Para la consecución del objetivo principal se propusieron los siguientes objetivos secundarios:

- Evaluar la utilidad de líneas de referencia capaces de predecir valores de MCD y Ψ_T en nectarinos extratempranos regados sin condiciones limitantes de agua en el suelo en función de diferentes variables meteorológicas.
- Evaluar la sensibilidad al déficit hídrico de diferentes indicadores de estado hídrico de la planta.
- Desarrollar un nuevo algoritmo capaz de evaluar la sensibilidad de indicadores de estado hídrico de la planta y evaluar su utilidad.
- Obtener nuevos indicadores de estado hídrico de la planta derivados de las FDT y evaluar su sensibilidad.
- Desarrollar, mejorar y evaluar un protocolo de programación del riego deficitario basado en IS_{MCD} .
- Evaluar el efecto del riego deficitario controlado (RDC) manejado en base a IS_{MCD} en el crecimiento vegetativo, producción y calidad de la cosecha y evaluar el efecto de la misma estrategia de riego deficitario controlado en los principales parámetros productivos y de calidad de la fruta bajo diferentes niveles de carga productiva.

2.- Estado del arte

2.1.- Situación actual del cultivo de melocotonero y nectarino

En el contexto mundial, el melocotonero es uno de los cultivos más extendidos, siendo la segunda especie frutal en importancia según su producción, después del manzano. Su gran aceptación por el consumidor es debida a su diversidad de usos y a su consumo en fresco.

La superficie y producción mundial de melocotón y nectarina ha aumentado en los últimos años y en 2013 alcanzó 1.54 millones de ha y 21.6 millones de toneladas, respectivamente. El rendimiento del cultivo también presenta una clara tendencia a aumentar, alcanzando un máximo de 13.7 T ha^{-1} en 2013 (Fig 1).

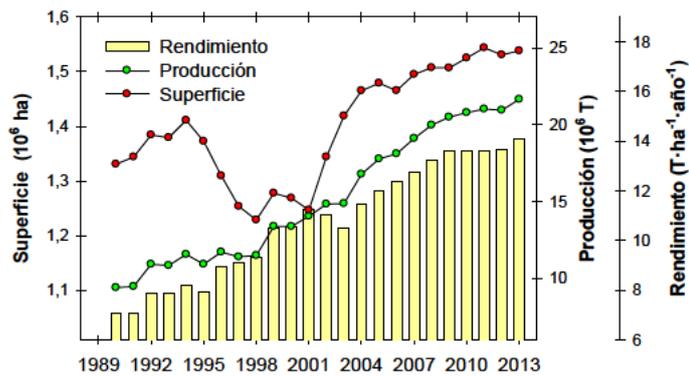


Figura 1.- Evolución de producción (verde), superficie (rojo) y rendimiento (barras amarillas) mundial de melocotón y nectarina. Fuente: FAOSTAT.

China, con 11.9 millones de toneladas, es el país más productor de melocotón y nectarina. Por detrás están Italia, España, Estados Unidos y Turquía con producciones de 1.4, 1.3, 1.0 y 0.6 millones de toneladas, respectivamente (FAOESTAT, 2016).

La superficie de melocotón y nectarina cultivada en España asciende a 84378 ha, de las cuales aproximadamente el 95% se cultivan en regadío. El rendimiento promedio es de 15.4 T ha⁻¹ año⁻¹, ligeramente superior al promedio mundial (MAGRAMA, 2015).

Cataluña, con 322025 t es la comunidad autónoma más productora de melocotón y nectarina (27.5 % de la producción total de España), la sigue de cerca Aragón con 301950 T (25.8 %) (Fig. 2).

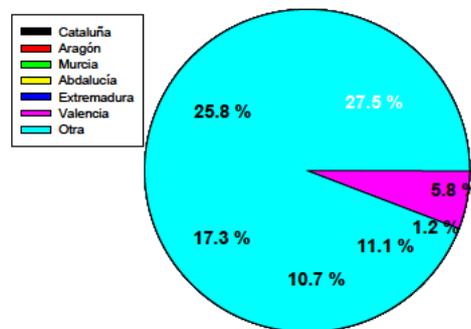


Figura 2.- Distribución de producciones de melocotón y nectarina en las comunidades autónomas en porcentaje de la producción total. Fuente: FAOSTAT

En la Región de Murcia, el melocotonero es el primer frutal de hueso en producción y el segundo en superficie de cultivo, tras el almendro. La producción y superficie de melocotón y nectarina en la región de Murcia asciende a 171526 t en 10713 ha, respectivamente (MAGRAMA, 2015).

Las diferentes variedades de melocotón y nectarina cultivadas en la región de Murcia presentan periodos de recolección que van desde mediados de abril, con variedades extratempranas de nectarinas como Viowhite, hasta principio de noviembre con variedades tardías como “Melocotón de Calanda”.

Las producciones de las variedades más tempranas son destinadas a exportar a países europeos y se caracterizan por presentar buenos precios y calidad limitada.

2.2.- Optimización del riego en frutales

La buena programación del riego consiste en determinar de manera precisa la cantidad (necesidades hídricas) y el momento óptimo (intervalo entre riegos) para aplicar el riego. Otro factor sin el cual no sería posible realizar un buen manejo del riego hace referencia al diseño agronómico de la instalación de riego: número de emisores por árbol, caudal y distancia entre emisores.

Las necesidades hídricas de los cultivos dependen en gran medida de la demanda evaporativa de la atmósfera, que a su vez depende de diferentes variables climáticas entre las que destacan: temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento. Para cuantificar la demanda evaporativa se utiliza habitualmente la evapotranspiración potencial del cultivo de referencia (ET_0) que se refiere al consumo de agua de una pradera extensa de gramíneas, de 8 a 15 cm de altura, en óptimas condiciones de crecimiento y bajo un adecuado suministro de agua (Doorenbos y Pruitt, 1977). La red de estaciones climáticas del Sistema de Información Agraria de la región de Murcia (SIAM) aporta información diaria de la ET_0 para cada zona de la región de Murcia.

Para estimar la evapotranspiración del cultivo (ET_c) se utilizan un coeficiente corrector de ET_0 que se denomina coeficiente de cultivo (K_c) y depende principalmente de: tipo de cultivo, estado fenológico y fracción de cubierta vegetal (Doorenbos y Pruitt, 1977).

Los K_c se suelen determinar relacionando ET_0 y ET_c medida. Para medir ET_c es frecuente utilizar lisímetros con los que se determina con gran precisión las necesidades hídricas del cultivo bajo condiciones no limitantes de agua en el suelo. Existen numerosos trabajos en la bibliografía donde se determinan los K_c de diferentes cultivos, entre todos ellos destacan los de Doorenbos y Pruitt, 1977 y su revisión posterior por Allen *et al.*, 1998.

A pesar de todo lo avanzado, los K_c suelen llevar asociado un importante grado de incertidumbre, debido a los efectos de la arquitectura del dosel vegetal, fracción de suelo sombreado y manejo del suelo. Por ese motivo se han desarrollado otros métodos de programación del riego.

Otra metodología para programar el riego es la basada en el estado hídrico del suelo. Algunos autores como Bonany *et al.*, (2000) y Biel *et al.*, (2008) programaron el riego en base al potencial matricial (Ψ_m) del suelo, otros como Monzer (2005) lo hicieron en base al contenido volumétrico de humedad (θ_v). Esta metodología presenta principalmente dos inconvenientes claros: i) para la determinación del punto exacto de colocación del sensor se debe tener en cuenta la distribución y densidad radicular, lo cual requiere un meticuloso estudio previo; ii) Las medidas de estado hídrico del suelo presentan elevada variabilidad por lo que para tener medidas representativas se requieren un importante número de sensores.

En la actualidad está adquiriendo una importancia creciente la utilización de las medidas de estado hídrico del cultivo para programar el riego. Se considera que es el método ideal ya que la planta integra las variables climáticas y del suelo (Domingo *et al.*, 2005). Sin embargo, no informa directamente de la cantidad de agua que hay que aportar a la planta (Jones, 2004).

2.2.- Riego deficitario controlado

Habitualmente, el riego que maximiza el beneficio económico del agricultor se consigue aplicando dotaciones de agua inferiores a las necesidades hídricas del cultivo, es lo que se denomina “riego deficitario”. La aplicación de estrategias de riego deficitario se puede justificar por diferentes motivos: i) el elevado precio del agua de riego y de la energía necesaria para su impulsión; ii) en variedades y patrones de excesivo vigor el riego deficitario puede evitar un crecimiento vegetativo excesivo lo que a su vez puede disminuir los costes de podas y mejorar la aireación de la frutos, incrementando su calidad; iii) aumentar la calidad de la producción mejorando aspectos como el contenido de sólidos solubles totales (SST), el color, la firmeza, etc; iv) disminuir la incidencia de fisiopatías como el cracking o enfermedades de naturaleza fúngicas.

Otras veces el agricultor no dispone de la cantidad de agua que demanda su cultivo, hecho que se da cada vez con más frecuencia en las comunidades de regantes de la Región de Murcia. En este caso el riego deficitario no es una opción sino una obligación.

Dentro de las estrategias de riego deficitario destaca el “riego deficitario controlado” (RDC, Chalmers *et al.*, 1981) que consiste en reducir el riego sólo en determinados periodos fenológicos (no críticos), donde se sabe que un déficit hídrico moderado no afecta negativamente a la cantidad y calidad de la cosecha, aplicando la totalidad de los requerimientos hídricos del cultivo en las restantes fases fenológicas del cultivo.

A pesar de lo expuesto anteriormente hay que tener en cuenta que aunque un periodo fenológico se considere no crítico no significa que un estrés hídrico severo en este periodo no genere mermas en la cosecha. Por lo tanto, el conocimiento del estado hídrico del cultivo resulta muy útil para evitar que el cultivo sufra estrés hídrico excesivo.

El RDC ha sido estudiado en diferentes especies frutales, habitualmente ha generado disminuciones del crecimiento vegetativo e incremento de la calidad de la cosecha (Ruiz-Sánchez *et al.*, 2010). La mayor parte de los estudios de RDC en melocotonero reducen los aportes hídricos en las fases I y II de crecimiento del fruto y en la poscosecha y aplican la plenitud del riego durante la fase III, cuando el déficit hídrico podría generar disminución en el crecimiento del fruto.

Girona *et al.*, (2013) en melocotonero variedad “Sundanell” y Girona *et al.*, (2005) en variedad “Andross” aplicando un 35 % de reducción durante fase II y/o durante poscosecha, consiguiendo reducciones de riego anuales hasta el 22 y el 35 % sin afectar a la producción y el tamaño del fruto.

Vera *et al.*, (2013), en un estudio en melocotonero temprano durante 5 años consecutivos, disminuyó en un 75% el riego aplicado durante todo el periodo a excepción de la fase III de crecimiento del fruto en la que aplicó todas las necesidades hídricas. En este caso la producción bajo RDC se disminuyó debido a una significativa disminución del número de frutos.

Recientemente, Mirás-Avalos *et al.*, (2016) en melocotonero programó el riego en base a valores umbrales de Ψ_T aplicando déficit durante la fase II de crecimiento del fruto y en la poscosecha, generando importantes ahorros de agua (entre 38 y 67 %) sin que se viera afectada la producción y el tamaño del fruto pero reduciendo significativamente el crecimiento vegetativo.

2.3.- Indicadores de estado hídrico de la planta

Se entiende por indicador del estado hídrico de la planta a medidas de parámetros físicos, químicos o fisiológicos que son capaces de modificarse en función del grado de estrés hídrico del cultivo.

2.3.1.- Cualidades deseables de los indicadores de estado hídrico de la planta

Las cualidades deseables para un indicador son:

1. **Sensibilidad al déficit hídrico.** Un indicador es sensible al déficit hídrico cuando es capaz de variar sus registros bajo condiciones deficitarias de agua en el suelo. Además, el término sensibilidad también hace referencia a la variabilidad de sus medidas. De esta forma, indicadores con alta variabilidad llevan asociados un importante grado de incertidumbre y por tanto se consideran menos sensibles. El método tradicionalmente utilizado para medir la sensibilidad de indicadores de estado hídrico de la planta es la relación de IS y el coeficiente de variación (CV) de las medidas (Goldhamer *et al.*, 2000). La sensibilidad de los indicadores de estado hídrico del cultivo han sido habitualmente comparados con la sensibilidad de Ψ_T (indicador habitualmente utilizado como referencia por su buen comportamiento en diferentes cultivos), como indican Naor (2006) y Fernández y Cuevas (2010). En algunas ocasiones, MCD presentó la mayor sensibilidad al déficit hídrico, como en almendro (Goldhamer y Fereres 2001), melocotonero (Goldhamer *et al.*, 1999; Remorini y Massai 2003), granado (Galindo *et al.*, 2013) y limonero (Ortuño *et al.*, 2006), aunque este no es el resultado más frecuente. Otras veces, Ψ_T fue el indicador más sensible como se vio en manzano (Naor y Cohen 2003), cerezo (Abdelfatah *et al.*, 2013), kaki (Badal *et al.*, 2010), ciruelo (Intrigliolo y Castel 2004) y granado (Intrigliolo *et al.*, 2011). En contra, TCD fue generalmente menos sensible que otros indicadores, y sólo presentó una clara respuesta al déficit hídrico en árboles jóvenes (Moriana y Fereres, 2002; Nortes *et al.*, 2005) o en periodos fenológicos de rápido crecimiento de tronco (mandarino - Pagán *et al.* 2012-; olivo - Moriana *et al.*, 2011- y ciruelo - Intrigliolo y Castel 2004).
2. **Rapidez en detectar el estrés hídrico.** Detectar rápidamente el estrés hídrico es fundamental, sobre todo durante periodos críticos del cultivo, ya que permite actuar en la programación del riego antes de que el estrés hídrico genere daños irreversibles al cultivo.
3. **Proporcionalidad de las medidas.** Además de detectar si existe estrés hídrico, el indicador debería de ser capaz de cuantificar el grado de estrés para lo que es necesario que los valores del indicador sean proporcionales a la intensidad del estrés de la planta.
4. **Automatización de las medidas.** La automatización de los indicadores permite tener información continua del estado hídrico del cultivo y evita los desplazamientos a la parcela.
5. **Facilidad de interpretación.** Sería deseable que el indicador genere un valor numérico que esté estrechamente relacionado con la intensidad del estrés hídrico del cultivo. Sin embargo, habitualmente los valores de los indicadores dependen de otras variables, principalmente de variables climáticas, lo que dificulta su interpretación. En estos casos es conveniente comparar los valores de los

indicadores bajo las condiciones de cultivo con los de plantas regadas sin condiciones limitantes de agua en el suelo.

6. **Facilidad de la medida.** Un indicador fácilmente medible tiene la ventaja de no requerir mano de obra cualificada y de permitir mayor número de medidas en poco tiempo.
7. **Bajo coste.** El coste asociado a la medida e interpretación de los indicadores tiene que ser inferior al beneficio económico que el agricultor obtiene con la utilización de dichos indicadores.

2.3.2.- Tipos de indicadores

Los indicadores pueden clasificarse en función de si son o no son automatizables. Mientras que los indicadores automatizables aportan medidas continuas, los no automatizables precisan de visitas a campo por lo que sólo aportan información puntual correspondiente a los días de medida.

- **Indicadores no automatizables**

Dentro de los indicadores de estado hídrico de la planta **no automatizables** destacan:

- ✓ **Contenido relativo de agua (CRA)**

Relaciona la cantidad de agua en un tejido con el contenido máximo a plena turgencia. Para su cálculo se corta una hoja y se pesa inmediatamente, ese valor será su peso fresco (Pf). Después se rehidrata sumergiéndola en agua hasta su máxima turgencia, se pesa (Pmt) y después se seca en estufa hasta peso constante (Ps). El CRA se calcula relacionando los diferenciales (Pf-Ps) y (Pmt-Ps). Los valores que presentan este indicador oscilan entre 1 (máxima hidratación) y 0 (tejido seco)

- ✓ **Potencial hídrico foliar (Ψ)**

Es un parámetro frecuentemente utilizado para caracterizar el estado hídrico de la planta (Klepper, 1968; Goode y Higgs, 1973). Se mide con la cámara de presión (Scholander *et al*, 1965). Se ha utilizado con éxito en numerosas especies pero presenta el inconveniente de su elevada variabilidad por depender de factores internos y externos a la propia planta (Jones, 1990).

En cambio, cuando las medidas se realizan al alba (Ψ_a) la sensibilidad aumenta. Diversos investigadores han informado de la existencia de una estrecha correlación entre los valores de Ψ_a y el estado hídrico del suelo, debido a que la transpiración es mínima por la noche, alcanzándose un equilibrio hídrico entre el suelo y la planta en ese momento del día (Ritchie y Hinckley, 1975).

- ✓ **Potencial hídrico de tallo (Ψ_T)**

Este indicador fue propuesto por Shackel *et al.* (1997). Para medirlo, se tapa una hoja cercana al tronco con film plástico y se cubre con papel de aluminio durante al menos 2 horas antes de la medida, para impedir la transpiración. Su fundamento reside en que al no existir transporte de agua, Ψ medido coincide con el Ψ del xilema de la hoja antes de la escisión y por tanto, puede ser utilizado para estimar Ψ_T en el punto de unión de la hoja. Entre sus ventajas destacan su menor variabilidad, mejor correlación con el déficit de presión de vapor (DPV) y que refleja mejor la disminución de agua en el suelo que Ψ . El valor umbral Ψ_T ,

correspondiente a un suministro hídrico adecuado, está alrededor de -0,8 MPa para especies frutales durante sus procesos fisiológicos sensibles y de -1,0 MPa para las especies más tolerantes (Villalobos *et al.*, 2002). Diversos trabajos han puesto de manifiesto la utilidad de este indicador en muchas especies (Shackel *et al.*, 1997), incluyendo nectarino (Naor *et al.*, 2001), peral (Marsal *et al.*, 2002) como albaricoquero (Pérez-Sarmiento *et al.*, 2010); granado (Intrigliolo *et al.*, 2011); olivo (Moriani *et al.*, 2012); y melocotonero (Abrisqueta *et al.*, 2015). En cambio, la principal desventaja de este indicador es su medida manual, imposible de mecanizar (Naor y Cohen, 2003; Ortuño *et al.*, 2009).

✓ **Intercambio gaseoso (conductancia estomática y fotosíntesis neta)**

La conductancia estomática (Gs) es la variable que mide el grado de apertura de los estomas de las hojas. En los frutales Gs sigue un ritmo circadiano y está influenciada por diversos factores como la intensidad lumínica, la temperatura, el incremento de la humedad absoluta entre hoja y aire, edad de la hoja, concentración de CO₂ y el potencial hídrico (Jones, 1983). Bajo condiciones de déficit hídrico la planta es capaz de cerrar parcial o totalmente estomas a fin de evitar pérdidas excesivas de agua. La contrapartida del cierre estomático es la reducción en el flujo de CO₂ hacia el interior de las hojas lo que implica una menor tasa fotosintética. Por lo tanto, la fotosíntesis depende en gran medida del grado de apertura estomática.

• **Indicadores automatizables**

Por otra parte, en la actualidad cada vez es más valorada la capacidad de automatización de las medidas de indicadores de estado hídrico de la planta. A continuación se detallan los indicadores automatizables más utilizados, haciendo especial hincapié en las fluctuaciones de diámetro de tronco por ser objeto de estudio en la presente tesis:

✓ **Flujo de savia**

Numerosos estudios han comprobado la utilidad de este indicador y de su elevada sensibilidad a la demanda climática (Cohen, 1991; Ameglio *et al.*, 1992; Moreno *et al.*, 1996; Alarcón *et al.*, 2000). Este indicador permite determinar el momento y la intensidad con la cual la disponibilidad de agua limita la transpiración del cultivo. Los métodos actualmente disponibles están clasificados en tres grupos: método radial de calor constante (Granier, 1985), balance de calor (Valancogne y Nasr, 1989) y método de pulso de calor (Marshall, 1958).

✓ **Temperatura foliar.**

El agua evaporada por una superficie vegetal funciona al mismo tiempo como un estabilizador de la temperatura de las hojas ante la demanda evapotranspirativa de la atmósfera. Cuando el cultivo se somete a estrés hídrico, los estomas se cierran, la transpiración decrece y la temperatura de la hoja aumenta. Cuando una planta transpira sin estrés hídrico, la temperatura de la hoja es entre 1 y 4 °C menor que la temperatura ambiental. A partir de la temperatura foliar actual del cultivo (T_{fa}), la de árboles regados sin condiciones limitantes de agua en el suelo (T_{fCTL}), la de árboles muy estresados (sin transpiración) (T_{fe}) y de la temperatura del aire (T_a) se determina el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) mediante la siguiente ecuación:

$$CWSI = \frac{(T_{fa} - T_a) - (T_{fCTL} - T_a)}{(T_{fe} - T_a) - (T_{fCTL} - T_a)}$$

CWSI presenta valores comprendidos entre 0 y 1, donde 0 indica ausencia de estrés (estomas totalmente abiertos) y 1 indica estrés máximo (estomas totalmente cerrados). Las variables $(T_{fCTL}-T_a)$ y $(T_{fe}-T_a)$ pueden ser estimadas a partir de ecuaciones de referencia en función del déficit de presión de vapor del aire (DPV). Actualmente, con la expansión de las técnicas de teledetección, el uso de la termografía infrarroja y las imágenes térmicas poseen un futuro prometedor en la monitorización del estrés hídrico de los cultivos (Jones, 2004).

✓ **Fluctuaciones de diámetro de tronco (FDT).**

Los avances realizados en la electrónica han hecho posible el registro continuo de las medidas de las fluctuaciones de diámetro de tronco (FDT), descritas por primera vez por Kozlowsky y Winget (1964). Klepper *et al.*, (1971) encontró que las FDT mostraban importante sensibilidad al déficit hídrico. Por la noche, cuando los estomas están cerrados, la absorción radicular permite la rehidratación de los tejidos conductores, lo que permite que el tronco alcance su máximo diámetro (MXDT) justo antes de salir el sol. Con la salida del sol se inicia la transpiración y los tejidos pierden parte de sus reservas hídricas provocando la contracción del tronco que finaliza por la tarde cuando se produce el mínimo diámetro de tronco (MNDT). Goldhamer y Fereres (2001) propusieron diferentes indicadores de estado hídrico de la planta derivados de las FDT: i) la máxima contracción de diámetro de tronco (MCD - determinada a partir de la diferencia entre el máximo y mínimo diámetro de tronco de un mismo día) y la tasa de crecimiento diaria de tronco (TCD – diferencia entre los máximos diámetros de tronco de dos días consecutivos).

Dentro de los indicadores derivados de las FDT, MCD está considerado como el indicador más consistente en frutales adultos (Intrigliolo y Castel, 2006; Ortuño *et al.*, 2006). En cambio, TCD es más sensible en frutales jóvenes (Goldhamer y Fereres, 2001; Moriana y Fereres, 2002; Nortes *et al.*, 2005). Los valores de MCD dependen del estado hídrico del suelo, pero también están influenciadas por demanda climática (Fernández y Cuevas 2010; Ortuño *et al.*, 2010). De esta forma, valores absolutos de MCD, sin considerar la demanda climática, pueden no ser útiles para la interpretación del estado hídrico del cultivo (Galindo *et al.*, 2013). Por esta razón se suele utilizar la intensidad de señal (IS), es decir, la relación de los valores actuales de MCD entre los valores de MCD correspondientes a un cultivo regado sin condiciones limitantes de agua en el suelo (Goldhamer y Fereres, 2001). La IS de los indicadores de estado hídrico de la planta es una variable adimensional, donde valores superiores a 1 indican déficit hídrico y valores igual a la unidad indican ausencia de déficit hídrico (Goldhamer y Fereres, 2004).

Para obtener los valores de MCD correspondientes a árboles regados sin condiciones limitantes de agua en el suelo se puede mantener en la parcela árboles sobrerregados y monitorizados con sensores LVDT lo que resulta costoso. Otra opción es estimar estos valores en base a variables meteorológicas, mediante ecuaciones de referencia (líneas de referencia) previamente determinadas. En este sentido, es esencial conocer la variable meteorológica que mejor explica la MCD. En numerosos trabajos se ha estudiado la dependencia de MCD con variables meteorológicas que hacen referencia a promedios diarios (ET_0 , temperatura media diaria $-T_m-$, déficit de presión de vapor medio diario $-DPV_{md}-$ y radiación solar diaria $-RS-$) o valores puntuales de estas variables como máximos diarios o valores al mediodía. Habitualmente, los valores máximos diarios o del mediodía suelen conseguir mejores ajustes que los valores promedios diarios. Las líneas de referencia pueden verse alteradas por factores como las diferentes fases fenológicas (Marsal *et al.*, 2002; Gènard *et al.*, 2001; Fereres y Goldhamer 2003; Intrigliolo y Castel 2004; Conejero *et al.*, 2007; Egea

et al., 2009; Pagán *et al.*, 2012), el tamaño del árbol (Intrigliolo y Castel 2006), la edad del cultivo (Intrigliolo y Castel, 2006; Egea *et al.*, 2009; Moriana y Fereres 2004), carga productiva (Moriana y Fereres 2004; Intrigliolo y Castel, 2007; Conejero *et al.*, 2010) entre otras variables.

Una limitación importante de la MCD es la variabilidad que presentan sus medidas, habitualmente con CV superiores al 15 % mientras que los de Ψ_T suele ser inferiores a 10 % (Naor y Cohen 2003). Posiblemente el principal factor limitante de MCD es que a partir de ciertos valores umbrales de estrés hídrico sus valores dejan de aumentar y empiezan a disminuir (Ortuño *et al.* 2010). Además, se ha observado en diferentes trabajos que la sensibilidad de MCD disminuye en determinados periodos fenológicos.

2.3.3.- Programación del riego en base al estado hídrico de la planta

Se considera que el método ideal para el control del riego consiste en utilizar a la propia planta como detector de sus necesidades hídricas, ya que ésta integra las condiciones de su entorno, clima y suelo (Domingo *et al.*, 2005). En las últimas décadas se ha avanzado en este sentido y en la actualidad existen en la bibliografía numerosos trabajos que describen experiencias de manejo de riego en base a diferentes indicadores de estado hídrico de la planta y en diferentes cultivos.

El uso de Ψ_T se ha considerado una herramienta útil para programar el riego en muchos cultivos, especialmente en frutales y viñedos (Girona *et al.*, 2006; Shackel *et al.*, 2010). Esta metodología consiste en fijar valores umbrales de Ψ_T para cada periodo fenológico. Dichos umbrales dependen de la sensibilidad al déficit hídrico del cultivo en cada fase fenológica. A fin de aumentar la precisión y disminuir el riego de incurrir en estrés hídrico excesivo es conveniente realizar medidas frecuentemente y en un número suficiente de árboles (Goldhamer y Fereres, 2001).

Miras-Avalos *et al.*, (2016) programó el riego en melocotonero, durante 3 años consecutivos, en base a valores umbrales de Ψ_T . Propuso dos tratamientos de riego deficitario controlado: i) RDC₁, con valor umbral de Ψ_T igual a -1.5 MPa durante la fase II de crecimiento del fruto y la poscosecha; RDC₂, con valores umbrales de Ψ_T igual a -1.8 y -2.0 MPa para la fase II de crecimiento del fruto y la poscosecha, respectivamente. Los valores de Ψ_T se ajustaron relativamente bien a los umbrales durante la poscosecha pero fueron sensiblemente superiores a los umbrales en la fase II de crecimiento del fruto. La disminución de riego en RDC₁ y RDC₂ totalizó porcentajes en torno al 50 y 60 %, respectivamente, sin verse afectados los parámetros productivos, incrementándose la eficiencia en el uso del agua de riego y aumentando, en RDC₂, el porcentaje de sólidos solubles (SST) de los frutos.

Por otra parte, existen numerosos estudios que proponen al flujo de savia (FS) como herramienta útil para la programación del riego (Huguet *et al.*, 1992; Goldhamer y Fereres 2001; Cohen *et al.*, 2001). Sin embargo, hay pocos trabajos donde se maneja el riego en base a este parámetro. Conejero *et al.*, (2007) programó el riego en base a IS de FS, para ello estableció una IS_{umbral} igual a 1. Los resultados muestran que IS no pudo mantenerse cercana a IS_{umbral} y que los parámetros productivos se vieron afectados negativamente en este tratamiento.

Otro parámetro potencialmente utilizable en la programación del riego es la temperatura foliar. Como ya se vio en el epígrafe anterior, el índice de estrés del cultivo (CWSI) se calcula a partir de la temperatura foliar. El CSWI ha sido muy utilizado en cultivos anuales (Idso *et al.*, 1981).

La IS de MCD se ha utilizado en diferentes estudios como herramienta para programar el riego (Fernández y Cuevas, 2010). El procedimiento consiste en establecer valores umbrales de IS para cada periodo fenológico y regular la dosis de riego según IS sea mayor o menor IS_{umbral} . Este tipo de programación de riego ha sido estudiada en almendros (Goldhamer y Fereres 2004; Puerto *et al.*, 2013), cítricos (García-Orellana *et al.*, 2007; Vélez *et al.*, 2007; Ortuño *et al.*, 2009) y en melocotonero (Conejero *et al.*, 2007). Goldhamer y Fereres (2004) consideraban, en almendro, que una IS_{umbral} de 1.75 generaba un estrés hídrico medio con poco efecto en la producción y que IS_{umbral} de 2.75 causaba un estrés severo. Su tratamiento severo ($IS_{umbral}=2.75$) adelantó la maduración mientras que el tratamiento menos severo ($IS_{umbral}=1.75$) no afectó a las variables productivas. Conejero *et al.*, (2007) programó el riego para mantener $IS=1$ en melocotonero y comprobó la consistencia y sensibilidad de este parámetro a cambios en el estado hídrico del melocotonero. García-Orellana *et al.*, (2007) utilizaron dos IS, 1.25 y 1.35 y concluyeron que es factible programar el riego en limonero utilizando IS_{MCD} . Vélez *et al.*, (2007) alcanzaron ahorros de agua entre un 12 y un 18% desde junio a octubre, manteniendo valores umbrales de IS cercanos a 1.25 en mandarina. Conejero *et al.* (2011), durante tres años consecutivos programó el riego en melocotonero temprano en base a IS_{umbral} de 1, 1.3 y 1.6 para los periodos fenológicos de precosecha, poscosecha temprana y poscosecha tardía, consiguiendo un ahorro de agua de aproximadamente el 40 % y sin generar mermas en la producción ni calidad de la cosecha. Puerto *et al.*, (2013) programó el riego deficitario en almendro en base a diferentes IS_{umbral} de hasta 3.2 en la fase IV de llenado del grano consiguiendo un ahorro de agua en torno al 50% y mejorando la rentabilidad del cultivo, a pesar de la disminución de la producción, por el elevado precio del agua de riego. Suele ocurrir, en casi todos estos estudios que han programado el riego en base a IS de MCD, que la principal dificultad es mantener los valores de IS cercanos a IS_{umbral} , sobre todo al final del periodo de crecimiento vegetativo, cuando los tejidos han perdido parte de su elasticidad.

3.- Resumen de artículos

Artículo 1: Utilidad del uso de las líneas de referencia de la fluctuaciones de diámetro de tronco y el potencia hídrico de tallo para la programación del riego de nectarino temprano

Objetivos

Los objetivos de este trabajo fueron: i) desarrollar líneas de referencia capaces de predecir valores de Ψ_T y MCD en base a variables climáticas; ii) evaluar su estabilidad entre años y entre periodos fenológicos, y iii) evaluar la desviación de los valores estimados de MCD a partir de las líneas de referencia obtenida en años anteriores con valores actuales de MCD.

Material y métodos

El estudio se realizó durante 3 años consecutivos (2009, 2010 y 2011) en una explotación comercial situada en Campotejar (Molina de Segura, Murcia) (38°8' N, 1°13' W) en nectarinos extratempranos (*Prunus persicae* L. Batsch cv Flanoba). Se ensayó un tratamiento control (T_{CTL}), regado en todo momento al 120% de E/T_c , a fin de no incurrir en condiciones limitantes de agua en el suelo.

Las medidas meteorológicas se obtuvieron de una estación agroclimática -perteneciente a la red de estaciones agroclimáticas del instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario -IMIDA- situada en las proximidades de la parcela experimental. Las variables climáticas obtenidas fueron ET_0 , déficit de presión de vapor medio diario (DPV_m), al mediodía (DPV_{md})

y máximo diario (DPV_{mx}) y temperatura del aire media diaria (T_m), al mediodía (T_{md}), y máxima diaria (T_{mx}).

Se determinó el estado hídrico del suelo a partir de medidas semanales de humedad volumétrica (θ_v). Las fluctuaciones de diámetro de tronco (FDT) se midieron a partir de 6 dendrómetros y a partir de estas medidas se calculó la máxima contracción diaria de tronco (MCD) y la tasa de crecimiento diario de tronco (TCD). Además, se realizaron medidas semanales de potencial hídrico de tallo (Ψ_T) al mediodía solar, en árboles monitoreados con sensores LVDT. Se correlacionaron valores diarios de indicadores (MCD, TCD y Ψ_T) con diferentes variables meteorológicas y se evaluó su grado de ajuste.

Además, se midió el perímetro de tronco y el peso seco de la madera eliminada en las diferentes podas. La sección transversal de tronco (STT) se determinó suponiendo secciones de tronco circulares a partir de las medidas del perímetro de tronco. El incremento anual de sección transversal de tronco (ΔSTT) se calculó como la diferencia entre las STT de dos años consecutivos.

Resultados y discusión

θ_v se mantuvo con valores cercanos a capacidad de campo en todo momento y Ψ_T mostró valores mínimos anuales de aproximadamente -1 MPa. Estos datos son característicos de árboles regados sin condiciones limitantes de agua en el suelo.

En general, MCD presentó un patrón de comportamiento similar al de las variables climatológicas estudiadas. Sin embargo, los máximos anuales de MCD tuvieron lugar entre julio y agosto, coincidiendo con los máximos de T_{mx} y DPV , y aproximadamente un mes después que los máximos valores de ET_0 . Los mínimos valores de Ψ_T coincidieron aproximadamente con los máximos de MCD.

TCD presentó gran variabilidad entre días y sus registros dependían principalmente de la fenología del cultivo. Al correlacionar este indicador con las variables meteorológicas estudiadas no se obtuvo correlaciones significativas.

Ψ_T presentó correlaciones significativas con las variables meteorológicas estudiadas, siendo T_m la variable que mejor explicó dicho indicador ($R^2 \approx 0.52$) y ET_0 la que peor ajuste presentó ($R^2 \approx 0.17$). Las ecuaciones no presentaron diferencias significativas entre años.

MCD fue el indicador que mayor dependencia presentó con las variables meteorológicas. Además, las ecuaciones obtenidas cuando se agrupaban todos los puntos de los 3 años, no presentaron diferencias entre años a excepción de las realizadas con la ET_0 cuyas pendientes diferían entre años. Este hecho puede considerarse anecdótico si se tiene en cuenta que ET_0 fue la variable que peor ajuste presentó con MCD.

Resulta curioso el hecho de que siendo ET_0 la variable que mejor cuantifica la demanda climática diaria, sea la que peor correlaciona con MCD. Sin embargo, la transpiración (I) del cultivo (principal factor del que depende MCD) es una fracción de ET_0 que varía constantemente a lo largo del ciclo de cultivo. Dicha fracción depende en gran medida del índice de área foliar y puede duplicar los valores de un periodo fenológico a otro. Por lo tanto, las correlaciones de ET_0 vs MCD con datos de todo el ciclo sólo podrían presentar altos coeficientes de determinación si la relación entre transpiración y ET_0 fuera constante durante todo el ciclo. Al realizar correlaciones entre ET_0 vs MCD durante periodos cortos de tiempo (mensualmente) se ha visto que se mejora significativamente el ajuste y que la

MCD estimada para un mismo valor de ET_0 se incrementa conforme avanza el ciclo de cultivo de manera similar a como se incrementa los coeficientes de cultivo y el área foliar. Se ha observado también que los coeficientes de determinación mejoran cuando se incluye una segunda variable relacionada con el estado fenológico como puede ser el día del año.

Por otra parte, llama la atención que las variables meteorológicas que mayor ajuste presentaron son las referidas a valores máximos diarios y del mediodía. Aunque MCD es un indicador que se considera que integra valores diarios, en realidad el tronco sólo se contrae durante 8-14 horas, desde primera hora de la mañana hasta por la tarde (aproximadamente las 16 hora solar) y además, es al mediodía cuando tiene lugar la mayor parte de la contracción tronco. Este hecho explicaría la mayor dependencia con valores máximos diarios y del mediodía de variables climáticas.

DPV_{md} fue la variable que mejor ajuste presentó con MCD ($R^2 \approx 0.75$). Al separar los datos por periodos fenológicos se encontraron ecuaciones significativamente diferentes entre sí para los periodos de crecimiento del fruto, poscosecha temprana y poscosecha tardía. A pesar de ser diferentes, las ecuaciones de cada periodo fenológico se mantenían constantes a lo largo de los años.

Para evaluar la idoneidad de las ecuaciones para predecir valores de MCD se relacionó los valores de MCD del tercer ciclo estimados con ecuaciones obtenidas años anteriores con los valores medidos en dicho en ese mismo ciclo. Como era de esperar el ajuste entre MCD estimada y MCD medida fue mayor cuando se tuvieron en cuenta las diferentes ecuaciones obtenidas en cada periodo fenológico, presentando un elevado coeficiente de determinación (0.84).

Conclusiones

MCD fue el indicador que mayor dependencia presentó con las variables meteorológicas estudiadas.

Las líneas de referencia determinadas para predecir valores de MCD, aunque diferían entre periodos fenológicos, fueron estables durante los 3 años de estudio.

Estas ecuaciones presentaron altos coeficientes de determinación, considerándose útiles para su uso en la programación del riego.

Artículo 2: Un nuevo enfoque para evaluar la sensibilidad de los indicadores de estado hídrico de la planta en nectarino temprano

Objetivos

Los objetivos de este trabajo fueron: i) Evaluar la utilidad del uso de diferentes indicadores de estado hídrico del cultivo: MCD, TCD, Ψ_T , Gs y Pn; y ii) Proponer y evaluar la utilidad de un nuevo algoritmo para determinar la sensibilidad de estos indicadores.

Metodología

El estudio se realizó en nectarino extratemprano (*Prunus persicae* L. Batsch cv. Viowhite) situada en Campotejar (Molina de Segura, Murcia) (38°8' N, 1°13' W) durante el período de la poscosecha del cultivo, en 2012. Los tratamientos de riego ensayados fueron: i) un control (T_{CTL}) regado al 120 % de E_{Tc} , y ii) uno de riego deficitario (T_D) regado al 50 % de T_{CTL} .

Se determinó el estado hídrico del suelo a partir de medidas semanales de humedad volumétrica (θ_v) en el perfil 0-100 cm. Las fluctuaciones de diámetro del tronco (FDT) se midieron a partir de 6 dendrómetros por tratamiento. A partir de las FDT se calculó MCD y TCD. Además, se realizaron medidas semanales de Ψ_T a mediodía solar, en árboles monitoreados con sensores LVDT. Gs y Pn se midió a mediodía, los mismos días que θ_v y Ψ_T .

La sensibilidad de los indicadores al estrés hídrico del cultivo se determinó utilizando dos metodologías:

- i) Método tradicional (Goldhamer *et al.*, 2000), en el que la sensibilidad (S) se calcula como la relación de la IS y el CV.

$$S = \frac{IS}{CV}$$

- ii) Nuevo algoritmo propuesto (S^*), donde la sensibilidad es igual a la relación entre IS-1 y CV.

$$S^* = \frac{(IS - 1)}{CV}$$

Resultados y discusión

MCD mostró valores altos de IS (entre 1.5 y 1.8) y medios de ruido (entre 0.11 y 0.15) en los tres primeros meses del periodo de déficit hídrico; denotándose una elevada sensibilidad de este indicador. Sin embargo, durante el último mes MCD redujo los valores de IS hasta 1, indicando ausencia de diferencias entre tratamientos de riego.

TCD mostró valores altos de IS al inicio del periodo de déficit hídrico (julio) debido al rápido crecimiento de tronco que manifestó el cultivo en este periodo. En los meses posteriores, IS disminuyó paulatinamente hasta alcanzar valores de 0.6 en octubre; lo que indica que se produjo un crecimiento compensatorio de los troncos de TCD después de las lluvias otoñales.

Por el contrario, Ψ_T alcanzó valores altos de IS (entre 1.6 y 1.7) durante los 3 primeros meses de poscosecha (entre julio y septiembre) y bajos (1.2), pero superiores a 1, en octubre. El

ruido alcanzado por este indicador fue el más bajo de todos los estudiados (CV entre 0.10 y 0.16), convirtiéndolo en el indicador más sensible.

Gs y Pn mostraron los niveles más elevados de IS (entre 2.8 y 3.0) a partir del segundo mes de déficit hídrico. El principal factor limitante de estos indicadores fue su alto nivel de ruido (CV entre 0.22 y 0.94); pero a pesar de ello, mostraron la sensibilidad más elevada al final del periodo de déficit hídrico. Las precipitaciones de finales de septiembre generaron IS muy bajas en MCD, TCD y Ψ_T , debido a que las diferencias entre tratamientos fueron muy pequeñas.

Respecto a los diferentes métodos para calcular la sensibilidad de los indicadores, ambas metodologías presentaron resultados similares, en cambio, se observó algún resultado contradictorio, como el alcanzado por el método tradicional (Goldhamer *et al.*, 2000), a partir del cual se presenta a MCD como el indicador más sensible en Octubre, a pesar de mostrar una IS de 1 (ausencia de diferencias entre tratamientos). Sin embargo, el nuevo algoritmo indicaría en este mismo mes que: i) MCD presenta una sensibilidad casi nula ($S^*=0.2$); ii) TCD muestra una sensibilidad negativa, apreciándose un comportamiento anómalo de este indicador, debido a que el tronco de los árboles de T_D crecieron más que los del T_{CTL} ; y iii) Gs y Pn fueron los indicadores que mayor sensibilidad mostraron.

Conclusiones

En general MCD y Ψ_T mostraron una elevada sensibilidad al déficit hídrico, detectándose éste con facilidad. Sin embargo, MCD presentó el inconveniente de la pérdida de sensibilidad al final del periodo, aunque a diferencia de Ψ_T , presenta la ventaja de la posible automatización de sus medidas.

El nuevo algoritmo propuesto para determinar la sensibilidad de indicadores del estrés hídrico del cultivo evita el problema de considerar a un indicador como sensible, sólo por el hecho de presentar CV bajos, aun cuando no existen diferencias entre tratamientos.

Artículo 3: Establecimiento de un protocolo de programación del riego deficitario a partir de indicadores de estado hídrico de la planta en nectarino temprano

Objetivos

El objetivo principal de este trabajo fue desarrollar y evaluar la idoneidad de la utilización de la intensidad de señal (IS) de MCD como herramienta para la programación del riego deficitario en nectarino extratemprano.

Metodología

El estudio se realizó durante 3 años consecutivos (2009, 2010 y 2011) en una explotación comercial situada en Campotejar (Molina de Segura, Murcia) (38°8' N, 1°13' W) de nectarino extratemprano (*Prunus persicae* L. Batsch cv Flanoba). Los tratamientos de riego ensayados fueron: i) un control (T_{CTL}), regado al 110% de ET_c durante todo el ciclo de cultivo a fin de evitar condiciones limitantes de agua en el suelo; ii) uno de riego deficitario controlado (T_{RDC}), programado en 2009 como T_{CTL} excepto en la poscosecha tardía (entre julio y noviembre) que se regó al 60% de T_{CTL} . Posteriormente, en los dos últimos años (2010 y 2011), y en base a la información obtenida en 2009 se diseñó el protocolo de programación del riego en base a IS de MCD, estableciendo valores umbrales de IS igual a 1 en los periodos críticos (período de no estrés hídrico) y 1.4 durante la poscosecha tardía (estrés hídrico moderado). En 2011, el periodo de déficit hídrico aplicado fue más prolongado, al iniciarse éste antes; y iii) uno regado en base al criterio del departamento técnico de la empresa comercial (T_{FINC}).

Se determinó el estado hídrico del suelo a partir de medidas semanales de humedad volumétrica (θ_v) en el perfil 0-100 cm. Las fluctuaciones de diámetro de tronco (FDT) se midieron a partir de 6 dendrómetros por tratamiento. A partir de las FDT se calculó la MCD y la IS en T_{RDC} .

Se realizaron medidas semanales de Ψ_T a mediodía solar, en árboles monitoreados con sensores LVDT. Se calculó la integral de estrés de Ψ_T , MCD y TCD siguiendo la metodología de Myers (1988).

Se controlaron los parámetros productivos (peso de la cosecha y número de frutos) y de calidad (peso medio del fruto, sólidos solubles totales, acidez e índice de madurez) durante la cosecha.

Resultados y discusión

El agua de riego aplicada al cultivo fue 681, 617 y 719 mm en T_{CTL} , para los ciclos 2009-2010, 2010-2011 y 2011-2012, respectivamente. T_{RDC} la redujo en un 17, 15 y 37 %, respectivamente. Sin embargo, T_{FINC} aplicó un 20 y 5 % más que T_{CTL} durante los dos primeros años, respectivamente, y un 10 % menos que T_{CTL} en el tercer año. La reducción progresiva del agua aplicada en T_{FINC} durante el ensayo, fue debida al buen comportamiento que experimentaban los árboles de T_{RDC} al déficit hídrico.

El riego aplicado en T_{CTL} propició valores de humedad volumétrica del suelo en el perfil 0-100 cm cercanos a capacidad de campo en todo momento. En cambio, θ_v se redujo significativamente en T_{RDC} durante los periodos de déficit hídrico.

Durante el primer año, T_{RDC} experimentó una disminución del 40 % del riego aplicado respecto a T_{CTL} , entre el 2 de julio y 28 de octubre de 2009, lo que generó un valor promedio de IS de 1.36 y un valor promedio y mínimo de Ψ_T de -1.2 y -1.8 MPa, respectivamente. Esta información fue utilizada para establecer el protocolo de programación del riego deficitario del siguiente año, en base a IS de MCD, fijando un valor umbral de IS de 1.4 en poscosecha.

Durante el segundo año, habiéndose fijado un IS_{umbral} de 1.4, T_{RDC} mantuvo IS en valores cercanos al umbral entre los meses de julio y septiembre, pero fue muy inferior tanto al inicio como al final del período de déficit hídrico, alcanzando finalmente un 38 % de reducción de riego respecto al control. Al final del período de déficit, IS presentó valores cercanos a 1, a pesar de que la reducción del agua aplicada en esos momentos en T_{RDC} , que llegó a ser de hasta un 80 % respecto a T_{CTL} . Este hecho ha sido observado en otros cultivos (Intrigliolo y Castel 2007; Ortuño *et al.*, 2006), donde MCD deja de aumentar e incluso disminuye cuando el estrés hídrico supera un cierto umbral.

Efectivamente, en octubre de 2010, el nectarino alcanzó un valor de Ψ_T de -2.1 MPa al mismo tiempo que MCD no mostraba diferencias entre tratamientos de riego (IS=1). Este comportamiento quedó patente en la correlación Ψ_T vs MCD donde una curva polinomial explicaba dicha relación. MCD alcanzaba valores máximos cuando Ψ_T se situaba entre -1.4 y -1.6 MPa, disminuyendo cuando se superaba estos valores de Ψ_T . Este comportamiento es posiblemente el principal factor limitante de este indicador y para que la información aportada por MCD sea útil en la programación del riego deficitario, el estrés hídrico del cultivo no se debería alcanzar valores de Ψ_T inferiores a -1.4 MPa. A fin de no volver a incurrir en estrés hídrico excesivo en campañas sucesivas, se estableció un 70% como la máxima reducción de riego respecto a T_{CTL} .

Durante el tercer año, el déficit hídrico aplicado (desde 25 de mayo de 2011 a 12 de octubre de 2011), mantuvo IS en valores cercanos al umbral hasta mitad de agosto, momento a partir del cual, descendieron por debajo del umbral hasta 1, a pesar del 70% de reducción del agua de riego aplicada respecto al control. A pesar de que en este periodo la disminución de riego en T_{RDC} (55 % respecto a T_{CTL}) fue mucho mayor que en años anteriores Ψ_T alcanzó un valor mínimo de -1.5 MPa, muy superior a los mínimos de años anteriores.

Se propone por primera vez utilizar la relación entre la integral de estrés y el porcentaje de ahorro de agua (ambos términos determinados en el periodo de poscosecha) como herramienta para evaluar diferentes métodos de programación del riego. Se parte de la premisa de que la programación de riego ideal es aquella que genera el máximo ahorro de agua con el menor impacto en el cultivo. De esta manera, T_{FINC} presentó los valores más bajos, 1.8 mm MPa⁻¹ d⁻¹, mientras que T_{RDC} fue incrementando el valor del ratio, desde 1.78 mm MPa⁻¹ d⁻¹ en el segundo año, momento en el que se generó un estrés hídrico severo en octubre, hasta 4.47 mm MPa⁻¹ d⁻¹, en el tercer año, tras los reajustes realizados en el protocolo de programación del riego.

Asimismo, se evaluó el efecto del déficit hídrico en los parámetros productivos y de calidad de la cosecha. Las diferentes estrategias de riego no generaron diferencias significativas en ninguna de las variables estudiadas: i) Peso de la producción; ii) Número de frutos por árbol; iii) Tamaño medio del fruto; iv) Sólidos solubles; v) Acidez, y vi) Índice de madurez.

Conclusiones

Las estrategias de riego deficitario controlado propuestas en este artículo consiguieron importantes ahorros de agua sin generar mermas en la producción y calidad de la cosecha y aumentando de esta forma la eficiencia en el uso del agua de riego.

Los resultados de este trabajo indican que la programación del riego en base a la IS de MCD es una herramienta útil bajo condiciones de estrés hídrico moderado, pero presenta claras limitaciones cuando el estrés hídrico alcanzado por el cultivo llegaba a ser severo, siendo necesario, en estas condiciones, la realización de medidas de Ψ_T .

Objetivos

El objetivo de este trabajo fue evaluar la sensibilidad al déficit hídrico de nuevos indicadores de estado hídrico de la planta derivados de las fluctuaciones de diámetro de tronco (Contracción temprana de diámetro de tronco -EDS- y contracción tardía de diámetro de tronco -LDS-) en comparación con indicadores tradicionales (MCD- y Ψ_T).

Material y métodos

El estudio se realizó durante los periodos de poscosecha de dos años consecutivos (2009 y 2010) en una finca comercial de nectarinos extratemprano (*Prunus persicae* L. Batsch cv Flanoba) situada en Campotejar (38°8' N, 1°13' W). Se establecieron 2 tratamientos de riego: i) Un tratamiento control (T_{CTL}) regado en base a sus necesidades hídricas totales; ii) Un tratamiento de riego deficitario (T_D) donde se aplica una reducción de riego del 40% durante la poscosecha del primer año y una reducción del riego paulatina (entre el 20 y el 70 %) durante la poscosecha de 2010.

Se realizaron medidas continuas de la humedad volumétrica de suelo a 20 cm de profundidad con sensores Hydra Probe II (Stevens Water Monitoring Systems, USA). A partir de las cuales se calculó el nivel relativo de agua extraíble (RAE, Granier 1987).

Las fluctuaciones de diámetro de tronco (FDT) se midieron a partir de 6 dendrómetros. A partir de las FDT se calculó MCD, TCD y también se calculó la contracción temprana de diámetro de tronco (EDS) como la contracción de tronco entre las 9 y las 12 (hora solar) y la contracción tardía de diámetro de tronco (LDS) como la contracción entre las 12 (hora solar) y el mínimo diámetro de tronco.

El potencial hídrico de tallo (Ψ_T) se midió al mediodía solar cada 7-10 días en árboles monitoreados con sensores LVDT. La conductancia estomática (Gs) se midió con CIRAS2 (PPSystem, Hitchin, Herfordshire, UK) el 26 de agosto de 2010 cada 2 horas desde la salida hasta la puesta del sol.

La sensibilidad al déficit hídrico de los indicadores se determinó a partir de la metodología propuesta por Goldhamer y Fereres (2001) relacionando la intensidad de señal (IS, relación entre valores en tratamiento deficitario y los valores del control) y el ruido (CV, coeficiente de variación de las medidas)

Resultados

A lo largo del periodo de medida, Ψ_T en T_{CTL} osciló entre -0.4 y -1.06 MPa, valores característicos de árboles bien regados (Shackel *et al.* 1997). Los indicadores Ψ_T , MCD y EDS mostraron rápidamente diferencias significativas en 2009, cuando se redujo el riego un 40 % respecto al riego aplicado en T_{CTL} . En cambio, cuando en 2010 el déficit hídrico se inició con una reducción de riego menor (20 % respecto a T_{CTL}), Ψ_T tardó más tiempo que el resto de indicadores en presentar las primeras diferencias significativas. Los valores de LDS promedio de cada periodo de déficit no mostraron diferencias entre tratamientos. TCD presentó valores más altos en CTL pero las diferencias habitualmente no eran significativas por la alta variabilidad que mostraba este indicador.

EDS presentó los valores más altos de IS durante los dos periodos de déficit hídrico, promediando 1.9 y 2.3 para 2009 y 2010, respectivamente. En cambio, MCD mostró valores sensiblemente más bajos (1.5 y 1.7) y similares a los de Ψ_T (1.4 y 1.5).

IS_{MCD} era mayor a IS_{Ψ_T} durante los dos primeros meses de los periodos de déficit, independientemente de la intensidad de déficit aplicado. En cambio, a final del periodo de

déficit la IS_{MCD} era inferior a la de IS_{Ψ_T} . Interesantemente, IS_{EDS} en ese periodo seguía manteniendo valores superiores o iguales a IS_{Ψ_T} , incluso en condiciones de estrés severo. Los mayores registros de IS_{EDS} frente a IS_{MCD} pueden estar relacionadas con el cierre estomático en T_{RDC} . La contracción del tronco tiene lugar cuando las salidas de agua de la planta, mediante transpiración, son mayores que las entradas de agua mediante absorción radicular. En condiciones normales la contracción es mayor cuanto mayor son las diferencias entre transpiración y absorción radicular. Antes del mediodía, T_{RDC} muestra habitualmente valores de G_s similares o levemente inferiores a los de T_{CTL} . En este momento, bajo condiciones de déficit hídrico la absorción radicular es limitada por lo que las diferencias entre salidas y entradas de agua se incrementan y con ellas la contracción del tronco. Conforme avanza el día, el incremento de la demanda atmosférica junto con el déficit hídrico del suelo favorece el cierre estomático en T_{RDC} . Por la tarde, G_s en T_{RDC} es muy baja, muy diferente a los valores altos encontrados en T_{CTL} . Así, T_{RDC} consigue disminuir las pérdidas de agua, con lo que la contracción del tronco en estas condiciones puede ser igual o inferior (en función de la intensidad del déficit) a la de árboles bien regados.

Al final de periodo, las IS de los indicadores derivados de FDT siempre disminuyen, esto en mayor medida con LDS. Se sabe que el cierre estomático se ve influenciado por la duración del déficit hídrico, conforme éste se prolonga, la acumulación de ácido abscísico (ABA) se incrementa, favoreciéndose de esta forma el cierre estomático.

Respecto a la variabilidad de las medidas, Ψ_T presentó los menores coeficientes de variación ($CV \approx 0.10$) en comparación con los de MCD y EDS ($CV \approx 0.18$). Por este motivo Ψ_T mostró la mayor sensibilidad al déficit hídrico. Entre los indicadores derivados de FDT, fue EDS el que mostró los valores más altos de sensibilidad y LDS los más bajos.

Al relacionar MCD y EDS con Ψ_T se observó que los coeficientes de determinación mejoraban cuando los datos se dividían en tres periodos: junio, julio-agosto y septiembre-octubre. A un mismo valor de Ψ_T le correspondían valores de MCD y EDS paulatinamente más bajos conforme avanzaba el periodo. Para explicar este hecho se suele hablar de la pérdida de elasticidad de los tejidos (Genard *et al.*, 2001; Intrigliolo y Castel 2004) o de problemas de cavitación xilemática al final del periodo (Kozlowsky, 1976). MCD estaba linealmente relacionada con Ψ_T en junio, cuando Ψ_T variaba entre -0.3 y -0.9. Sin embargo, en los periodos julio-agosto y septiembre-octubre el mejor ajuste fue con relaciones no lineales. En cambio, EDS estaba siempre linealmente relacionada con Ψ_T . Se ha observado en diferentes cultivos que a partir de cierto umbral MCD disminuye al aumentar el estrés hídrico lo que puede ser debido a problemas de rehidratación de los tejidos del tronco (Hughes *et al.*, 1992; Ortuño *et al.*, 2010) al descenso de la transpiración (Hinckley y Bruckerhoff 1975) y/o al descenso de la conductividad hidráulica de los tejidos xilemáticos del tronco a partir de un cierto nivel de estrés.

Conclusiones

Ψ_T fue el indicador que presentó mayor sensibilidad al déficit hídrico debido principalmente a la baja variabilidad de sus medidas.

Dentro de los indicadores derivados de las fluctuaciones de diámetro de tronco, EDS fue el que mayor sensibilidad presentó, superando incluso a los indicadores tradicionales MCD y TCD.

Objetivos

Los objetivos de este trabajo fueron: i) evaluar el efecto del riego deficitario programado en base a la intensidad de señal de la MCD (IS_{MCD}) sobre el crecimiento vegetativo y los parámetros productivos y de calidad de la cosecha; y ii) evaluar el efecto de esta programación del riego bajo diferentes niveles de cargas frutales.

Metodología

El estudio se realizó durante 3 años consecutivos (2009, 2010 y 2011) en una explotación comercial situada en Campotejar (Molina de Segura, Murcia) ($38^{\circ}8' N$, $1^{\circ}13' W$) en nectarinos extratempranos (*Prunus persicae* L. Batsch cv Flanoba). Los tratamientos de riego ensayados fueron: i) un control (T_{CTL}), regado en base a sus necesidades hídricas totales; ii) uno de riego deficitario controlado (T_{RDC}) donde se redujo el riego durante la poscosecha y en el que se programó el riego en base a IS_{MCD} a partir del segundo ciclo de cultivo; y iii) uno regado en base al criterio del departamento técnico de la empresa comercial (T_{FIN}).

Además, dentro de T_{CTL} y T_{RDC} se desarrollaron 5 tratamientos con diferentes cargas productivas: i) muy baja (16 cm entre frutos); ii) baja (14 cm entre frutos); iii) comercial (12 cm entre frutos); iv) elevada (10 cm entre frutos); y v) muy elevada (8 cm entre frutos). En todos los tratamientos se retiraron los frutos dañados o mal posicionados.

Se determinó la fluctuación del diámetro de tronco a partir de 6 dendrómetros por tratamiento. A partir de ellas se determinó el máximo diámetro diario de tronco (MXDT) y la tasa de crecimiento diaria de diámetro de tronco (TCD). El potencial hídrico de tallo (Ψ_T) se midió al mediodía solar en árboles monitoreados con dendrómetros. Se calculó la integral de estrés ($S\Psi_T$) mensualmente siguiendo la metodología propuesta por Myers (1988).

Como parámetros de crecimiento vegetativo se midió el perímetro de tronco, el peso seco de la madera eliminada en poda y el crecimiento de los brotes. La sección transversal de tronco (STT) se determinó suponiendo secciones de tronco circulares. El incremento anual de sección transversal de tronco (ΔSTT) se calculó como la diferencia entre las STT de dos años consecutivos de medidas realizadas al finalizar la cosecha.

Resultados y discusión

$S\Psi_T$ mensual incrementó su valor en relación al tiempo y la intensidad del déficit hídrico al que se sometieron los árboles de T_{RDC} y T_{FINC} respecto a T_{CTL} . Su valor máximo fue 23 MPa día, y se alcanzó en septiembre del segundo año. T_{RDC} mostró una reducción significativa de TCD durante el periodo de rápido crecimiento de tronco (entre junio y septiembre), una vez finalizada la cosecha, desapareciendo las diferencias en octubre, cuando los troncos dejaron de crecer. De esta forma, el crecimiento acumulado del tronco presentó diferencias claras entre tratamientos y proporcionales al riego aplicado. Sin embargo, la reducción de STT fue sólo significativa con respecto a T_{CTL} hasta el tercer ciclo. Contrariamente, ΔSTT fue significativamente inferior en T_{RDC} durante todo el ensayo, mientras que en T_{FINC} sólo lo fue durante el tercer ciclo.

Por otra parte, el peso seco de la madera eliminada en la poda presentó pequeñas diferencias entre tratamientos, aunque fueron significativas entre T_{RDC} y T_{CTL} durante el segundo y tercer año. Este hecho junto al similar crecimiento de los brotes entre ambos fue debido a que la

aplicación del déficit hídrico tuvo lugar cuando los brotes ya habían experimentado gran parte de su crecimiento en longitud.

El crecimiento del fruto, tanto en diámetro como en peso fresco, fue idéntico para los 3 tratamientos durante el período experimental. El fruto mantuvo un crecimiento elevado durante la fase III, alcanzándose tasas en torno a $4 \text{ g F}^{-1} \text{ d}^{-1}$, durante la semana previa a la recolección. Este hecho propició que la distribución de los fotoasimilados estuviese dirigida en su totalidad hacia el crecimiento del fruto, produciendo una parada en el del tronco.

Respecto a los parámetros productivos (producción, carga frutal, tamaño medio del fruto) y de calidad (calibre, firmeza, sólidos solubles totales, acidez e índice de madurez) no presentaron diferencias significativas en ninguno de los cortes ni en los resultados globales de cada cosecha.

La reducción del agua de riego aplicado en T_{RDC} (en torno al 17, 15 y 37 % respecto a T_{CTL} durante los ciclos 2009-2010, 2010-2011 y 2011-2012, respectivamente) no indujo mermas en la producción, propiciándose valores más elevados de la eficiencia en el uso del agua de riego (EUA) respecto al T_{CTL} , en torno a un 25% durante los dos primeros ciclos, y un 74% en el tercero. T_{FINC} incrementó su EUA de forma continuada durante el período experimental, debido al cambio de estrategia de riego que se produjo en la explotación comercial, motivada por los resultados obtenidos en T_{RDC} .

El crecimiento vegetativo se vio afectado por el déficit hídrico, tal como se ha visto en otros frutales (Boland *et al.*, 1993; Caspari *et al.*, 1994; Girona *et al.*, 2005; Pérez-Pastor *et al.*, 2014; Rahmati *et al.*, 2015). Este hecho puede tener un aspecto positivo al reducir los costes de las labores de poda (López *et al.* 2008). En cambio, los parámetros productivos y de calidad de la cosecha no se vieron afectados por el déficit hídrico, tal y como había observado Conejero *et al.*, (2007)

Los valores significativamente más altos del ratio Producción/ ΔSTT en T_{RDC} que en los otros tratamientos durante los 3 años de estudio indican que el reparto de carbono fue principalmente destinado al crecimiento del fruto a expensas de la reducción del crecimiento vegetativo.

Conclusiones

El crecimiento vegetativo determinado a partir del crecimiento de la sección transversal de tronco se redujo con el déficit hídrico.

En general el déficit hídrico no afectó a los parámetros productivos y de calidad de la cosecha en ninguno de los niveles de carga productiva estudiados, a excepción de la firmeza del fruto, que fue más elevada en T_{RDC} cuando la carga productiva era baja.

El riego aplicado en T_{RDC} se redujo en torno a un 20% (media de los 3 años) lo que provocó que la Eficiencia en el Uso del Agua fuera mayor en T_{RDC} .

4. Conclusiones generales

A continuación se enumeran las conclusiones generales de esta Memoria de Tesis:

- Las líneas de referencia determinadas para predecir valores de MCD a partir de valores de DPVmd presentaron altos coeficientes de determinación y estabilidad entre años considerándose útiles para su uso en la programación del riego.
- En general MCD y Ψ_T mostraron una elevada sensibilidad al déficit hídrico. Sin embargo, MCD presentó el inconveniente de la pérdida de sensibilidad al final del periodo, con la disminución de la demanda evaporativa, aunque a diferencia de Ψ_T , presenta la ventaja de la posible automatización de sus medidas.
- Dentro de los indicadores derivados de las fluctuaciones de diámetro de tronco, EDS fue el que mayor sensibilidad presentó, superando incluso a los indicadores tradicionales MCD y TCD.
- El nuevo algoritmo propuesto para determinar la sensibilidad de indicadores del estrés hídrico del cultivo evita el problema de considerar a un indicador sensible, sólo por el hecho de presentar valores bajos de ruido en sus medidas.
- La programación del riego en base a la IS de MCD es una herramienta útil bajo condiciones de estrés hídrico moderado, pero presenta claras limitaciones en condiciones de estrés hídrico severo, siendo necesario, en estas condiciones, la realización de medidas de potencial hídrico de tallo.
- Las estrategias de riego deficitario controlado propuestas consiguieron importantes ahorros de agua sin generar mermas en la producción y calidad de la cosecha y aumentando de esta forma la eficiencia en el uso del agua de riego.
- En general el déficit hídrico no afectó a los parámetros productivos y de calidad de la cosecha en ninguno de los niveles de carga productiva estudiados, a excepción de la firmeza del fruto, la cual fue más elevada en T_{RDC} cuando la carga productiva era baja.

5. Bibliografía

- Abdelfatah A., Aranda X., Savé R., de Herralde F., Biel C., 2013. Evaluation of the response of maximum daily shrinkage in Young cherry trees submitted to water stress cycles in a greenhouse. *Agric Water Manag* 118:150–158.
- Abrisqueta, I., Conejero, W., Valdés-Vela, M., Vera, J., Ortuño, M.F., Ruiz-Sánchez, M.C., 2015. Stem water potential estimation of drip-irrigated early-maturing peach trees under Mediterranean conditions. *Comput. Electron. Agr.* 114, 7-13.
- Alarcón J.J, Domingo R., Green S., Sánchez-Blanco M.J., Rodríguez P., Torrecillas A., 2000. Sap flow as an indicator of transpiration and the water status of Young apricot trees. *Plant and Soil* 227, 77–85..
- Alcobendas, R., Mirás-Avalos, J.M., Alarcón, J.J., Pedrero, F., Nicolás, E., 2012. Combined effects of irrigation, crop load and fruit position on size: color and firmness of fruits in an extra-early cultivar of peach. *Sci. Hortic.* 142, 128–135.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. *Irrig. Drain. Paper No. 56.* FAO, Rome, Italy, p. 300.
- Ameglio, T., Minguéau, M., Archer, P. y Pons, B., 1992. Water relations in Halzenut: Sap flow, predawn water potential and micromorphometric variations of stem diameter. III International Congress on Halzelnut. Alba. Italy.
- Badal, E., Buesa, I., Guerra, D., Bonet, L., Ferrer, P., Intrigliolo, D.S., 2010. Maximum diurnal trunk shrinkage is a sensitive indicator of plant water, stress in *Diospyros kaki* (Persimmon) trees. *Agric Water Manag* 98:143–147.
- Boland, A.M., Mitchell, P.D., Jerie, P.H., Goodwin, I., 1993. The effect of regulated deficit irrigation on tree water use and growth of peach. *J. Hortic. Sci.* 68, 261–274.
- Caspari, H.W., Behboudian, M.H., Chalmers, D.J., 1994. Water use growth, and fruit yield of 'houis' asian pears under deficit irrigation. *J. Amer. Soc. Sci.* 119, 383–438.
- 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. *Journal of the American Society of Horticultural Science* 106, 307–312.
- Cohen, Y., 1991. Determination of orchard water requirement by a combined trunk sap flow and meteorological approach. *Irrigation Science*, 12: 93–98.
- Cohen, M., Goldhamer, D.A., Fereres, E., Girona, J. y Mata, M., 2001. Assessment of peach tree responses to irrigation water deficits by continuous monitoring of trunk diameter changes. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 76: 55–60.
- Conejero, W., Alarcón, J.J., García-Orellana, Y., Abrisqueta, J.M., Torrecillas, A., 2007. Daily sap flow and maximum daily trunk shrinkage measurements for diagnosing water stress in early maturing peach trees during the post-harvest period. *Tree Physiology* 27, 81–88.
- Conejero, W., Ortuño, M.F., Mellisho, C.D., Torrecillas, A., 2010. Influence of crop load on maximum daily trunk shrinkage reference equations for irrigation scheduling of early maturing peach trees. *Agricultural Water Management* 97, 333–338.
- Conejero, W., Mellisho, C.D., Ortuño, M.F., Galindo, A., Perez-Sarmiento, F., Torrecillas, A., 2011. Establishing maximum daily trunk shrinkage and stem water potential reference equations for irrigation scheduling of early maturing peach trees. *Irrigation Science* 29, 299–309.

- Domingo, R., Nortes, P.A., Egea, G., Torres, R., Perez-Pastor, A., 2005. Utilización de sensores en planta para la programación del riego y uso eficiente del agua en la agricultura. *Vida Rural* 217, 42-46.
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O., 1977. Crop water requirements. *Irrigation and Drainage*. Paper N°24 (rev.). FAO, Rome, 144p.
- Egea, G., Pagán, E., Baille, A., Domingo, R., Nortes, P.A., Pérez-Pastor, A., 2009. Usefulness of establishing trunk diameter based reference lines for irrigation scheduling in almond trees. *Irrigation Science* 27, 431–441.
- Fereres, E., Goldhamer, D.A., 2003. Suitability of stem diameter variations and water potential as indicators for irrigation scheduling of almond trees. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 78, 139–144.
- Fernández, J.E., Cuevas, M.V., 2010. Irrigation scheduling from stem diameter variations: A review. *Agric. Forest Meteorol.* 150, 135–151.
- Galindo, A., Rodríguez, P., Mellisho, CD., Torrecillas, E., Moriana, A., Cruz, Z.N., Conejero, W., Moreno, F., Torrecillas, A., 2013. Assessment of discretely measured indicators and maximum daily trunk shrinkage for detecting water stress in pomegranate trees. *Agric For Meteorol* 180:58–65.
- García-Orellana, Y., Ruiz-Sánchez, M.C., Alarcón, J.J., Conejero, W., Ortuno, M.F., Nicolás, E., Torrecillas, A., 2007. Preliminary assessment of the feasibility of using maximum daily trunk shrinkage for irrigation scheduling in lemon trees. *Agricultural Water Management* 89, 167–171.
- Gènard, M., Fishman, S., Vercambre, G., Huguet, J.G., Bussi, C., Besset, J., Habib, R., 2001. A biophysical analysis of stem and root diameter variations in Woody plants. *Plant Physiology* 126, 188–202.
- Girona, J., Gelly, M., Mata, M., Arbonés, A., Rufat, J., Marsal, J., 2005. Peach tree response to single and combined deficit irrigation regimes in deep soils. *Agric. Water Manage.* 72, 97–108.
- 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.
- Goldhamer D.A., Fereres E., Mata M., Girona J., Cohen M., 1999. Sensitivity of continuous and discrete plant and soil water status monitoring in peach trees subjected to deficit irrigation. *J Am Soc Hortic Sci* 124:437-444
- Goldhamer, D., Soler, M., Salinas, E., Fereres, E., Cohen, M., Girona, J., 2000. Comparison of continuous and discrete plant-based monitoring for detecting tree water deficits and barriers to grower adoption for irrigation management. *Acta Hortic.* 537, 431–445.
- Goldhamer D.A., Fereres E., 2001. Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. *Irrig Sci* 20:115–125.
- Goldhamer, D.A., Fereres, E., 2004. Irrigation scheduling of almond trees with trunk diameter sensors. *Irrigation Science* 23, 11–19.
- Goode, J.E., Higgs, K.H., 1973. Water, osmotic and pressure potential relationships in apple leaves. *Journal of Horticultural Science*, 48:203–215.
- Granier, A., 1985. Une nouvelle methode pour la mesure des flux de seve dans le tronc des arbres. *Annales des Sciences Forestieres* 42, 193-200.

- Granier, A., 1987. Evaluation of transpiration in a Douglas fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiol* 3(4):309–319.
- Hanson, R.B., Orloff, S., Peters, D., 2000. Monitoring soil moisture helps refine irrigation management. *Calif. Agric.* 54, 38–42.
- Hinckley T.M., Bruckerhoff D.N., 1975. The effects of drought on water relations and stem shrinkage of *Quercus alba*. *Can J Bot* 53:62–72
- Huguet, J.G., Li, S.H., Lorendeau, J.Y., Pelloux, G., 1992. Specific micromorphometric reactions of fruit-trees to water-stress and irrigation scheduling automation. *Journal of Horticultural Science* 67, 631–640.
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Reginato, R.J. y Hatfield, J.L. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24: 45–55.
- Intrigliolo, D.S., Castel, J.R., 2004. Continuous measurement of plant and soil water status for irrigation scheduling in plum. *Irrigation Science* 23, 93–102.
- Intrigliolo, D.S., Castel, J.R., 2006. Performance of various water stress indicators for prediction of fruit size response to deficit irrigation in plum. *Agricultural Water Management* 83, 173–180.
- Intrigliolo, D.S., Castel, J.R., 2007. Crop load affects maximum daily trunk shrinkage of plum trees. *Tree Physiology* 27, 89–96.
- Intrigliolo, D.S., Puerto, H., Bonet, L., Alarcon, J.J., Nicolas, E., Bartual, J., 2011. Usefulness of trunk diameter variations as continuous water stress indicators of pomegranate (*Punica granatum*) trees. *Agricultural Water Management* 98, 1462–1468.
- Jones, H.G., 1983. Estimation of an effective soil water potential at the root Surface of transpiring plants. *Plant, Cell and Environment*, 6: 671–674.
- Jones, H.G., 1990. Physiological aspects of the control of water status in horticultural crops. *HortScience*, 25: 19–26.
- Jones, H.G., 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *J Exp Bot* 55:2427–2436.
- Klepper, B., Browning, V.D. y Taylor, H.M. 1971. Stem diameter in relation to plant water status. *Plant Physiology*, 48: 683–685.
- Klepper, B., 1968. Diurnal pattern of water potential in woody plants. *Plant Physiology*, 43: 1931–1934.
- Kozlowsky T.T., Winget C.H., 1964. Diurnal and seasonal variation in radio of tree stems. *Ecology* 45:149–155.
- Kozlowsky T. T., 1976. Shrinking and swelling of plant tissues. In: Kozlowski TT (ed) *Water deficits and plant growth*, vol 3. Academic Press, New York, pp 1–64
- López, G., Arbones, A., del Campo, J., Mata, M., Vallberdy, X., Girona, J., Marsal, J., 2008. Response of peach trees to regulated deficit irrigation during stage II offruit development and summer pruning. *Span. J. Agric. Res.* 6 (3), 479–491.
- MAGRAMA, 2015. Anuario de estadística agraria 2015. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Marsal, J., Gelly, M., Mata, M., Arbonés, A., Girona, J., 2002. Phenology and drought affects the relationship www.magrama.gob.es between daily trunk shrinkage and midday stem water potential of peach trees. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 77, 411–417.

- Marshall, D.C., 1958. Measurement of sap flow in conifers by heat transport. *Plant Physiology*, 33: 385–396.
- Mirás-Avaloz, F., Perez-Sarmiento, R. Alcobendas., 2016. Using midday stem water potential for scheduling deficit irrigation in midlate maturing peach trees under Mediterranean conditions. *Irrig. Sci.*, 34 (2016), pp. 161–173.
- Moreno, F., Fernández, J.E., Clothier, B.E. y Green, S. R. 1996. Transpiration and root water uptake by olive trees. *Plant and Soil*, 184: 85–96.
- Moriana, A., Fereres, E., 2002. Plant indicators for scheduling irrigation of young olive trees. *Irrig Sci* 21:83–90
- Moriana, A., Fereres, E., 2004. Establishing reference values of trunk diameter fluctuations and stem water potential for irrigation scheduling of olive trees. *Acta Horticulturae* 664, 407–412.
- Moriana, A., Moreno, F., Girón, I., Conejero, W., Ortuño, MF., Morales, D., Corell, M., Torrecillas, A., 2011. Seasonal changes of maximum daily shrinkage reference equations for irrigation scheduling in olive trees: influence of fruit load. *Agric Water Manag* 99:121–127.
- Moriana, A., Pérez-López, D., Prieto, M.H, Ramírez-Santa-Pau, M., Pérez-Rodríguez, J.M., 2012. Midday stem water potential as a useful tool for estimating irrigation requirements in olive trees. *Agricultural Water Management* 112, 43–54.
- Myers, B.J., 1988., Water stress integral, a link between short-term stress and long-term growth. *Tree Physiol.* 4, 315–323.
- Naor, A., Hupert, H., Greenblat, Y., Peres, M., Kaufman, A., Klein, I., 2001. The response of nectarine fruit size and midday stem water potential to irrigation level in stage III and crop load. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 126, 140–143.
- Naor, A., Cohen, S., 2003. The sensitivity and variability of maximum trunk shrinkage, midday stem water potential, and transpiration rate in response to withholding of irrigation in field-grown 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. *Agric Water Manag* 77(1–3):296–307.
- Naor, A., 2006. Irrigation scheduling and evaluation of tree water status in deciduous orchards. *Hortic Rev* 32:111–165.
- Ortuño, M.F., García-Orellana, Y., Conejero, W., Ruiz-Sánchez, M.C., Alarcón, J.J., Torrecillas, A., 2006. Stem and leaf water potentials, gas exchange, sap flow, and trunk diameter fluctuations for detecting water stress in lemon trees. *Trees* 20:1–8.
- Ortuño, M.F., Brito, J.J., Conejero, W., García-Orellana, Y., Torrecillas, A., 2009. Using continuously recorded trunk diameter fluctuations for estimating water requirements of lemon trees. *Irrig Sci* 27:271–276.
- Ortuño, M.F., Brito, J.J., García-Orellana, Y., Conejero, W., Torrecillas, A., 2009. Maximum daily trunk shrinkage and stem water potential baselines for irrigation scheduling of lemon trees. *Irrigation Science* 27, 121–127.
- Ortuño, M.F., Conejero, W., Moreno, F., Moriana, A., Intrigliolo, D.S., Biel, C., Mellisho, C.D., Pérez-Pastor, A., Domingo, R., Ruiz-Sánchez, M.C., Casadesus, J., Bonany, J., Torrecillas, A., 2010. Could trunk diameter sensors be used in woody crops for irrigation scheduling? A review of current knowledge and future perspectives. *Agricultural Water Management* 97, 1–11.

- Pagan, E., Perez-Pastor, A., Domingo, R., Conesa, M.R., Caro, M., 2012. Suitability of trunk diameter reference lines for irrigation scheduling with saline water in late mandarin trees with different crop load. *Agricultural Water Management* 111, 11–19.
- 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. *Agricultural Water Management* 134, 110-118.
- Perez-Sarmiento, F., Alcobendas, R., Mounzer, O., Alarcón, J.J. y Nicolás, E., 2010. Effects of regulated deficit irrigation on physiology and fruit quality in apricot trees. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8: 86–94.
- Puerto, P., Domingo, R., Torres, R., Pérez-Pastor, A., García-Riquelme, M., 2013. Remote management of deficit irrigation in almond trees based on maximum daily trunk shrinkage. *Water relations and yield. Agric. Water Manage.* 126, 33–45.
- Rahmati, M., Davarynejad, G.H., Génard, M., Bannayan, M., Azizi, M., Vercambre, G., 2015. Peach Water Relations, Gas Exchange, Growth and Shoot Mortality under Water Deficit in Semi-Arid Weather Conditions. *PLoS One*, <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0120246> (in press).
- Remorini, D., Massai, R., 2003. Comparison of water status indicators for Young peach trees. *Irrigation Science* 22, 39–46.
- Ritchie, G.A. y Hinckley, T.M., 1975. The pressure chamber as an instrument for ecological research. *Advances in ecological research*, 9: 165–254.
- Ruiz-Sánchez, M.C., Domingo, R., Castel, J.R., 2010. Review. Deficit irrigation in fruit trees and vines in Spain. *Spanish Journal of Agricultural Research* 8, 5–20.
- Scholander P.F., Hammel H.T., Bradstreet E.D., Hemingsen E.A., 1965. Sap pressure in vascular plants. *Science* 148, 339-346.
- Shackel, K.A., Ahmadi, H., Biasi, W., Buchner, R., Goldhamer, D.A., Gurusinge, S.H., Hasey, J., Kester, D., Krueger, B., Lampinen, B., McGourty, G., Micke, W., Mitcham, E., Olson, B., Pelletrau, K., Philips, H., Ramos, D., Schwankl, L.J., Sibbet, S., Snyder, R., Southwick, S., Stevenson, M., Thorpe, M., Weinbaum, S., Yeager, J., 1997. Plant water status as an index of irrigation need in deciduous fruit trees. *Horticulture Technology* 7, 23–29.
- Shackel, K.A., Buchner, R.P., Connell, J.H., Edstrom, J.P., Fulton, A.E., Holtz, B.A., Lampinen, B.D., Reil, R.O., Stewart, W.L., Viveros, M.A., 2010. Midday stem water potential as a basis for irrigation scheduling. *5th National Decennial Irrigation Conference Proceedings*.
- Valancogne, C., Nasr, Z., 1989. Measuring sap flow in the stem of small trees by a heat balance method. *Horticultural Science* (24), 383-385.
- Vélez, J.E., Intrigliolo, D.S., Castel, J.R., 2007. Scheduling deficit irrigation of citrus trees with maximum daily trunk shrinkage. *Agricultural Water Management* 90, 197–204.
- Vera, J., Abrisqueta, I., Abrisqueta, J.M., Ruiz-Sánchez, M.C., 2013. Effect of deficit irrigation in early-maturing peach tree performance. *Irrigation Science* 31, 747-757.
- Villalobos, F.J., Mateos, L., Orgaz, F. y Fereres, E., 2002. Mundiprensa eds. Madrid, España. 496 pp.

6- Artículos completos

*Artículo 1.- Feasibility of using trunk diameter fluctuation and stem water potential reference lines for irrigation scheduling of early nectarine trees. **De la Rosa, JM.**, MR Conesa, R. Domingo, R. Torres, A. Pérez-Pastor. 2013. *Agricultural Water Management* 127: 31-39.*

*Artículo 2.- A new approach to ascertain the sensitivity to water stress of different plant water indicators in extra-early nectarine trees. **De la Rosa, JM.**, Conesa MR., Domingo, R., Pérez-Pastor A. 2014. Scientia Horticulturae 169, 147-153.*

*Artículo 3.- Implementing deficit irrigation scheduling through plant water stress indicators in early nectarine trees. **De la Rosa, JM.,** Domingo, R., Pérez-Pastor A. 2015. Agricultural Water Management 152: 207-216.*

*Artículo 4.- Early morning fluctuations in trunk diameter are highly sensitive to water stress in nectarine trees. **De la Rosa, JM.**, IC. Dodd., Domingo, R., Pérez-Pastor A. 2016. Irrigation Science 34: 117-128.*

Artículo 5.- Combined effects of deficit irrigation and crop level on early nectarine trees. De la Rosa, JM., Conesa MR., Domingo, R., Aguayo, E., Falagan, N., Pérez-Pastor A. 2016. Agricultural Water Management 170: 120-132.

Apendice I: Indices de impacto de las publicaciones

Índice de Impacto y cuartil de los artículos que componen la tesis doctoral titulada: “VIABILIDAD DE LA UTILIZACIÓN DE LOS INDICADORES DE ESTADO HÍDRICO DE LA PLANTA COMO HERRAMIENTA PARA LA PROGRAMACIÓN DEL RIEGO DEFICITARIO EN NECTARINOS EXTRA-TEMPRANOS”, de **D. JOSÉ MARÍA DE LA ROSA SÁNCHEZ**, bajo la dirección y supervisión del doctor D. Alejandro Pérez Pastor, en la modalidad de compendio de publicaciones.

Artículo 1: A new approach to ascertain the sensitivity to water stress of different plant water indicators in extra-early nectarine trees

Publicado en “**Scientia Horticulturae**” en el año **2014**

Índice de Impacto: **1.365**

Area: **Horticulture**

Posición **9/33**; Cuartil: **Q2**

Artículo 2: Implementing deficit irrigation scheduling through plant water stress indicators in early nectarine trees

Publicado en “**Agricultural Water Management**” en el año **2015**

Índice de Impacto: **2.603**

Area: **Water resources**

Posición **10/85**; Cuartil: **Q1**

Artículo 3: Combined effects of deficit irrigation and crop level on early nectarine trees

Publicado en “**Agricultural Water Management**” en el año **2016**

Índice de Impacto: **2.848**

Area: **Water resources**

Posición **14/88**; Cuartil: **Q1**

Artículo 4: Feasibility of using trunk diameter fluctuation and stem water potential reference lines for irrigation scheduling of early nectarine trees

Publicado en “**Agricultural Water Management**” en el año **2013**

Índice de Impacto: **2.333**

Area: **Water resources**

Posición **18/81**; Cuartil: **Q1**

Artículo 5: Early morning fluctuations in trunk diameter are highly sensitive to water stress in nectarine trees

Publicado en “**Irrigation Science**” en el año **2016**

Índice de Impacto: **1.822**

Area: **Water resources**

Posición **35/88**; Cuartil: **Q2**

<https://jcr.incites.thc>

<https://j>

<https://jcr.incites.th>

Apéndice II: Producción científica en periodo predoctoral

Artículos en revistas SCI incluidos en la presente tesis

- **De la Rosa, J.M.**, Conesa, M.R., Domingo, R., Torres, R., Pérez-Pastor, A. 2013. Feasibility of using trunk diameter fluctuation and stem water potential reference lines for irrigation scheduling of early nectarine trees. *Agricultural Water Management*. 126:133-141.
- **De la Rosa, J.M.**, Conesa, M.R., Domingo, R., Pérez-Pastor, A.. 2014. A new approach to ascertain the sensitivity to water stress of different plant water indicators in extra-early nectarine trees. *Scientia Horticulturae*. 169: 147-153.
- **De la Rosa, J.M.**, Domingo, R., Gómez-Montiel, J., Pérez-Pastor, A. 2015. Implementing deficit irrigation scheduling through plant water stress indicators in early nectarine trees. *Agricultural Water Management*. 152: 207-216.
- **De la Rosa, J.M.**, Dodd, I.C., Domingo, R., Pérez-Pastor, A. 2016. Early morning fluctuations in trunk diameter are highly sensitive to water stress in nectarine trees. *Irrigation Science* 34: 117-128
- **De la Rosa, J.M.**, Conesa, M.R., Domingo, R., Aguayo, E., Falagán, N., Pérez-Pastor, A. 2016. Combined effects of deficit irrigation and crop level on early nectarine trees. *Agricultural Water Management*. In press

Artículos en revistas SCI relacionados

- Conesa, M.R., García-Salinas, M.D., **de la Rosa, J.M.**, Domingo, R., Fernandez-Trujillo, J.P., Perez-Pastor, A. 2014. Effects of deficit irrigation applied during fruit growth period of late mandarin trees on harvest quality, cold storage and sub-subsequent shelf-life. *Scientia Horticulturae*. Manuscrito nº HORTI 10663.
- Conesa, M.R., **de la Rosa, J.M.**, Artés-Hernández, F., Dodd, I., Domingo, R., Pérez-Pastor, A. 2014. Long-term impact of deficit irrigation on the physical quality of berries in ‘Crimson Seedless’ table grapes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*.
- Conesa, M.R., García-Salinas, M.D., **de la Rosa, J.M.**, Fernández-Trujillo, J.P., Domingo, R., Pérez-Pastor, A. 2015. Effects of deficit irrigation applied during fruit growth period of late mandarin trees on harvest quality, cold storage and subsequent shelf-life. *Irrigation Science* 165: 344-351

- Conesa, M.R., Falagán, N., **de la Rosa, J.M.**, Aguayo, E., Domingo, R., Pastor, A.P. 2015. Post-veraison deficit irrigation regimes enhance berry coloration and health-promoting bioactive compounds in 'Crimson Seedless' table grapes. *Agricultural Water Management*. 163: 9-18.
- Zornoza, R., Rosales, R.M., Acosta, J.A., **de la Rosa, J.M.**, Arce-negui, V., Faz, Á., Pérez-Pastor, A. 2016. Efficient irrigation management can contribute to reduce soil CO₂ emissions in agriculture. *Geoderma* 263:70-77.
- Conesa MR., **de la Rosa, J.M.**, Fernández-Trujillo JP., Domingo R., Pérez-Pastor A. 2015. Response of late mandarin tres cv. Fortune to deficit irrigation strategies and effect on fruit production and phytochemical characteristics at harvest and after cold storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*.
- Conesa, M.R., **de la Rosa, J.M.**, Domingo, R., Bañón, S., Pérez-Pastor, A. 2016. Changes induced by water stress on water relations, stomatal behaviour and morphology of table grapes (cv. Crimson Seedless) grown in pots. *Scientia Horticulturae*. 202: 9-16.

Publicaciones no listadas en JCR

- Domingo, R., Puerto, P., García, M., **de la Rosa, J.M.**, Torres, R., Pérez Pastor, A. 2011. I jornadas nacionales sobre el granado: Producción, economía, industrialización, alimentación y salud. Equipamiento y automatización de la programación del riego localizado. *Agrícola verdel*, 344. p 73.
- Conesa, M.R., **de la Rosa, J.M.**, Pagán, E., Corbalán, M., García, M., Domingo, R., Pérez-Pastor, A. (2011). Estudio de las relaciones hídricas y productividad en mandarino 'Fortune' sometido a riego deficitario controlado. IV Introducción a la Investigación de la UPCT. pp 51-53. ISSN: 1888-8356
- Conesa, M.R., **de la Rosa, J.M.**, Corbalán, M., Pérez-Pastor, A., Domingo, R. (2012). Influencia de las estrategias de riego deficitario controlado en el color de uva de mesa, cv. 'Crimson Seedless'. V Introducción a la investigación de la UPCT. pp 48-50. ISSN: 1888-8356.
- Conesa, M.R., Pérez-Pastor, A., **de la Rosa, J.M.**, Robles, J.M., Domingo, R., García-Salinas, M.D. (2013). Sensibilidad estomática de 'Crimson Seedless' al déficit hídrico. VI Introducción a la investigación de la UPCT. pp 61-63. ISSN: 1888-8356.

- A. Pérez Pastor, **J.M. de la Rosa Sánchez**. Viabilidad de la utilización del sulfato de calcio como fuente para la aplicación de calcio en cultivo de limonero y naranjo. Revista de horticultura. ISSN: 2013-5742, N°. 42, 2015, págs. 18-29.

Publicaciones en libros científicos

- Pérez-Pastor, A., Conesa M.R., **de la Rosa, J.M.**, Zornoza, R., M. Corbalán, Faz A., Muñoz, M.A., Domingo, R. (2010). Metodología no destructiva para la obtención del balance neto de carbono en cultivos leñosos de la Región de Murcia. Consejería de Agricultura y Agua. ISBN: 978-84-693-6838-1. pp. 157-183.

Comunicación a congresos (nacionales e internacionales)

- **De la Rosa, J.M.**, Conesa, M.R., Pagán, E., Corbalán, M., Pérez-Pastor, A., Caro, M., González, P. (2010). Estrategias de riego deficitario controlado en nectarino extratemprano. X Simposium hispano-portugués de relaciones hídricas en las plantas. Cartagena, 6-8 Octubre 2010. Comunicación oral.
- **De la Rosa, J.M.**, Conesa, M.R., Domingo, R., Pagán, E., Corbalán, M., Pérez-Pastor, A. (2010) Líneas de referencia basadas en la máxima contracción diaria del tronco en nectarinos extratempranos. X Simposium hispano-portugués de relaciones hídricas en las plantas. Cartagena, 6-8 Octubre 2010. Comunicación oral.
- **De la Rosa, J.M.**, Conesa, M.R., Domingo, R., Pagán, E., Corbalán, M., Pérez-Pastor, A. (2010) Líneas de referencia basadas en la máxima contracción diaria del tronco en nectarinos extratempranos. XXVIII Congreso Nacional de riegos. León, 15-17 Junio 2010. Comunicación oral.
- **De la Rosa, J.M.**, Pérez-Pastor, A., García-Riquelme, M., Peñalver, M.E., Conesa, M.R., Corbalán, M., Domingo, R. Riego deficitario controlado aplicado en dos variedades de nectarino extratemprano. XXIX Congreso Nacional de riegos. Córdoba 17-19 Junio 2011. Comunicación oral.
- Conesa, M.R., **de la Rosa J.M.**, Corbalán M., Domingo R., Pérez-Pastor A. (2011). Evaluación del déficit hídrico en uva de mesa. Primeros Resultados. XXX Congreso Nacional de Riegos y Drenajes (AERYD). 12-14 Junio. Albacete (España). Tipo de participación. Oral. Publicación: Actas del congreso

- Conesa, M.R., **de la Rosa, J.M.**, Pérez-Pastor, A., Domingo, R., Corbalán, M., Pagan, E. (2012). Effects of different deficit irrigation strategies on the yield and berry quality of table grape, orchard Crimson. II Conference Emuni Research Resouk 2012. Cartagena, 17-18 Abril 2012.
- Falagán, N. Aguayo, N., Gómez, P.A., Artés-Hernández, F., **de la Rosa, J.M.**, y Artés, F. (2012). El riego deficitario mantiene la calidad postcosecha de nectarina extratemprana. XIII Congreso Nacional de Ciencias Hortícolas. SECH. Almería, 16-20 de abril. Comunicación oral.
- Conesa, M.R., **de la Rosa, J.M.**, Corbalán, M., Domingo, R. y Pérez-Pastor, A. (2012). Evaluación del déficit hídrico en uva de mesa Crimson. Primeros resultados. Albacete, Junio 2012. Comunicación oral.
- **De la Rosa J.M.**, Conesa MR., Domingo R., Gómez-Montiel J., Perez-Pastor A. (2013). Sensitivity to wáter stress of plant wáter status indicators in early trees. VIII International Peach Sympo-sium. Matera (Italia).
- **De la Rosa J.M.**, Pérez-Pastor, A., Conesa, M.R., Domingo, R. (2013). Feasibility of using reference lines derived from plant water status indicators for irrigation scheduling of early nectarin trees. The 8th Conference on Sustainable development of energy, water and environmental system. Dubrovnik. Croatia 22-27 Septiembre 2013.
- Pérez-Pastor, A., **de la Rosa, J.M.**, Conesa, M.R., Domingo, R. (2013) Increases of 40 % in water use efficiency attained through a sustained irrigation strategy in a commercial nectarine orchard located in an area of low water availability. The 8th Conference on Sustainable development of energy, water and environmental sys-tem. Dubrovnik. Croatia 22-27 Septiembre 2013.
- Conesa, M.R., García-Salinas, M.D., Pérez-Pastor, **de la Rosa, J.M.**, Fernández-Trujillo. (2013) Deficit irrigation applied during growth of ‘Fortune’ mandarin improves quality at harvest, during storage and subsequent shelf-life.. Quality of fresh produce, herbs and vegetables from field to fork. Warsaw Poland 18-19 Septiembre 2013.
- **De la Rosa J.M.**, Conesa, M.R., García-Salinas., Domingo, R., Gó-mez-Montiel, J., Pérez-Pastor, A. (2013). “Sensibilidad de indica-dores de estrés hídrico en nectarino extratemprano”. XXXI Congreso Nacional de Riegos y Drenajes. Orihuela. 18-20 Agosto 2013. Comunicación oral.

- Conesa, M.R., Navarro, H., **de la Rosa, J.M.**, Pérez-Pastor, A., Torres, R. Redes de sensores cableadas en inalámbricas. Estudio y aplicación en la instrumentación y control de riego en uva de mesa. Seminario anual de automática, electrónica industrial e instrumentación (SAAEI) Madrid (España), 2013. Comunicación oral.
- **De la Rosa, J.M.** Sensibilidad de indicadores de estrés hídrico en nectarino extratemprano. II Workshop de Investigación Agroalimentaria. Doctorado en Técnicas Avanzadas en Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario. Cartagena 7-8 Mayo 2013. Comunicación oral.
- Conesa Saura, M.R., Navarro Hellín, H., **de la Rosa Sánchez, J.M.**, Pérez Pastor, A., Torres Sánchez, R. (2013). Redes de sensores cableadas e inalámbricas. Estudio y aplicación en la instrumentación y control de riego en cultivos. Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI). Madrid, 10-12, Julio. Comunicación oral.
- Falagán, N., Aguayo, E., Gómez, P.A., Artés-Hernández, F., **de la Rosa, J.M.**, Otón, M., y F. Artés, F. (2013). El riego deficitario controlado mantiene la calidad de la nectarina extratemprana mínima-mente procesada. VII Congreso Ibérico de Agroingeniería y Ciencias Hortícolas. Madrid, 26-29 Agosto. Comunicación oral.
- Conesa, M.R., **De la Rosa, J.M.**, Domingo, R., Torres, R, Soto, F., Navarro, H., García, M., Pérez-Pastor, A. (2014). Programación del riego en uva de mesa cv. ‘Crimson Seedless’ en base a la máxima contracción diaria del tronco. XXXII Congreso Nacional de Riegos y Drenajes (AERYD). XXX Junio. Madrid (España). Tipo de participación. Oral. Publicación: Actas del congreso
- Pérez-Pastor, A., **de la Rosa, J.M.**, Conesa, M.R., Domingo, R. (2015). The timing of the irrigation modifies the sensitivity to water stress of the plant water indices derived from the trunk diameter fluctuation. VIII International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops (ISHS). 8-11. Junio. Lleida (España). Tipo de participación. Oral. Publicación: Actas del congreso
- Pérez-Pastor, A., Conesa, M.R., **de la Rosa, J.M.**, Domingo, R., Dodd, I.C., Artés-Hernández, F. (2015). Different irrigation regimes affect xylem ABA concentrations and physical berry quality of table grapes at harvest and during postharvest life. VIII

International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops (ISHS). 8-11 Junio. Lleida (España). Tipo de participación. Póster. Publicación: Actas del congreso

- Conesa, M.R., **de la Rosa, J.M.**, Montemurro, L., García, M., Domingo, R., Pérez-Pastor, A. (2015). Aclimatación al estrés hídrico de plantas de uva de mesa cv. ‘Crimson Seedless’ cultivadas en maceta. XXXII Congreso Nacional de Riegos y Drenajes (AERYD). 16-18 Junio. Madrid (España). Tipo de participación. Oral. Publicación: Actas del congreso.
- Pérez-Pastor, A., **de la Rosa, J.M.**, Conesa, M.R., Domingo, R. The timing of irrigation modifies the sensitivity to water stress of plant water indices derived from trunk diameter fluctuation in extra early nectarine trees. (2017) *Acta Horticulturae*, 1150, pp. 75-82.
- Pérez-Pastor, A., Conesa, M.R., **De La Rosa, J.M.**, Domingo, R., Dodd, I., Artés-Hernández, F. Different irrigation regimes affect xylem ABA concentrations and the physical berry quality of table grapes at harvest and during postharvest life. (2017) *Acta Horticulturae*, 1150, pp. 449-456.

Dirección de Proyectos Fin de Carrera (PFC) y Trabajos Fin Máster (TFM)

- Trabajos fin de carrera Ingeniero Técnico Agrícola de Emperatriz García Espín: “Respuesta al riego deficitario controlado de nectarnino extratemprano Viowhite”. Calificación: 10
- Trabajo fin de grado de Abdelmalek Temnani Rajjaf: “Influencia de la carga productiva sobre parámetros productivos en nec-tarino”. Calificación 9.5. Premio G’s España al mejor trabajo fin de grado en estudios y soluciones en el ámbito agroalimentario.
- Trabajo fin de grado de Jesús Carlos Ruiz Gómez: “Influencia del riego deficitario aplicado durante el crecimiento del fruto del melocotón. Calificación 9.5.
- Trabajo Fin de Máster en Ingeniería Agronómica de Abdelmalek Temnani Rajjaf: Evaluación de diferentes indicadores de estado hídrico del cultivo en paraguay temprano variedad Carioca. Calificación 9.0.
- Trabajo Fin de Máster en Ingeniería Agronómica de Jesús carlos Ruiz Gómez : Aplicación de riego deficitario controlado y desecación parcial de raíces en cultivo de uva de mesa cv. Crimson Seedless. Calificación 9.5