Universidad Politécnica de Cartagena

Departamento de Producción Vegetal

Gestión de la calidad del fruto mediante prácticas culturales y aplicación de un modelo fisiológico en melocotonero

Rosalía Alcobendas Puig

2014

Universidad Politécnica de Cartagena

Departamento de Producción Vegetal

**Gestión de la calidad del fruto mediante prácticas culturales y
aplicación de un modelo fisiológico en melocotonero**

Rosalía Alcobendas Puig

2014

Universidad Politécnica de Cartagena

Departamento de Producción Vegetal

**Gestión de la calidad del fruto mediante prácticas culturales y
aplicación de un modelo fisiológico en melocotonero**

Rosalía Alcobendas Puig

Directores:

Juan José Alarcón Cabañero

Emilio Nicolás Nicolás

2014

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

D. Juan José Alarcón Cabañero Director de la Tesis doctoral **“Gestión de la calidad del fruto mediante prácticas culturales y aplicación de un modelo fisiológico en melocotonero”**.

INFORMA:

Que la referida Tesis Doctoral, ha sido realizada por D^a. Rosalía Alcobendas Puig, 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 25 de FEBRERO de 2014.

EL DIRECTOR/A DE LA TESIS

Fdo.:

COMISIÓN DE DOCTORADO

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

D. Emilio Nicolás Nicolás Director de la Tesis doctoral **“Gestión de la calidad del fruto mediante prácticas culturales y aplicación de un modelo fisiológico”**.

INFORMA:

Que la referida Tesis Doctoral, ha sido realizada por D^a. Rosalía Alcobendas Puig, 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 25 de Febrero de 2014.

EL DIRECTOR/A DE LA TESIS

Fdo.:

COMISIÓN DE DOCTORADO

**CONFORMIDAD DE SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN DE DEPÓSITO DE
TESIS DOCTORAL POR EL TUTOR DE LA TESIS**

D. Rafael Domingo Miguel Tutor de la Tesis doctoral **“Gestión de la calidad del fruto mediante prácticas culturales y aplicación de un modelo fisiológico en melocotonero”**.

INFORMA:

Que la referida Tesis Doctoral, ha sido realizada por D^a. Rosalía Alcobendas Puig, 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 27 de FEBRERO de 2014.

EL TUTOR DE LA TESIS

Fdo.:

Rafael Domingo Miguel

COMISIÓN DE DOCTORADO

**CONFORMIDAD DE DEPÓSITO DE TESIS DOCTORAL
POR LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA**

D. Francisco Artés Hernández, Presidente de la Comisión Académica del Programa
“Técnicas Avanzadas en Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario”.

INFORMA:

Que la Tesis Doctoral titulada, “Gestión de la calidad del fruto mediante prácticas culturales y aplicación de un modelo fisiológico en melocotonero”, ha sido realizada, dentro del mencionado programa de doctorado, por D^a. Rosalía Alcobendas Puig, bajo la dirección y supervisión de los Drs. Juan José Alarcón Cabañero y Emilio Nicolás Nicolás.

En reunión de la Comisión Académica de fecha 10/04/14, visto que en la misma se acreditan los indicios de calidad correspondientes y la autorización del Director de la misma, se acordó dar la conformidad, con la finalidad de que sea autorizado su depósito por la Comisión de Doctorado.

La Rama de conocimiento por la que esta tesis ha sido desarrollada es:

- ☒ Ciencias
☐ Ciencias Sociales y Jurídicas
☐ Ingeniería y Arquitectura

En Cartagena, a 27 de FEBRERO de 2014.

EL PRESIDENTE DE LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA

Fdo: Dr. Francisco Artés Hernández

COMISIÓN DE DOCTORADO

UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA DE
CARTAGENA
COMISIÓN DE DOCTORADO

Dña. Rosalía Alcobendas Puig

Vistos los informes favorables de los Directores de Tesis y el VºBº de la Comisión Académica para la presentación de la Tesis Doctoral titulada: ***“Gestión de la calidad del fruto mediante prácticas culturales y aplicación de un modelo fisiológico en melocotonero”*** en la modalidad de “compendio de publicaciones” solicitada por Dña. Rosalía Alcobendas Puig, la Comisión de Doctorado de la Universidad Politécnica de Cartagena, en reunión celebrada el 28 de marzo de 2014, considerando lo dispuesto en el artículo 33 del Reglamento de Estudios Oficiales de Máster y Doctorado de la UPCT, aprobado en Consejo de Gobierno el 13 de abril de 2011 y modificado el 11 de julio de 2012,

ACUERDA

Autorizar la presentación de la Tesis Doctoral a Dña. Rosalía Alcobendas Puig en la modalidad de compendio de publicaciones.

Contra el presente acuerdo, que no agota la vía administrativa, podrá formular recurso de alzada ante el Sr. Rector-Magnífico de la Universidad Politécnica de Cartagena, en el plazo de un mes a partir de la notificación de la presente.

Cartagena, 28 de marzo de 2014

El Presidente de la Comisión de Doctorado

Edo.: Pablo Fernández Escámez

Esta tesis doctoral se presenta por compendio de publicaciones. Los artículos que la componen se citan a continuación.

- **Publicación 1: 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. *Scientia Horticulturae*; 142, 128-135.
- **Publicación 2: Mirás-Avalos, J.M., Alcobendas, R.,** Alarcón, J.J., Pedrero, F., Valsesia, P., Lescourret, F., Nicolás, E. 2013. Combined effects of water stress and fruit thinning on fruit and vegetative growth of a very early-maturing peach cultivar: assessment by means of a fruit tree model, QualiTree. *Irrigation Science*, 31(5): 1039-1051.
- **Publicación 3: Alcobendas, R.,** Mirás-Avalos, J.M., Alarcón, J.J., Nicolás, E. 2013. Effects of irrigation and fruit position on size, colour, firmness and sugar contents of fruits in a mid-late maturing peach cultivar. *Scientia Horticulturae*; 164, 340-347.
- **Publicación 4: Mirás-Avalos, J.M., Alcobendas, R.,** Alarcón, J.J., Pedrero, F., Valsesia, Génard, M., Nicolás, E. 2013. Assessment of the water stress effects on peach fruit quality and size using a fruit tree model, QualiTree. *Agricultural Water Management*; 128: 1-12.

Agradecimientos

Quisiera comenzar por mis directores, los Drs. Juan José Alarcón Cabañero y Emilio Nicolás Nicolás, sin los cuales no habría sido posible la realización de este trabajo. Gracias por vuestro apoyo incondicional, tanto en el ámbito profesional, como en el personal, y por supuesto, gracias por transmitirme vuestro amor por el mundo de la investigación.

A todos y cada uno de mis compañeros del departamento de Riego del CEBAS, por su inestimable ayuda, consejos y por los buenos ratos que hemos pasado juntos. Mención especial a mis compañeros y amigos Jose María Bayona, Cristina Romero, Sara Álvarez, Margarita Parra, Nathalie Hernández y Macarena Moreno, gracias por esos cafés, por esos buenos ratos, por vuestro apoyo en los buenos y malos momentos, y por estar ahí.

Al Dr. Jose Manuel Mirás-Avalos, por su inestimable ayuda, porque esta tesis doctoral no habría sido posible sin su estrecha colaboración.

Al Dr. Rafael Domingo Miguel, por haber llevado la tutoría de mi tesis y haber estado ahí cuando lo he necesitado.

Al Dr. Ian Charles Dodd y al Dr. Michel Génard, y a sus respectivos equipos de trabajo, por haberme permitido realizar sendas estancias en sus centros de trabajo, dándome la oportunidad de aprender, y crecer, personal y profesionalmente.

A mi familia y amigos por su apoyo, comprensión y ayuda, porque sin ellos no habría sido capaz de terminar este “capítulo” de mi vida. Gracias a Ángeles, mi suegra, por ser como mi segunda madre, a Federico, mi abuelo, al que esta tesis le hace una gran ilusión, a mis dos soles Gael y Fabio, porque son mi vida y siempre me sacan una sonrisa. A Antonio, mi marido, mi amigo, mi compañero y confidente, gracias por tu paciencia, apoyo y amor.

Y por último, a Mari Carmen, mi madre, a la que esta tesis doctoral está especialmente dedicada, la responsable de mi carrera profesional y gracias a la

cual, soy lo que soy en mi vida. Gracias por tus ánimos, tu dedicación y tu amor y gracias por haber estado, y estar, siempre que te necesito. Te Quiero.

ÍNDICE

1.	Introducción.....	1
2.	Resumen.....	7
3.	Objetivos.....	19
4.	Antecedentes.....	23
4.1.	Cultivo del melocotonero.....	23
4.2.	Riego Deficitario Controlado en frutales.....	35
4.3.	Modelos agronómicos y mecánicos: aplicaciones.....	42
5.	Publicaciones que componen la tesis doctoral.....	47
5.1.	Publicación 1.....	47
5.1.1.	Resumen.....	47
5.1.2.	Publicación 1.....	55
5.2.	Publicación 2.....	63
5.2.1.	Resumen.....	63
5.2.2.	Publicación 2.....	75
5.3.	Publicación 3.....	89
5.3.1.	Resumen.....	89
5.3.2.	Publicación 3.....	97
5.4.	Publicación 4.....	105
5.4.1.	Resumen.....	105
5.4.2.	Publicación 4.....	115
6.	Conclusiones generales.....	129
7.	Bibliografía general.....	135
Anexo I:	Índice de impacto de la publicaciones.....	151
Anexo II:	Imágenes obtenidas a partir de datos de arquitectura con el modelo ‘QualiTree’.....	153
A.	“Flordastar”, árbol control.....	153
B.	“Catherine”, árbol control.....	156
C.	“Catherine”, árbol sometido a RDC.....	158
Anexo III:	Índice de abreviaturas, figuras y fotografías.....	161

1. INTRODUCCIÓN

1. Introducción

La agricultura de las regiones áridas y semiáridas afronta una situación casi permanente de escasez de recursos hídricos, los cuales son de baja calidad en muchas ocasiones. A esta situación debemos añadir la competencia por la explotación de los mismos, sobre todo con sectores de gran importancia, como son el turismo y el desarrollo urbanístico. En estas regiones es necesario desarrollar nuevas estrategias dirigidas a optimizar los recursos hídricos disponibles, entre ellas se encuentran el riego deficitario controlado (RDC) y el uso de modelos mecanísticos de producción agraria (basados en los procesos fisiológicos).

En este sentido, las estrategias de RDC se basan en disminuir los aportes hídricos en periodos fenológicos concretos (dependiendo de la especie), sin que esta reducción afecte al tamaño y a la calidad del fruto. Por otro lado, el uso de modelos mecanísticos nos permite predecir mediante simulaciones, la respuesta del cultivo (fisiológica y agronómica) a distintas situaciones posibles como pueden ser: plagas, condiciones climáticas adversas, diversas prácticas culturales, etc., de un modo rápido y bastante aproximado.

Por tanto, se trata de dos poderosas herramientas de las que se dispone para, por un lado, disminuir los aportes hídricos y por otro, predecir la calidad de la cosecha (entre otros parámetros). El análisis de la calidad de los frutos cultivados bajo condiciones de déficit hídrico ha sido una de las líneas centrales de esta tesis ya que actualmente, y cada vez más, el consumidor demanda alimentos de alta calidad, por lo que si cumplen con este requisito prioritario, su mercado será más amplio, y se podrá obtener un precio final de venta más elevado.

El cultivo del melocotonero es uno de los más tecnificados y de mayor importancia a nivel mundial. España es el tercer país productor a nivel mundial, tras China e Italia, y el segundo de la Unión Europea con una producción de 1.336.362 toneladas durante el año 2011. A nivel nacional, el melocotón y la nectarina se encuentran entre los 10 productos agroalimentarios más

importantes (Faostat, 2011), aportando la Región de Murcia, a su vez, el 21% del total nacional (MAGRAMA, 2010).

En la Región de Murcia, el melocotonero es el primer frutal no cítrico en producción (179.997 ton año⁻¹), y el segundo en superficie cultivada (10.796 ha) (MAGRAMA, 2012).

Por todo esto, el objetivo general de esta tesis ha sido realizar un estudio detallado de la calidad de la cosecha en dos variedades de melocotonero (extra-temprana y de media estación), sometidas a diferentes condiciones de RDC, además de validar con los resultados obtenidos el modelo mecanístico 'QualiTree' (Lescourret et al., 2011) bajo las condiciones agroclimáticas de la Región de Murcia.

Previamente a validar el modelo ha sido necesario realizar la parametrización del mismo en las dos variedades estudiadas.

Esta tesis se presenta como compendio de cuatro publicaciones de acuerdo a lo establecido por el Reglamento de Estudios Oficiales de Máster y Doctorado el 14 de abril de 2011. De acuerdo con estas regulaciones, el manuscrito se estructura de la siguiente manera.

Primero se presenta un breve resumen del estudio realizado (epígrafe 2) donde se ponen de manifiesto las principales líneas de trabajo desarrolladas, así como los principales resultados obtenidos en cada una de las publicaciones.

Los objetivos de esta investigación, tanto generales como específicos, se describen en el epígrafe 3.

Seguidamente, se ha realizado una revisión del estado del arte y de los antecedentes (epígrafe 4), intentando presentar la temática de interés relacionada con esta tesis de una forma actualizada.

En el epígrafe 5, se presentan las publicaciones que componen esta tesis, cada una de ellas se encuentra precedida de un resumen en español. En epígrafe 6 se recogen las principales conclusiones derivadas de este trabajo de investigación. A continuación, las referencias bibliográficas generales

consultadas son descritas en el epígrafe 7, finalizando el documento con los anexos (I, II y III), donde se adjuntan los índices de impacto de las publicaciones, unos ejemplos de las imágenes que representan la arquitectura de los árboles, obtenidas a partir de simulaciones realizadas con el modelo 'QualiTree', y finalmente un índice de abreviaturas, figuras y fotografías.

1. Introduction

Nowadays, agriculture is facing an almost permanent situation of water scarcity, especially in arid and semiarid regions. Furthermore, the available water resources have a low quality in many cases. In this situation we also must take into account the competition for the water use, especially with important sectors, such as tourism and urban development. In these regions it is necessary to develop new strategies to optimize water resources, these strategies include regulated deficit irrigation (RDI) and the use of mechanistic models of agricultural production (based on physiological processes).

In this sense, RDI strategies are based on reducing water inputs in specific phenological periods (depending on species) with a minimum impact on yield and/or fruit quality. Moreover, the use of mechanistic models allows us to predict the crop response (physiological and agronomical) to different scenarios such as: pests, adverse weather conditions, agricultural practices, etc., in a quick and reasonably accurate way.

Hence, these two powerful tools are available to, firstly, reduce the amount of applied water, and secondly, to predict the fruit quality (and other parameters such as yield). To analyse the fruit quality of the crops grown under water deficit conditions has been one of the central lines of this thesis as currently, and increasingly, consumers demand for high quality food, and products complying with these requirements will be more marketable.

Peach is one of the most important fruit crops in the world, with a high level of applied technology. Spain is the third largest producer, behind China and Italy, and the second in the European Union, with a production of 1.336.362 tons in 2011. Nationally, peach and nectarine crops are in the top10 most important agrifood products (Faostat, 2011). The province of Murcia represents about 21% of the total Spanish production (MAGRAMA, 2010).

In the province of Murcia, the peach is the first non-citrus fruit by production (179.997 t yr⁻¹), and the second in area under cultivation (10.796 ha) (MAGRAMA, 2012).

For all these reasons, the overall aim of this dissertation was to perform a detailed study of the fruit quality in two peach cultivars (extra-early and mid-season), under different conditions of RDI and thinning. And also, to validate the mechanistic model 'QualiTree' (Lescourret et al., 2011) with our data, under the agro-climatic conditions of the province of Murcia.

Before validating the model it was necessary to parameterise it for the two peach cultivars evaluated.

This thesis is presented as a compendium of four publications according to the "Reglamento de Estudios Oficiales de Máster y Doctorado" on April 14th 2011. According to those regulations, the dissertation is structured as follows.

A brief summary (section 2), where the main lines of work carried out are explained, as well as the main results obtained in each issue.

The objectives of this thesis, both general and specific, are described in section 3. Then, a review of the state of the art and history (section 4) has been made, trying to present the topic related with this dissertation in an updated way.

The four scientific articles which are the basis of this thesis, each one preceded by a summary in Spanish, are presented in section 5. Finally, the main conclusions from this research are summarized in section 6. Then, the general references consulted are listed in section 7, and finally appendixes (I, II and III), where the Journals Impact Factors, some examples of images representing tree architecture (obtained from simulations performed with 'QualiTree' model), and an index of abbreviations, figures and pictures, are attached.

2. RESUMEN

2. Resumen

La escasez de recursos hídricos constituye uno de los principales desafíos del siglo XXI al que se están enfrentando ya numerosas sociedades de todo el mundo. A lo largo del último siglo, el uso del agua aumentó a un ritmo dos veces superior al de la tasa de crecimiento de la población, siendo la agricultura la gran consumidora de agua a nivel mundial, ya que emplea actualmente más del 70% del agua dulce disponible.

Por todo ello resulta de vital importancia llevar a cabo estudios encaminados a conseguir una óptima gestión de los recursos hídricos disponibles, especialmente en zonas áridas y semiáridas como el Levante Español, donde se producen la mayor parte de frutas y verduras a nivel nacional, y en la que la pluviometría es especialmente escasa.

Además de intentar optimizar la eficiencia en el uso del agua mediante el estudio de nuevas estrategias y sistemas de riego de precisión, otra herramienta útil que debemos tener en cuenta es el uso de modelos de producción agraria. Estos modelos nos permiten simular un gran número de situaciones o escenarios, variando las condiciones de cultivo, la climatología, las prácticas culturales, etc., y permitiendo de este modo predecir la producción y/o calidad de la cosecha en función de nuestros “inputs” de entrada (entre los que se encuentran los aportes hídricos). De este modo es posible estimar previamente (y de forma aproximada) la relación coste-beneficio al final de cada ciclo de cultivo. Para ello es necesario parametrizar y validar los distintos modelos para cada cultivo y variedad estudiada.

La presente tesis doctoral se divide en dos grandes apartados, el primero de ellos se centra en evaluar y conocer la calidad del fruto de dos variedades distintas de melocotonero en función de la arquitectura del árbol (**Publicaciones 1 y 3**), en el segundo apartado se pretende conocer y simular la calidad de la cosecha por medio de la parametrización y validación de un modelo mecanístico específico adaptado a las dos variedades de melocotonero mencionadas anteriormente (**Publicaciones 2 y 4**).

Las dos variedades estudiadas han sido los cultivares “Flordastar” y “Catherine”. La primera de ellas es una variedad extra-temprana (cosechada entre finales de Abril y primeros de Mayo), cuya importancia económica radica principalmente en su precocidad, siendo éste uno de los motivos del progresivo incremento de la superficie de cultivo dedicado a dicha variedad en los últimos años. En cambio, “Catherine” es una variedad de media estación tradicionalmente cultivada en la Región de Murcia, cuya cosecha se realiza a mediados de Julio.

En ambas variedades se llevó a cabo un estudio pormenorizado de la calidad del fruto dentro del dosel vegetal, evaluándose además si existía influencia del déficit hídrico y la posición de los frutos en la copa del árbol, sobre la misma. En el caso de “Flordastar” (**Publicación 1**), se evaluó también la influencia de la carga productiva sobre la calidad de los frutos. En la bibliografía, existen diversos trabajos en los que se pone de manifiesto la variabilidad existente en las características de los frutos dentro de un mismo árbol (Forlani et al., 2002; Wu et al., 2005), asociándose dicha variabilidad a un gran número de factores cómo son: la exposición de los frutos a la luz solar (Génard y Baret, 1994), la carga de cultivo (Marini y Sowers, 1994), la poda (Bussi et al., 2010; Kumar et al., 2010) y las distintas estrategias de riego aplicadas (Buendía et al., 2008; Mercier et al., 2009). Sin embargo, gran parte de estos estudios están realizados en cultivares de media estación y de maduración tardía, por lo que el presente trabajo pretende completar y/o ampliar el rango de variedades estudiadas en este ámbito. De este modo, en el caso de “Flordastar”, se pudo observar que las estrategias de riego aplicadas afectaron al crecimiento del fruto, obteniéndose un mayor porcentaje de frutos no comerciales en el tratamiento de riego deficitario controlado (RDC). Además los árboles del tratamiento control produjeron un mayor número de frutos de calibre extra (AAA). La carga productiva también afectó el crecimiento reproductivo, siendo mayores y más firmes los frutos de los árboles que presentaron una carga baja de frutos. Respecto al grado de exposición a la luz solar, éste resultó un factor con gran influencia sobre la calidad de los frutos, siendo los más expuestos a la luz solar los que alcanzaron un mayor tamaño (respecto a los que estaban sombreados o levemente expuestos), y

presentando un color rojo más intenso que los que no recibieron la luz solar directa. Los resultados obtenidos permitieron identificar que los efectos negativos del RDC sobre la calidad de los frutos en “Flordastar” pueden ser parcialmente compensados mediante una distribución de frutos en el árbol que permita una exposición óptima de los mismos a la luz solar.

En la variedad “Catherine” (**Publicación 3**), se evaluó la influencia de los factores previamente citados (déficit hídrico y posición de los frutos en el dosel vegetal) sobre la calidad del fruto, analizando la evolución y contenido de azúcares en dichos frutos. Existen estudios previos similares en melocotonero, pero en los que los análisis de la calidad realizados se centran, principalmente, en atributos como el color o el contenido en sólidos solubles (Corelli-Grappadelli et al., 1991; Miranda-Jiménez y Royo Díaz, 2002), y sólo unos pocos analizan con detalle el contenido y evolución de los azúcares (Génard y Bruchou, 1992). La concentración de azúcares constituye uno de los principales componentes nutricionales de la fruta, y su proporción en la misma varía a lo largo del ciclo de maduración, aportando el dulzor característico. De ahí, la importancia de evaluar la influencia de factores como el déficit hídrico y la posición de los frutos en el dosel vegetal sobre la calidad en general, y el contenido de estos azúcares en particular. En el caso de “Catherine” se pudo observar que la estrategia de RDC aplicada no afectó significativamente al crecimiento del fruto (producción total, números de frutos por árbol, diámetro y peso unitario). Este resultado no concuerda con otros previamente publicados por otros autores (Besset et al., 2001; Mercier et al., 2009; López et al., 2010a), y puede deberse a que, bajo nuestras condiciones de cultivo, los árboles presentaron una baja carga de frutos, lo que pudo compensar los efectos negativos del déficit hídrico. Sin embargo, el tratamiento de riego sí ejerció influencia sobre algunos de los parámetros de calidad evaluados. Así, el contenido en sólidos solubles, los ácidos cítrico, málico y tartárico, y algunos azúcares (glucosa y sorbitol) resultaron ser más elevados en los frutos procedentes del tratamiento de RDC. Estos resultados sí que concuerdan con los publicados por otros autores (Lo Bianco et al., 2000; Wu et al., 2002; Buendía et al., 2008; López et al., 2011). Ambos tratamientos de riego produjeron un porcentaje similar de frutos de categoría extra, siendo éste

ligeramente superior en los frutos procedentes del tratamiento de RDC. Atendiendo a la distribución de los frutos dentro de la copa del árbol (altura, exposición a la luz solar y orientación), se observó que los frutos posicionados en zonas altas del dosel y, por tanto, más expuestos a la luz solar, presentaron un mayor contenido en sólidos solubles, ácidos orgánicos (cítrico, málico y tartárico) y azúcares (sorbitol y glucosa).

El segundo bloque de este trabajo de investigación está dedicado a la validación y parametrización del modelo 'QualiTree' (Lescourret et al., 2011), para las dos variedades de melocotonero anteriormente mencionadas (**Publicaciones 2 y 4**). Este modelo, como posteriormente se describirá con más detalle, integra las ventajas de los dos tipos de modelos existentes en agronomía, (agronómicos y mecanísticos), e incorpora parámetros de calidad de fruto (tamaño, proporción del peso de la pulpa sobre el peso total, contenido en materia seca de la pulpa, y concentraciones de cuatro azúcares reductores) mediante la integración de las ecuaciones publicadas por Lescourret y Génard (2005). En primer lugar se llevó a cabo la parametrización del modelo para ambos cultivares (cv. "Flordastar" y "Catherine"), con el objeto de optimizar la capacidad de predicción del mismo en estas nuevas variedades. Seguidamente, se compararon los valores resultantes de las distintas simulaciones con los valores observados en los ensayos de campo previamente realizados. Finalmente se diseñaron distintos escenarios de simulación, con el objetivo de observar y evaluar la respuesta del modelo a los mismos y las predicciones que ofrece en cuanto a crecimiento vegetativo y reproductivo (cv. "Flordastar" y "Catherine"), y a contenido y evolución de azúcares en los frutos (cv. "Catherine"). En ambas variedades se diseñaron varios escenarios de déficit hídrico en los que se variaba el nivel de estrés y su periodo de ocurrencia a lo largo del ciclo de cultivo. En el caso de la variedad "Flordastar", además, se diseñaron dos escenarios de aclareo basados en la carga productiva observada en campo. En cuanto a la parametrización de 'QualiTree' para ambas variedades, podemos destacar que el parámetro k , que refleja el efecto de la distancia entre las distintas partes del árbol sobre el flujo de carbono dentro de la planta (Lescourret et al., 2011), y que es cultivar-dependiente, fue muy bajo en ambas variedades ($k=0.008$ y $k=0.002$ para

“Flordastar” y “Catherine”, respectivamente). Esto sugiere que las distancias entre los distintos órganos del árbol no resultaron limitantes para los flujos de carbono en ninguna de las dos variedades estudiadas, al igual que ocurría con las variedades previamente descritas en la literatura, “Alexandra” y “Suncrest” (Mirás-Avalos et al., 2011). La estimación de los parámetros dependientes del cultivar se realizó con éxito en ambas variedades, ya que los valores simulados se ajustaron adecuadamente a los observados, tanto para los valores de crecimiento vegetativo y reproductivo, como para el contenido en azúcares, este último en la variedad “Catherine”. La correcta validación del modelo en ambas variedades, quedó reflejada en los bajos valores de la raíz cuadrada del error cuadrático medio relativo (RECMR) de predicción obtenidos.

Finalmente, como principales resultados referentes a los escenarios de simulación diseñados, podemos destacar que en el caso de “Flordastar” un nivel alto de aclareo puede compensar el efecto negativo sobre la calidad de la cosecha que supone la ocurrencia de un déficit hídrico severo en la fase III, lo cual está en concordancia con resultados observados experimentalmente por otros autores (López et al., 2010a). Para la variedad “Catherine”, la simulación de los distintos escenarios de déficit hídrico puso de manifiesto que la aplicación de estrategias de RDC en esta variedad de melocotonero no conlleva mermas en la calidad de la cosecha, llegando incluso a mejorarla, lo cual está en concordancia con los resultados observados en campo por otros autores (Besset et al., 2001; Fereres y Soriano, 2007; Intrigliolo y Castel, 2010; López et al., 2011).

2. Summary

Water scarcity is one of the main challenges of the XXI century, which is already being faced by many societies all over the world. Throughout the last century, water use grew at twice the rate of population growth. Agriculture is the major consumer of water worldwide and currently employs more than 70% of available freshwater.

Therefore it is really important to perform studies leading to optimum management of the available water resources, particularly in arid and semi-arid areas such as the Spanish southeast, where most of the fruit and vegetables are produced at the national level and where rainfall is particularly low.

Apart from trying to optimize the water use efficiency through the development of irrigation strategies and the use of precision irrigation systems, another useful tool to bear in mind is the use of physiological and agronomic models. These models allow us to simulate a large number of situations or scenarios, varying growing conditions, climatological conditions, agricultural practices, etc. Thus, these models offer an insight of the production and / or crop quality that will be obtained, taking into account our "inputs" (such as water intake). Thereby it would be possible, to estimate previously (and roughly) the cost-benefit ratio which we will obtain at the end of the growing season. To this end, it is necessary to parameterise and validate each model for each crop and variety under study.

This thesis is divided into two main sections; the first one is focused on assessing the fruit quality of two different peach cultivars according to the peach tree architecture (**Publications 1 and 3**). In the second section it is intended to understand and simulate crop quality through the parameterisation and validation of a specific mechanistic model adapted to the two peach varieties abovementioned (**Publications 2 and 4**).

The two varieties studied were "Flordastar" (**Publication 1**) and "Catherine" (**Publication 3**). The first one is an extra-early variety (harvested between end April and early May), whose economic importance lies mainly in its precocity, which is one of the reasons for the gradual increase in the cultivation

area for this variety, in recent years. However, "Catherine" is a mid-season variety traditionally grown in the province of Murcia, harvested in mid-July.

In both varieties, a detailed analysis of the fruit quality within the canopy was carried out, being also evaluated if there were any effects of the water stress and the position of the fruit within the tree canopy on the fruit quality.

For "Flordastar" (**Publication 1**), the effect of the crop load on fruit quality was also assessed. There are several works in the literature which highlight the fruit performance variability within the tree (Forlani et al., 2002; Wu et al., 2005). This variability is associated to a great number of factors such as light interception (Génard and Baret, 1994), crop load (Marini and Sowers, 1994), pruning (Bussi et al., 2010; Kumar et al., 2010) and irrigation strategies (Buendía et al., 2008; Mercier et al., 2009; Lopez et al., 2010), but most of these studies are conducted in mid-season and late maturing cultivars, so this work aims to complement and / or extend the range of varieties studied in this area. In this way, for "Flordastar", our results showed that irrigation strategies influenced fruit growth, yielding a higher percentage of fruits which did not reach the marketable size from regulated deficit irrigation (RDI) treatments, whereas high-grade fruits were more common in the trees under full irrigation (FI). Crop load also affected fruit growth. Fruits from low-loaded trees were greater and firmer than those from commercially loaded trees. Regarding exposure to sunlight, it was a factor that greatly affected fruit-quality traits. Exposed fruits were greater than those shadowed or medium-exposed. They were redder than those that did not receive direct sunlight.

Our results indicate that, for "Flordastar", the negative effects of RDI on fruit quality can be partly compensated leaving on the tree a certain fruit distribution that enables a higher fruit exposition to sunlight.

Regarding to the mid-season variety ("Catherine") (**Publication 3**), the effects of previously mentioned factors (water stress and fruit position within the canopy) on fruit quality, were evaluated by analyzing the evolution and sugar content within these fruits. In this sense, similar studies have been conducted in peach, where the fruit quality analysis carried out are mainly focused on attributes such as ground colour or soluble solids content (Corelli-Grappadelli et

al., 1991; Miranda-Jiménez and Royo Díaz, 2002). However, only a few of them analyze in detail the sugars content and time evolution (Génard and Bruchou, 1992). These sugars are one of the main nutritional components of the fruit, and fruit sugar content varies throughout the ripening period, contributing to the characteristic fruit sweetness. Hence, the importance to assess the influence of different cultural practices (such as RDI and fruit position within the canopy) on the fruit quality, particularly on the fruit sugar content. For our cultivar ("Catherine") irrigation strategies did not significantly affect fruit growth (total yield, numbers of fruit per tree, diameter and unitary weight, are the parameters that were not affected). These results are in disagreement with others previously reported for other peach cultivars under different management conditions (Besset et al., 2010; Mercier et al., 2010; López et al., 2010a). In our conditions our peach trees supported low crop load, which could compensate the negative effects of the water deficit. However, the irrigation treatment did exert influence on some of the fruit quality attributes. Thus, the soluble solids content, citric, malic and tartaric acids, and certain sugars (such as glucose and sorbitol) were found to be higher in fruits from the RDI treatment. These results are consistent with other previously published (Lo Bianco et al., 2000; Wu et al., 2002; Buendía et al., 2008; López et al., 2011). Both FI and RDI trees yielded a similar percentage of fruits in the highest marketable category (AAA; 12% for FI trees and 19% for RDI trees).

When considering the fruits position within the tree canopy (height in the crown, exposure to sunlight and orientation), it was observed that fruits positioned high in the tree canopy and more exposed to sunlight, had a higher soluble solids content, organic acids (citric, malic and tartaric acids) content and some sugars (glucose and sorbitol) content.

The second section of this dissertation is focused on the parameterisation and validation of 'QualiTree' model (Lescourret et al., 2011), in the same abovementioned varieties of peach (**Publications 2 and 4**). This model, as will be described below in a more detailed way, combines the advantages of the two models used in agronomy (agronomic and mechanistic), and also includes fruit quality parameters (fruit size, the proportion of the total mass consisting of fruit flesh, dry matter content of the flesh, concentrations of

various sugars) by integrating the equations published by Lescourret and Génard (2005). First of all, we parameterized ‘QualiTree’ for both varieties (cv. “Flordastar” and “Catherine”), thus enhancing the prediction capabilities of the model. Then, we compared the predictions from the model with experimental data from different situations regarding irrigation. Finally, we designed several simulation scenarios in order to observe and evaluate the response of the model, and in order to use the predictive capabilities of the model for evaluating the effects of water restrictions on fruit and vegetative growth (cv. “Flordastar” and “Catherine”), and also on sugar concentrations in the fruit flesh (cv. “Catherine”). For both cultivars we designed several water stress scenarios, in which there were one to two different levels and application times of water stress along the crop cycle. For “Flordastar” variety, in order to assess any additional simulation scenario, we carried out two different levels of thinning (according to crop load observed in the field). Regarding to the parameterisation results for both peach cultivars, we can emphasize the values of the parameter expressing the effect of distance between tree objects on carbon exchange within the tree (k) (Lescourret et al., 2011). This parameter is cultivar-dependent, and the values showed for our cultivars were quite low ($k=0.008$ and $k=0.002$ for “Flordastar” and “Catherine”), indicating that within-tree distances were not limiting in any of the two varieties studied, as was observed for “Alexandra” and “Suncrest” (Mirás-Avalos et al., 2011). The remaining cultivar-dependent parameters estimated provided good results in both peach cultivars. Simulated and observed values properly fitted for both vegetative and reproductive growth, and also for fruit sugars content (latter for cv. “Catherine”). As for the validation of ‘QualiTree’ with our experimental data, we can conclude that the model prediction was good, fitting correctly the values simulated and observed (low values of relative root mean square error for “Flordastar” and “Catherine”).

Finally, as main results concerning simulation scenarios designed, we can emphasize that in the case of “Flordastar”, when a severe water stress occurred during stage III of fruit development, according to the model, thinning was able to partly counteract its negative effects on fruit size. This is in agreement with reported data for other peach cultivars (Lopez et al., 2010a). In

the same line, for “Catherine”, the simulation of the different scenarios of water deficit showed that the application of RDI strategies in this peach cultivar does not reduce fruit quality. Some quality attributes are even improved, which is consistent with the results reported by other authors (Besset et al., 2001; Fereres and Soriano, 2007; Intrigliolo and Castel, 2010; Lopez et al., 2011).

3. OBJETIVOS

3. Objetivos

A continuación se describen los dos objetivos principales de esta tesis doctoral, así como los objetivos parciales necesarios para su consecución.

1. Analizar el efecto de dos prácticas culturales sobre el crecimiento vegetativo y reproductivo y la calidad del fruto.

- 1.1. Evaluar los efectos del riego deficitario controlado sobre la calidad del fruto.
- 1.2. Establecer la influencia de dos niveles de aclareo y de la posición relativa de los frutos en el dosel arbóreo sobre la calidad de los mismos.

2. Parametrizar, calibrar y validar el modelo fisiológico ‘QualiTree’, completando el rango de variedades que representa.

- 2.1. Caracterizar la arquitectura y la dinámica de crecimiento vegetativo y reproductivo de dos variedades de melocotonero: “Flordastar” y “Catherine”.
- 2.2. Parametrizar el modelo para los dos cultivares de melocotonero descritos.
- 2.3. Validación del modelo mecanístico con los datos experimentales recogidos en campo para ambas variedades.
- 2.4. Simular diversos escenarios agronómicos y evaluar, tanto la respuesta del modelo, como las estimaciones que hace sobre el cultivo.
- 2.5. Evaluar y validar, a escala de árbol completo, el submodelo de calidad de fruto desarrollado por Lescourret y Génard (2005).

3. Objectives

The two main objectives of this thesis, as well as the partial aims necessary to achieve them, are described below.

1. To analyze the effect of two agricultural practices on vegetative and reproductive growth and fruit quality.

- 1.1. To assess the effects of regulated deficit irrigation on fruit quality.
- 1.2. To establish the influence of two levels of thinning and the relative position of the fruit within the tree canopy, on fruit quality.

2. To parameterize, calibrate, validate and complete the range of varieties included in the mechanistic model 'QualiTree'.

- 2.1. To characterize the architecture, vegetative and reproductive growth of two peach cultivars: "Flordastar" and "Catherine".
- 2.2. To parameterize the model for the previous two peach-tree cultivars.
- 2.3. To validate the model for both varieties with experimental data collected in the field.
- 2.4. To simulate several agronomic scenarios and evaluate both, the model response and its outputs concerning crop response.
- 2.5. To evaluate and validate, for the whole-tree scale, the fruit quality sub-model developed by Lescourret and Génard (2005).

4. ANTECEDENTES

4. Antecedentes

4.1. Cultivo del melocotonero

Origen y taxonomía

El melocotonero debe su nombre (*Prunus persica*) al país del que se pensó inicialmente que era originario (Persia, actual Irán). En el siglo XIX, nuevas evidencias paleobotánicas atribuyeron a China el origen geográfico de la especie, cuyas primeras referencias escritas y arqueológicas se remontan a unos 3000 años a.C. (Li, Z., 1984).

Fue introducido en occidente a través de las rutas comerciales romanas durante los siglos I y II a.C., siendo Persia la vía de entrada. Los primeros países europeos a los que llegó su cultivo fueron Italia y Francia (siglo I a.C.), siendo este último durante la Edad Media el segundo mayor distribuidor del melocotonero, después de China. En el siglo XVI el cultivo se extendió al continente Americano, alcanzando su mayor expansión durante el siglo XIX.

Taxonómicamente, el melocotonero (*Prunus persica* (L.) Batsch) se clasifica en la familia de las Rosáceas, perteneciente al género *Prunus* (el cual engloba a todos los frutales de hueso) (Bailey, 1927), y a la especie *persica*.

Actualmente, las variedades más ampliamente cultivadas pueden subdividirse en cuatro grupos según el tipo de fruto: melocotón, pavia, paraguay y nectarina. Además el melocotón y la nectarina pueden subdividirse según sean de carne amarilla o blanca. Las diferencias más importantes entre variedades se deben a la coloración de los frutos, la calidad gustativa (firmeza, contenido de azúcares, acidez), la fecha de maduración y, en algunos casos, la forma del fruto (MAGRAMA, 2013).

Características morfológicas

El melocotonero es un árbol caducifolio de porte pequeño (Fotografía 4.1), que puede alcanzar 6-7m de altura, aunque a veces no pasa de talla arbustiva. Es característico de zonas templadas, ya que no es muy resistente al frío, aunque puede soportar unas temperaturas mínimas cercanas a -20° C

pero las cercanas a -15°C son suficientes para producir daños en las yemas florales. Los requerimientos de horas-frío oscilan entre 400-800 h, incluso menores en variedades extra-tempranas.

Fotografía 4.1. Melocotonero cv. "Catherine"

El árbol del melocotonero posee un tronco corto, recto y liso cuya corteza es de color rojizo-verdoso durante el primer año, para después presentar un color grisáceo.

Su sistema radical explora los primeros 50-60 cm en profundidad del perfil del suelo (según el tipo de suelo), y en extensión ocupa una superficie mayor que la zona de proyección de la copa. Las raíces son bastante ramificadas, de color blanco-anaranjado cuando son jóvenes, y que tornan a un naranja más intenso al aumentar la edad del árbol. Además presentan lenticelas características muy patentes (Fideghelli, 1986).

Estos árboles pueden alcanzar edades comprendidas entre 20-30 años, aunque su vida productiva se limita a unos 12-15 años como máximo ya que, a partir de esta edad, desciende drásticamente su capacidad de producción.

Las yemas vegetativas y florales se localizan en la madera de un año, las primeras tienen una forma puntiaguda y pequeña, siendo las yemas florales de mayor tamaño y de forma globosa. En una rama, ambos tipos de yemas

pueden ubicarse de forma continua o separada, normalmente se encuentran en grupos de tres siendo, por lo general, las laterales yemas florales y la del centro, la yema vegetativa.

Las hojas del melocotonero, aunque varían ligeramente de una variedad a otra, suelen ser simples, lanceoladas y acuminadas, con un tamaño que oscila entre los 7-15 cm de longitud y 2-3.5 cm de anchura. Presentan un margen finamente aserrado (Fideghelli, 1986) y un limbo normalmente liso, de color verde brillante. El peciolo tiene un tamaño de entre 1 y 1.5 cm de longitud, en su base se encuentran dos estípulas laterales, las cuales se pierden cuando la hoja está totalmente desarrollada. En la zona apical del peciolo (limitando con el limbo) se presentan 2-4 glándulas que pueden poseer distinta forma según la variedad (reniformes o globosas). La salida de las hojas o foliación es siempre posterior a la floración.

Las flores suelen ser solitarias (Fotografía 4.2), a veces aparecen en parejas, se encuentran casi pegadas a los tallos, con un tamaño medio de entre 2 y 3.5 cm de diámetro, y presentan un color rosáceo que puede llegar a rojo según la variedad, y son hermafroditas, por lo que no requieren polinizadores.

Fotografía 4.2. Detalle de la floración del melocotonero.

La fecundación de estas flores (en las primeras 48 h tras la polinización) da lugar a los frutos, que son drupas globosas de gran tamaño (50-85 mm de diámetro) con una epidermis delgada, un mesocarpo carnoso y un endocarpo duro y acanalado que contiene la semilla. Se puede distinguir entre: frutos de carne blanda (cv. "Flordastar", cv. "Springcrest", cv. "Mycrest", cv. "M^a Rosa"), cuya pulpa no presenta adherencia al endocarpo y que suelen ser destinados a consumo en fresco, y frutos de carne dura (cv. "Catherine", cv. "Babygold", cv. "Sudanell", etc.), en los que la pulpa se encuentra fuertemente adherida al endocarpo y que se destinan tanto a consumo en fresco, como a la industria.

El melocotonero muestra un comportamiento fenológico característico, con dos etapas definidas: la época de actividad vegetativa y la dormancia o reposo; en donde se distinguen claramente las fases de caída de hojas, desnudamiento, hinchamiento de yemas, formación de cálices, punta rosada, floración, caída de pétalos, formación, desarrollo y madurez del fruto (Alvarado et al., 1999).

El crecimiento del fruto del melocotonero, al igual que el de otros frutales de hueso, responde a una curva doble sigmoidea (Figura 4.1), en la que podemos definir tres fases claramente diferenciadas. La primera y la tercera (fases I y III) se caracterizan por presentar un rápido crecimiento de los frutos. En la fase I, el rápido crecimiento del fruto es consecuencia de una activa división celular en el mesocarpo, mientras que en la fase III se produce la elongación y el engrosamiento de estas células, lo que promueve un rápido crecimiento y aumento de peso en el fruto. La fase II es una transición entre ambas fases de rápido crecimiento, en ella se produce una lignificación o endurecimiento del endocarpo, por lo que el crecimiento exterior del fruto es más lento.

Figura 4.1. Curva de crecimiento de fruto (doble sigmoidea) en “Flordastar”. (Fuente: Mounzer et al., 2008).

La propagación de este frutal puede hacerse por reproducción sexual o asexual. La primera se utiliza únicamente para mejora genética y elaboración de patrones, siendo la reproducción vegetativa o asexual la utilizada a nivel comercial. Este último tipo de reproducción puede realizarse mediante estaquillado, acodo o injerto de yema, siendo el injerto en forma de T o de escudete el tipo de propagación más ampliamente utilizado.

Prácticas culturales

En el cultivo del melocotonero, al igual que en otros tipos de frutales, podemos distinguir entre la poda de formación y la de fructificación, la primera se realiza en árboles jóvenes con tres objetivos fundamentales: obtener una estructura fuerte de ramas principales, conseguir una copa bien iluminada y determinar la longitud del tronco. Se estima que la poda de formación más utilizada en melocotonero (90%) es la denominada en vaso, con sus diferentes modalidades dependiendo de la zona de producción y de la variedad (Montserrat e Iglesias, 2012). Otros sistemas de formación utilizados en menor escala son el Ypsilon transversal, el eje central y la palmeta de tres ejes. La poda de fructificación (Figura 4.3) se realiza una vez el árbol está ya formado (a partir del 3^{er} ó 4^o año) y su principal objetivo es la sustitución de los elementos que ya han fructificado por otros nuevos. Para la realización de esta poda es necesario conocer los distintos tipos de ramos presentes en el árbol (ramilletes de mayo, chifonas, ramos mixtos, ramos de madera y chupones) y decidir si podarlos o no, y en caso afirmativo, cómo y cuándo realizar la poda.

Fotografía 4.3. Detalle de poda de fructificación.

El aclareo es una práctica imprescindible en muchos frutales de hueso, especialmente en melocotonero, ya que permite conseguir un tamaño de fruto adecuado para su comercialización. Esta práctica consiste en eliminar, de forma manual o mecánica, el exceso de frutos consiguiendo que los que quedan en el árbol alcancen un mayor tamaño y calidad. Se realiza tras la caída natural de frutos no fecundados y antes de la fase de endurecimiento del hueso, cuando el tamaño de dichos frutos oscila entre 10-15 mm de diámetro. La distancia entre frutos suele ser de unos 15-20 cm, dejando un mayor o menor número de frutos dependiendo de la carga total del árbol y del vigor de los ramos. Además, con el aclareo se pretende conseguir una distribución equilibrada de los frutos en el árbol de modo que reciban una adecuada intensidad lumínica, y se minimice la competencia por la captación de los fotoasimilados.

En cuanto a los aportes hídricos, el melocotonero es un cultivo con unas necesidades hídricas que varían según la zona de cultivo y la variedad. En concreto, bajo las condiciones edafoclimáticas de la Región de Murcia, los aportes hídricos necesarios para este cultivo oscilan entre 6066-7274 m³ha⁻¹ para variedades extra-tempranas, y 6801-8409 m³ha⁻¹ para variedades tardías (Erena et al., 1999).

Bajo condiciones de riego por goteo, el abonado del cultivo se realiza por fertirrigación. En caso de riego por gravedad o cultivo en secano, se realizan de dos a tres abonados: uno en primavera y uno o dos más en verano.

El balance anual de nutrientes más comúnmente aplicado es: 280 u.f ha⁻¹ de N, 125 u.f ha⁻¹ de P₂O₅ y 200 u.f ha⁻¹ de K₂O, suministrados como ácido fosfórico, nitrato amónico, nitrato potásico y nitrato cálcico. En general, es frecuente el aporte adicional de Ca y Mg, ya que el melocotonero suele presentar carencias de estos dos elementos.

La recolección suele realizarse de forma manual (puede mecanizarse si el destino de la cosecha es la industria), siendo el criterio principal que determina la fecha de la misma el cambio de color de fondo de los frutos de verde a amarillo - rojizo.

Variedades

En la Región de Murcia, las variedades más ampliamente cultivadas son “Catherine”, “Baby Gold” y “Sudanell”. Además podemos encontrar otras variedades autóctonas de la zona como son “Marujas”, “Jerónimos” y “Calabaceros” (CARM, 2012).

Las variedades utilizadas en esta tesis doctoral han sido “Catherine” y “Flordastar”. El cultivo de esta última no está muy extendido en la Región de Murcia pero la hemos seleccionado porque se trata de una variedad extra-temprana, que presenta un interés creciente por su momento de recolección, así como por sus bajas necesidades hídricas y de horas frío.

A continuación se describen brevemente las principales características de las dos variedades estudiadas en el presente trabajo de investigación.

Ambas variedades pertenecen a la categoría conocida como melocotón de carne amarilla, la principal diferencia entre ambas es que “Flordastar” es una variedad extra-temprana (cosechada desde final de Abril hasta principio de Mayo) y cuyo mercado principal es el consumo en fresco, mientras “Catherine” pertenece al grupo varietal catalogado como de media estación (cosechadas en la primera quincena de Julio), siendo su mercado algo más amplio, ya que puede destinarse tanto para consumo en fresco (preferentemente) como para industria. Ambas son variedades vigorosas y productivas, cuyos frutos llegan a alcanzar un tamaño medio, siendo mayores los de la variedad “Catherine”. Atendiendo a la distribución de calibres propuesta por el Ministerio de

Agricultura (1995), en “Flordastar” predominan los calibres de tipo A y B, mientras que en “Catherine” los calibres predominantes son AA y A, alcanzando sin problemas el calibre extra (AAA). (Figuras 4.4 y 4.5).

Fotografía 4.4. Variedad extra-temprana “Flordastar”

Fotografía 4.5. Variedad de media estación “Catherine”

Patrones

En fruticultura es muy habitual el uso de patrones (también denominados portainjertos o pie), que aportan a la planta ciertas características deseables (resistencia o tolerancia a suelos salinos o calizos, enfermedades o plagas, confieren vigor, etc.). Sobre estos patrones se injerta la variedad, que es la planta o árbol que realmente se quiere cultivar, y que va a aportar la parte aérea. Una vez injertado, el árbol estará formado por dos partes que pueden proceder de individuos genéticamente bastante diferentes. En el melocotonero la disponibilidad de patrones es muy elevada (a diferencia de otros frutales como el ciruelo o el cerezo), aunque en la práctica son unos 10 los que cuentan con mayor importancia. Cabe destacar los patrones francos (confieren gran vigor), los ciruelos (San Julián GF-655/2), y los híbridos inter-específicos (GF-677), de todos ellos, este último ha sido el más utilizado durante las décadas de los 80-90, principalmente por su resistencia a la clorosis férrica (Iglesias y Carbó, 2006).

El patrón GF-677 ha sido el empleado en este trabajo de investigación, tanto en la variedad “Flordastar”, como en la variedad “Catherine”. Este patrón es un híbrido natural de almendro y melocotonero seleccionado por la Estación francesa de La Grand Ferrade (INRA Burdeos). Se trata de un patrón vigoroso y productivo, además de tolerante a la sequía y especialmente tolerante a la

clorosis, es decir, a altos niveles de caliza activa, lo cual es una gran ventaja ya que el contenido en caliza es una característica de gran parte de los suelos de la zona levantina. Es capaz de tolerar en torno a un 12-13% de contenido en caliza activa (De Miguel, 2000).

Como aspectos negativos podemos destacar su sensibilidad a nematodos y que, si va unido a una variedad vigorosa, puede proporcionar un exceso de vigor, encareciendo o dificultando el aclareo, la recolección y la poda.

Situación actual del cultivo

El cultivo del melocotonero es uno de los más extendidos a nivel mundial, siendo España el tercer país productor en importancia (tras China e Italia), y el segundo de la UE, aportando 1.336.362 toneladas anuales (Faostat, 2011) (Figura 4.2).

Figura 4.2. Distribución de la producción de melocotón en el mundo (**Fuente:** Faostat)

Como previamente se ha mencionado, se trata de un cultivo extendido mundialmente, aunque su producción tiene unos requerimientos climáticos muy concretos. Es un cultivo de zonas templadas, por lo que se encuentra limitado entre los 30° y 40° de latitud.

Dentro del ámbito nacional, el melocotonero es el frutal no cítrico de mayor importancia (38,9%), ocupa una superficie de cultivo de 50.805 ha, de las que un 93% se encuentran en regadío, ya que el cultivo aumenta su producción casi 5 veces bajo estas condiciones (de 4.113 kg ha⁻¹ a 19.119 kg ha⁻¹) (MAGRAMA, 2013). De hecho, es el único frutal no cítrico (junto con el cerezo) que ha aumentado su superficie cultivada en el cómputo de años que comprende desde 1987 a 2012, siendo este aumento del 5,8% (MAGRAMA, 2012). Además se encuentra entre los 10 productos más exportados (en la 7ª posición) a nivel nacional, por lo que es un cultivo de gran importancia en la economía española (Faostat, 2011).

Respecto a la evolución del cultivo de variedades, en el melocotonero la clasificación de estas variedades es compleja ya que atiende a diversos criterios cómo: precocidad, tipo de fruto, color de la carne, tipo de adherencia de la pulpa al hueso, etc. En la figura 4.3 se aprecian los 4 grupos en los que se ha clasificado esta especie atendiendo a la pulpa y color de la piel. Las nectarinas son el grupo más abundante (39,1%) caracterizadas por poseer una piel completamente lisa de color rojizo y una carne más blanda y dulce. El melocotón de pulpa amarilla, al que pertenecen las variedades “Catherine” y “Flordastar” utilizadas en esta tesis, es el segundo grupo en importancia (26,6%).

Figura 4.3. Distribución de la superficie de melocotón según variedades. Año 2012. **Fuente:** ESYRCE, 2012.

En función de la fecha de recolección destacan los de media estación (16,8%) seguidos de los tempranos (12,9%). Si bien es cierto que, como se ha comentado, existe una tendencia de aumento en el cultivo de variedades extra-tempranas en las zonas del sur de Europa y América.

El principal destino de la producción de este cultivo en España es el consumo en fresco (74%), el resto es destinado a la industria (almíbar, mermeladas, zumos, etc.).

Figura 4.4. Destino de la producción de melocotón en España. **Fuente:** Anuario de estadística 2012, MAGRAMA.

La Región de Murcia es la tercera región productora de melocotón dentro del territorio nacional, tras Cataluña y Aragón, con una superficie cultivada de 10.796 ha y una producción de 172.997 t. (MAGRAMA, 2013). Dentro de la Región, el melocotonero es el primer frutal de hueso en producción y el segundo en superficie de cultivo, tras el almendro.

Según las estadísticas de producciones y superficies agrícolas de la Región de Murcia 2013 (CARM), la producción del melocotón en esta Comunidad Autónoma se concentra en los municipios de Cieza, Jumilla, Molina de Segura, Blanca y Calasparra, cuya superficie de cultivo supone el 74% del total regional (Figura 4.5).

Figura 4.5. Principales zonas productoras de melocotón en la R. de Murcia. **Fuente:** Región de Murcia Digital (www.regiondemurcia.com).

Las exportaciones de melocotón de Murcia para consumo en fresco representan alrededor del 16% del total de España, siendo el valor de las mismas en el mercado alrededor de 103 millones de euros en 2012 (INFO, 2014).

Fotografía 4.6. Melocotones de la variedad “Catherine” para consumo en fresco.

Según datos del año 2012 de la Consejería de Agricultura y Agua de la Región de Murcia las exportaciones han aumentado alrededor de un 40% en los 10 últimos años, siendo los principales países de destino Alemania, Reino Unido y Francia, los cuales suman el 72% del total de las mismas.

4.2. Riego deficitario controlado en frutales

Como se ha mencionado previamente, el agua es un recurso cada vez más escaso en el mundo, especialmente en zonas como el área mediterránea donde las precipitaciones son bajas y el sector agrario es de gran importancia, localizándose aquí gran parte de las plantaciones de frutales y hortalizas. Este hecho implica realizar un uso y gestión eficiente y responsable del agua, especialmente en zonas como la Cuenca Hidrográfica del Segura, en la que la escasez de recursos hídricos y la sobreexplotación de acuíferos son problemas muy importantes.

En la Región de Murcia, la precipitación anual media en el último decenio ha sido de 297 mm, mientras que la evapotranspiración de referencia ha alcanzado valores de aproximadamente 1200 mm. A este déficit estructural hay que añadir la competencia por la explotación de los recursos hídricos con otros sectores como son el turismo, la industria y los servicios. Esto nos lleva a diseñar estrategias de riego encaminadas a reducir los consumos de agua y a minimizar efectos adversos en el medioambiente, entre ellas destaca el Riego Deficitario Controlado (RDC), dirigido a reducir los aportes hídricos en agricultura sin que esto conlleve mermas en la producción y en la calidad de las cosechas. Por otro lado, hay que destacar otro tipo de soluciones como el uso en agricultura de recursos hídricos no convencionales, procedentes de la reutilización de aguas residuales y de la desalación de aguas marinas y salobres (Libro Blanco del Agua en España, 2000), y el manejo eficiente de la programación del riego en base a sensores del estado hídrico de la planta y suelo (Abrisqueta, 2010).

Actualmente, los procedimientos de programación del riego están basados en estimaciones de la evapotranspiración de los cultivos (ET_c), en medidas del estado hídrico de la planta a través de la evaluación de indicadores fisiológicos (potencial hídrico foliar, conductancia estomática, etc.) (Fotografía 4.7), y en el balance hídrico del suelo, mediante indicadores del estado hídrico del mismo como son, entre otros, la sonda de neutrones y las sondas capacitivas tipo TDR y FDR (Holmes et al., 1967; Campbell y Campbell, 1982).

Fotografía 4.7. Detalle de hoja de melocotonero cubierta para la medida del potencial hídrico foliar con cámara Scholander.

A la hora de elaborar y aplicar una estrategia de RDC debemos conocer entre otros aspectos, la fenología y fisiología del cultivo, y las necesidades hídricas del mismo, ya que estas estrategias están basadas en la reducción de los aportes hídricos en los periodos fenológicos en los que la especie cultivada es menos sensible al déficit hídrico. De este modo, tanto la producción como la calidad de la cosecha no se deberían ver afectadas (Ferreira y Soriano, 2007).

Necesidades hídricas del cultivo

Para el cálculo de las necesidades hídricas de una plantación de frutales se ha de tener en cuenta que la mayor parte del agua consumida por el cultivo es resultado de la combinación de los procesos de transpiración del mismo y de la evaporación que se produce directamente en la superficie del suelo. Estos procesos se dan de forma simultánea, por lo que ambos procesos se engloban en el término evapotranspiración (ET).

La **evapotranspiración de referencia (ET_0)** es un concepto establecido para indicar la cantidad de agua que fluye a la atmósfera desde un suelo permanentemente húmedo, y cubierto por un cultivo de referencia (alfalfa o gramíneas), bien regado, en pleno desarrollo y en buenas condiciones fitosanitarias (FAO 56, Allen et al., 1998). La ET_0 depende exclusivamente de condiciones meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, etc.). La estimación de la ET_0 de un cultivo de gramíneas simplifica la estimación de la evapotranspiración de otros cultivos, en condiciones ambientales similares, tomando en consideración las diversas etapas de su desarrollo (Figura.4.6).

La cobertura del suelo por los cultivos no es constante; en realidad los cultivos van cubriendo el suelo de manera progresiva, por lo que la evapotranspiración del cultivo solamente representa una fracción de ET_0 .

La **evapotranspiración del cultivo (ET_c)** es la evapotranspiración de un cultivo en función de su grado de desarrollo vegetativo y bajo condiciones de disponibilidad suficiente de agua. En términos simples se trata de las necesidades hídricas potenciales de un cultivo y, por tanto, depende además de los factores ambientales, de las características genéticas del cultivo (follaje, raíces, estructura estomática, etc.).

Figura 4.6. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0), bajo condiciones estándar (ET_c). **Fuente:** Estudio FAO de riego y drenaje N° 56. (Allen et al., 1998).

La determinación de ET_c , por su dependencia de los factores biológicos, es más compleja que la determinación de la ET_0 , por lo que para su estimación es necesario relacionar la variación de ET_0 durante el período de desarrollo del cultivo con mediciones de ET_c . Las relaciones obtenidas se denominan “coeficientes de cultivo” (K_c). Dado que es muy difícil determinar teóricamente las relaciones entre ET_0 y ET_c de cada cultivo, éstas se han obtenido mediante mediciones experimentales. Los coeficientes de cultivo (K_c) son definidos por la siguiente expresión:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0}$$

Existen referencias bibliográficas donde se estiman distintos K_c para una gran variedad de cultivos, y distintas condiciones climáticas (Allen y Pereira, 2009; Girona et al., 2011; Abrisqueta et al., 2013; Payero y Suat, 2013; Marsal et al., 2014).

Respecto a los procedimientos para estimar o medir la ET_C , éstos se clasifican en directos, como el uso de lisímetros o el método gravimétrico (Pruitt y Angus, 1960; Bryla et al., 2010; López-Urrea et al., 2012), e indirectos, como por ejemplo los agro-meteorológicos (Doorenbos y Pruitt, 1977; FAO 56, Allen et al., 1998; Allen y Pereira, 2009). Los primeros proporcionan directamente el consumo total del agua, utilizando aparatos e instrumentos para su determinación. Los segundos obtienen una estimación del consumo de agua a través de todo el ciclo vegetativo, mediante la utilización de fórmulas empíricas, siendo por ello los más ampliamente empleados por su sencillez.

Cabe aclarar que la mayoría de las fórmulas empíricas en uso, que sirven para estimar la evapotranspiración de los cultivos y que utilizan datos meteorológicos, se basan en una primera estimación de la ET_C y luego se ajustan con ciertos coeficientes previamente obtenidos en la zona, para cada cultivo y otras condiciones variantes que afectan la evapotranspiración.

En general, la evapotranspiración depende de factores hídricos (calidad, disponibilidad del agua, etc.), edáficos (textura, estructura, profundidad, etc.), vegetales (variedad, especie, edad, etc.), y climáticos.

Para los ensayos realizados en esta tesis doctoral el método de cálculo de la ET_0 se ha llevado a cabo mediante la ecuación de Penman-Monteith (FAO 56, Allen et al., 1998).

Riego deficitario controlado (RDC)

El concepto de RDC surge como un paso más en la optimización del uso de los recursos hídricos durante la década de los 80, concretamente como consecuencia de unos ensayos realizados en Australia por David J. Chalmers durante los años 70, y cuyo objetivo principal era controlar el exceso de vigor de plantaciones de melocotonero sin que la producción final se viera afectada. Estos ensayos pusieron de manifiesto la existencia de un periodo en el que se

podía aplicar déficit hídrico sin afectar a la producción final, y que coincidía con el período de máximo desarrollo vegetativo, permitiendo controlar dicho crecimiento (Chalmers et al., 1981; Mitchell y Chalmers, 1982). Desde entonces se han realizado numerosos ensayos en distintas especies de frutales, por su buena respuesta a estas estrategias de riego (Costa et al., 2007), entre ellos destacan: melocotonero (Conejero et al., 2011; Vera et al., 2013), albaricoquero (Pérez Pastor, 2009; Pérez Sarmiento, 2010; Zapata et al., 2013), cítricos (Treeby et al., 2007; Ballester et al., 2013; Mounzer et al., 2013), frutales de pepita (Zegbe y Serna-Pérez, 2011; Marsal et al., 2012), granado (Intrigliolo et al., 2013; Laribi et al., 2013), almendro (Goldhamer et al., 2006; Egea et al., 2013), etc.

El melocotonero ha sido objeto de numerosos ensayos de RDC (Chalmers et al., 1981; Mitchell y Chalmers, 1982; Li et al., 1989; Williamson y Coston, 1990; Boland et al., 1993, 2000; Girona et al., 2003, 2005; Gelly et al., 2004; Dichio et al., 2007; López et al., 2010a; Alcobendas et al., 2013), entre otras razones, porque cumple con dos de los requisitos más importantes a la hora de aplicar con éxito estas estrategias de riego. Por un lado, presentan una separación clara de las distintas fases de crecimiento del fruto (Girona et al., 2004), y, por otro, presentan una separación temporal del crecimiento vegetativo y reproductivo (Chalmers et al., 1981), de modo que el periodo de mayor actividad vegetativa es coincidente con las fases I y II del crecimiento del fruto. Este hecho permite que la aplicación de un déficit hídrico durante las fases I y II (especialmente la II) de crecimiento del fruto, controle y reduzca el crecimiento vegetativo, sin afectar ni al desarrollo, ni al tamaño final del fruto (Chalmers et al., 1981; Girona et al., 2004).

En gran parte de los estudios existentes en la bibliografía, las estrategias de RDC en frutales suponen un importante ahorro de agua, aumentando la eficiencia en el uso de la misma (Egea et al., 2010; Hueso y Cuevas, 2010), una disminución del crecimiento vegetativo (Girona et al., 2005; Pérez-Pástor et al., 2009), lo cual se traduce en un ahorro de costes de producción (poda), y por último una producción final que no se ve afectada por la reducción de aportes los hídricos, ni en cantidad, ni en calidad, llegando incluso esta última a mejorar bajo estrategias de RDC (Gelly et al., 2004; Goldhamer y Fereres

2004, Laribi et al., 2013). Sin embargo, ciertos autores, han observado resultados negativos en la producción final al aplicar un déficit hídrico durante la fase II (Girona, 1989; Girona et al., 1993; Abrisqueta et al., 2009). Esto puede deberse a la aplicación de un estrés demasiado severo y/o a una lenta recuperación hídrica del cultivo, lo cual nos llevaría a un inicio de fase III con cierto grado de estrés hídrico, repercutiendo así en la producción y/o calidad de la cosecha.

En todas las investigaciones realizadas en este campo y que dan soporte al RDC, hay que tener presente que los beneficios atribuidos a estas estrategias de riego dependerán de cada tipo y profundidad de suelo, climatología, especie y variedad elegidas, y sistema de riego utilizado.

Efectos del RDC en la calidad del fruto

Actualmente, existe una creciente demanda por parte de los consumidores de productos de alta calidad. La palabra calidad proviene del latín *qualitas*, cuyo significado es atributo o propiedad. Por tanto, cuando se habla de alimentos, se trata de un concepto subjetivo que comprende un gran número de propiedades, entre las que se incluyen: propiedades organolépticas o sensoriales (textura, apariencia, sabor, aroma, etc.), propiedades nutritivas, debidas a la composición química de los alimentos y que aportan la energía necesaria para el metabolismo, así como vitaminas y minerales, y por último, propiedades funcionales, las cuales se atribuyen a los alimentos que aportan beneficios adicionales a la mera nutrición (p.e. antioxidantes para la prevención de enfermedades) (Abbott, 1999; Boeing et al., 2012).

En la literatura existen numerosos trabajos que ponen de manifiesto la estrecha relación existente entre la aplicación de un déficit hídrico y el mantenimiento, e incluso mejora, de ciertos parámetros de calidad en los frutos (Vallverdú y Girona, 2012; Romero et al., 2013), especialmente en frutales de pepita y hueso, cítricos y vid.

En gran parte de los ensayos de RDC realizados en melocotonero, la aplicación del déficit hídrico se realiza durante las fases I y II de rápido crecimiento del fruto, y en el periodo de post cosecha, ya que en esta especie

el período considerado como crítico corresponde a la fase III de crecimiento del fruto. En ensayos en melocotonero cv. “Andross” se encontró que una reducción de los aportes hídricos durante la fase II y/o la post-cosecha, supuso ahorros de hasta el 30% respecto al tratamiento control, sin afectar a la producción ni a la calidad del fruto (Girona et al., 2005). Estos resultados están en concordancia con los obtenidos por otros autores en melocotonero (Girona et al., 1995; Botía et al., 2004; Dichio et al., 2007; López et al., 2008; Conejero et al., 2011). Sin embargo, otros autores han observado una mejora en ciertos parámetros de calidad del fruto al aplicar un déficit hídrico, como es el caso de estudios como los de Buendía et al. (2008) donde los frutos sometidos a RDC presentaron una mayor concentración de compuestos fenólicos que los que estaban regados al 100% de sus necesidades hídricas. Varios autores han demostrado un aumento en el contenido de sólidos solubles (SS) y en el índice de madurez (calculado como el cociente SS/AT) en frutos de melocotonero bajo condiciones de estrés hídrico (Gelly et al., 2004; Pascual et al., 2011; Alcobendas et al., 2013). Sin embargo, existen estudios en melocotonero que señalan que la aplicación de estrategias de RDC tiene efectos negativos sobre la calidad de la cosecha (Goldhamer, 2002; Abrisqueta et al., 2009; López et al., 2010a; Vera et al., 2013), lo cual puede ser atribuido a la aplicación de un déficit demasiado severo o prolongado en el tiempo durante la fase II, o a la aplicación de este déficit en una fase distinta a esta última.

En otras especies leñosas, como se ha comentado anteriormente, se han realizado ensayos de RDC con buenos resultados, es el caso de albaricoquero (Ruiz-Sánchez et al., 2000; Pérez-Pastor et al., 2007, 2009; Pérez-Sarmiento et al., 2010), ciruelo (Intrigliolo y Castel, 2010; Razouk et al., 2013), níspero (Hueso y Cuevas, 2010), peral y manzano (Mpelasoka et al., 2001; Zegbe y Serna-Pérez, 2011; Marsal et al., 2012), granado (Intrigliolo et al., 2013; Laribi et al., 2013; Peña et al., 2013) y almendro (Romero et al., 2004; Egea et al., 2009; García-Tejero et al., 2011).

Respecto a los cultivos leñosos como los cítricos, una gran parte de estos ensayos de RDC han sido realizados en zonas del Levante español, ya que es una de las principales zonas productoras, indicando que la aplicación de RDC no afectó a la producción ni a la calidad de la cosecha, llegando en

algunos casos a mejorar ciertos parámetros de esta última. Este es el caso de los trabajos realizados por Domingo et al. (1996) en limonero, Pérez-Pérez et al. (2009), Gasque et al. (2010) y Ballester et al. (2013) en naranjo, González-Altozano y Castel (1999), Romero et al. (2006) y Navarro et al. (2010) en mandarina.

Finalmente, en el caso del cultivo de la vid, existe también un gran número de estudios de aplicación de estrategias de RDC. En este caso se debe distinguir entre trabajos realizados en uva de mesa (Blanco et al., 2010; Faci et al., 2014) y en uva de vinificación (Intrigliolo et al., 2012; Zarrouk et al., 2012; Edwards y Clingeleffer, 2013; Romero et al., 2013).

4.3. Modelos agronómicos y mecanísticos: aplicaciones

La importancia del uso de modelos en agricultura subyace en tres pilares principales: permiten adquirir información de un sistema complejo, que de otro modo sería caro y tedioso; por otro lado, nos permiten estimar el efecto de diversas prácticas agrícolas (aclareo, poda, etc.) en la respuesta fisiológica y productiva del cultivo y por último, nos ofrecen una valiosa conexión entre investigación e ingeniería, en otras palabras, son un nexo de unión entre teoría y práctica (Gary et al., 1998).

El objetivo final de la modelización en agronomía es utilizar los resultados de las simulaciones como una herramienta adicional en la gestión de las explotaciones agrícolas (Bergez et al., 2010).

De un modo sencillo, un modelo se puede definir como un marco conceptual que integra una serie de procesos interrelacionados. En el caso de la agricultura, un modelo es una representación teórica (por medio de ecuaciones matemáticas) que permite estimar distintos procesos como son, por ejemplo, la fotosíntesis, la calidad de la cosecha, el crecimiento vegetativo, las prácticas culturales, etc.

Dentro de estos procesos intervienen numerosos factores que los controlan a distintos niveles. Por tanto, la realización en campo de experimentos que integren todos estos procesos es en la mayoría de las ocasiones, inviable. En este sentido, el uso de modelos nos permite evaluar la

influencia de gran parte de estos factores y conocer su grado de incidencia sobre el parámetro o variable de interés.

En el ámbito de la agricultura existen dos tipos de aproximaciones a la modelización: agronómica o de producción, y ecofisiológica o mecanística, cuyas principales ventajas e inconvenientes se describen brevemente a continuación.

Los modelos agronómicos, desarrollados inicialmente para cultivos extensivos (Whisler et al., 1986), presentan como principales ventajas: su sencilla aproximación para modelizar ciertos procesos (interceptación luminosa, ciclo de cultivo, etc.), tienen en cuenta explícitamente diversas prácticas agrícolas (fertilización, uso de pesticidas, etc.) y, por último, son aplicables a un gran número de especies (Gabrielle et al., 2002; Rinaldi et al., 2007). Como mayores desventajas se puede citar el hecho de que no consideren parámetros de calidad de la cosecha y que no son aplicables a cultivos leñosos.

Por otro lado, las principales ventajas de los modelos mecanísticos son: ofrecer una adecuada representación del funcionamiento fisiológico de la planta (Allen et al., 2005), su adaptación a cultivos leñosos y que, pese a su complejidad, facilitan la integración de submodelos para el cálculo de procesos fisiológicos concretos (interceptación de la radiación solar, el flujo de agua en la planta, etc.). Sus inconvenientes son, básicamente, dos; al estar centrados en la simulación del crecimiento del árbol no integran, salvo alguna excepción (López et al., 2010b), prácticas culturales, y además, no tienen en cuenta la calidad del fruto.

En el caso de los cultivos leñosos, un aspecto importante a considerar en los modelos es la arquitectura del árbol. El hecho de tener en cuenta la arquitectura del árbol, implica considerar los flujos de carbono existentes entre los distintos órganos de la planta (Le Roux et al., 2001). A la hora de incluir estos flujos en el modelo se pueden tener en cuenta cuatro teorías: la alométrica o empírica, la basada en el equilibrio existente entre los crecimientos foliar y radicular, la basada en las relaciones “fuente-sumidero”, y por último, la basada en la existencia de un gradiente de foto-asimilados entre los distintos compartimentos de la planta (Génard et al., 2008).

Otro aspecto interesante a la hora de modelizar un cultivo leñoso es el de implementar la interceptación de la radiación solar por parte del dosel vegetal, ya que el comportamiento de este tipo de plantaciones es totalmente diferente al de los cultivos extensivos en los que teniendo en cuenta un coeficiente de extinción y el porcentaje de cobertura se puede obtener una buena estimación de la radiación interceptada (Mirás-Avalos et. al, 2011). Por lo tanto, para un cultivo leñoso cultivado “en filas” se puede emplear una aproximación que tenga en cuenta tanto la forma de la copa del árbol, como el diseño de la plantación.

Una característica muy importante a considerar en la producción frutícola es la calidad del fruto, por lo que un modelo utilizado para este tipo de cultivos debe incluirla. En este sentido, existen aproximaciones que simulan el contenido en azúcares en distintos frutos (Lescourret y Génard, 2005), aunque son independientes y no se encuentran integradas en modelos de árbol completo.

A partir de todas estas premisas se ha considerado que, para conseguir alcanzar parte de los objetivos de esta tesis, se debe aplicar un modelo lo más versátil posible, que integre las ventajas de las dos aproximaciones existentes (agronómica y mecánica), ya que se pretende evaluar la influencia de prácticas culturales, como son el RDC y el aclareo, en la calidad del fruto del melocotonero. Es por ello que se ha seleccionado el modelo ‘QualiTree’ (Lescourret et al., 2011).

‘QualiTree’ es un modelo genérico de frutales que describe el árbol como un conjunto de órganos: unidades fructíferas (ramos con frutos) situadas sobre una arquitectura definida, madera (tronco y ramas principales) y raíces finas y gruesas. Este modelo representa el crecimiento en masa seca de todos los órganos utilizando una aproximación de flujos de carbono basada en la teoría “fuente-sumidero”, pero teniendo en cuenta una jerarquía entre procesos y órganos. En ‘QualiTree’ la interceptación de la radiación solar se describe mediante un modelo similar al utilizado para cultivos extensivos, pero integrado dentro de la copa del árbol, la cual se define como dos elipses que simulan la poda en vaso, típica en melocotonero (Mirás-Avalos et al., 2011).

Las salidas generadas por este modelo se ven afectadas por diversas prácticas culturales (poda, aclareo y manejo del riego). Así, por ejemplo, la poda, ejerce un efecto en las salidas de masa foliar y raíces finas del modelo, ya que afecta al cociente existente entre las parte aérea y subterránea del árbol. El aclareo influye en el número de frutos por ramo, es decir, en las relaciones “fuente-sumidero” dentro del árbol. Por último, el efecto del déficit hídrico se considera mediante la influencia que ejerce el potencial hídrico foliar sobre la fotosíntesis (Harrison et al., 1989).

El modelo mecanístico ‘QualiTree’ incorpora el desarrollo de varios parámetros de calidad del fruto: el tamaño, la proporción del peso de la pulpa sobre el peso total, el contenido en materia seca de la pulpa, y las concentraciones de cuatro azúcares (glucosa, fructosa, sacarosa y sorbitol). La modelización de estos parámetros de calidad se realiza mediante la integración de las ecuaciones publicadas por Lescourret y Génard (2005).

Previamente, ‘QualiTree’ ha sido parametrizado y validado con éxito para dos variedades de melocotonero, “Alexandra” y “Suncrest” (Mirás-Avalos et al., 2011). El objetivo principal de nuestro estudio es validar dicho modelo para nuestras variedades “Flordastar” y “Catherine”, y obtener simulaciones precisas que nos permitan mejorar nuestras prácticas culturales y nuestra gestión del riego para estas dos variedades de gran interés regional.

5. PUBLICACIONES

5. Publicaciones que componen la tesis doctoral

5.1. Publicación 1

5.1.1. Resumen

Título

Combined effects of irrigation, crop load and fruit position on size, color and firmness of fruits in an extra-early cultivar of peach.

Introducción

El melocotón, como fruto de consumo en fresco, es muy apreciado por sus características organolépticas, especialmente por su sabor. Por tanto, es de gran importancia la investigación de diversas estrategias agronómicas dirigidas a la obtención de frutos de una calidad óptima, lo cual llevará a conseguir un mayor valor comercial.

Existen diversos trabajos que demuestran que la calidad de estos frutos varía según estén posicionados dentro del dosel arbóreo (Forlani et al., 2002; Wu et al., 2005), asociándose esta variabilidad a diversos factores como son: la radiación solar interceptada (Génard y Baret, 1994), la carga productiva (Marini y Sowers, 1994), la poda (Bussi et al., 2010; Kumar et al., 2010) y las estrategias de riego (Buendía et al., 2008; Mercier et al., 2009; López et al., 2010). El aclareo o raleo, es otra práctica cultural de gran influencia en el tamaño y la calidad final del fruto del melocotonero (Marini y Sowers, 1994; Miranda Jiménez y Royo-Díaz, 2002), aunque dicha influencia varía según la precocidad de los cultivares estudiados (Nicolás et al., 2006).

El efecto sobre el tamaño y calidad del fruto de los diversos factores previamente mencionados (carga productiva, poda, etc.), ha sido objeto de estudio por varios autores (Génard y Bruchou, 1992; Lewallen y Marini, 2003); sin embargo, dichos estudios presentan carencias o limitaciones, ya que sólo consideran frutos de la orientación sur del dosel arbóreo (Génard y Bruchou, 1992), o sólo tienen en cuenta la influencia de uno o dos factores de los anteriormente citados (Marini y Sowers, 1994; Kumar et al., 2010). Además,

gran parte de los estudios previamente mencionados han sido realizados en cultivares tardíos y/o de media estación.

Por lo tanto, el **objetivo principal** de este trabajo ha sido evaluar los efectos de dos estrategias de riego (control y riego deficitario controlado), dos niveles de carga productiva (baja y comercial), y la posición relativa de los frutos en la copa del árbol (posición en el ramo, altura, exposición a la radiación solar y orientación), sobre el crecimiento y calidad de los mismos.

Material y Métodos

1. Material vegetal y tratamientos de riego

El estudio se llevó a cabo en una parcela de 0.8 ha situada en la finca experimental perteneciente al CEBAS-CSIC ubicada en Santomera (Murcia). El clima de esta zona es Mediterráneo-semiárido con veranos secos y calurosos e inviernos templados.

El material vegetal utilizado fue melocotoneros de 5 años de edad de la variedad “Flordastar”, injertados sobre patrón GF-677 y con un marco de plantación de 5x5m. “Flordastar” es una variedad de maduración extra-temprana que se cosecha a comienzos de mayo. El manejo del cultivo respecto al control fitosanitario y las prácticas de fertilización fue el habitual para este cultivo en la zona.

El aclareo se llevó a cabo de forma manual, un mes después de la plena floración. Para la consecución de los dos niveles de carga productiva a evaluar, se realizó en parte de los árboles un aclareo comercial (con una separación entre frutos de 25 cm), y en los restantes un aclareo intenso, dejando una distancia entre frutos de 50 cm.

Se evaluaron dos tratamientos de riego: el primero de ellos, denominado control, en el que los árboles se regaron para cubrir el 100% de la ET_c , y un segundo tratamiento de riego, en este caso de RDC, en el que los árboles fueron regados, igual que el tratamiento control durante todo el ciclo, excepto en las fases I y II de crecimiento del fruto, en las que se aplicó el 25% de la ET_c . Las necesidades hídricas del cultivo fueron determinadas

según la evapotranspiración de referencia diaria (ET_0), calculada con la ecuación de Penman-Monteith, un coeficiente de cultivo mensual (FAO 56, Allen et al., 1998) y el porcentaje de suelo sombreado por la copa del árbol (Ferreira y Goldhamer, 1990).

El sistema de riego consistió en un lateral por hilera de árboles, con 8 emisores (de 2 L h^{-1} cada uno) por árbol. Las cantidades anuales de agua aplicada en cada tratamiento se midieron con contadores situados en cada línea de árboles, y fueron, 705 y 196 mm, en los tratamientos Control y RDC, respectivamente.

Los tratamientos de riego se distribuyeron en bloques al azar, con cuatro repeticiones, cada una de las cuales constaba de tres filas de 5 árboles. Los árboles controlados fueron los tres centrales de las filas situadas en medio de cada repetición, sirviendo el resto como árboles guarda. Por lo tanto, las medidas se realizaron en 12 árboles seleccionados, seis bajo RDC y seis bajo el tratamiento control. En la mitad de los árboles de cada tratamiento de riego se realizó un aclareo intensivo (baja carga productiva), mientras que en la otra mitad se llevó a cabo un aclareo comercial (carga comercial).

Para determinar la posición relativa de los frutos en el dosel arbóreo, se evaluó: la posición en el ramo (central, basal o distal), la altura en la copa (alto, medio, bajo), la exposición a la radiación solar (total, media, sombreado) y la orientación (Norte, Sur, Este y Oeste).

2. Medidas realizadas

En el momento de la cosecha se midieron como atributos de calidad de fruto: el diámetro ecuatorial (calibre digital), color de la piel y pulpa (colorímetro minolta CR-300) y la firmeza (texturómetro LR10K, Lloyd instruments), (Fotografías 5.1.1 y 5.1.2). Los frutos se clasificaron según su diámetro ecuatorial conforme a la distribución de calibres propuesta por el Ministerio de Agricultura (1995) en las normas de calidad para frutas y hortalizas.

El estado hídrico del cultivo se evaluó mediante medidas de potencial hídrico del tallo medido a mediodía solar. Las medidas se realizaron semanalmente, con una cámara de presión tipo Scholander.

Fotografía 5.1.1. Medida del diámetro ecuatorial de los frutos con calibre digital.

Fotografía 5.1.2. Texturómetro LR10K, Lloyd Instruments.

3. Análisis estadístico

Los efectos de los diferentes tratamientos de riego y carga productiva sobre el rendimiento del cultivo y el peso medio del fruto en el momento de la cosecha, fueron analizados por análisis de covarianza (ANCOVA). Las diferencias según los diversos factores considerados en este estudio se evaluaron mediante análisis de varianza (ANOVA), y las diferencias entre medias se compararon mediante el test de Tukey. La prueba de Chi-cuadrado se utilizó para comparar el porcentaje de frutos de categoría comercial entre tratamientos de riego y los dos niveles de carga productiva.

Además, las relaciones entre las distintas variables se evaluaron a través del coeficiente de correlación de Pearson.

Los datos fueron analizados con el software R versión 2.11.1.

Resultados y Discusión

Durante el ensayo, los potenciales hídricos de tallo no mostraron diferencias significativas entre los 2 tratamientos de riego aplicados, ni entre las distintas cargas productivas ensayadas. Los valores mínimos de los árboles con rol y RDC fueron -0.60 y -0.73 MPa, respectivamente.

Las producciones totales fueron mejores en los árboles con un mayor nivel de aclareo (como cabía esperar), independientemente del tratamiento de riego.

Los resultados mostraron que las estrategias de riego aplicadas afectaron al crecimiento del fruto, obteniendo un mayor porcentaje de frutos no comerciales en el tratamiento de RDC. Además los árboles del tratamiento control produjeron un mayor número de frutos de calibre extra (AAA).

Existen trabajos que demuestran que la carga de cultivo puede modificar el efecto del estrés hídrico sobre el tamaño del fruto (Naor et al., 1999), y que los árboles con mayor número de frutos son más sensibles al déficit hídrico que los que tienen una menor carga (Naor et al., 2001). Sin embargo, en este ensayo los árboles no alcanzaron un estrés hídrico severo debido por una parte a su precocidad (coincidente con una menor demanda climática), y por otra, a que no se consideraron árboles con una carga productiva elevada, por lo que no se observaron diferencias significativas en el estado hídrico de los árboles de ambos tratamientos (control y RDC). A pesar de que el déficit hídrico impuesto no fue severo, el tratamiento de riego sí que influyó en el color de la pulpa y en el índice Chroma de la piel de los frutos. Así, los valores del índice Chroma para piel y pulpa fueron mayores en los frutos del tratamiento RDC.

La carga productiva también afectó el crecimiento del fruto, siendo mayores y más firmes los frutos de los árboles con una baja carga. Si una baja carga productiva produce frutos de mayor tamaño, podría asumirse que un aclareo intenso sería capaz de compensar los efectos negativos derivados de un déficit hídrico, de acuerdo a resultados obtenidos por otros autores (Marsal et al., 2006; López et al., 2010). Sin embargo, bajo nuestras condiciones, no se observó un mayor tamaño de frutos en árboles con baja carga productiva en condiciones de RDC, lo cual sí sucedió en los árboles regados al 100% de la ET_c . Esto puede indicar que bajo RDC, los frutos no son capaces de conseguir su crecimiento potencial, ya que la competencia por los foto-asimilados es muy fuerte incluso a bajas cargas productivas.

Otros factores que pueden influir en el tamaño final de los frutos y en la calidad de los mismos, como son la posición en los ramos fructíferos, la altura en la copa del árbol, la exposición a la luz solar y la orientación, también fueron evaluados en este ensayo. Los resultados mostraron que para este cultivar de maduración extra-temprana, los frutos distales resultaron más pequeños que

los posicionados en las zonas centrales y basales de los ramos, siendo los centrales los de mayor tamaño. Además, estos frutos más distales presentaron una menor firmeza y una coloración en la piel más luminosa y más brillante que la de los frutos ubicados en la zona central y basal de los ramos.

Respecto al grado de exposición a la luz solar, resultó ser otro factor con gran influencia sobre la calidad de los frutos. Los frutos más expuestos a la luz solar alcanzaron un mayor tamaño que los que estaban sombreados o levemente expuestos, además presentaron un color rojo más intenso que los que no recibieron la luz solar directa, no encontrándose estas diferencias de color en la pulpa.

Así, podemos decir que bajo condiciones de RDC, la exposición a la luz solar, la posición en el ramo fructífero, y la carga productiva fueron los factores más influyentes, tanto sobre el crecimiento del fruto, como sobre la coloración de los mismos, siendo la orientación y la altura en el dosel vegetal los factores más determinantes sobre el crecimiento y la coloración de los frutos en el tratamiento regado al 100% de la ET_c .

Respecto a las correlaciones realizadas entre las distintas variables evaluadas, podemos resaltar que se obtuvieron correlaciones significativas entre el crecimiento de fruto (diámetro y peso) y los parámetros de color. La firmeza resultó la variable menos correlacionada con el resto, lo que está en concordancia con resultados previamente publicados (Génard y Bruchou, 1992). Esta variable presentó una correlación significativa con el ángulo Hue, de acuerdo a una función curvilínea (r^2 de 0.35 a 0.52, $P < 0.05$) (Bible y Singha, 1993). En este sentido, un parámetro que suele ser clave a la hora de la recolección comercial del melocotón, es la coloración, parámetro que en nuestro caso no hubiera sido de mucha utilidad, ya que los frutos con una misma coloración presentaron firmezas muy distintas, lo que coincide con lo observado por Lewallen y Marini (2003). Estos autores propusieron que la correlación existente entre la firmeza y la coloración (ángulo Hue) es dependiente de la posición del fruto en la copa del árbol, lo cual es confirmado con nuestros resultados, ya que ésta se vio afectada tanto por la posición del fruto en el ramo, como por la altura en el dosel arbóreo.

Conclusiones

Los resultados ponen de manifiesto la capacidad de este cultivo para sobrellevar condiciones de estrés, tales como son el déficit hídrico y las fluctuaciones de la carga productiva. El tratamiento de RDC evaluado provocó reducciones en el tamaño y peso del fruto, así como cambios en el color de la pulpa (menor luminosidad y mayor ángulo Hue e índice Chroma) y un aumento de la firmeza de los frutos, no siendo el aclareo capaz de contrarrestar el efecto del déficit hídrico en el tamaño del fruto. La exposición a la luz solar y la posición del fruto en el ramo fructífero ejercieron una gran influencia en la mayoría de los parámetros evaluados (tamaño, color y firmeza), siendo los frutos más expuestos a la luz solar mucho mayores que los menos expuestos.

Por lo tanto, estos resultados indican que los efectos del RDC pueden ser parcialmente compensados mediante una distribución de frutos en el árbol que permita una exposición óptima de los mismos a la luz solar.

5.2. Publicación 2

5.2.1. Resumen

Título

Combined effects of water stress and fruit thinning on fruit and vegetative growth of a very early- maturing peach cultivar: assessment by means of a fruit tree model, 'QualiTree'.

Introducción

El cultivo del melocotonero está ampliamente extendido a nivel mundial, siendo las principales áreas de producción coincidentes con zonas de escasa pluviometría, como es el caso del área Mediterránea. Además, los recursos hídricos disponibles, en este caso para la agricultura, son cada vez menores, por lo que los cultivos están en muchas ocasiones sujetos a un déficit hídrico impuesto, lo cual influye en el desarrollo de los frutos (Berman y Dejong, 1996). En este sentido las estrategias de Riego Deficitario Controlado son utilizadas como herramientas dirigidas principalmente al ahorro de agua y a la mejora de la calidad de los productos hortofrutícolas (Buendía et al., 2008; Fereres y Soriano, 2007; Intrigliolo y Castel, 2010).

En el caso concreto del melocotonero, el aclareo ha demostrado ser una técnica agronómica capaz de compensar los efectos negativos que pueden derivarse del déficit hídrico (López et al., 2006). Ambas prácticas (el riego deficitario y el aclareo) influyen notablemente sobre el reparto de carbono dentro del árbol, ya que alteran una serie de procesos interrelacionados (la fotosíntesis, el número y localización de zonas que actúan como sumidero de carbono, almacenamiento y transporte del mismo) responsables de este reparto (Lescourret y Génard, 2005). Para analizar la importancia e influencia de cada uno de estos procesos en el reparto de carbono, se dispone de una serie de herramientas, entre las que destacan los modelos. Por un lado tenemos los modelos mecanísticos, los cuales representan la evolución y desarrollo de la arquitectura del árbol, así como los procesos fisiológicos del mismo de forma muy detallada (Costes et al., 2008; L-PEACH: Allen et al., 2011). Por otro lado tenemos los modelos agronómicos o de producción

(Wishler et al., 1986), los cuales tienen en cuenta las prácticas agrícolas (aclareo, poda, etc.) y se centran más en parámetros como el rendimiento de los cultivos.

En nuestro caso y para cumplir los objetivos de este trabajo concreto, resulta más adecuado el uso de un modelo que combine las ventajas de ambas aproximaciones, ya que debe integrar la arquitectura del árbol, así como la influencia de diversas prácticas culturales, y estos requisitos los reúne el modelo 'QualiTree'.

'QualiTree' hasta ahora, había sido validado y parametrizado para dos variedades de melocotonero (una de maduración temprana y otra de maduración tardía), y además, se ha utilizado para simular los efectos de prácticas culturales como el aclareo sobre el crecimiento vegetativo y reproductivo (Mirás-Avalos et al., 2011). Sin embargo, en este modelo no se había validado la utilización de distintas estrategias de riego.

Por lo tanto, el principal **objetivo** de este trabajo fue evaluar el efecto del riego deficitario controlado y el aclareo sobre una variedad extratemprana de melocotonero, haciendo uso del modelo 'QualiTree', mediante la confrontación de los valores simulados y los observados. Para ello, el primer paso fue la parametrización del modelo para este nuevo cultivar (cv."Flordastar"). Una vez parametrizado e implementado, se llevó a cabo la comparación de los datos (simulados vs. observados) procedentes de los distintos tratamientos de riego. Finalmente, se diseñaron varios escenarios teóricos (con distintas condiciones de riego) para evaluar la bondad de la respuesta del modelo.

Material y Métodos

1. Descripción del modelo 'QualiTree'

Se trata de un modelo de árbol completo que considera el mismo dividido en distintos compartimentos, por un lado las unidades fructíferas (UF), que serían los ramos que portan los frutos junto con los mismos (Figura 5.2.1). Por otro lado, la madera vieja, de la que forman parte tronco y ramas principales. Finalmente las raíces, que se dividirían en gruesas (de más de un año) y finas (o jóvenes).

Figura 5.2.1. Unidad Fructífera y sus componentes.

Este modelo realiza las simulaciones con una periodicidad diaria, desde la plena floración hasta la cosecha de los frutos, y requiere como datos de entrada ('inputs') los referentes al estado inicial del árbol (en el momento de la floración), simulando la evolución temporal del mismo durante la campaña, y por tanto el resto de estados fenológicos hasta la maduración de los frutos. 'QualiTree' representa el crecimiento en masa seca de todos los órganos utilizando una aproximación de flujos de carbono basada en la teoría "fuente-sumidero", y considera una jerarquía entre los procesos que rigen estos flujos (por orden, prioriza el mantenimiento de los órganos y después el crecimiento; dentro del crecimiento, el crecimiento vegetativo prima sobre el reproductivo). Además, utiliza ecuaciones de asimilación de carbono (basadas en el área foliar disponible para la fotosíntesis) y de demanda (crecimiento). La mayoría de estas ecuaciones provienen del modelo de UF desarrollado por Lescourret et al. (1998).

De forma resumida, este modelo establece el balance de carbono en el árbol, basándose principalmente en dos teorías. La primera de ellas, es la teoría de coordinación (Reynolds y Chen, 1996; Chen y Reynolds, 1997), la cual propone que el desequilibrio entre el crecimiento de las brotaciones y el de raíces finas, referenciado como masa seca estructural de las mismas (cociente entre ambos compartimentos) al inicio de la estación de crecimiento, cambia las demandas de ambos compartimentos hasta alcanzar su equilibrio (SR_{eq}).

La segunda teoría (de demanda y oferta), propone que los flujos de carbono que ocurren entre los distintos compartimentos del árbol son proporcionales a la capacidad de suministro de los órganos que actúan como "fuente" y a las necesidades de los que actúan como "sumidero", así como al

efecto de disminución del flujo de carbono (C) debido a la distancia entre los compartimentos “fuentes y sumideros”.

El principio de este balance de carbono se rige sobre tres ecuaciones fundamentales, la primera de ellas basada en las demandas de C para crecimiento de los siguientes compartimentos: brotaciones, madera vieja y raíces gruesas. La segunda, también calcula la demanda de C, pero en este caso en frutos, hojas y raíces jóvenes. Finalmente, la tercera describe los flujos de carbono entre dos órganos o compartimentos, en función de la distancia entre ambos.

Además, la intercepción de la radiación solar se describe mediante un modelo similar al utilizado para cultivos extensivos, pero integrado dentro de la copa del árbol, la cual se define mediante dos elipses que simulan la poda en vaso, típica en melocotonero (Mirás-Avalos et al., 2011). ‘QualiTree’ incluye el efecto del déficit hídrico sobre la planta, incorporándolo como potencial hídrico foliar, a través de la ecuación de Harris (Harrison et al., 1989), que estimula disminución de la tasa fotosintética del árbol conforme aumenta el estrés hídrico de la planta.

Las salidas generadas por el modelo (‘outputs’) se ven afectadas por diversas prácticas culturales (poda, aclareo y manejo del riego). Así, por ejemplo, la poda ejerce un efecto en las salidas del crecimiento vegetativo y de raíces finas del modelo, ya que afecta al cociente existente entre la parte aérea y subterránea del árbol. El aclareo influye en el número de frutos por ramo, es decir, en las relaciones “fuente-sumidero” dentro del árbol. Por último, los efectos del manejo del riego sobre la calidad de los frutos se incorporan al modelo mediante una serie de ecuaciones adaptadas de las previamente descritas por Fishman y Génard (1998), y que se encuentran también en el trabajo realizado por Lescourret y Génard (2005).

Una descripción más exhaustiva del modelo puede encontrarse en el trabajo realizado por Lescourret et al. (2011).

2. Condiciones experimentales y tratamientos de riego

La recogida de datos experimentales para estimar diferentes parámetros necesarios para el funcionamiento de 'QualiTree', tuvo lugar en una parcela experimental de 0.8 ha ubicada en la finca experimental perteneciente al CEBAS-CSIC, en Santomera (Murcia). El material vegetal utilizado fue melocotoneros extra-tempranos (cv. "Flordastar"), que tenían 5 años de edad al inicio del ensayo.

Se establecieron dos tratamientos de riego, un tratamiento control, regado para cubrir el 100% de las necesidades hídricas del cultivo durante todo el ciclo, y un segundo tratamiento, en este caso de Riego Deficitario Controlado (RDC), en el cual se aplicó un 25% de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) durante las fases I y II del crecimiento del fruto, y un 100% de la ET_c durante la fase III.

Además, se llevaron a cabo dos niveles distintos de aclareo, en el primero de ellos, al que nos referiremos como "carga comercial", se dejó una distancia de unos 20 cm aproximadamente entre frutos de un mismo ramo fructífero. Para el segundo nivel de aclareo, denominado "baja carga", esta distancia entre frutos fue de 40 cm. Finalmente se seleccionaron tres árboles representativos dentro de la parcela experimental, en los que se obtuvieron los datos (arquitectura del árbol, medidas periódicas de crecimiento vegetativo y de frutos). Cada uno de estos árboles se encontraba bajo unas condiciones de riego y carga productiva diferentes, y a partir de ahora nos referiremos a ellos de la siguiente forma: control carga comercial, control baja carga y RDC baja carga.

Se evaluó el estado hídrico del cultivo mediante medidas periódicas de potencial hídrico foliar, medido a mediodía solar, con una frecuencia que osciló entre 7 y 15 días. El resto de medidas realizadas fueron la arquitectura del árbol (diámetro y longitud de cada rama, ángulos de inserción y filotáxicos) (Fotografía 5.2.1) y el diámetro ecuatorial de los frutos (mm), con una frecuencia de medida de 5-6 días.

Fotografía 5.2.1. Imagen de uno de los árboles utilizados para las medidas de arquitectura.

El árbol denominado control baja carga, fue el que se utilizó para la parametrización del modelo debido a que no presenta restricciones hídricas ni una excesiva competencia entre frutos, lo cual permite que éstos alcancen su crecimiento potencial. Los dos árboles restantes fueron utilizados para la validación del modelo.

3. Datos de entrada que requiere 'QualiTree' ('Inputs')

Para iniciar el modelo son necesarias las variables climáticas (entre las que se incluyen la radiación solar y la temperatura) que en este caso fueron obtenidas en una estación meteorológica ubicada dentro de la parcela experimental, el potencial hídrico foliar (Ψ_h) que caracteriza el estado hídrico inicial del árbol, y también los datos de arquitectura del árbol y características del cultivar. Entre estos últimos se encuentran, el diámetro y la longitud iniciales de las diferentes partes del árbol (tronco, ramas principales, UF, etc.), los cuales son necesarios para el cálculo de las distancias entre los distintos órganos, así como el contenido inicial en materia seca (Lescourret, 2011).

En el caso de las raíces finas, el contenido inicial en materia seca se asume proporcional al de la parte aérea del árbol antes de iniciarse el crecimiento anual (Kozlowski et al., 1991). Para poder iniciar las simulaciones, se ajusta un coeficiente proporcional entre la parte aérea y la parte radicular (según Mirás-Ávalos et al., 2011).

Finalmente, la máxima capacidad de acumulación de carbono de reserva en cada órgano viene definida como porcentaje de materia seca, siendo distinto según la zona del árbol. Así, se establece para la madera (tronco y ramas principales) y las raíces gruesas (de más de un año) un 8% (Jordan y Habib, 1996; Mediene et al., 2002), para los ramos leñosos portadores de las UF un 5.5% y para las brotaciones (hojas) un 16% (Lescourret y Génard, 2005).

4. Estimación de parámetros

Como se ha mencionado previamente, ciertos parámetros necesarios para utilizar 'QualiTree' son cultivar-dependientes (Mirás-Avalos et al., 2011), y fueron los estimados en este trabajo (Ver tabla 1). El resto de parámetros proceden de la bibliografía (Génard et al., 1998; Lescourret et al., 1998; Lescourret y Génard, 2005; Mirás-Avalos et al., 2011).

5. Comparación de datos observados y simulados

Para llevar a cabo las comparaciones entre los valores medios de los datos observados y simulados, tanto para el contenido en materia seca de los frutos como para el de las hojas pertenecientes a una misma UF, y en una fecha determinada (Kobayashi y Salam, 2000) se utilizó la raíz cuadrada del error cuadrático medio relativo (RECMR) de predicción, que viene definida por:

$$RECMR = \frac{1}{\bar{y}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - y_i^s)^2}$$

Donde, y_i representa el valor observado, y_i^s , es el correspondiente valor simulado; N, el número de datos observados e $\bar{y}$, el valor medio de estos datos. Cuanto menor sea el valor de RECMR, más precisa será la simulación realizada.

6. Escenarios simulados

Para evaluar de modo más exhaustivo los efectos del déficit hídrico y el aclareo sobre el crecimiento vegetativo y reproductivo se diseñaron varios escenarios técnicos. Así, un total de 12 escenarios técnicos de simulación de

estrés hídrico, definidos por valores de potencial hídrico foliar, se agruparon en 4 bloques. En el primer bloque se mantuvieron valores constantes de estrés hídrico desde el día 48 después de la plena floración (DPF) hasta la cosecha, con valores de -0.8, -1.6, -2.0, -2.5 y -3.0 MPa. En el siguiente bloque, se fijaron dos escenarios de estrés en fase II (días 44 a 64 DPF), donde los valores de potencial hídrico impuestos fueron -1.5 en el primer caso, y -3.0 MPa en el segundo. Durante el resto del ciclo el potencial hídrico se mantuvo en -0.8 MPa en ambos casos. En el tercer bloque de escenarios, el estrés hídrico se aplicó durante la fase III, manteniendo un potencial de -0.8 MPa hasta fin de la fase II (día 64 DPF) y aplicando posteriormente y hasta cosecha dos niveles de estrés, -1.5 MPa en el primer caso, y -3.0 MPa en el segundo.

Finalmente, el último grupo de escenarios de estrés hídrico trata de reproducir un aumento gradual del déficit, desde la plena floración hasta la cosecha, dividiendo este periodo en tres etapas de aplicación de estrés hídrico: la primera desde el día 44 al 63 DPF, la siguiente del 63 al 80 DPF, y por último desde el 80 al 86 DPF (cosecha). Así, se obtuvieron tres escenarios dentro de este bloque: el primero o control con unos valores de potencial de -0.4 MPa, -0.4 MPa y -0.6 MPa en cada una de las etapas definidas; el segundo denominado como estrés moderado y cuyos valores en cada una de las fases fueron de -0.6 MPa, -1.0 MPa y -1.6 MPa; finalmente, el tercer escenario fue de estrés severo, siendo sus valores de potencial hídrico foliar de -0.8 MPa, -1.6 MPa, y -2.5 MPa.

Además de los escenarios de déficit hídrico, se diseñaron tres escenarios técnicos adicionales que simulaban tres niveles de aclareo (sin aclareo, frutos separados 20 cm y a 40 cm, respectivamente) llevado a cabo al inicio de la simulación. Estos tres niveles de aclareo se combinaron con cada uno de los escenarios de estrés hídrico anteriores, obteniendo así un total de 36 escenarios técnicos de simulación en los que se evaluaron los efectos del aclareo y su posible interacción con el estrés hídrico.

7. Análisis estadístico

Los distintos escenarios se analizaron mediante ANOVA. Las variables de salida evaluadas fueron: peso medio y total de los frutos, contenido en

materia seca, y peso seco total y medio de las hojas. Las medias se analizaron mediante el Test de Tukey (5%). El software utilizado para ello fue R 2.11.1.

Resultados y discusión

Respecto a los resultados obtenidos en la parametrización de 'QualiTree' para la variedad "Flordastar", podemos destacar que el parámetro que refleja el efecto de la distancia entre las distintas partes del árbol sobre el flujo de carbono dentro de la planta (Lescourret et al., 2011), y que es cultivar-dependiente, fue muy bajo ($k=0.008$). Esto sugiere que estas distancias entre los distintos órganos del árbol no resultaron limitantes para los flujos de carbono, al igual que ocurría con las variedades previamente descritas, "Alexandra" y "Suncrest" (Mirás-Avalos et al., 2011). El resto de parámetros estimados a partir de datos experimentales (tasas iniciales de crecimiento de los distintos órganos del árbol y pesos secos máximos de los mismos) ofrecieron buenos resultados en las simulaciones posteriores, y fueron distintos a los anteriormente calculados (Mirás-Avalos et al., 2011) para "Alexandra" y "Suncrest", confirmando que son parámetros cultivar-dependientes.

En cuanto a la validación de 'QualiTree', se pudo concluir que la predicción del modelo fue buena, ajustándose adecuadamente los valores simulados a los observados (valores de RECMR entre 0.24 y 0.37), y presentando una menor variabilidad en los valores simulados. Además 'QualiTree' reprodujo de forma adecuada, en las simulaciones realizadas, los parámetros de crecimiento vegetativo y reproductivo observados, tanto en el tratamiento control como en el de RDC.

Los escenarios técnicos simulados mostraron que, independientemente del nivel de aclareo, el estrés hídrico constante (primer bloque de escenarios), afecta negativamente a ambos tipos de crecimientos (vegetativo y reproductivo), siendo algo más sensible el crecimiento de los frutos (53% menos de contenido en materia seca que el control, mientras que en el crecimiento vegetativo la reducción fue del 25%, en ambos casos en el nivel más severo de estrés hídrico). En este grupo de escenarios, el nivel de aclareo resultó influyente en tres de las variables de salida evaluadas (excepto en el contenido total en materia seca de los ramos), mientras que el déficit hídrico

tuvo efectos negativos en todas ellas, siendo la más afectada, en ambos casos, el peso seco medio de los frutos. No se observaron interacciones entre el déficit hídrico y el nivel de aclareo.

Cuando se tiene en cuenta el momento de aplicación del déficit hídrico (2º y 3º bloque de escenarios), se observaron dos tipos de respuesta. Al aplicar un estrés moderado (-1.5 MPa), el crecimiento del fruto no se vio significativamente afectado, independientemente del momento de aplicación del mismo (fase II ó III del crecimiento del fruto) y del nivel de aclareo considerado. Por el contrario, al aplicar un déficit hídrico severo (-3 MPa) se obtuvo un comportamiento diferente según el momento de ocurrencia y el nivel de aclareo. Así, cuando el cultivo es sometido a déficit hídrico severo durante la fase II del crecimiento del fruto, se observó un menor tamaño de fruto en todos los niveles de aclareo simulados. Sin embargo, si el momento de aplicación del mismo es en la fase III, la respuesta es distinta, es decir, el tamaño del fruto también resulta afectado bajo condiciones de no aclareo o aclareo comercial (20 cm), pero no cuando se realiza un aclareo intenso. Por ello, un nivel alto de aclareo puede compensar el efecto negativo que supone la ocurrencia de un déficit hídrico severo en esta fase, lo cual está en concordancia con los resultados observados experimentalmente por otros autores (López et al., 2010a). Este hecho se justifica por las diferencias existentes en producción de foto-asimilados y movilización de reservas entre árboles con distintos niveles de carga productiva. Es decir, en los árboles con una baja carga productiva, la reducción de foto-asimilados debido al estrés hídrico puede ser compensada mediante la movilización de reservas hasta que se alcanza un nivel severo de estrés, en cambio, esto no ocurre en árboles con una alta carga productiva, ya que la movilización de reservas no llega a compensar la reducción en la producción de foto-asimilados.

En el caso del último bloque de escenarios de déficit hídrico (control, moderado y severo), 'QualiTree' nos permite observar el resultado de la aplicación de un estrés hídrico una semana antes de la cosecha, periodo que suele considerarse crítico para el tamaño final del fruto. Las simulaciones pusieron de manifiesto que ninguno de los niveles de déficit hídrico simulados durante este periodo influyeron en el tamaño de los frutos, lo que coincide con

lo descrito por otros autores (Génard et al., 2009), y sugiere que, en variedades extra-tempranas como “Flordastar”, es más importante para conseguir un tamaño final del fruto comercial, mantener el árbol en un adecuado estado hídrico durante casi todo su periodo de crecimiento, que durante la última semana de su desarrollo, ya que éste ya habría alcanzado el 85-90% de su tamaño. Además la semana previa a la cosecha en variedades extra-tempranas como “Flordastar” suele coincidir con un periodo de baja demanda climática, por lo que la aplicación de un déficit hídrico de corta duración (1 semana) no sería suficiente para agotar la reserva de agua en el suelo.

Conclusiones

La parametrización y validación de ‘QualiTree’ se llevó a cabo satisfactoriamente para la variedad extra-temprana “Flordastar”, bajo los diferentes niveles de aclareo y RDC evaluados. Además, las simulaciones de los distintos escenarios técnicos han servido para ampliar las capacidades predictivas del modelo, mostrando que el modelo puede ser una herramienta muy útil a la hora de gestionar la aplicación de distintas prácticas culturales.

Finalmente, el modelo aporta una valiosa información a los productores de variedades extra-tempranas de melocotonero:

- La aplicación de un estrés hídrico moderado, tanto en fase II como en fase III, no afectó al tamaño final del fruto.
- El efecto de un nivel de estrés severo fue dependiente del momento de aplicación. Así, al aplicarlo durante la fase II, el tamaño del fruto puede verse comprometido, mientras que si ocurre durante la fase III, el efecto negativo sobre el tamaño del fruto puede ser parcialmente compensado por un aclareo intenso.
- La aplicación de estrés hídrico durante la semana previa a la cosecha no resultó crítica para el tamaño final del fruto en esta variedad extra-temprana.

5.3. Publicación 3

5.3.1. Resumen

Título

Effects of irrigation and fruit position on size, colour, firmness and sugar contents of fruits in a mid-late maturing peach cultivar.

Introducción

El cultivo del melocotonero está ampliamente extendido por los países Mediterráneos, entre los que se encuentra España. Dentro del ámbito nacional, la Región de Murcia es la tercera productora de este cultivo, con una producción anual de 162.000 toneladas y un área cultivada de 11.151 ha (MAGRAMA, 2011). El melocotón es principalmente apreciado por su sabor y color, por lo que se deben buscar estrategias de distinta índole, dirigidas a obtener frutos de una óptima calidad y con un amplio mercado.

El sabor de este fruto depende principalmente de la proporción de azúcares y ácidos orgánicos presentes en el mismo (Souty y André, 1975). La sacarosa es el azúcar predominante, aunque los azúcares reductores (glucosa y fructosa) también se encuentran en altas concentraciones (Génard y Souty, 1996). Estos azúcares junto con los ácidos orgánicos predominantes (málico y cítrico), son los principales responsables del sabor de este fruto.

La variabilidad del tamaño y calidad de los frutos según su posición en el dosel vegetal ha sido ya estudiada por algunos autores (Wu et al., 2005; Alcobendas et al., 2012), estando su variabilidad asociada a diversos factores como la radiación solar (Génard y Baret, 1994), la carga productiva (Marini y Sowers, 1994), la poda (Kumar et al., 2010), etc. Además el manejo del riego ha resultado ser el factor más influyente tanto en la producción como en la calidad de la cosecha de diversos cultivares de melocotonero, como queda demostrado en numerosos trabajos realizados por diversos autores (Crisosto et al., 1994; Besset et al., 2001; Mercier et al., 2009; López et al., 2010). Sin embargo, la respuesta de los distintos cultivares al déficit hídrico varía según

éstos sean de maduración temprana o tardía (Naor et al., 2001; Girona et al., 2005; Buendía et al., 2008).

Existen estudios previos en melocotonero donde se evalúa la influencia de parámetros como la posición de los frutos en el dosel vegetal y/o el manejo del riego sobre la calidad de los frutos. Sin embargo, los análisis de la calidad realizados se centran, principalmente, en atributos como el color o el contenido en sólidos solubles (Corelli-Grappadelli et al., 1991; Miranda Jiménez y Royo Díaz, 2002), pero sólo unos pocos analizan con detalle el contenido y evolución de los azúcares (Génard y Bruchou, 1992). La concentración de estos azúcares constituye uno de los principales componentes nutricionales de la fruta, y su proporción en la misma varía a lo largo del ciclo de maduración, aportando el dulzor característico. De ahí, la importancia de evaluar la influencia de diversos factores (déficit hídrico y posición de los frutos en el dosel), de forma individual y combinada, sobre la calidad, concretamente sobre el contenido de estos azúcares en el fruto.

Así, el principal **objetivo** de este ensayo fue evaluar por un lado, la influencia de dos estrategias de riego (control y RDC), y por otro, la posición de los frutos dentro del dosel vegetal (ya que en el primer estudio de este tipo realizado en la variedad “Flordastar”, esta variable pudo compensar los efectos negativos del déficit hídrico en el tamaño y calidad de los frutos) (Alcobendas et al., 2012), tanto sobre el crecimiento del fruto (diámetro, peso fresco, cociente entre pulpa y hueso), como sobre la calidad del mismo (color, firmeza, contenido en sólidos solubles, ácidos orgánicos, pH y azúcares).

Hay que puntualizar que en este estudio, los árboles en los que se realizaron las medidas y muestreos presentaron una baja carga productiva, ya que se les realizó un aclareo algo más intenso, con la finalidad de que los frutos no presentasen restricciones de crecimiento y calidad, alcanzando sus máximos potenciales.

Material y Métodos

1. Material vegetal, condiciones experimentales y tratamientos de riego

El ensayo se llevó a cabo en una parcela experimental de melocotoneros cv. “Catherine”, con una superficie de 0.5 ha, y perteneciente a una finca comercial localizada en Fuente Librilla (Murcia). El clima de la zona es Mediterráneo semi-árido, presentando unos veranos secos y calurosos.

Los árboles estaban injertados sobre el patrón GF-677 y contaban con 9 años de edad al inicio del ensayo. El marco de plantación fue de 4 x 6 m. “Catherine” es una variedad de media estación, cuyo fruto se cosecha a primeros de Julio. Tanto el control fitosanitario como la fertilización se realizaron de acuerdo a las prácticas habituales de la zona.

El aclareo se realizó un mes después de la plena floración. Los tratamientos de riego impuestos fueron dos, un tratamiento control, donde se regaron los árboles al 100% de la ET_c , y un segundo de riego deficitario controlado (RDC), regado de igual forma que el control, excepto durante la fase II de crecimiento del fruto (el árbol es menos sensible al déficit hídrico) (Girona et al., 2005), en la que se regó en base a un valor umbral pre-establecido de potencial hídrico de tallo (-1.8 MPa). Las necesidades hídricas del cultivo se determinaron diariamente mediante la ET_0 , calculada a partir de la ecuación de Penman-Monteith, coeficientes de cultivo estacionales (FAO 56, Allen et al., 1998) y el porcentaje de suelo sombreado por el dosel vegetal (Fereres y Goldhamer, 1990).

El sistema de riego consistió en un lateral de riego por fila, con 3 goteros por árbol, cada uno con un caudal de 4 L h^{-1} . Las cantidades de agua aplicadas hasta la cosecha en los tratamientos control y RDC, fueron 412 y 318 mm respectivamente.

El diseño experimental se realizó en bloques al azar, con cuatro repeticiones por tratamiento de riego, cada una de las cuales estaba compuesta por tres filas de 4 árboles cada una. De los 12 árboles de cada repetición se controlaban los 2 árboles centrales, quedando los restantes como árboles guarda. En estos árboles controlados, 8 por tratamiento de riego, se

recolectaron todos los frutos, seleccionándose 36 por árbol para la evaluación de los parámetros de calidad (1 fruto por punto cardinal, a 3 alturas distintas y a 3 niveles de exposición solar).

2. Medidas realizadas

Se llevó a cabo la caracterización de la parcela mediante la realización de medidas como el área de la sección transversal del tronco (AST), la altura y diámetro de cada árbol, así como el volumen de copa (método de Westwood, 1988) (Fotografía 5.3.1).

Fotografía 5.3.1. Medida de la altura y diámetro longitudinal y transversal, de la copa del árbol.

Desde el momento en el que se realizó el aclareo (1 mes tras la plena floración), se llevaron a cabo medidas periódicas de potencial hídrico de tallo (7-15 días), y de crecimiento vegetativo y de frutos (3-7 días).

En el momento de cosecha, en los 288 frutos procedentes de los 16 árboles seleccionados, se determinó: su posición en la copa del árbol, exposición a la radiación solar, diámetro ecuatorial, calibre (Ministerio de Agricultura, 1995), peso unitario, color de piel y de pulpa (colorímetro Minolta CR-300), y firmeza (texturómetro LR10K, Lloyd instruments). Además, se determinó el contenido en sólidos solubles (SS) (refractómetro manual Atago N1), el pH, la acidez titulable (AT) (Valorador Metrohm Titrimo 785 DMP) y el contenido en azúcares (glucosa, fructosa, sacarosa y sorbitol) (Fotografías 5.3.2 y 5.3.3). Este último se obtuvo por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), usando el protocolo descrito por Gómez et al. (2002).

Fotografía 5.3.2. Valorador Metrohm Titrino 785 DMP para la medida del pH y la acidez titulable de los frutos.

Fotografía 5.3.3. . Medida del color de los frutos con colorímetro Minolta CR-300.

3. Análisis estadístico

Las diferencias entre las variables consideradas se evaluaron mediante análisis de varianza, y las diferencias entre las medias se compararon mediante el test de Tukey. Para comparar el porcentaje de frutos de categoría comercial entre los dos tratamientos de riego se utilizó el test LSD. Finalmente se evaluó la relación entre las distintas variables mediante el coeficiente de correlación de Pearson. Los análisis estadísticos se realizaron con el software R versión 2.11.1.

Resultados y Discusión

Los potenciales hídricos de tallo entre los dos tratamientos de riego ensayados resultaron significativamente diferentes, especialmente durante la fase II de crecimiento del fruto, siendo en general en torno a un 30% menos negativos (más altos) los de los árboles procedentes del tratamiento control que los de árboles bajo RDC.

Parámetros como la carga productiva (control: 7,8 kg árbol⁻¹; RDC: 6,7kg árbol⁻¹), el número de frutos por árbol (control: 41.5; RDC: 37.5) y el peso medio de los frutos (control: 188,8 g; RDC: 179,3 g) de los árboles de los dos tratamientos, fueron muy similares, por lo que podemos decir que la estrategia de RDC aplicada no afectó significativamente al crecimiento del fruto. Este resultado no concuerda con otros previamente publicados por otros autores (Besset et al., 2001; Mercier et al., 2009; López et al., 2010), y puede deberse a que, bajo nuestras condiciones de cultivo, los árboles presentaron una baja

carga de frutos, lo que pudo compensar los efectos negativos del déficit hídrico. Además, el nivel de déficit impuesto no fue muy severo, probablemente como consecuencia de las condiciones climáticas acontecidas durante el año de estudio.

Sin embargo, el tratamiento de riego sí ejerció influencia sobre algunos de los parámetros de calidad evaluados. Así, el contenido en sólidos solubles, los ácidos cítrico, málico y tartárico, y algunos azúcares (glucosa y sorbitol) resultaron ser más elevados en los frutos procedentes del tratamiento de RDC. Estos resultados sí que concuerdan con los publicados por otros autores (Lo Bianco et al., 2000; Wu et al., 2002; Buendía et al., 2008; López et al., 2011). Algunos parámetros de color resultaron también afectados por el tratamiento de riego (frutos del tratamiento de RDC algo menos rojos), y pueden ser atribuidos a que al inicio de la fase III, tuvo lugar un cierto grado de estrés hídrico, ya que los árboles no se habían recuperado totalmente del estrés aplicado en la fase II.

Ambos tratamientos produjeron un porcentaje similar de frutos de categoría extra, siendo éste ligeramente superior en los frutos procedentes del tratamiento de RDC (12% en tratamiento control y 19% en RDC), aunque en general los frutos de este último tratamiento tendieron a ser algo más pequeños (un pequeño porcentaje de frutos de categoría no comercial). El calibre de los frutos también resultó estar relacionado con el contenido de los mismos en algunos azúcares, en concreto glucosa y fructosa, siendo mayor la concentración de estos azúcares en los frutos de categoría C (56 a 61 mm de diámetro) que en los de categoría A (67 a 73 mm de diámetro). Esto puede deberse a cambios en el metabolismo de los distintos azúcares en el fruto, causados por las distintas estrategias de riego (Lo Bianco et al., 2000). En cambio el sorbitol y los ácidos orgánicos no resultaron afectados por el calibre de los frutos, al igual que gran parte de los parámetros de color.

Respecto al resto de parámetros evaluados y teniendo en cuenta todos los datos, es decir agrupando ambos tratamientos de riego, la altura en la copa del árbol no afectó ni al crecimiento del fruto, ni a la firmeza, lo cual no concuerda con lo previamente descrito por otros autores (Génard y Bruchou,

1992; Lewallen y Marini, 2003), pero sí con los resultados obtenidos en la misma zona por Alcobendas et al., (2012). Sin embargo, este parámetro sí resultó influir en el contenido en sólidos solubles (menor en los frutos de las zonas más bajas de la copa) y en el índice Chroma de la piel de los frutos (presentando coloración más intensa en las zonas más altas).

La exposición al la radiación solar sólo influyó en el contenido en SS (mayor en los frutos más expuestos) y en el cociente entre pulpa y hueso. Estos resultados no concuerdan con otros previamente publicados (Génard y Bruchou, 1992; Bible y Singha, 1993; Alcobendas et al., 2012), en los que los frutos más expuestos resultaron más grandes y con una mayor coloración. Este hecho puede justificarse a que en nuestras condiciones de baja carga productiva todos los frutos (independientemente de la exposición a la radiación solar) fueron capaces de alcanzar su crecimiento potencial.

El último parámetro “posicional” evaluado, fue la orientación, el cual resultó ser el que más atributos de calidad afectó: cociente entre pulpa y hueso, pH, contenido en fructosa y sacarosa, y en la tonalidad (ángulo Hue) e intensidad de la coloración (índice Chroma) de la pulpa de los frutos. Estos resultados son relevantes, ya que estudios previos similares no tuvieron este parámetro en cuenta (Lewallen y Marini, 2003), o sólo consideran los frutos de la orientación Sur (Génard y Bruchou, 1992). Además, la orientación, puede afectar de forma distinta a otros cultivares de melocotonero, ya que en el estudio realizado por Alcobendas et al. (2012) en “Flordastar” (variedad extra-temprana), no tuvo influencia alguna en los atributos de calidad evaluados.

Respecto a la influencia de los parámetros que definen la posición de los frutos en el dosel de forma separada, según se trate de frutos del tratamiento control o del tratamiento de RDC, puede indicarse que bajo condiciones de RDC, la exposición a la radiación solar y la orientación fueron los parámetros más influyentes, mientras en el tratamiento control, la altura en la copa también resultó un factor determinante. Cuando se observa la distribución de los frutos dentro de la copa del árbol (definida por la combinación de altura, exposición a la luz solar y orientación), resultó que los frutos posicionados en zonas altas del dosel y, por tanto, más expuestos a la luz solar, presentaron un mayor

contenido en sólidos solubles, ácidos orgánicos (cítrico, málico y tartárico) y azúcares (sorbitol y glucosa), siendo el número de frutos con estas características mayor en el tratamiento de RDC. Esto puede indicar que bajo condiciones de RDC, sería adecuado intentar conseguir una distribución de los frutos en la copa del árbol dirigida a conseguir una mayor exposición solar, para así mejorar algunos parámetros de calidad de los mismos, logrando un mayor valor comercial de la fruta.

Finalmente, las correlaciones realizadas entre las distintas variables estudiadas mostraron que la firmeza fue la variable más correlacionada con el resto, como, por ejemplo, con el ángulo Hue, estando de acuerdo con los resultados obtenidos por otros autores (Bible y Singha, 1993; Lewallen y Marini, 2003). Sin embargo, en concordancia con estudios previos (Alcobendas et al., 2012), esta correlación resultó significativa ($r^2 < 0.5$), aunque existió un amplio rango de firmeza para una misma coloración (ángulo Hue). Además, la firmeza resultó también correlacionada con variables como el contenido en sorbitol, los SS y los ácidos orgánicos.

Conclusiones

La estrategia de RDC aplicada no afectó significativamente al crecimiento del fruto, ya que el número de frutos por árbol y el peso medio de los mismos fueron muy similares en ambos tratamientos.

Teniendo en cuenta todos los frutos de ambos tratamientos de riego, el parámetro evaluado que más parámetros de calidad afectó, fue la orientación.

A la vista de los resultados obtenidos, se puede concluir que bajo condiciones de estrés hídrico realizar un aclareo “selectivo”, intentando que la distribución de los frutos se ajuste a lo realizado en este ensayo (zonas elevadas de la copa y expuestas a la luz solar), puede compensar los efectos negativos derivados de dicho déficit mediante una mejora en la calidad, y por tanto, en el valor comercial de la fruta.

5.4. Publicación 4

5.4.1. Resumen

Título

Assessment of the water stress effects on peach fruit quality and size using a fruit tree model, 'QualiTree'.

Introducción

El Riego Deficitario Controlado (RDC) es una práctica habitual en el cultivo del melocotonero (*Prunus persica* L. Batsch), cuya finalidad es el ahorro hídrico, ya que las principales zonas de producción de este cultivo (como el Sureste español) están sujetas a importantes restricciones de agua, debido principalmente, a la escasez pluviométrica y a su alta demanda evapotranspirativa. Esta infradotación hídrica suele producirse a mitad de verano, cuando gran parte de los cultivares de media estación o de maduración tardía aún no se han recolectado (López et al., 2010), y normalmente coincide con la fase III de crecimiento del fruto, la cual es crítica para el tamaño final y la calidad de los frutos. Por tanto, un déficit hídrico en esta fase provocaría efectos negativos en estas dos características tan importantes de los frutos (Berman y Dejong, 1996).

En cambio, existen numerosos estudios en los que ciertos parámetros de calidad como los SS se ven incrementados cuando se aplica un déficit hídrico en una fase no crítica (fase II, en el caso del melocotonero) (Intrigliolo y Castel, 2010; López et al., 2010), lo cual nos permite reducir los aportes hídricos sin afectar a la calidad, o incluso mejorándola.

Cuando se habla de calidad en los frutos, el concepto lleva implícitos distintos atributos como son el tamaño, la composición nutricional y el sabor (Génard et al., 2009). Estos parámetros individuales que, en conjunto, conforman la calidad de los alimentos, resultan de diversos procesos que ocurren tanto a nivel de árbol completo, cómo a nivel de "órganos" o partes individuales de la planta, y dependen tanto de la genética de la especie, como

de los factores ambientales a los que se encuentran expuestos, así como de las interacciones existentes entre ambos factores (Aguirrezábal et al., 2009).

Para ayudar a conocer y entender mejor los diferentes procesos e interacciones que afectan a la calidad de los frutos, disponemos de herramientas de gran utilidad como son los modelos fisiológicos o “basados en procesos” (modelos mecanísticos). Aunque existen varios modelos capaces de simular la arquitectura y funcionamiento del árbol, y el efecto de algunas prácticas culturales de diversos cultivos, como manzano (Costes et al., 2008) y melocotonero (L-PEACH: Allen et al., 2005), éstos no tienen en cuenta la calidad de los frutos. En cambio, el modelo ‘QualiTree’ (Lescourret et al., 2011) combina aspectos fisiológicos y agronómicos para describir los procesos de reparto de carbono que ocurren en el árbol, así como el crecimiento vegetativo y reproductivo, y la evolución de la calidad de los frutos. Es por todo esto que resulta más adecuado para el objetivo de este estudio.

Hasta la fecha, ‘QualiTree’ había sido parametrizado y validado para tres cultivares de melocotonero (Mirás-Avalos et al., 2011; Mirás-Avalos et al., 2013), pero el submodelo de calidad (Lescourret, 2005), que simula la concentración final de azúcares en el fruto, no ha sido validado hasta ahora con datos experimentales. Por ello, el **objetivo** principal de este trabajo fue validar con datos experimentales recogidos en campo, el submodelo de azúcares que forma parte del modelo mecanístico ‘QualiTree’, y utilizar este último, para evaluar (mediante simulaciones) los efectos del déficit hídrico sobre el crecimiento vegetativo y reproductivo y también sobre el contenido en azúcares de los frutos.

Para la consecución de este objetivo, previamente se parametrizó y validó el modelo para el cultivar “Catherine”. Las variables evaluadas fueron el contenido en materia seca de brotes y frutos, así como la concentración de glucosa, fructosa, sacarosa y sorbitol de los frutos.

Finalmente, se diseñaron varios escenarios técnicos para observar y evaluar la respuesta del modelo. Algunos de estos escenarios fueron teóricos y otros se elaboraron a partir de datos experimentales recogidos en campo, con el manejo del riego como variable principal.

Material y Métodos

1. Descripción del modelo QualiTree

La descripción del modelo queda reflejada en el **resumen de la publicación 2** (página 64), dentro del epígrafe 5.2.1. Simplemente añadir que, como previamente se ha descrito, ‘QualiTree’ es capaz de calcular y representar diversos parámetros relacionados con la calidad del fruto, como son: el tamaño final, la proporción del peso total que representa la pulpa y el contenido en peso seco de la misma. Pero además, y como novedad de la presente publicación, es capaz de calcular y/o predecir la concentración en pulpa de sorbitol, glucosa, fructosa y sacarosa, y un índice de dulzor, mediante la integración del submodelo de calidad de fruto desarrollado por Lescourret y Genard (2005). La evolución del contenido en azúcares de los frutos que el modelo calcula se basa en una serie de ecuaciones descritas por Génard et al. (2003).

2. Datos experimentales

El ensayo se llevó a cabo en una parcela experimental de melocotoneros cv. “Catherine”, con una superficie de 0.5 ha, y perteneciente a una finca comercial localizada en Fuente Librilla (Murcia).

Los árboles estaban injertados sobre el patrón GF-677 y contaban con 9 años de edad al inicio del ensayo. El marco de plantación fue de 4 x 6 m. “Catherine” es una variedad de media estación, cosechada a primeros de Julio. Tanto el control fitosanitario como la fertilización se realizaron de acuerdo a las prácticas habituales de la zona. El aclareo se realizó un mes después de la plena floración (DPF).

Los tratamientos de riego impuestos fueron dos, un tratamiento control, donde se regaron los árboles al 100% de la ET_c , y un segundo de riego deficitario controlado (RDC), regado de igual forma que el control, excepto durante la fase II de crecimiento del fruto (el árbol es menos sensible al déficit hídrico) (Girona et al., 2005), en la que se regó (frecuencia y dosis) en base a un valor umbral pre-establecido de potencial hídrico de tallo (-1.5 MPa). Las necesidades hídricas del cultivo se determinaron diariamente mediante la ET_0 ,

calculada a partir de la ecuación de Penman-Monteith (FAO 56, Allen et al., 1998), coeficientes de cultivo estacionales y el porcentaje de suelo sombreado por el dosel vegetal (Fereres y Goldhamer, 1990). Las cantidades totales de agua aplicadas fueron 750.1 mm en los árboles control y 460.2 mm en el tratamiento de RDC.

El diseño experimental se realizó en bloques al azar, con cuatro repeticiones por tratamiento de riego, cada una de las cuales estaba compuesta por cuatro filas de 4 árboles cada una. De los 16 árboles de cada repetición se controlaban los 4 árboles centrales, quedando los restantes como árboles guarda.

Las medidas realizadas durante el ciclo de cultivo fueron las siguientes: estado hídrico del cultivo mediante medidas periódicas de potencial hídrico foliar y de tallo (3-5 días), seguimiento del crecimiento vegetativo y de los frutos (5-7 días), y la evolución de los azúcares en la pulpa. Este último parámetro se evaluó previa realización de tres muestreos de frutos (días 66, 94 y 105 después de plena floración), siendo el último coincidente con el momento de la cosecha. En los dos primeros muestreos se evaluaron 20 frutos por tratamiento, mientras que en el último, se evaluaron todos los frutos cosechados. En los frutos muestreados, se determinó el contenido en fructosa, glucosa, sacarosa y sorbitol por HPLC, previa extracción de los azúcares según el protocolo descrito por Gómez et al. (2002).

Para la realización de estas medidas (excepto las de potencial hídrico foliar y de tallo, que se realizaron en 2 árboles por repetición) se seleccionaron 3 árboles representativos de la parcela, dos de ellos bajo el tratamiento de riego control, y el tercero bajo el tratamiento de déficit hídrico. Los datos experimentales derivados de las medidas realizadas en uno de los árboles regados al 100% de la ET_c , se utilizaron para parametrizar el modelo mecanístico 'QualiTree' en esta variedad (cv. "Catherine"). Con los dos árboles restantes (control y RDC), se llevó a cabo la validación de dicho modelo. En estos tres árboles se realizaron, además, al inicio del ensayo diversas medidas (diámetro y longitud del tronco y ramas principales, ángulos de inserción y

filotáxicos, etc.) necesarias para la descripción de la arquitectura de dichos árboles dentro del modelo.

Fotografía 5.4.1. Detalle de uno de los árboles en los que se realizaron las medidas necesarias para la determinación de la arquitectura.

3. Datos de entrada (“Inputs”)

Al igual que la descripción del modelo, los “inputs” son los mismos que los previamente descritos en el resumen de la publicación 2 (página 68). La única diferencia es que para la caracterización del estado hídrico del árbol, en el presente ensayo, se utilizó también el potencial hídrico de tallo (Ψ_t), además del potencial hídrico foliar (Ψ_h).

4. Estimación de parámetros

Los parámetros cultivar-dependientes necesarios para ejecutar el modelo ‘QualiTree’ (Mirás-Avalos et al., 2011), y que fueron estimados en este trabajo, quedan resumidos en la Tabla 1 (Publicación 4). El resto de parámetros proceden de bibliografía previa (Génard et al., 1998; Lescourret et al., 1998; Lescourret y Génard, 2005; Mirás-Avalos et al., 2011).

Los parámetros que describen el crecimiento potencial de frutos y brotes son: la tasa inicial de crecimiento relativo (RGR^{ini}), la cantidad máxima potencial de materia seca (DM^{max}), y los días grado máximos y mínimos (dd_{max} y dd_{min}), fueron estimados mediante regresiones no lineales de mínimos cuadrados utilizando los datos experimentales.

Los parámetros necesarios para el submodelo de azúcares se estimaron según lo descrito por Génard et al. (2003).

Por último se estimaron tres parámetros globales, ejecutando el modelo para la variedad “Catherine” que son: el parámetro k (que expresa el efecto de la distancia entre los distintos compartimentos sobre los flujos de C), y las tasas iniciales de crecimiento relativo de las raíces jóvenes (RGR_{fr}^{ini}) y de la madera vieja (RGR_{ow}^{ini}). El valor de la tasa inicial de crecimiento relativo de las raíces gruesas (RGR_{cr}^{ini}) se consideró igual al correspondiente para la madera vieja.

5. Comparación de datos observados y simulados

Para llevar a cabo las comparaciones entre los valores medios de los datos observados y simulados se utilizó la raíz cuadrada del error cuadrático medio de predicción relativo (RECMR), como queda descrito en el resumen de la publicación 2 (página 69).

6. Escenarios técnicos simulados

Para evaluar de modo más exhaustivo los efectos del déficit hídrico sobre el crecimiento vegetativo y reproductivo, y sobre la evolución del contenido en azúcares del fruto, se diseñaron varios escenarios técnicos. Así, un total de 12 escenarios técnicos de simulación de estrés hídrico y definidos por valores de potencial hídrico foliar y de tallo se agruparon en 3 bloques. El primero de ellos consistió en evaluar la respuesta del modelo sobre el crecimiento vegetativo y reproductivo, y sobre el contenido en azúcares de los frutos a 5 niveles de déficit hídrico constantes que comenzaron el día 57 DPF. Los niveles de estrés se definen por los valores mostrados en la tabla 2 de la presente publicación. En el segundo bloque de escenarios, la aplicación del estrés hídrico ocurre durante la fase II ó III de crecimiento del fruto, y se evalúan 2 niveles de estrés, moderado y severo, resultando un total de 4 escenarios en este bloque. Los valores de potencial hídrico y foliar que los definen también son mostrados en la tabla 2 de la publicación. El último grupo de escenarios técnicos fue construido a partir de datos experimentales de potencial hídrico foliar y de tallo, procedentes de otros trabajos previamente

publicados en melocotoneros bajo diversas estrategias de riego (Berman y Dejong, 1996; Besset et al., 2001; Solari et al., 2006; Conejero et al., 2007; Mercier et al., 2009; Abrisqueta et al., 2010; Bussi et al., 2010; López et al., 2010). Los escenarios resultantes fueron tres, el primero denominado control, sin restricciones hídricas durante todo el ciclo de cultivo; un escenario de estrés moderado, que puede ser equivalente a una estrategia de RDC; y por último, una situación de estrés severo, que puede corresponderse a unas elevadas necesidades hídricas del cultivo, unidas a una baja disponibilidad de agua.

Todos estos escenarios se analizaron mediante ANOVA. Las variables de salida evaluadas fueron: producción total y peso medio del fruto (ambos como contenido en materia seca), peso seco total y medio de las hojas, y las concentraciones de glucosa, fructosa, sacarosa y sorbitol en la pulpa de los frutos. Las medias de estas variables se analizaron mediante el Test de Tukey (5%). El software utilizado para ello fue R 2.11.1.

Resultados y Discusión

Los resultados mostraron una buena estimación de los parámetros dependientes del cultivar, ya que los valores simulados se ajustaron adecuadamente a los observados, tanto para los valores de crecimiento vegetativo y reproductivo, como para el contenido en azúcares, y tanto en condiciones de riego al 100% de la ET_c , como en los árboles del tratamiento de RDC.

Varios parámetros resultaron diferentes de los previamente estimados en otras variedades (“Flordastar”, “Alexandra” y “Suncrest”), como era de esperar. Así, las tasas iniciales de crecimiento relativo de los frutos y de los brotes en “Catherine” (tabla 1), resultaron intermedias entre las previamente publicadas para los cvs. “Alexandra” y “Suncrest” (Mirás-Avalos et al., 2011), al igual que el contenido máximo en materia seca de los frutos. Cabe destacar la elevada precisión obtenida en la estima del parámetro k cuyo valor, $k=0.002$, fue más bajo que para la variedad “Flordastar”, lo que sugiere una menor influencia de las distancias (sobre el flujo de carbono) entre las distintas partes del árbol en las variedades más tardías.

La principal novedad de este trabajo es que el modelo 'QualiTree' se ha parametrizado satisfactoriamente para el contenido en azúcares de los frutos. Sin embargo, la sacarosa resultó sobreestimada en todos los casos (independientemente del tratamiento de riego aplicado), ocurriendo algo similar con la fructosa en los frutos procedentes del tratamiento de RDC, lo que sugiere la necesidad de mejorar la parametrización del modelo para estos azúcares en concreto.

Respecto a los distintos escenarios técnicos simulados, los resultados mostraron que la aplicación de un estrés hídrico continuado (primer bloque de escenarios) afectó de forma negativa, tanto al crecimiento vegetativo como al reproductivo, aunque a este último de forma más severa. En cambio el nivel de estrés hídrico afectó de forma positiva a la concentración de los cuatro azúcares en el fruto, siendo este efecto más acusado en el caso de la fructosa y la sacarosa.

El nivel de déficit moderado, independientemente de la fase de aplicación, no afectó a ninguna de las variables de crecimiento (vegetativo o reproductivo) evaluadas, mostrando un aumento en la concentración de azúcares en los frutos en el momento de la cosecha. Si se evalúan los escenarios de estrés severo, el modelo mostró que, independientemente de la fase de aplicación del mismo, se produce una disminución en el peso del fruto y en la producción. Respecto a la concentración de azúcares en fruto, el resultado es distinto según el momento de aplicación del déficit. Así, cuando se aplica en fase II, las concentraciones de los azúcares evaluados no resultan alteradas, mientras que si el déficit hídrico se da durante la fase III, se incrementan las concentraciones de todos los azúcares, excepto la del sorbitol.

En el último grupo de escenarios de simulación (agronómicos), la aplicación de un nivel de estrés severo produjo mermas en el crecimiento de los frutos, mientras el crecimiento vegetativo no resultó afectado por el déficit hídrico. Las concentraciones de todos los azúcares evaluados en los frutos se vieron incrementadas en condiciones de estrés severo. Cuando el estrés hídrico aplicado es menor (moderado), las concentraciones de glucosa,

fructosa y sacarosa aumentan mientras que la concentración sorbitol no resulta alterada.

En resumen, y según los resultados obtenidos en las distintas simulaciones, el crecimiento vegetativo resultó ser menos sensible al déficit hídrico que el crecimiento de los frutos, ya que resultó afectado a partir de valores de potencial hídrico foliar de -2.5 MPa, mientras que valores de este último de -2.0 MPa resultaron suficientes para producir mermas en el tamaño final de los frutos. Por el contrario, la concentración de azúcares en los frutos, aumentó de forma gradual al incrementarse el grado de estrés hídrico, cuando éste se aplicó desde el inicio de la simulación, lo cual concuerda con un gran número de ensayos realizados por otros autores en los que la aplicación de estrategias de RDC mejoran la calidad del fruto (Crisosto et al., 1994; Besset et al., 2001; Barry et al., 2004; Intrigliolo y Castel, 2010).

Conclusiones

La parametrización y validación de 'QualiTree' se llevó a cabo satisfactoriamente para la variedad de media estación "Catherine" bajo los diferentes niveles de estrés hídrico evaluados. Además, las simulaciones de los distintos escenarios técnicos han permitido ampliar las capacidades predictivas del modelo, mostrando que este modelo mecanístico puede ser una herramienta muy útil a la hora de gestionar la aplicación de prácticas culturales, como el manejo del riego, orientadas a mejorar la calidad de los frutos.

Además, los resultados obtenidos con 'QualiTree' confirman los previamente obtenidos en numerosos ensayos de campo, y que proponen el RDC como una buena estrategia para mantener, o incluso mejorar, la calidad de los frutos, a la vez que se reducen los aportes hídricos.

Finalmente, el modelo aporta una valiosa información a los productores de variedades de media estación de melocotonero:

- La aplicación de un estrés hídrico severo durante las fases II y III afecta de forma negativa tanto al crecimiento vegetativo como al reproductivo, lo cual no se ve compensado por un aumento de la concentración de azúcares en fruto.

- La aplicación de un estrés hídrico moderado tanto en fase II como en fase III, no afecta el tamaño final del fruto, produciendo un aumento en la concentración de glucosa, fructosa, sacarosa y sorbitol.
- La aplicación de un estrés severo durante la semana previa a la cosecha (fase III) produce un aumento de la concentración de los azúcares en el fruto, pero sus efectos sobre la producción son negativos (22% menos que el control), tanto si se aplica en esta fase, como en fase la II.

6. CONCLUSIONES GENERALES

6. Conclusiones Generales

A continuación se detallan las principales conclusiones derivadas del presente trabajo de investigación:

1. El grado influencia de prácticas culturales como el aclareo y el riego deficitario controlado sobre la calidad del fruto depende de la variedad estudiada.

1.1. En el caso de la variedad extra-temprana “Flordastar”:

1.1.1. El déficit hídrico impuesto con el RDC (al 25% ET_c en las fases I y II) resultó lo suficientemente severo como para que un aclareo intenso no fuese capaz de compensar los efectos negativos derivados de dicho déficit sobre los parámetros de producción (menor tamaño y peso de frutos), provocando también cambios en la coloración de los frutos.

1.1.2. Los frutos con un mayor grado de exposición a la radiación solar presentaron una mejora en la mayoría de los atributos de calidad evaluados. Asimismo, la posición relativa del fruto en la copa del árbol tuvo una cierta influencia sobre los parámetros analizados (coloración, tamaño y firmeza de los frutos).

1.1.3. Por lo tanto, los efectos negativos derivados del déficit hídrico podrían verse parcialmente compensados mediante la realización de un “aclareo selectivo” que esté basado, no sólo en dejar una distancia constante entre frutos, sino en el grado de insolación que recibirían y en su posición relativa en el dosel.

1.2. En el caso de la variedad de media estación “Catherine”:

1.2.1. El déficit hídrico impuesto por el RDC no supuso diferencias en cuanto al crecimiento de los frutos. Sin embargo, los frutos procedentes este tratamiento presentaron valores más elevados de ciertos parámetros de calidad del fruto: contenido en sólidos solubles, glucosa, sorbitol y ácidos orgánicos.

1.2.2. La posición relativa de los frutos en el dosel vegetal, definida por su altura dentro de la copa del árbol, sólo tuvo influencia en algunos parámetros de calidad: contenido en sólidos solubles, sorbitol y en la coloración de los frutos.

1.2.3. El grado de exposición a la radiación solar afectó positivamente al contenido en sólidos solubles de los frutos, mientras que la orientación resultó un factor influyente en el cociente pulpa/hueso, pH, coloración y en los contenidos en sacarosa y fructosa.

1.2.4. En el caso de los frutos procedentes de los árboles regados al 100% ET_c , se afectaron un menor número de parámetros de calidad asociado a la posición relativa de los frutos en el dosel, en comparación con los procedentes del tratamiento de RDC.

1.2.5. Por lo tanto, una buena estrategia para conseguir una mejor calidad de la cosecha bajo condiciones de déficit hídrico sería distribuir los frutos en la copa del árbol de tal manera que se maximice la exposición de los mismos a la radiación solar.

2. Las dos variedades objeto de estudio de esta tesis doctoral, “Flordastar” y “Catherine”, se incorporaron con éxito al modelo fisiológico ‘QualiTree’.

2.1. Los parámetros dependientes de la variedad se estimaron de manera adecuada, especialmente aquéllos para los que se emplearon datos recogidos en campo. Del mismo modo, las simulaciones realizadas para el crecimiento vegetativo y reproductivo se ajustaron correctamente a los resultados observados en el campo.

2.2. Respecto a los escenarios técnicos, para una variedad extra-temprana, el aclareo intenso contrarrestó el efecto que provocó un déficit hídrico severo previo a la recolección en el tamaño del fruto. Por otro lado, la aplicación de un nivel de estrés hídrico moderado promovió una mayor concentración de azúcares en el fruto.

2.3. La calibración y validación del modelo de calidad de fruto individual fue llevada con éxito para la variedad “Catherine”. Las simulaciones de la

evolución del contenido de azúcares (fructosa, glucosa, sacarosa y sorbitol) en el fruto se ajustaron adecuadamente a los valores observados, excepto en el caso de la sacarosa que resultó sobreestimada.

Finalmente, el uso de modelos en agronomía proporciona una herramienta prometedora en lo referente a la gestión de las explotaciones agrarias, ya que actúan como apoyo en la toma de decisiones relacionadas con las prácticas culturales en general, y con la gestión de la aplicación de los recursos hídricos disponibles en particular. Esto puede resultar especialmente relevante en zonas donde los recursos hídricos suponen una importante limitación, como es el caso del Sureste español.

6. General Conclusions

The main conclusions derived from this research are explained in the following lines:

1. The level of influence of agricultural strategies such as thinning and regulated deficit irrigation on fruit quality depends on the studied cultivar:

1.1. For the extra-early variety “Flordastar”:

1.1.1. Water deficit imposed by the RDI (25% ET_c during phases I and II) was so severe that even a heavy thinning was not able to offset the negative effects due to the water stress, on the production parameters (reductions in fruit size and weight). Some changes in the colour of the fruits were also observed.

1.1.2. Fruits more exposed to solar radiation showed an improvement in most of the quality traits. Also, the fruit position on the canopy exerted a great influence on most fruit attributes.

1.1.3. Therefore, the negative effects due to the water stress, could be partially offset by performing a "selective thinning", which is based, not only on leaving a constant spacing between fruits, but rather on the amount of solar radiation that they would receive and also on their position in the crown.

1.2. For the mid-late maturing peach cultivar “Catherine”:

1.2.1. In our conditions, irrigation strategies did not significantly affect fruit growth attributes such as diameter or fresh weight. However, the fruits from the RDI treatment showed higher levels of some quality traits such as the soluble solids, glucose, sorbitol, and organic acids contents.

1.2.2. The position of the fruit within the canopy, defined by its height in the tree crown, only affected some quality attributes: soluble solids, sorbitol and the coloration of the fruit.

1.2.3. The level of exposure to sunlight positively affected soluble solids content, whereas the orientation was an important influencing factor on the

ratio: flesh / stone, on the pH, on the coloration and on sucrose and fructose contents of the fruits.

1.2.4. A lower number of fruit quality traits (sugars, acids and colour) were affected by the fruit position within the canopy (defined by height in the crown, exposure to sunlight and orientation) in fruits from FI trees than in those from RDI trees.

1.2.5. Therefore, this may indicate that leaving a certain fruit distribution in the canopy which allows the fruits to be more exposed to sunlight would improve fruit quality and, thus, marketability under RDI conditions.

2. Both varieties under study in this dissertation, "Flordastar" and "Catherine," were successfully implemented in the model 'QualiTree'.

2.1. For both varieties, the cultivar-dependent parameters were adequately estimated, especially those which were estimated from data collected in the field. Similarly, vegetative and fruit growth were adequately simulated, fitting correctly with the experimental data.

2.2. Regarding the simulated scenarios, for an extra-early peach cultivar, a heavy thinning was able to counteract the negative effect on fruit size due to a severe water stress applied before harvest. Moreover, the application of a moderate water stress promotes a higher concentration of sugars in the fruit.

2.3. For the mid late maturing peach cultivar ("Catherine"), simulation of the evolution of the fruit flesh sugar content (fructose, glucose, sucrose and sorbitol) are properly adjusted to observed values, except for sucrose which was overestimated.

In general, the use of models in agronomy provides a promising tool for the farm management, by acting as a support for decision-making related to agricultural practices in general, and for the management of the available water resources in particular. This is particularly relevant in areas where water resources are an important limitation, such as southeastern Spain.

7. BIBLIOGRAFIA

7. Bibliografía General

- Abbott, J. 1999. Quality measurement of fruits and vegetables. *Postharvest Biology and Technology*, 15: 207-225.
- Abrisqueta, I., Tapia, L.M., Conejero, W., Sánchez-Toribio, M.I., Abrisqueta, J.M., Vera, J., Ruiz-Sánchez, M.C. 2009. Riego deficitario en melocotonero extra-temprano. *Actas XXVII Congreso Nacional de Riegos*, Murcia. pp. 23-24.
- Abrisqueta, I. 2010. Balance hídrico y respuesta del melocotonero extratemprano al riego deficitario. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura. 234 p.
- Abrisqueta, I., Abrisqueta, J.M., Tapia, L.M., Munguía, J.P., Conejero, W., Vera, J., Ruiz-Sánchez, M.C. 2013. Basal crop coefficients for early-season peach trees. *Agricultural Water Management*, 121: 158-163.
- 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 in an extra-early cultivar of peach. *Scientia Horticulturae*, 142: 128–135.
- Alcobendas, R., Mirás-Avalos, J.M., Alarcón, J.J., Nicolás, E. 2013. Effects of irrigation and fruit position on size, colour, firmness and sugar contents of fruits in a mid-late maturing peach cultivar. *Agricultural Water Management*, 128: 1-12.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration. Paper 56. FAO of the United Nations. Roma (Italia). 300 p.
- Allen, M.T., Prusinkiewicz, P., DeJong, T.M. 2005. Using L-systems for modeling source-sink interactions, architecture and physiology of growing trees: the L-PEACH model. *New Phytologist*, 166(3): 869-880.
- Allen, R.G., Pereira, L.S. 2009. Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. *Irrigation Science*, 28(1): 17-34.

- Alvarado, Q., González, R., I., 1999. Manual del cultivo del Melocotón. 1ª Ed. Profruta-Maga. Guatemala, 38 pp. (Guía Técnica Profruta)
- Badenes, M.L. 2000. Melocotonero. En: La Horticultura Española (F. Nuez y G. Llácer, Eds.). Sociedad Española de Ciencias Hortícolas: 334-337.
- Bailey, L.H. 1927. The Standard Cyclopedia of Horticulture. Mcmillan, New York.
- Ballester, C., Castel, J., Intrigliolo, D.S., Castel, J.R. 2013. Response of Navel Lane Late citrus trees to regulated deficit irrigation: yield, components and fruit composition. Irrigation Science, 31: 333-341.
- Baraona, M., Sancho, E. 1992. Fruticultura especial: manzana, melocotón, fresa y mora. San José, CR., EUNED
- Bergez, J.E., Colbach, N., Crespo, O., García, F., Jeuffroy, M.H., Justes, E., Loyce, C., Munier-Jolain, N., Sadok, W. 2010. Designing crop management systems by simulation. European Journal of Agronomy, 32: 3-9.
- Berman, M.E., Dejong, T.M., 1996. Water stress and crop load effects on fruit fresh and dry weights in peach (*Prunus persica*). Tree Physiology 16:859-864.
- Bessey, J., Génard, M., Girard, T., Serra, V., Bussi, C., 2001. Effect of water stress applied during the final stage of rapid growth on peach trees (cv. Big-Top). Scientia Horticulturae, 91: 289–303.
- Blanco, O., Faci, J.M., Neguerols, J. 2010. Response of table grape cultivar “Autumn Royal” to regulated deficit irrigation applied in post veraison period. Spanish Journal of Agricultural Research, 8(S2): 72-85.
- Boeing, H., Bechtold, A., Bub, A., Ellinger, S., Haller, D., Kroke, A., Leschik-Bonnet, E., Müller, M.J., Oberritter, H., Schulze, M., Stehle, P., Watzl, B. 2012. Critical review: vegetables and fruit in the prevention of chronic diseases. European Journal of Nutrition, 51: 637-663.

- 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. *Journal of Horticultural Science*, 68(2): 261-274.
- Boland, A.M., Jerie, P.H., Mitchell, P.D., Goodwin, I. 2000. Long-term effects of restricted root volume and regulated deficit irrigation on peach: II. Productivity and water use. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 125(1): 143-148.
- Botía, P., Romero, P., Navarro, J. M., Pérez-Pérez, J.G., García-Oller, I., Trintran, A.J. 2004. Efecto de diferentes estrategias de riego deficitario controlado sobre la producción y calidad de variedades de media estación de melocotonero (*Prunus persica* L. *Bastch*). VII Symposium Hispano-Portugués de Relaciones Hídricas en las Plantas, Faro, Portugal. Sept 27-29, pp. 53-56.
- Bryla, D.R., Thomas, J.T., Ayars, J.E. 2010. Weighing lysimeters for developing crop coefficients and efficient irrigation practices for vegetable crops. *HortScience*, 45 (11): 1597-1604.
- Buendía, B., Allende, A., Nicolás, E., Alarcón, J.J., Gil, M.I., 2008. Effect of regulated deficit irrigation and crop load on the antioxidant compounds of peaches. *Journal of Agricultural Food and Chemistry*, 56: 3601–3608.
- Bussi, C., Lescourret, F., Mercier, V., Génard, M., 2010. Effects of winter pruning and of water restriction on fruit and vegetative growth, water potential and leaf gas exchange during the final stage of rapid growth in an early maturing peach cultivar. *European Journal of Horticultural Science*, 75: 15–19.
- Campbell, G.S., Campbell, M.D., 1982. Irrigation scheduling using soil moisture measurements. En: *Advances in irrigation* (D. Hillel Ed.) Academic Press, Inc., New York, Vol 1: 25-42.
- CARM, 2012. Estadística agraria de Murcia 2010-2011. Consejería de Agricultura y Agua de la Región de Murcia. www.carm.es

- CARM, 2013. Producción de Cultivos leñosos. Estadísticas Agrícolas. Consejería de Agricultura y Agua de la Región de Murcia. www.carm.es
- 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 American Society for Horticultural Science*, 106: 307-312.
- Conejero, W., Mellisho, C.D., Ortuño, M.F., Moriana, A., Moreno, F., Torrecillas, A. 2011. Using trunk diameter sensors for regulated deficit irrigation scheduling in early maturing peach trees. *Environmental and Experimental Botany*, 71: 409-415.
- Corelli-Grappadelli, L., Coston, D.C., 1991. Thinning pattern and light environment in peach tree canopies influence fruit quality. *HortScience*, 26: 1464–1466.
- Costa, J.M., Ortuño, M.F., Chaves, M.M. 2007. Deficit irrigation as strategy to save water: physiology and potential application to horticulture. *Journal of Integrative Plant Biology*, 49(10): 1421-1434.
- De Miguel, A. 2000. Ensayo del comportamiento de portainjertos de melocotonero y nectarina. *Comunitat Valenciana Agraria* nº14, 35-38. Generalitat Valenciana. Conselleria d'Agricultura, Pesca y Alimentació.
- Dichio, B., Xiloyannis, C., Sofo, A., Montanaro, G. 2007. Effects of post-harvest regulated deficit irrigation on carbohydrate and nitrogen partitioning, yield, quality and vegetative growth of peach trees. *Plant and Soil*, 290: 127-137.
- Domingo, R., Ruiz-Sánchez, M.C., Sánchez-Blanco, M.J., Torrecillas, A. 1996. Water relations, growth and yield of Fino lemon trees under regulated deficit irrigation. *Irrigation Science*, 16: 115-123.
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O. 1977. Crop water requirements. *Irrigation and Drainage*. Paper N°24 (rev.). FAO, Rome, 144p.

- Edwards, E.J., Clingeleffer, P.R. 2013. Interseasonal effects of regulated deficit irrigation on growth, yield, water use, berry composition and wine attributes of Cavernet Sauvignon grapevines. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 19(2): 261-276.
- Egea, G., González-Real, M.M., Baille, A., Nortes, P.A., Sánchez-Bel, P., Domingo, R. 2009. The effects of contrasted deficit irrigation strategies on the fruit growth and kernel quality of mature almond trees. *Agricultural Water Management*, 96: 1605-1614.
- Egea, G., Nortes, P.A., González-Real, M.M., Baille, A., Domingo, R. 2010. Agronomic response and water productivity of almond trees under contrasted deficit irrigation regimes. *Agricultural Water Management*, 97: 171-181.
- Egea, G., Nortes, P.A., Domingo, R., Baille, A., Pérez-Pastor, A., González-Real, M.M. 2013. Almond agronomic response to long-term deficit irrigation applied since orchard establishment. *Irrigation Science*, 31:445-454.
- Erena, M., Fontes, C., Soler, M. D., Caro, M., 1999. Necesidades hídricas del melocotonero en la Región de Murcia. *Actas de Horticultura. VIII Congreso Nacional de Ciencias Hortícolas. Tomo 3*, 433-439.
- Faci, J.M., Blanco, O., Medina, E.T., Martínez-Cob, A. 2014. Effect of post veraison regulated deficit irrigation in production and berry quality of Autumn Royal and Crimson table grapes cultivars. *Agricultural Water Management*, 134: 73-83.
- FAO, 2011. Food and Agriculture Organization of the United Nations. www.faostat.fao.org
- Fereres, E., Soriano, M.A., 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany* 58, 147–159.
- Fideghelli, C., 1986. El melocotonero. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. 243 pp.

- Forlani, M., Basile, B., Cirillo, C., Iannini, C., 2002. Effects of harvest date and fruit position along the tree canopy on peach fruit quality. *Acta Horticulturae*, 592: 459–466.
- Gabrielle, B., Roche, R., Angas, P., Cantero-Martínez, C., Consentino, L., Mantineo, M., Langensiepen, M., Hénault, C., Laville, P., Nicoullaud, B., Gosse, G. 2002. A priori parameterisation of the CERES soil-crop models and tests against several European data sets. *Agronomie*, 22: 119-132.
- García-Tejero, I.F., Durán-Zuazo, V.H., Vélez, L.M., Hernández, A., Salguero, A., Muriel-Fernández, J.L. 2011. Improving almond productivity under deficit irrigation in semiarid zones. *The Open Agriculture Journal*, 5: 56-62.
- Gary, C., Jones, J.W., Tchamitchian, M. 1998. Crop modelling in horticulture: state of the art. *Scientia Horticulturae*, 74: 3-20.
- Gasque, M., Granero, B., Turegano, J.V., González-Altozano, P. 2010. Regulated deficit irrigation effects on yield, and vegetative growth of “Navelina” citrus trees. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8(S2): 40-51.
- Gelly, M., Recasens, I., Girona, J., Mata, M., Arbonès, A., Rufat, J., Marsal, J. 2004. Effects of stage II and postharvest deficit irrigation on peach quality during maturation and after cold storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84: 561-568.
- Génard, M., Bruchou, C., 1992. Multivariate analysis of within-tree factors accounting for the variation of peach fruit quality. *Scientia Horticulturae*, 52: 37–51.
- Génard, M., Baret, F. 1994. Spatial and temporal variation of light inside peach trees. *Journal of American Society for Horticultural Science*, 119: 669–677.

- Génard, M., Dauzat, J., Franck, N., Lescourret, F., Moitrier, N., Vaast, P., Vercambre, G. 2008. Carbon allocation in fruit trees: from theory to modelling. *Trees*, 22: 269-282.
- Girona, J. 1989. Physiological, growth and production responses of late maturing peach (*Prunus persica* L. Batsch) to controlled deficit irrigation. Tesis Doctoral.
- Girona, J., Mata, M., Goldhamer, D. A., Johnson, R. S., DeJong, T. M. 1993. Patterns of soil and tree water status and leaf functioning during regulated deficit irrigation scheduling in peach. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 118(5): 580-586.
- Girona, J., Marsal, J. 1995. Estrategias de RDC en almendro. In: Riego deficitario controlado (Zapata, M., Segura, P., eds). Colección cuadernos.
- Girona, J., Mata, M., Arbonès, A., Alegre, S., Rufat, J., Marsal, J. 2003. Peach tree response to single and combined regulated deficit irrigation regimes under shallow soils. *Journal of American Society for Horticultural Science*, 128(3): 432-440.
- Girona, J., Marsal, J., Mata, M., Arbonès, A., Dejong, T.M. 2004. A comparison of the combined effect of water stress and crop load on fruit growth during different phenological stages in young peach trees. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 79(2): 308-315.
- Girona, J., Gelly, M., Mata, M., Arbonès, A., Rufat, J., Marsal, J. 2005. Peach tree response to single and combined deficit irrigation regimes in deep soils. *Agricultural Water Management*, 72: 97-108.
- Girona, J., del Campo, J., Mata, M., López, G., Marsal, J. 2011. A comparative study of apple and pear tree water consumption measured with two weighing lysimeters. *Irrigation Science*, 29(1):55-63.

- Goldhamer, D.A., Salinas, M., Crisosto, C., Day, K.R., Soler, M., Moriana, A. 2002. Effects of regulated deficit irrigation and partial root zone drying on late harvest peach tree performance. *Acta Horticulturae*, 592: 343-350.
- Goldhamer, D.A., Viveros, M., Slinas, M. 2006. Regulated deficit irrigation in almonds: effects of variations in applied water and stress timing on yield and yield components. *Irrigation Science*, 24: 101-114.
- González-Altozano, P., Castel, J.R. 1999. Regulated deficit irrigation in 'Clementina de Nules' citrus trees. I. Yield and fruit quality effects. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 74: 706-713.
- Harrison, R.D., Daniell, J.W., Cheshire, J.M. 1989. Net photosynthesis and stomatal conductance of peach seedlings and cutting in response to changes in soil water potential. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 114(6): 986-990.
- Holmes, J.W., Taylor, S.A., Richards, S.J., 1967. Measurements of soil water. En: R.M. Hagan, H.R. Haise, T.W. Edminister (eds.) *Irrigation of Agricultural Lands, Agronomy Monograph nº11*, American Society of Agronomy. Madison, WI. pp. 275-303.
- Hueso, J.J., Cuevas, J. 2010. Ten consecutive years of regulated deficit irrigation probe the sustainability and profitability of this water saving strategy in loquat. *Agricultural Water Management*, 97: 645-650.
- Iglesias, I. y Carbó, J. 2006. Patrones de melocotonero. Dossier Tècnic nº 17. Ed: Direcció General de Producció, Innovació e Indústries Agroalimentàries. Departament de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Generalitat de Catalunya. 23pp.
- INFO. 2014. Informe sectorial. El sector hortofrutícola en la Regió de Murcia, 28 pp.
- Intrigliolo, D.S. and Castel, J.R. 2010. Response of plum trees to deficit irrigation under two crop levels: tree growth, yield and fruit quality. *Irrigation Science*, 28: 525-534.

- Intrigliolo, D.S., Pérez, D., Risco, D., Yeves, A., Castel, J.R. 2012. Yield components and grape composition responses to seasonal water deficits in Tempranillo grapevines. *Irrigation Science*, 30: 339-349.
- Intrigliolo, D.S., Bonet, L., Nortes, P.A., Puerto, H., Nicolás, E., Bartual, J. 2013. Pomegranate trees performance under sustained and regulated deficit irrigation. *Irrigation Science*, 31: 959-970.
- Kumar, M., Rawat, V., Rawat, J.M.S., Tomar, Y.K., 2010. Effect of pruning intensity on peach yield and fruit quality. *Scientia Horticulturae*, 125: 218–221.
- Laribi, A.I., Palou, L., Intrigliolo, D.S., Nortes, P.A., Rojas-Argudo., C., Taberner, V., Bartual, J., Pérez-Gago, M.B. 2013. Effect of sustained and regulated deficit irrigation on fruit quality of pomegranate cv. “Mollar Elche” at harvest and during cold storage. *Agricultural Water Management*, 125: 61-70.
- Layne, D. R., Bassi, D. (Eds.). 2008. The peach: botany, production and uses. CABI. 615 pp.
- Le Roux, X., Lacointe, A., Escobar-Gutiérrez, A., Le Dizès, S. 2001. Carbon-based models of individual tree growth: A critical appraisal. *Annals of Forest Science*, 58: 469-506.
- Lescourret, F., Génard, M. 2005. A virtual peach fruit model simulating changes in fruit quality during the final stage of fruit growth. *Tree Physiology*, 25: 1303-1315.
- Lescourret, F., Moitrier, N., Valsesia, P., Génard, M. 2011. QualiTree, a virtual fruit tree to study the management of fruit quality. I. Model development. *Trees*, 25: 519–530.
- Li, Z. 1984. Peach germplasm and breeding in China. *HortScience*, 19:348–35.
- Li, S.H., Huguet, J.G., Schach, P.G., Orlando, P. 1989. Response of peach tree growth and cropping to soil water deficit at various phenological stages of

- fruit development. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 64:541-552.
- Libro blanco del agua en España. 2000. Secretaría de Estado de Aguas y Costas. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. 637 pp.
- Lo Bianco, R., Rieger, M., Sung, S.J.S., 2000. Effect of drought on sorbitol and sucrose metabolism in sinks and sources of peach. *Physiologia Plantarum*, 108: 71–78.
- López, G., Arbonès, A., del Campo, J., Mata, M., Vallverdú, X., Girona, J., Marsal, J. 2008. Response of peach trees to regulated deficit irrigation during stage II of fruit development and summer pruning. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 6 (3): 479-491.
- López, G., Favreau, R.R., Smith, C., Dejong, T.M. 2010b. L-PEACH: A computer-based model to understand how peach trees grow. *HortTechnology*, 20(6): 983-990.
- López, G., Behboudian, M.H., Vallverdu, X., Mata, M., Girona, J., Marsal, J. 2010a. Mitigation of severe water stress by fruit thinning in ‘O’Henry’ peach: implications for fruit quality. *Scientia Horticulturae*, 125: 294–300.
- López, G., Behboudian, M.H., Echeverria, G., Girona, J., Marsal, J., 2011. Instrumental and sensory evaluation of fruit quality for ‘Ryan’s Sun’ peach grown under deficit irrigation. *HortTechnology* 21, 712–719.
- López-Urrea, R., Montoro, A., Mañas, F., López-Fuster, P., Fereres, E. 2012. Evapotranspiration and crop coefficients from lysimeter measurements of mature ‘Tempranillo’ wine grapes. *Agricultural Water Management*, 112: 13-20.
- MAGRAMA, 2012. Encuesta sobre plantaciones de frutales, olivar y uva de mesa. Encuesta sobre rendimientos y cultivos en España (ESYRCE). Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

- MAGRAMA, 2013. Anuario de estadística 2012. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Capítulo 13.
- Marini, R.P., Sowers, D.L. 1994. Peach fruit weight is influenced by crop density and fruiting shoot length but not position on the shoot. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 119: 180–184.
- Marsal, J., López, G., Mata, M., Girona, J. 2012. Postharvest deficit irrigation in “Conference” pear: Effects on subsequent yield and fruit quality. *Agricultural Water Management*, 103: 1-7.
- Marsal, J., Johnson, S., Casadesus, J., López, G., Girona, J., Stöckle, C. 2014. Fraction of canopy intercepted radiation relates differently with crop coefficients depending on the season and the fruit tree species. *Agricultural and Forest Meteorology*, 184: 1-11.
- Mercier, V., Bussi, C., Lescourret, F., Génard, M., 2009. Effects of different irrigation regimes applied during the final stage of rapid growth on an early maturing peach cultivar. *Irrigation Science*, 27: 297–306.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. www.magrama.es/app/materialvegetal. Consultado en Octubre 2013.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1995. Normas de calidad para frutas y hortalizas. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Secretaría General de Alimentación, Madrid, 481 pp.
- Miranda Jiménez, C., Royo Díaz, J.B., 2002. Fruit distribution and early thinning intensity influence fruit quality and productivity of peach and nectarine trees. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 127: 892–900.
- Mirás-Avalos, J.M., Egea, G., Nicolás, E., Génard, M., Vercambre, G., Moitrier, N., Valsesia, P., González-Real, M.M., Bussi, C., Lescourret, F. 2011 QualiTree, a virtual fruit tree to study the management of fruit quality. II. Parameterisation for peach, analysis of growth-related processes and agronomic scenarios. *Trees*, 25:785–799.

- Mitchell, P.K., Chalmers, D.J., 1982. The effects of reduced water supply on peach tree growth and yields. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 107: 853-856.
- Montserrat, R., Iglesias, I. 2012. El vaso catalán, un eficiente sistema de conducción en melocotonero. *Dossier melocotonero. Vida rural*, 59-65.
- Mounzer, O., Conejero, W., Nicolás, E., Abrisqueta, I. 2008. Growth pattern and phenological stages of early-maturing peach trees under a Mediterranean climate. *Hortscience*, 43(6):1813–1818.
- Mounzer, O., Pedrero-Salcedo, F., Nortes, P.A., Bayona, J.M., Nicolás, E., Alarcón, J.J. 2013. Transient soil salinity under the combined effect of reclaimed water and regulated deficit drip irrigation of Mandarin trees. *Agricultural Water Management*, 120: 23-29.
- Mpelasoka, B.S., Behboudian, M.H., Mills, T.M. 2001. Effects of deficit irrigation on fruit maturity and quality of “Braeburn” apple. *Scientia Horticulturae*, 90: 279-290.
- Naor, A.; Klein, I.; Hupert, H.; Greenblat, Y.; Peres, M.; Kaufman, A. 1999. Water stress and crop level interactions in relation to nectarine yield, fruit size distribution, and water potentials. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 124: 189-193.
- 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. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 126: 140-143.
- Navarro, J.M., Pérez-Pérez, J.G., Romero, P., Botía, P. 2010. Analysis of the changes in quality in mandarin fruit, produced by deficit irrigation treatments. *Food Chemistry*, 119: 1591-1596.
- Nicolás, E., Lescourret, F., Génard, M., Bussi, C., Besset, J., 2006. Does dry matter partitioning to fruit in early- and late-ripening peach (*Prunus persica*) cultivars confirm the branch autonomy theory?. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 81: 444–448.

- Pascual, M., Villar, J.M., Domingo, X., Rufat, J. 2011. Water productivity of peach for processing in a soil with low available water holding capacity. *Acta Horticulturae*, 889: 189-195.
- Pavel, E.W., DeJong, T.M., 1993. Source and sink-limited growth periods of developing peach fruits indicated by relative growth rate analysis. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 118: 820–824.
- Payero, J.O., Suat, I. 2013. Daily energy fluxes, evapotranspiration and crop coefficient of soybean. *Agricultural Water Management*, 129: 31-43.
- Peña, M.E., Artés-Hernández, F., Aguayo, E., Martínez-Hernández, G.B., Galindo, A., Artés, F., Gómez, P.A. 2013. Effects of sustained deficit irrigation on physicochemical properties, bioactive compounds and pomegranate fruits (cv. “Mollar de Elche”). *Postharvest Biology and Technology*, 86: 171-180.
- Pérez-Pastor, A., Ruiz-Sánchez, M.C., Martinez, J.A., Nortes, P.A., Artés, F., Domingo, R. 2007. Effect of deficit irrigation on apricot fruit quality at harvest and during storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87: 2409-2415.
- Pérez-Pastor, A., Domingo, R., Torrecillas, A., Ruiz-Sánchez, M.C. 2009. Response of apricot trees to deficit irrigation strategies. *Irrigation Science*, 27: 231-242.
- Pérez-Pérez, J.G., Robles, J.M., Botía, P. 2009. Influence of deficit irrigation in phase III of fruit growth on fruit quality in “lane late” sweet orange. *Agricultural Water Management*, 96: 969-974.
- Pérez-Sarmiento, F., Alcobendas, R., Mounzer, O., Alarcón, J.J., Nicolás, E. 2010. Effects of regulated deficit irrigation on physiology and fruit quality in apricot trees. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8: 86-94.
- Pruitt, W. O., Angus, D. E. 1960. Large weighing lysimeter for measuring evapotranspiration. *American Society of Agricultural Engineers*, 3(2): 13-18.

- Razouk, R., Ibijbijem, J., Kajji, A., Karrou, M. 2013. Response of peach, plum and almond to water restrictions applied during slowdown periods of fruit growth. *American Journal of Plant Sciences*, 4: 561-570.
- Rinaldi, M., Ventrella, D., Gagliano, C. 2007. Comparison of nitrogen and irrigation strategies in tomato using CROPGRO model. A case study from Southern Italy. *Agricultural Water Management*, 87: 91-105.
- Romero, P., Botía, P. García, F. 2004. Effects of regulated deficit irrigation under subsurface drip irrigation conditions on vegetative development and yield of mature almond trees. *Plant and Soil*, 260: 169-181.
- Romero, P., Navarro, J.M., Pérez-Pérez, J.G., García-Sánchez, M., Gómez-Gómez, A., Porras, I., Martínez, V., Botía, P. 2006. Deficit irrigation and rootstock: their effects on water relations, vegetative development, yield, fruit quality and mineral nutrition of *Clemenules* mandarin. *Tree Physiology*, 26: 1537-1548.
- Romero, P., Gil-Muñoz, R., del Amor, F.M., Valdés, E., Fernández, J.I., Martínez-Cutillas, A. 2013. Regulated deficit irrigation based upon optimum water status improves phenolic composition in Monastrell grapes and wines. *Agricultural Water Management*, 121: 85-101.
- Ruiz-Sánchez, M.C., Torrecillas, A., Pérez-Pastor, A., Domingo, R. 2000. Regulated deficit irrigation in apricot trees. *Acta Horticulturae*, 537:759-766.
- Treeby, M.T., Henriod, R.E., Bevington, K.B., Milne, D.J., Storey, R. 2007. Irrigation management and rootstock effects on navel orange [*Citrus sinensis* (L.) Osbeck] fruit quality. *Agricultural Water Management*, 91: 34-22.
- Vallverdú, X., Girona, J. 2012. Sensory quality and consumer acceptance of “Tardibelle” peach are improved by deficit irrigation applied during stage II of fruit development. *Hortscience*, 47(5): 656-659.

- 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.
- Whisler, F.D., Acock, B., Baker, D.N. 1986. Crop simulations models in agronomic systems. *Advances in Agronomy*, 40: 141-208.
- Williamson, J.G., Coston, D.C. 1990. Planting method and irrigation rate influence vegetative and reproductive growth of peach planted at high density. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 115(2): 207-212.
- Wu, B.H., Génard, M., Lescourret, F., Gómez, L., Li, S.H. 2002. Influence of assimilate and water supply on seasonal variation of acids in peach (cv Suncrest). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82(15): 1829-1836.
- Wu, B.H., Ben Mimoun, M., Génard, M., Lescourret, F., Besset, J., Bussi, C., 2005. Peach fruit growth in relation to the leaf-to-fruit ratio, early fruit size and fruit position. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 80: 340–345.
- Zapata, N., Nerilli, E., Martinez-Cob, A., Chalghaf, I., Chalghaf, B., Fliman, D., Playan, E. 2013. Limitations to adopting regulated deficit irrigation in stone fruit orchards: a case study. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 11(2): 529-546.
- Zarrouk, O., Francisco, R., Pinto-Marijuan, M., Brossa, R., Santos, R.R., Pinheiro, C., Costa, J.M., Lopes, C., Chaves, M.M. 2012. Impact of irrigation regime on berry development and flavonoids composition in Aragonez (Syn. Tempranillo) grapevine. *Agricultural Water Management*, 114: 18-29.
- Zegbe, J.A., Serna-Pérez, A. 2011. Partial root-zone drying maintains fruit quality of “Golden Delicious” apples at harvest and postharvest. *Scientia Horticulturae*, 127: 455-459.

ANEXO I

Índice de impacto de las publicaciones

(Fuente: ISI Web of Knowledge, 2012. JCR Science Edition)

Publicación 1

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. *Scientia Horticulturae*; 142, 128-135.

Factor de Impacto de la revista *Scientia Horticulturae*

- Factor de Impacto: 1.396 (Q2; 9/32 Horticulture)

Publicación 2

Mirás-Avalos, J.M., **Alcobendas, R.**, Alarcón, **J.J.**, Pedrero, F., Valsesia, P., Lescourret, F., Nicolás, E. 2013. Combined effects of water stress and fruit thinning on fruit and vegetative growth of a very early-maturing peach cultivar: assessment by means of a fruit tree model, QualiTree. *Irrigation Science*; 31(5): 1039-1051

Factor de Impacto de la revista *Irrigation Science*

- Factor de Impacto: 2.289 (Q1; 12/80 Water Resources)

Publicación 3

Alcobendas, R., Mirás-Avalos, J.M., Alarcón, **J.J.**, Nicolas, E. 2013. Effects of irrigation and fruit position on size, colour, firmness and sugar contents of fruits in a mid-late maturing peach cultivar. *Scientia Horticulturae*; 164, 340-347.

Factor de Impacto de la revista *Scientia Horticulturae*

- Factor de Impacto: 1.396 (Q2; 9/32 Horticulture)

Publicación 4

Mirás-Avalos, J.M., **Alcobendas, R.**, Alarcón, **J.J.**, Valsesia, P., Génard, M., Nicolás, E. 2013. Assessment of the water stress effects on peach fruit quality and size using a fruit tree model, QualiTree. *Agricultural Water Management*; 128: 1-12.

Factor de Impacto de la revista *Agricultural Water Management*

- Factor de Impacto: 2.203 (Q1; 15/78 Water Resources)

ANEXO II

A. Imágenes del árbol control, cv. "Flordastar", obtenidas con 'QualiTree'.

1. Vistas aéreas

C. Imágenes del árbol bajo RDC, cv. "Catherine", obtenidas con 'QualiTree'.

1. Vistas aéreas

2. Vistas frontales

ANEXO III

Índice de figuras

Figura 4.1.	Curva de crecimiento de fruto (doble sigmoidea) en “Flordastar”.....	27
Figura 4.2.	Distribución de la producción de melocotón en el mundo.....	31
Figura 4.3.	Distribución de la superficie de melocotón según variedades. Año 2012.....	32
Figura 4.4.	Destino de la producción de melocotón en España.....	33
Figura 4.5.	Principales zonas productoras de melocotón en la R. de Murcia.....	34
Figura 4.6.	Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0), bajo condiciones estándar (ET_c).....	37
Figura 5.2.1	Unidad Fructífera y sus componentes.....	65

Índice de fotografías

Fotografía 4.1. Melocotonero cv. “Catherine”	24
Fotografía 4.2. Detalle de la floración del melocotonero.....	25
Fotografía 4.3. Detalle de poda de fructificación.....	28
Fotografía 4.4. Variedad extra-temprana “Flordastar”	30
Fotografía 4.5. Variedad de media estación “Catherine”	30
Fotografía 4.6. Melocotones de la variedad “Catherine” para consumo en fresco.....	34
Fotografía 4.7. Detalle de hoja de melocotonero cubierta para la medida del potencial hídrico foliar con cámara Scholander.....	36
Fotografía 5.1.1. Medida del diámetro ecuatorial de los frutos con calibre digital.....	50
Fotografía 5.1.2. Texturómetro LR10K, Lloyd Instruments.....	50
Fotografía 5.2.1. Imagen de uno de los árboles utilizados para las medidas de arquitectura.....	68
Fotografía 5.3.1. Medida de la altura y diámetro longitudinal y transversal, de la copa del árbol.....	92
Fotografía 5.3.2. Valorador Metrohm Titrino 785 DMP para la medida del pH y la acidez titulable de los frutos.....	93
Fotografía 5.3.3. . Medida del color de los frutos con colorímetro Minolta CR-300.....	93
Fotografía 5.4.1. Detalle de uno de los árboles en los que se realizaron las medidas necesarias para la determinación de la arquitectura.....	109

Índice de abreviaturas

AST	Área de la sección transversal del tronco
AT	Acidez titulable
cv	Cultivar
DPF	Días después de la plena floración
ET _c	Evapotranspiración del cultivo
ET ₀	Evapotranspiración de referencia del cultivo
FDR	Frequency Domain Reflectometry
HPLC	High performance liquid chromatography
IM	Índice de madurez
K _c	Coeficiente de cultivo
RDC	Riego deficitario controlado
RECMR	Raíz cuadrada del error cuadrático medio relativo
SS	Sólidos solubles
TDR	Time domain reflectometry
UF	Unidades fructíferas
RGR	Tasa inicial de crecimiento relativo
DM	Materia seca

Abbreviations index

cv	Cultivar
DAFB	Days alter full bloom
DM	Dry mass
ET _c	Crop evapotranspiration
ET ₀	Crop reference evapotranspiration
FDR	Frequency Domain Reflectometry
FU	Fruiting units
HPLC	High performance liquid chromatography
K _c	Crop coefficient
MI	Maturity index
RDI	Regulated deficit irrigation
SSC	Soluble solids content
TA	Titrateable acidity
TDR	Time domain reflectometry
TCSA	Trunk-cross sectional area
RGR	Relative growth rate
RRMSE	Relative root mean square error