

Universidad
Politécnica
de Cartagena



industriales
etsii UPCT

Influencia del riego deficitario controlado y agua regenerada en árboles jóvenes de pomelo

Máster en Ingeniería Ambiental y de Procesos Químicos y Biotecnológicos

Alumna: Elvira Cánovas Ros

Director: Juan Ignacio Moreno Sánchez

Cartagena, 16 de Febrero de 2012



CSIC

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

**Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura
(CEBAS-CSIC)**

**Máster en Ingeniería Ambiental y de Procesos
Químicos y Biotecnológicos.**

TRABAJO FIN DE MÁSTER:

***“Influencia del riego deficitario controlado y agua
regenerada en árboles jóvenes de pomelo”***

Elvira Cánovas Ros

Murcia, 2012

Juan José Alarcón Cabañero y *Francisco Pedrero Salcedo* del Departamento de Riego del Centro de Edafología y Biología aplicada del Segura del Consejo Superior de Investigaciones y *Juan Ignacio Moreno Sánchez* profesor titular del Departamento de Ingeniería Química y Ambiental de la Universidad Politécnica de Cartagena

CERTIFICAN:

Que el presente Trabajo Fin de Máster: **“Influencia del riego deficitario controlado y agua regenerada en árboles jóvenes de pomelo”** presentado por *Elvira Cánovas Ros*, ha sido realizado bajo nuestra dirección para optar al título de Máster en Ingeniería Ambiental y de Procesos Químicos y Biotecnológicos.

Y para que conste a los efectos oportunos, firmamos la presente en Murcia a 16 de Febrero de 2012.

Fdo: Juan José Alarcón Cabañero

Fdo: Francisco Pedrero Salcedo

Fdo: Juan Ignacio Moreno Sánchez

Fdo: Elvira Cánovas Ros

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Juan José Alarcón Cabañero, Profesor de Investigador del Departamento de Riego del CEBAS-CSIC, permitirme hacer el proyecto fin de Máster sobre este tema tan interesante como necesario en nuestra Región y, durante una temporada, formar parte de su equipo compuesto por: Emilio Nicolás Nicolás, Francisco Pedrero Salcedo, Francisco Pérez Sarmiento, José María Bayona Gambín, Oussama Mounzer, Pedro A. Nortes Tortosa y Rosalía Alcobendas Puig, a los cuales también quiero agradecer enormemente su acogida, ayuda y apoyo en todo momento.

Un especial y profundo agradecimiento a Francisco Pedrero Salcedo, tutor y supervisor de mi proyecto, por transmitirme su ilusión, por su esfuerzo, por ser mi guía, por su gran ayuda y apoyo hacia mí durante todo el periodo.

Y por último, darles las gracias a mi familia y amigos por darme los medios y el apoyo necesario para poder realizar este Máster y avanzar en la vida.

ÍNDICE

1. Introducción.....	1
1.1 Recursos hídricos mundiales. Problemática actual	1
1.2. Recursos hídricos no convencionales.....	2
1.2.1. Agua regenerada.....	2
1.2.1.2 Agua regenerada en la agricultura	4
1.3. Estrategias para el uso eficiente del agua en la agricultura.....	6
1.3.1. Riego deficitario.....	6
1.3.1.2 Riego deficitario controlado y agua regenerada.....	7
2. Materiales y Métodos	8
2.1. Condiciones experimentales	8
2.2. Diseño experimental y manejo del riego	9
2.3. Análisis de Agua	12
2.4. Análisis de Suelo.....	14
2.5. Análisis de Hoja.	15
2.6. Estado hídrico, intercambio gaseoso y crecimiento.....	16
2.7. Producción y calidad de la fruta	17
3. Resultados y discusión.....	18
3.1 Calidad del agua de riego	18
3.2 Acumulación de sales en el suelo.....	22
3.3 Contenido del agua en el suelo.....	24
3.4 Relaciones planta-agua	25
3.5 Análisis de hoja	27
3.6 Crecimiento vegetativo, producción y calidad del fruto.....	30
5. Bibliografía.....	35

Índice de figuras

Figura 1: Ubicación de la plantación experimental en Campotejar, Murcia, España	8
Figura 2: Vista de la parcela experimental de 0.5 ha. ubicado en Campotejar, (Murcia), con árboles jóvenes de pomelo de 5 años.....	9
Figura 3: Ubicación de la parcela experimental de pomelos respecto al Canal de trasvase Tajo-Segura, la EDAR de Molina Norte y el cabezal de riego independiente.	10
Figura 4: Tratamientos de Riego: los tratamientos Control con riego al 100% de la ETc durante todo el período vegetativo (sección azul), los tratamientos RDC en 2008 al 50% de la ETc durante tres semanas a partir de la última semana de junio (sección amarilla) y al 30% hasta la segunda semana de agosto (sección naranja) y en 2009, las dosis de riego al 50% de la ETc durante todo el período de RDC (sección amarilla).	11
Figura 5: Disposición aleatoria de los seis tratamientos en el cultivo de pomelo, con dos repeticiones por tratamiento: el color naranja representa el tratamiento T0 (AT- C), el morado para el tratamiento T1 (AT- RDC), el verde para el tratamiento T2 (AD- C), el rojo indica el tratamiento T3 (AD-RDC), el amarillo para el tratamiento T4 (AM- RDC) y el azul para el tratamiento T5 (AM-C).....	11
Figura 6: ETo, lluvia, riego control y RDC (m ³ /mes) en Campotejar. Los valores son el promedio mensual de los datos recopilados durante 2007, 2008 y 2009.....	12
Figura 7: Equipos para la evaluación de la calidad del agua: a) medidor de oxígeno disuelto, b) pH-metro, c) turbidímetro y d) equipos multi-rango, conductividad eléctrica (CE) y sólidos totales disueltos (STD).	13
Figura 8: Coliformes fecales y E. coli aislados tras la incubación durante 24 horas a 44,5 y 37°C, respectivamente.	14
Figura 9: Mediciones en suelo: a) muestras de extracto de pasta saturada con barrena, a 0,3 m de distancia del emisor, a 0,2, 0,4 y 0,6 m de profundidad y b) sonda de neutrones, modelo Troxler 4300, Raleigh, N.C, a 0,2 m de distancia del emisor.....	15
Figura 10: a) Equipo de medida del potencial de tallo se utilizando una cámara de presión: modelo 3000, Soil Moisture Equipment Corp., Santa Barbara, California, EEUU y b) Equipo de fotosíntesis portátil: Li-6400, Li-Cor, Lincoln, NE, EE.UU.....	17
Figura 11: Evolución mensual de los indicadores de calidad del agua de riego: conductividad eléctrica, CE, dS m ⁻¹ , relación de absorción de sodio, RAS, y composiciones químicas: Na, B, K y cloruros en ppm, de las tres fuentes de agua de riego: AT, agua trasvase línea azul, AD, agua regenerada, línea verde y AM, agua de la Comunidad de Regantes línea naranja, durante los tres años de la experiencia, 2007, 2008 y 2009.....	20

Figura 12: Evolución mensual de los índices de calidad microbiológica medidos, coliformes fecales y concentraciones de E. coli, de las tres fuentes de agua de riego: agua del transvase, AT, líneas azules, agua regenerada, AD, líneas verdes y agua de la Comunidad de Regantes, AM, líneas rojas, durante los tres años del experimento, 2007, 2008 y 2009..... 22

Figura 13: Conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada (CEe) ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) y la relación de absorción de sodio (RAS), medido en muestras de suelo en 2008 y 2009 en tres muestras tomadas a 20,40 y 60 cm de profundidad y a 30 cm del emisor. Cada columna representa el promedio de los dos años. El azul representa el agua de transvase (AT), el verde corresponde al agua regenerada (AD) y el naranja al agua de la Comunidad de Regantes de Campotejar (AM), las columnas ralladas representan el riego deficitario controlado (RDC) y las no ralladas el riego control (C). Las letras indican diferencias significativas según $\text{LSD}_{0.05}$ 23

Figura 14: Evolución del contenido de agua en el suelo, medido en la capa superior de 1m de profundidad durante el periodo 2008-2009 (Stock hídrico, $\text{mm}\cdot\text{m}^{-1}$). Cada color representa una fuente de agua de riego, agua del transvase, AT, color azul, agua regenerada, AD, color verde y agua de la Comunidad de Regantes, AM, color marrón, los símbolos rellenos y líneas continuas pertenecen al riego Control y los vacíos y líneas discontinuas al riego RDC. * Indica diferencias significativas según $\text{LSD } 0.05$.. 24

Figura 15: Evolución del potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallo}) durante el periodo 2008-2009. Cada punto es el promedio de medición de dieciséis medidas. Cada fuente de agua de riego está representada con un color, agua del transvase, AT, color azul, agua regenerada, AD, color verde y el agua de la Comunidad de Regantes, AR, color naranja. Los símbolos rellenos se refieren a los tratamientos Control y los vacíos a los tratamientos RDC. Las líneas discontinuas representan los periodos RDC. * Indica diferencias significativas según $\text{LSD}0.05$ 25

Figura 16: Fotosíntesis neta (P_n) y la conductancia estomática (g_s) en 2008. Cada punto representa el promedio de medición de dieciséis medidas, la región punteada representa el periodo RDC. Los tratamientos representados son el agua del transvase, AT, en azul y el agua regenerada, AD, en naranja. * Indica diferencias significativas según $\text{LSD}0.05$ 26

Figura 17: Fotosíntesis neta (P_n) y la conductancia estomática (g_s) en 2009. Cada punto representa el promedio de medición de dieciséis medidas, la región punteada representa el periodo RDC. Los tratamientos representados son el agua del transvase, AT, en azul y el agua regenerada, AD, en naranja. * Indica diferencias significativas según $\text{LSD}0.05$ 27

Figura 18: Concentración media de Boro (ppm) en 2008 y 2009. Las columnas azules representan los tratamientos AT, agua transvase, el color naranja indica los tratamientos AM, agua de la comunidad de regantes y el color verde indica los tratamientos AD, agua regenerada. Las columnas lisas son corresponden a tratamientos control y las ralladas a tratamientos RDC. Las letras en cada columna indican las diferencias significativas de acuerdo con $\text{LSD}_{0.05}$ 28

Figura 19: Concentración media de Cloro (%) en 2008 y 2009. Las columnas azules representan los tratamientos AT, agua transvase, el color naranja indica los tratamientos AM, agua de la comunidad de regantes y el color verde indica los tratamientos AD, agua regenerada. Las columnas lisas son corresponden a tratamientos control y las ralladas a tratamientos RDC. Las letras en cada columna indican las diferencias significativas de acuerdo con $LSD_{0.05}$ 29

Figura 20: Concentración media de Sodio (Na) en %, en 2008 y 2009. Las columnas azules representan los tratamientos AT, agua transvase, el color naranja indica los tratamientos AM, agua de la comunidad de regantes y el color verde indica los tratamientos AD, agua regenerada. Las columnas lisas son corresponden a tratamientos control y las ralladas a tratamientos RDC. Las letras en cada columna indican las diferencias significativas de acuerdo con $LSD_{0.05}$ 30

Índice de tablas

Tabla 1: Medidas de copa de árbol (m^3) y diámetro de tronco (mm). (AT- agua transvase, AD - agua regenerada, AM - agua de la Comunidad regantes, C – riego control, RDC – riego deficitario controlado). En 2007, 2008 y 2009. Valores medios \pm error. Las letras en cada columna indican diferencias significativas según $LSD_{0.05}$ 31

Tabla 2: Datos de producción en 2008 y 2009. $Kg \cdot \text{árbol}^{-1}$, n° de frutos $\cdot \text{árbol}^{-1}$ y UEA (uso eficiente del agua). AT- agua transvase, AD - agua regenerada, AM - agua de la Comunidad regantes, C – riego control, RDC - riego deficitario controlado. Las letras en cada columna indican diferencias significativas según $LSD_{0.05}$ 32

Tabla 3: Parámetros medios de calidad del fruto en 2008 y 2009. Espesor piel (mm), volumen de zumo (ml), $^{\circ}$ Brix, Acidez total ($mg \cdot g^{-1}$) índice de madurez y Vitamina C ($mg \cdot 100g^{-1}$) (AT- agua transvase, AD - agua regenerada, AR - agua de la Comunidad Regantes, C – riego control, RDC – riego deficitario controlado)..... 33

Resumen

El gran reto de la agricultura en el futuro próximo será, por una parte, la tarea de incrementar la producción con menos agua, particularmente en países con limitados recursos hídricos (Fererres y Connor, 2004), y por otra parte el uso seguro para el riego de los recursos hídricos no convencionales, sustituyendo a los recursos hídricos potables.

La Cuenca del Segura (Murcia), es la única cuenca en España cuyos recursos naturales no pueden cubrir su demanda de agua. El principal uso es el agrícola, con un 84% (CHS, 2009), por esta razón, el uso de las aguas regeneradas en la agricultura murciana es especialmente importante. En Murcia, existen en funcionamiento 92 plantas depuradoras, las cuales producen un volumen de 102 hm³ al año (ESAMUR, 2009), el cual supone un 13% de los recursos hídricos utilizados en la agricultura murciana (CARM, 2007). El mayor problema asociado al uso del agua regenerada en Murcia, es la salinidad. En esta región, el 93% de las aguas residuales tratadas, tienen una conductividad eléctrica superior a 2 dS·m⁻¹ y el 63% una conductividad eléctrica superior a 3 dS·m⁻¹ (ESAMUR, 2005). Por lo tanto, cuando estos recursos son utilizados para el riego, es necesario el uso de estrategias adecuadas de riego para el manejo del suelo, agua y planta (Mohsen y Al-Jayyousi, 1999; Voutchkov, 2004; Oweis et al., 2004; Qadir y Oster, 2004).

Las investigaciones realizadas en el campo de las aguas regeneradas normalmente utilizan aguas no salinas, y en general, poco es sabido sobre la interacción entre estrategias de riego deficitario y aguas de riego salinas. Por esta razón, el principal objetivo de este trabajo de investigación fue evaluar el efecto combinado de diferentes calidades de agua de riego y estrategias de riego deficitario en el cultivo de pomelo bajo condiciones de clima mediterráneo y estudiar sus efectos sobre la fisiología de la planta, el estado nutricional foliar, las propiedades químicas del suelo y su contenido hídrico, la producción y calidad de la fruta obtenida.

En este trabajo, se ha observado una tendencia en términos de acumulación de boro en hoja y sales en el suelo en los tratamientos de agua regenerada durante el último año de ensayo. Por lo tanto, tras estos resultados preliminares, al utilizar agua regenerada en nuestra Región, se recomienda una vigilancia intensa para evitar la acumulación de sales en el suelo y una reducción en las propiedades físicas del mismo. Las reducciones del rendimiento no fueron significativas entre los diferentes tratamientos aplicados, a pesar de que se observó una tendencia de reducción del número de frutos en el tratamiento de aguas regeneradas. Esto fue más pronunciado en condiciones de riego deficitario controlado (RDC). Por tanto, es importante destacar

que en las zonas áridas y semiáridas, la combinación de las estrategias RDC y el uso del agua regenerada salina pueden verse afectadas a largo plazo debido a la acumulación de sales y boro.

1. Introducción

1.1 Recursos hídricos mundiales. Problemática actual

El agua es un bien muypreciado y escaso, necesario para el desarrollo de la vida así como para numerosas actividades humanas. Las estimaciones indican que la hidrosfera contiene cerca de 1.386 millones de km³ de agua, de los cuales el agua salada de los mares y océanos representa el 97,5%, siendo inservible para usos directos agrícolas, industriales o humanos; el resto es agua dulce, un 2,5%, pero sólo un 1% se obtiene fácilmente, ya que gran parte está congelada en los glaciares, otro tanto en capas acuíferas subterráneas inaccesibles o permanece como humedad en el suelo. De este 1%, el sector agrícola es el mayor consumidor de agua, alcanzando un porcentaje que supera el 70-80% en algunas zonas áridas y semiáridas (Fererres y Soriano, 2007); este alto porcentaje no sólo es debido a que la superficie de riego en el mundo ha tenido que quintuplicarse para poder abastecer al crecimiento de la población (Dyson, 1999), sino porque la eficiencia del uso del agua en este sector sigue siendo baja (Postel, 1997). Tras el sector agrícola, le siguen el sector industrial con el 22% y el consumo doméstico, comercial y de otros servicios urbanos municipales que utilizan el 8% (CEDEX, 2002).

La población mundial actualmente ronda los 7 billones de habitantes, pero se estima que en 2050 esta cifra supere los 9,1 billones (ONU, 2005). Además el sector industrial cada vez requiere un mayor volumen de agua. Se estima que en el año 2015 el uso industrial alcanzará el 34% a costa de reducir al 58% los volúmenes destinados para riego (PNUMA, 2000). Ante esta situación muchas regiones del mundo han alcanzado el límite de aprovechamiento del agua, lo que ha provocado la sobreexplotación los recursos hídricos superficiales y subterráneos, creando un fuerte impacto en el medioambiente. Todas estas circunstancias están creando una crisis del agua a nivel mundial.

En España los recursos hídricos se distribuyen de manera desigual, siendo la Cuenca Mediterránea la más deficitaria. En el caso de la Región de Murcia este déficit de agua es debido principalmente al clima semiárido, con escasas precipitaciones (200 - 300 mm/año) distribuidas irregularmente en el tiempo y en el espacio y una demanda evapotranspirativa muy alta, por lo que la Cuenca del Segura es la única del territorio nacional español con déficit hídrico estructural (CARM, 2007). El regadío constituye, con diferencia, el principal uso del agua en cuanto a volúmenes de recursos hídricos consumidos, y es el motor básico que ha contribuido al desarrollo socioeconómico de

la Región de Murcia (CARM, 2007). Los principales cultivos de regadío en dicha región son frutales, destacando los cítricos, limonero y naranjo, con un 30,9 y 19,6% respectivamente (ESYRCE, 2010). La Región de Murcia produce más del 52% de la producción total de pomelo de toda España (CARM, 2009).

La Región de Murcia ocupando el 3% de la superficie total de la península, consume el 3,4 % del agua total disponible en España (INE, 2008) y es capaz de producir el 20% de las exportaciones de frutas y hortalizas de toda España (FEPEX, 2010). Para conservar esta agricultura de vanguardia se hace necesario pensar en nuevas estrategias de riego, selección de cultivos adaptados a las condiciones locales, un manejo aun más eficiente del agua y hacer un uso adecuado de los recursos hídricos no convencionales para poder hacer frente a esta situación de escasez de agua (Pedrero, 2011).

1.2. Recursos hídricos no convencionales

Ante la mayor demanda de agua, se crea la necesidad de una nueva cultura del agua consistente en conservar, gestionar correctamente y reciclar este recurso (Arrojo, 1998), pudiéndose sustituir las fuentes convencionales de agua, básicamente superficial y subterránea, por recursos hídricos no convencionales como el agua desalada, el agua de drenaje, el agua de escorrentía y la utilización de agua regenerada (Oron et al., 2001). De esta forma, parte del agua destinada a la agricultura, y en especial aquella de buena calidad, se puede reservar para los usos más exigentes de calidad como agua potable y agua para fines de conservación como los caudales ecológicos (Bouwer, 1992; Arrojo, 1998; Vergés, 1998).

1.2.1. Agua regenerada

Se entiende por “agua regenerada” aquel agua residual que después de ser sometida a un proceso de tratamiento, adquiere una calidad satisfactoria para un uso en particular (Asano, 1998), es decir, el agua regenerada no es otra que “agua residual tratada” o “efluente tratado”, que satisface los criterios para poder ser usada nuevamente. Sin embargo, se prefiere el termino agua regenerada porque conlleva una connotación ambiental positiva y evita las connotaciones sociales negativas que provocan los términos “reutilización de las aguas residuales” o “reutilización del efluente tratado de las aguas residuales” (Grobicki y Cohen, 1999).

Las primeras evidencias de la reutilización de aguas residuales corresponden a la antigua Grecia, las cuales han sido recogidas y documentadas por Barty-King (1992), Angelakis y Spyridakis (1996), Asano y Levine (1996) y Asano (2001). Pero el

uso de las aguas regeneradas comenzó a principios de los años 20 en Estados Unidos, concretamente en los estados de Arizona y California (Segui, 2004). Durante la década de los 70 se iniciaron estudios en los que el agua residual depurada era utilizada como recurso hídrico en zonas forestales, campos de golf o en cultivos de forraje (Sopper y Kardos, 1973; Bole, 1978; Burton, 1979) con el objetivo de incrementar su biomasa. Ya en esos primeros resultados se indicaba la efectividad de la utilización de ese tipo de agua no sólo para la nutrición de especies vegetales sino también para la mejora de las características del suelo. En los años 80 se manejó, con éxito, el agua residual depurada para riego de árboles frutales como manzanos (Neilsen, 1989a) o melocotoneros (Basiouny, 1984), y en algún otro tipo de cultivos como la vid (Neilsen, 1989b), el algodón (Feigin, 1984) y algunos cereales, maíz y alfalfa (Campbell, 1983). También se extendió su utilización en especies ornamentales con menores limitaciones de uso (Hasek, 1986). En cultivos de cítricos no se desarrollaron investigaciones de riego con aguas residuales hasta finales de los 80 principios de los 90. Los primeros ejemplos los encontramos en los cultivos de Florida (Lapeña et al., 2002).

El desarrollo actual en el campo de la tecnología de regeneración permite obtener efluentes de agua regenerada de diversas calidades, incluso hasta un nivel tan alto como la del agua potable. La finalidad es conseguir un producto que sea adecuado para ser empleado en diferentes usos (agrícola, industrial, recreativo, municipal, etc.). La regeneración y reutilización de aguas residuales tienen un papel cada vez más importante dentro de la administración y manejo del agua, especialmente en aquellos países y regiones donde existen problemas de escasez, o bien en los que las fuentes convencionales de suministro han sido contaminadas. La práctica de regenerar y reutilizar aguas residuales está surgiendo como una fuente de suministro técnicamente viable. Esto conlleva que esta práctica debe ser incluida dentro de la gestión integral del agua y asumida dentro de la estructura de las instituciones del sector hídrico (Segui, 2004).

En numerosos países industrializados se han desarrollado muchos proyectos e investigaciones para la reutilización de las aguas residuales, obteniendo, además de la reutilización del agua regenerada para satisfacer demandas, beneficios adicionales de protección del medioambiente y prevención de riesgos para la salud. La región Mediterránea, debido a sus condicionantes hidroclimáticas, necesita incorporar la reutilización de agua dentro del balance de sus recursos hídricos como estrategia. Israel fue el pionero en la reutilización moderna aunque con cierta rapidez se incorporaron a esta práctica Chipre, Túnez y posteriormente otros países de la cuenca.

En Italia la reutilización del agua regenerada está básicamente enfocada a usos agrícolas; sin embargo, existen algunos sistemas para la reutilización de aguas regeneradas en la industria y en el riego de jardines. En los últimos años se ha incrementado la reutilización en las zonas áridas y semiáridas del sur de Italia, mientras que en el norte la reutilización se ha realizado para prevenir la contaminación de los cuerpos receptores (IEA, 2010). La mayor parte de los proyectos e instalaciones de depuración de aguas en España se centran principalmente en las Islas Baleares, Islas Canarias, Andalucía, la Comunidad Valenciana y Murcia (INE, 2008). Actualmente el sector agrícola consume un 75% del agua regenerada en España (MARM, 2007). Murcia con total de 92 plantas depuradoras trató 102 hm³ de agua residual en 2009 (ESAMUR, 2010), destinada mayoritariamente a uso agrícola. Este volumen supone un 13% de los recursos hídricos utilizados en la agricultura murciana (CARM, 2007).

1.2.1.2 Agua regenerada en la agricultura

La calidad de las aguas de riego se deduce del conjunto de condiciones de naturaleza química, física y biológica que deben concurrir en un agua determinada para que, de forma sostenible, pueda satisfacer las necesidades de los cultivos. Las guías para su determinación califican el agua de acuerdo con los riesgos que su uso implicaría a la hidratación, integridad fisiológica, producción de los cultivos y a la conservación de los suelos. Este clásico cuadro de prevenciones tiene en los trabajos de Ayers y Westcot (1985) una, todavía actual, fuente de conocimiento. En principio, es válido para todo tipo de aguas aunque en el caso de las aguas regeneradas hay que prestar especial atención a la presencia de nutrientes, exceso de salinidad, la toxicidad por iones y los microelementos.

La adición de sales que aporta el agua de riego puede dar lugar al incremento progresivo de sales solubles totales en la rizosfera de las plantas y el consiguiente aumento de la presión osmótica en ese entorno, lo que reduce el volumen de agua asimilable, provocando, en condiciones extremas, la situación de marchitamiento permanente. La intensidad de este efecto depende de las sales solubles presentes en el agua de riego, del manejo del riego, y en su caso, del drenaje. La experiencia acumulada a lo largo de muchos años así como las investigaciones realizadas, sitúan a los cítricos y a los frutales entre los cultivos sensibles a la salinidad cuyos rendimientos suelen disminuir cuando la conductividad eléctrica del agua de riego supera el valor de 1,1 dS m⁻¹ (IEA, 2010). Los problemas de salinidad en el suelo se pueden paliar mediante lavado y drenaje (IEA, 2010).

Los problemas de toxicidad se producen en el interior de las plantas cuando ciertos cationes, absorbidos desde la solución del suelo, se acumulan en las hojas durante la transpiración hasta niveles que provocan daños en las plantas (Ayers y Westcot, 1985). Sustancias frecuentes en las aguas de riego como cloruro, sodio y boro son susceptibles de provocar toxicidades en los cultivos.

La toxicidad por Cloruro (Cl^-) es quizás una de las más conocidas y frecuentes. Este ion apenas es adsorbido por el complejo arcillo-húmico del suelo, por lo que es muy móvil, fácil de absorber por las raíces y de llegar hasta las hojas donde se acumula. Cuando su concentración supera el nivel de tolerancia se manifiestan los síntomas de toxicidad y la disminución del rendimiento de los cultivos. Inicialmente, son síntomas de esta toxicidad las necrosis de los ápices foliares que suelen progresar por el borde de las hojas. En general, para cultivos sensibles, se considera como límite de tolerancia a este ion $0,5 \text{ g l}^{-1}$ en agua de riego; este valor sólo es orientativo pues la manifestación de toxicidades concretas dependerá de las condiciones particulares en cada caso estudiado. En algunos cultivos de cítricos regados con aguas de riego con concentraciones entre $0,7$ y $0,8 \text{ g l}^{-1}$ de cloruro no se han manifestado estos síntomas (Ayers y Westcot, 1985). Como en el caso de la salinidad, el problema se puede aliviar impidiendo la acumulación de cloruro en el suelo manteniendo una fracción de lavado adecuada.

La toxicidad por Sodio (Na^+) ocurre cuando existe una alta proporción en la solución del suelo. En árboles frutales y cítricos suele manifestarse cuando el contenido de sodio supera $0,3 - 0,5\%$ del peso de materia seca de las hojas (Ramos, 1996). Concentraciones de sodio superiores a $0,2 - 0,3 \text{ g l}^{-1}$ en agua de riego pueden dar lugar a la aparición de los síntomas de toxicidad causados por este ion que consisten en necrosis en los limbos foliares, cuya intensidad depende de la concentración acumulada y de la salinidad del cultivo considerado (Ayers y Westcot, 1985). Los problemas de infiltración del agua en el suelo debidos a la degradación de su estructura suelen estar relacionados con el exceso de sodio tanto en el complejo arcillo-húmico como en el agua de riego. El agua de baja conductividad y con presencia significativa de sodio puede contribuir a la eliminación de los iones divalentes de este complejo y a la destrucción de los agregados que posibilitan la circulación por el suelo y el aire requeridos por las plantas. Este efecto suele ser duradero, de difícil enmienda y limitante de la fertilidad del suelo.

La toxicidad del Boro (B) se manifiesta generalmente en las hojas más maduras, con manchas amarillas o áreas secas en los bordes y ápices de las hojas. Suele aparecer cuando la concentración supera los 300 mg de boro por kilogramo de

materia seca foliar (Ayers y Westcot, 1985). Entre los cultivos más sensibles a esta toxicidad se encuentra el limonero que puede manifestarla con concentraciones de boro en el agua de riego inferiores a $0,5 \text{ mg l}^{-1}$, como también son considerados sensibles: naranja, pomelo y albaricoquero. Estos cultivos pueden mostrar la toxicidad cuando la concentración de boro en el agua de riego se encuentra entre $0,75$ y 1 mg l^{-1} (Ayers y Westcot, 1985).

Los microelementos que mayores problemas pueden ocasionar a las plantas son: cadmio, molibdeno, níquel y zinc. La toxicidad de estos dos últimos se manifiesta en las plantas cuando es inferior a la que pudiera dañar a las personas; valores de pH elevados suelen ser incompatibles con esta toxicidad (Blancas et al., 1994).

1.3. Estrategias para el uso eficiente del agua en la agricultura

Los criterios más importantes para un uso eficiente del agua en la agricultura pasan por la elaboración de un calendario medio de riegos, favorecer la selección y mejora de cultivos más resistentes a la sequía y métodos más eficientes de riego, como el riego deficitario.

1.3.1. Riego deficitario

A nivel mundial, la mayoría de las zonas de regadío mantienen como criterio de programación del riego satisfacer las necesidades hídricas máximas del cultivo, lo que permite obtener el rendimiento máximo de la explotación pero no la máxima productividad del agua de riego. Esta estrategia resulta claramente insostenible en regiones con escasos recursos hídricos y donde la agricultura de regadío comienza a no ser prioritaria frente a la creciente demanda hídrica de otros sectores. Por lo tanto, el desafío que la agricultura de regadío debe afrontar en el futuro inmediato pasa inexorablemente por una mejora sustancial de la eficiencia de uso del agua de riego.

Numerosos estudios han demostrado que el riego deficitario puede conseguir ahorros sustanciales de agua, si bien su correcta aplicación precisa de un conocimiento riguroso del comportamiento del cultivo, ya que la respuesta al estrés hídrico varía considerablemente entre especies vegetales (Egea et al., 2008; Castel y Buj, 1993; Gelly et al., 2003; Girona et al., 2003; Crisosto et al., 2000; Li et al., 1998; Pedrero, 2011). Además de como estrategia de ahorro de agua, tradicionalmente el déficit hídrico también ha sido utilizado tanto por sus implicaciones beneficiosas sobre algunos aspectos de la calidad del fruto como por su efecto regulador sobre el vigor vegetativo de la planta.

Las necesidades hídricas de un determinado cultivo en condiciones no limitantes de agua constituyen una referencia imprescindible en riego deficitario, puesto que los aportes de agua se definen generalmente con respecto a este valor de referencia. Para alcanzar satisfactoriamente los objetivos propuestos al implantar estrategias de riego deficitario en una explotación, es importante que se disponga de un conocimiento amplio sobre la intensidad de déficit hídrico que se debe aplicar para evitar mermas importantes de cantidad y/o calidad de la producción, y la idoneidad de aplicar el déficit hídrico a lo largo de todo el ciclo de cultivo, riego deficitario sostenido (RDS), o en períodos fenológicos concretos, riego deficitario controlado (RDC) (Egea et al., 2008).

El riego deficitario controlado, consiste en reducir parcialmente el riego durante los períodos de baja sensibilidad al estrés hídrico, cuando los efectos adversos sobre la productividad se reducen al mínimo (Mitchell et al., 1986). El RDC se diseñó inicialmente como una herramienta para mejorar el rendimiento y el control del crecimiento vegetativo (Chalmers et al., 1981; Mitchell y Chalmers, 1982). Posteriormente, en varias ocasiones se observó que el uso del RDC en frutales, no sólo aumentaba la productividad del agua, sino también las ganancias de los agricultores. En otro estudio de RDC en cítricos, Castel y Buj (1993) comprobaron en naranja Sultana, que aplicando un déficit hídrico del 40%, se produjo un incremento de los azúcares del fruto.

1.3.1.2 Riego deficitario controlado y agua regenerada

Estrategias de riego deficitario se han empleado en diversos cultivos en regiones semiáridas (Lapeña et al., 2002, Naor, 2006; Egea, 2008; Pedrero, 2011). El progresivo empeoramiento de la calidad de las aguas de riego junto con la escasez de agua ha motivado un interés creciente en el uso y aplicación de agua regenerada con las estrategias de gestión eficiente del agua, como el riego deficitario controlado, para la mejora de la productividad del agua.

Esta combinación de agua regenerada y riego deficitario es propensa a producir niveles indeseables de estrés y puede tener efectos negativos en las características agronómicas del suelo por un exceso de salinidad, por lo tanto, este enfoque requiere un conocimiento preciso de la respuesta del cultivo al agua regenerada, ya que la tolerancia a la sequía varía considerablemente según la especie, cultivar y el estado de crecimiento (Egea et al., 2008). La combinación de las estrategias de riego deficitario controlado y el uso de agua regenerada puede verse

afectada a largo plazo debido a la acumulación de sales y boro en el suelo (Pedrero, 2011).

2. Materiales y Métodos

2.1. Condiciones experimentales

El experimento se llevó a cabo en una finca comercial de pomelos, durante 2007-2009, ubicada en Campotejar, al Norte de Molina de Segura, Murcia, España (38°07'13"N; 1°13'08"W) (figura 1). La parcela experimental, de 0,5 hectáreas, está cultivada con árboles jóvenes de pomelo Star Ruby de 5 años de edad "*Citrus Paradisi Macf*", injertados sobre patrón "*Citrus Macrophylla*". El marco de plantación es de 6 x 4 metros (figura 2). El suelo tiene en los primeros 90 cm de profundidad una textura limosa (42 % de arena, 26 % de arcilla y 32 % de limo), con una densidad aparente media de 1,37 g·cm⁻³.



Figura 1: Ubicación de la plantación experimental de pomelos en Campotejar, Murcia, España (38°07'13"N; 1°13'08"W).



Figura 2: Vista de la parcela experimental de árboles jóvenes de pomelo (0,5 ha).

2.2. Diseño experimental y manejo del riego

La parcela está equipada con un cabezal de riego independiente (figura 3), el cuál suministra tres fuentes de agua de diferente calidad a la parcela experimental; la primera fuente procede del trasvase Tajo-Segura (AT) ($CE \approx 1$ dS/m), la segunda es agua suministrada por la Comunidad de Regantes de Campotejar (AM) ($1 \leq CE \leq 4$), esta agua es de calidad variable en el tiempo, dependiendo de la mezcla de los recursos de agua disponible para cubrir la demanda de riego (agua subterránea, agua de trasvase y agua regenerada) y del periodo fenológico de los diferentes cultivos representativos de la misma, y la tercera es agua regenerada bombeada desde la planta de tratamiento de aguas residuales de Molina Norte (AD) ($CE \approx 3-4$ dS/m).

La depuradora de Molina norte tiene una capacidad de $9.125.000$ m³/año, actualmente trabaja a $4.403.544$ m³/año. El sistema de depuración aplicado es de fangos activos con un tratamiento terciario por ultravioleta (ESAMUR, 2010).



Figura 3: Ubicación de la parcela experimental de pomelos respecto al Canal de trasvase Tajo-Segura, la EDAR de Molina Norte y el cabezal de riego independiente.

Las dosis de riego fueron programadas mediante la ETc semanal, estimada como la evapotranspiración de referencia (ET_o), calculada con la metodología de Penman-Monteith (Allen et al., 1998) y un coeficiente de cultivo mensual (Castel et al., 1987). Se aplicó el coeficiente de correlación de cobertura propuesto por Fereres y Goldhamer (1990). El riego fue aplicado mediante riego por goteo con 3 goteros auto-compensantes por árbol de 4 l/h separados 0,9 m entre sí. El cabezal de riego está equipado con dos tipos de filtros para evitar la obturación de los goteros, un fenómeno común en el riego con aguas regeneradas (Li et al., 2011). Primero se estableció una batería de filtros de arena y después los filtros de anilla. Los datos climáticos fueron obtenidos mediante la estación agroclimática facilitada por el servicio de información agraria de Murcia (SIAM, 2010). La cantidad de agua aplicada se midió mediante contadores volumétricos instalados a pie de parcela.

En 2007 toda la plantación fue regada al 100% de la ETc, En 2008 y 2009, se diferencian dos tratamientos de riego para cada fuente de agua. Un tratamiento control (C) regado al 100% de la ETc a lo largo de todo el periodo fenológico y un tratamiento (RDC) aplicando el 50 y 30% de la ETc durante el periodo de RDC en 2008 y el 50% de ETc durante todo el periodo de RDC en 2009 (figura 4). El periodo de RDC se aplicó durante la segunda etapa de crecimiento del fruto (González-Altozano y Castel, 1999), que se extendía desde principios de junio hasta mediados de agosto. Por lo tanto, un total de 6 tratamientos con dos repeticiones se distribuyeron mediante un diseño completamente aleatorio (figura 5).

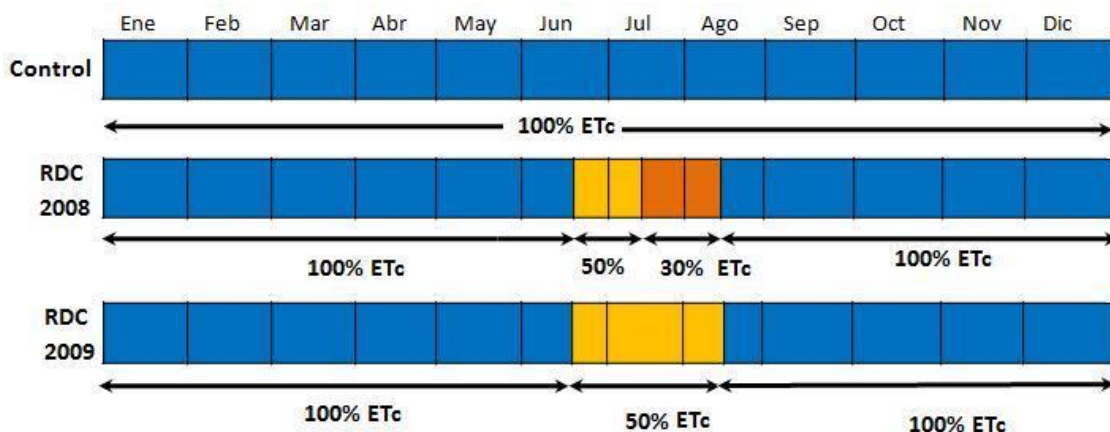


Figura 4: Tratamientos de Riego: los tratamientos Control con riego al 100% de la ETc durante todo el período vegetativo (sección azul), los tratamientos RDC en 2008 al 50% de la ETc durante tres semanas a partir de la última semana de junio (sección amarilla) y al 30% hasta la segunda semana de agosto (sección naranja) y en 2009, las dosis de riego al 50% de la ETc durante todo el período de RDC (sección amarilla).



Figura 5: Disposición aleatoria de los seis tratamientos en el cultivo de pomelo, con dos repeticiones por tratamiento: el color naranja representa el tratamiento T0 (AT- C), el morado para el tratamiento T1 (AT- RDC), el verde para el tratamiento T2 (AD- C), el rojo indica el tratamiento T3 (AD-RDC), el amarillo para el tratamiento T4 (AM- RDC) y el azul para el tratamiento T5 (AM-C).

Durante las tres temporadas, la evapotranspiración anual de referencia (ET_o) fue 1300, 1332 y 1384 mm en 2007, 2008 y 2009, respectivamente (SIAM, 2010). Los tratamientos de riego se aplicaron desde enero de 2007 hasta diciembre de 2009. La

media anual de agua de riego que se aplicó en tratamientos de control fue 226, 314 y 396 mm en 2007, 2008 y 2009, respectivamente y en tratamientos RDC fue de 269 y 345 mm, en 2008 y 2009 (figura 6). Todos los tratamientos recibieron la misma cantidad de fertilizantes, los cuales fueron aplicados a través del sistema de riego por goteo con $N_2 - P_2O_5 - K_2O$ (Kg/ ha y año) a tasas de 450 - 325 - 225 en 2007 ,158 - 530 - 481 en 2008 y 1,350 - 560 - 255 en 2009.

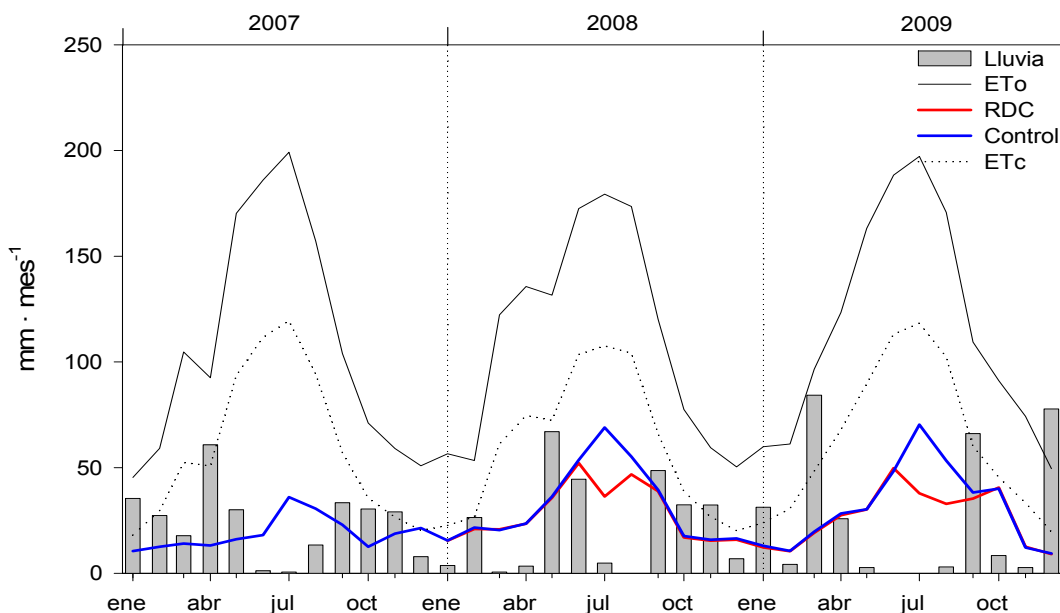


Figura 6: ETo, ETC, lluvia, riego control y RDC ($mm \cdot mes^{-1}$) en Campotejar. Los valores son el promedio mensual de los datos recopilados durante 2007, 2008 y 2009.

2.3. Análisis de Agua

Mensualmente se recogieron tres muestras de agua de cada tipo, entre 2007 y 2009, para caracterizar la calidad del agua de riego. Las muestras se recogieron en botellas de vidrio estériles, fueron transportadas directamente al laboratorio y almacenadas a 5 ° C antes de ser procesadas.

Las concentraciones de: Na, K, Ca, Mg, Fe, B, Mn, Ni, Cd, Cr, Cu, Pb y Zn se determinaron mediante espectroscopia de emisión de plasma acoplada (ICP-OES ICAP 6500 Duo Thermo, Inglaterra), aniones (cloruros, nitratos, fosfatos y sulfatos) fueron analizados por cromatografía de intercambio iónico (Metrohm, Suiza), el pH con un pHmetro modelo Crison-507 (Crisom Instruments S.A. Barcelona, España), conductividad eléctrica (CE) y el total de sólidos disueltos (STD) con un equipo multirango modelo Crison-HI8734 (Crisom Instruments S.A. Barcelona, España), la

turbidez fue medida con un turbidímetro Dinko D-110 (Dinko Instrumets S.A. Barcelona, España) (figura 7).

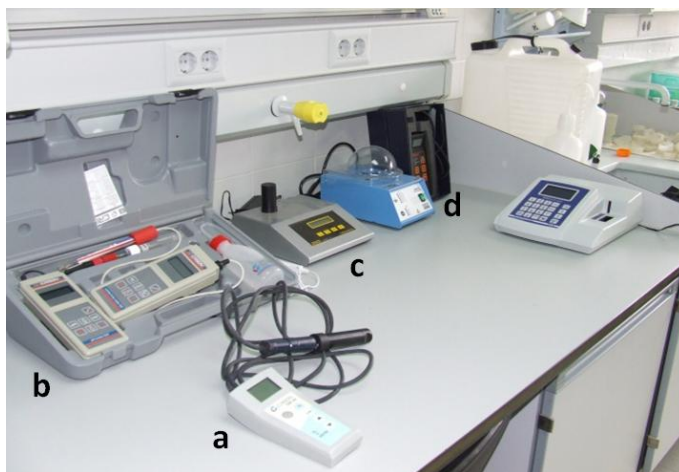


Figura 7: Equipos para la evaluación de la calidad del agua: a) medidor de oxígeno disuelto, b) pH-metro, c) turbidímetro y d) equipo multi-rango, conductividad eléctrica (CE) y sólidos totales disueltos (STD).

La calidad microbiológica del agua de riego fue determinada por la detección del número total de coliformes fecales y *E. coli* presentes en un volumen de 100 mL, por el método de filtración por membrana (APHA, 1985). Las muestras fueron filtradas con un sistema de vacío a través de un filtro de membrana estéril de 0,45 μm de tamaño de poro (Millipore, Billerica, EE.UU). La formación de colonias tuvo lugar en la parte superior de las placas cultivadas con el medio de cultivo agar Chromocult (Merck, Darmstadt, Alemania) durante 24 horas (figura 8). Las temperaturas de incubación fueron 37°C para *E. coli* y 44,5°C para coliformes fecales. Los recuentos microbianos se expresaron como ufc 100 ml⁻¹. Los huevos de helminto fueron medidos mediante el método de Bailenger (1979). Para la detección de *E. coli* O157:H7, se prepararon muestras de 25 mL de agua en bolsas estériles digestoras a las que se les añadió 225 mL de mTSB + Novobiocin (Oxoid, Basingstoke, Hampshire, UK), una vez homogeneizadas, se incubaron a 37°C durante 24h. Las presuntas colonias de *E. coli* O157:H7 (sin color) fueron seleccionadas y almacenadas en tubos Eppendorf que contienen TSB +10% glicerol a -20°C, antes del análisis por PCR (Manafi y Kneifel, 1989).

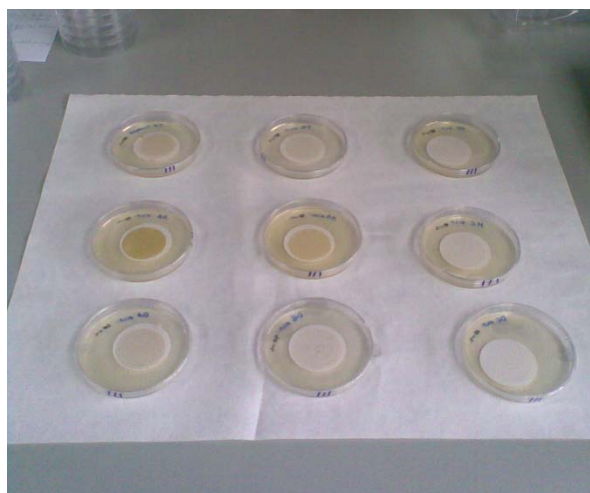


Figura 8: Coliformes fecales y *E. coli* aislados tras la incubación durante 24 horas a 44,5 y 37°C, respectivamente.

2.4. Análisis de Suelo

Tres veces al año durante los años 2008 y 2009 (al comienzo del período de riego, al inicio del periodo de RDC y al final del período de RDC) se tomaron muestras de suelo para cada repetición en tres profundidades distintas (0,2 , 0,4 y 0,6 m) todas ellas a 0,3 m de distancia del gotero. En dichas muestras se determinó el contenido de sales solubles en el extracto de pasta saturada según lo descrito por Rhoades (1982) (figura 9). La conductividad eléctrica del extracto de la pasta saturada (EC_e) se midió con un equipo multi-rango Cryson-HI8734 (Crison Instruments, SA, Barcelona, España). Los valores de Ca y Mg solubles se midieron mediante el método titration EDTA y el Na se midió con un fotómetro de llama (Richards, 1954).

El contenido de agua del suelo se midió cada dos semanas con una sonda de neutrones (Troxler 4300, (Troxler, Raleigh, NC, USA) (figura 9). La utilización de la sonda de neutrones permitió conocer el nivel de humedad de agua en el suelo en un perfil vertical que llega hasta 1 m de profundidad y a 0,2 m de distancia del gotero.

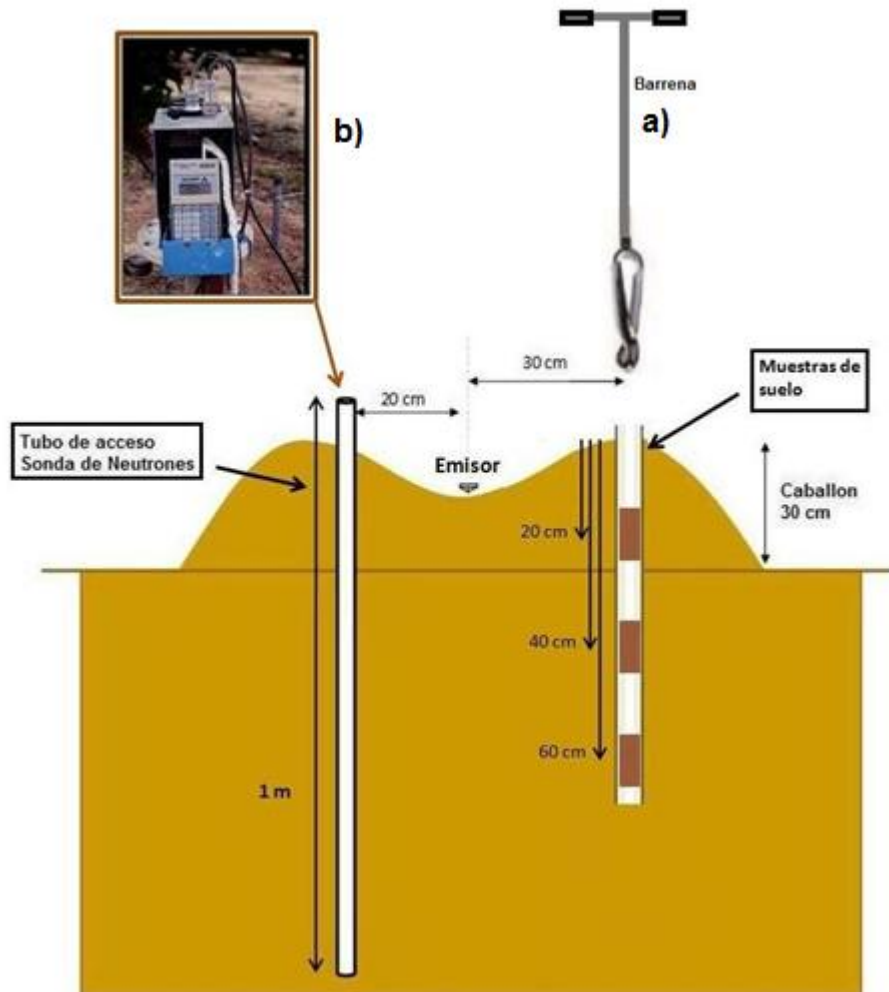


Figura 9: Mediciones en suelo: a) muestras de extracto de pasta saturada con barrena, a 0,3 m de distancia del emisor, a 0,2, 0,4 y 0,6 m de profundidad y b) sonda de neutrones a 0,2 m de distancia del emisor y a 1 m de profundidad.

2.5. Análisis de Hoja.

Trimestralmente se tomaron veinte hojas de muestra de cada repetición por tratamiento, de árboles aleatorios, en 2008 y 2009. Para la preparación de la muestra, se lavaron con detergente (Alconox 0,1%) y agua corriente, posteriormente se limpiaron con una solución de HCl al 0,005% y finalmente fueron lavadas con agua destilada; se escurrieron al aire en un filtro de papel y se secaron en un horno durante dos días a 65°C. Se molieron las hojas una vez secas y se procedió a su disolución con ácido nítrico y perclórico (2:1) (Thomson, 1982), otra parte de la muestra (0,25g) se disolvió en agua regia HCl/HNO₃. La concentración de macro-elementos, oligoelementos y metales pesados se determinaron por plasma de acoplamiento inductivo (ICP-ICAP 6500 DUO Thermo, Inglaterra). Los aniones fueron analizados

mediante cromatografía iónica con un cromatógrafo Metrohm (Suiza) después de usar una proporción de disolución patrón de 1:2,5 (w:w).

2.6. Estado hídrico, intercambio gaseoso y crecimiento.

El potencial de tallo (Ψ_{tallo}), se midió con una periodicidad quincenal durante toda la temporada y semanal durante el período de RDC, en los dos árboles centrales de cada repetición, es decir, cuatro árboles por tratamiento. En cada árbol las medidas se realizaron en dos hojas maduras cercanas al tronco. Las hojas se cubrieron con una bolsa de papel de aluminio, por lo menos dos horas antes de su medición (McCutchan y Shackel 1992). El potencial de tallo se midió al mediodía solar (12:00 h GMT), utilizando una cámara de presión (modelo 3000, Soil Moisture Equipment Corp., Santa Barbara, California, EEUU) (figura 10), y siguiendo las recomendaciones de Turner (1988).

La tasa neta de asimilación de CO_2 (P_n) y la conductancia estomática (g_s) se midieron con un equipo de fotosíntesis portátil (Li-6400, Li-Cor, Lincoln, NE, EEUU) (figura 10). Se realizaron medidas de intercambio gaseoso cada dos semanas durante el período fenológico y semanales durante el periodo de riego deficitario, entre las horas 08:00-10:00 h GMT, en días claros. Las mediciones se realizaron en dieciséis hojas sanas y maduras por tratamiento (dos hojas por árbol, ocho árboles por tratamiento), expuestas al sol, en las posiciones cubierta exterior y en el tercio medio del árbol.

La altura del árbol y el perímetro se midieron al inicio y al final de cada temporada, durante el período experimental, en todos los árboles de la parcela experimental. El volumen de copa fue estimado a partir de la altura y el diámetro del árbol, medido con jalones que van en dos direcciones perpendiculares, según la fórmula propuesta por Hutchinson (1977).



Figura 10: a) Equipo de medida del potencial de tallo se utilizando una cámara de presión (modelo 3000, Soil Moisture Equipment Corp., Santa Barbara, California, EEUU) y b) Equipo de fotosíntesis portátil (Li-6400, Li-Cor, Lincoln, NE, EEUU).

2.7. Producción y calidad de la fruta

El rendimiento fue evaluado en 8 árboles por tratamiento. En cada árbol se realizaron las siguientes mediciones: número de frutos por árbol, kg totales y distribución de calibres en diámetros comerciales utilizando la siguiente clasificación (A<90 mm, B<95 mm, C<100 mm, D<105 mm, E<120 mm, F<140 mm y extra (> 140 mm) (UNECE, 2009).

El uso eficiente del agua (UEA) se calculó para cada tratamiento como la relación entre el rendimiento anual y el agua aplicada durante el mismo período en Kg m^{-3} (Kijne et al., 2003).

La calidad se midió en 100 frutos por tratamiento. Los parámetros medidos fueron: espesor de corteza, peso, tamaño y volumen de zumo. Una muestra de 50 ml de zumo por tratamiento se utilizó para medir otros parámetros de calidad, como la acidez titulable (AT), el pH y contenido de sólidos solubles (CSS). Estos parámetros fueron determinados mediante una valoración de 10 ml de zumo con $0,1 \text{ mol l}^{-1}$ de NaOH a pH 8.1. El índice de madurez se calculó como la relación entre la CSS y la AT

(CSS/AT). El CSS se midió con un refractómetro de mano (Atago N1, Tokyo, Japón).

El contenido en vitamina C se calculó como suma de ácido ascórbico (AA) y ácido dehidroascórbico (DHA), determinados por HPLC según el método de Zapata y Dufour (1992) y modificado por Gil et al., (1999).

3. Resultados y discusión

3.1 Calidad del agua de riego

La cantidad de agua aplicada para los tratamientos control fueron 2.268, 3.143 y 3.963 m³/ha en 2007, 2008 y 2009, respectivamente. Mientras que el agua aplicada en los tratamientos deficitarios para 2008 y 2009 fueron 2.695 y 3.457 m³/ha, respectivamente. Por lo tanto el ahorro medio de agua para los tratamientos RDC fue del 14% en 2008 y el 13% en 2009, este porcentaje se encuentra en el rango documentado por González-Altozano y Castel (2003a). Estos autores aplicaron RDC en *Clementina de Nules* en Valencia (España) durante la segunda etapa de crecimiento del fruto (Junio, Julio y Agosto) permitiendo ahorros de agua entre el 6% y el 22%.

La calidad del agua de riego fue diferente para cada fuente de agua. AD presentó los mayores valores de salinidad y sodicidad, con valores de conductividad eléctrica (CE) cercanos a 3 dS m⁻¹ y relación de adsorción de sodio (RAS) en torno a 5 (figura 11), mientras que para AT los valores de CE y RAS fueron los más bajos, cerca de 1 y 1,5 dS m⁻¹, respectivamente (figura 11). En AM, la calidad del agua resultante de una mezcla de las diferentes fuentes de agua disponibles, reflejó una alta variabilidad de CE y SAR durante toda la experiencia. Durante 2007 y 2008, la proporción de agua regenerada en AM fue muy alta debido a que la cantidad de agua utilizada del trasvase Tajo-Segura no fue suficiente para cubrir las necesidades hídricas de los cultivos. Durante 2009, el agua trasvasada fue suficiente para mezclar las diferentes fuentes de agua en una proporción adecuada para obtener una CE óptima para el riego de los árboles de la experiencia.

Durante la experiencia se observaron algunos picos en los diferentes parámetros de calidad del agua en los tratamientos AD y AM a causa de los vertidos industriales puntuales en la EDAR y la mezcla de diferentes fuentes de agua de riego utilizadas por la Comunidad de Regantes.

La principal característica de la agricultura de regadío en Murcia es la mezcla de los diferentes recursos hídricos para lograr completar las necesidades hídricas

totales de los cultivos, por lo tanto las variaciones en la calidad del agua de riego son representativas del riego en la Región de Murcia (Pedrero, 2011).

En general, se observó que AD y AM tenían una concentración significativamente mayor en Na, B y cloruros que AT (figura 11). La elevada concentración de Na en AD y AM, en torno a 400 ppm, produjo un mayor RAS, y por lo tanto, en ambos tratamientos existe un riesgo moderado de problemas de infiltración del suelo (Ayers y Wescot, 1985). Durante la mayor parte del período experimental, la concentración de B en AD (0,8 ppm) se encontraba en niveles de fitotoxicidad para los cultivos sensibles, como son considerados los cítricos (Mass, 1993) (figura 11). La toxicidad del Boro es más preocupante en ambientes áridos y semiáridos (Nicholaichuk et al., 1988) como la Región de Murcia, donde existen más problemas de salinidad. Según Parsons y Wheaton (1996), 1 ppm es probablemente el nivel umbral máximo de B que se debería permitir en el agua de riego para evitar serios problemas de fitotoxicidad en cítricos.

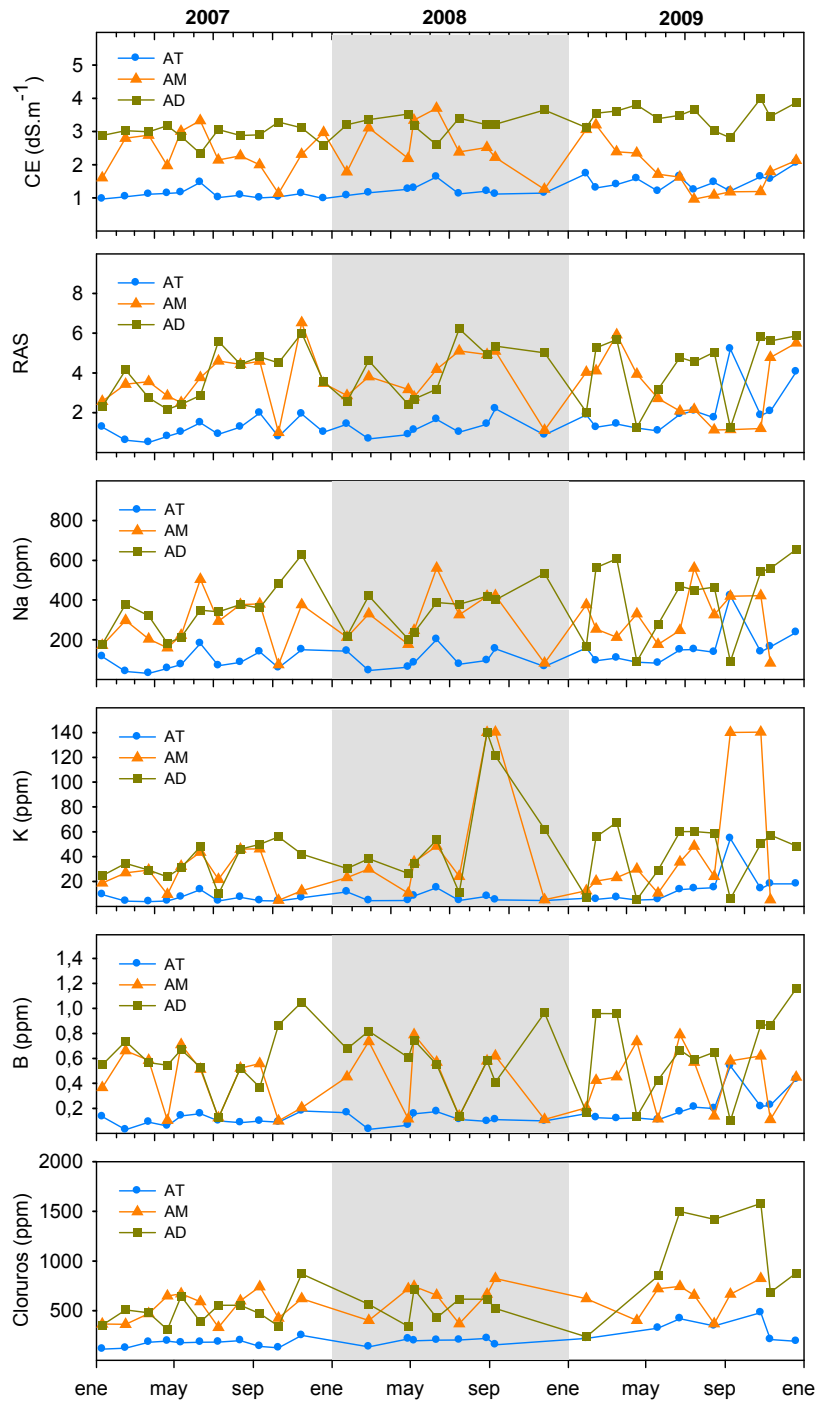


Figura 11: Evolución mensual de los indicadores de calidad del agua de riego: conductividad eléctrica, CE, dS.m^{-1} , relación de adsorción de sodio (RAS) y composiciones químicas: Na, B, K y cloruros en ppm, de las tres fuentes de agua de riego: AT, agua trasvase línea azul, AD, agua regenerada línea verde y AM, agua de la Comunidad de Regantes línea naranja, durante los tres años de la experiencia, 2007, 2008 y 2009.

En relación con los parámetros microbiológicos medidos en el agua de riego, se observaron en algunas ocasiones que AT superaba a AD en la concentración de *E. coli* y coliformes fecales (figura 12). Estos resultados mostraron que los canales abiertos de las redes de distribución de agua de riego pueden tener mayor riesgo microbiológico que las propias aguas regeneradas, lo que corrobora estudios previos que demuestran que las aguas regeneradas son tan seguras y adecuadas para el riego como cualquier otra fuente de agua (York et al., 2008).

Los resultados más interesantes relacionados con la carga microbiológica de las diferentes fuentes de agua de riego, fue la alta variabilidad estacional observada durante el periodo experimental (figura 12). Estas variaciones no se relacionaron con un período específico del año o unas condiciones climáticas particulares. Por lo tanto, el incremento en la concentración de *E. coli* y/o coliformes fecales se alcanzó por medio de alguna contaminación accidental y espontánea en el caso del agua del transvase Tajo-Segura, y de algunas contaminaciones transitorias en el efluente de la EDAR en el caso del agua regenerada. Estas contaminaciones puntuales respaldan la necesidad de realizar análisis microbiológicos con regular periodicidad en los suministros de agua de riego, independientemente de la fuente de agua considerada, para minimizar los impactos negativos en la salud pública (OMS, 2004). Los huevos de helminto estuvieron siempre por debajo del umbral (<1 huevo 10 l^{-1}) impuesto por el Real Decreto 1620/2007 que regula el uso del agua regenerada en España. Este resultado es corroborado con estudios previos llevados a cabo en Murcia por ESAMUR (2009), donde en 43 efluentes de EDAR analizados, hubo ausencia de huevos de helminto en el 79% de los casos tratados con un tratamiento secundario, y ausencia total en los efluentes de EDAR obtenidos con tratamiento terciario.

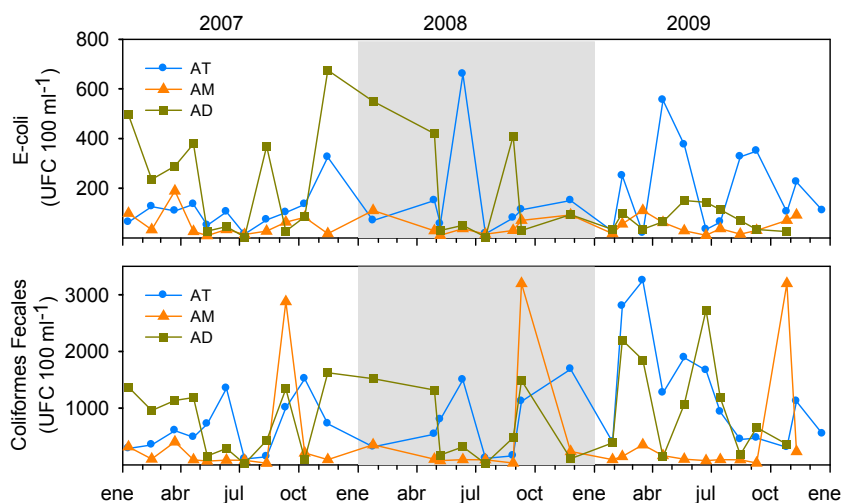


Figura 12: Evolución mensual de los indicadores microbiológicos medidos, coliformes fecales y concentraciones de E.coli ($\text{ufc } 100\text{ml}^{-1}$), de las tres fuentes de agua de riego: agua del transvase, AT, líneas azules, agua regenerada, AD, líneas verdes y agua de la Comunidad de Regantes, AM, líneas rojas, durante los tres años del experimento, 2007, 2008 y 2009.

3.2 Acumulación de sales en el suelo

Los resultados de los análisis químicos realizados en las muestras de suelo extraídas a diferentes profundidades (0,2, 0,4 y 0,6 m), mostraron una conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada (CEe) más alta en los tratamientos AD (figura 13).

La estrategia de riego deficitario controlado también influyó en que los valores de salinidad en el suelo fueran elevados para los tratamientos de aguas con alto contenido en sales como AD y AM, siendo evidentemente superior en los tratamientos de uso de agua regenerada (figura 13). La acumulación de sales en el suelo de todos los tratamientos supera tanto el umbral óptimo de $1,4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ propuesto para los cultivos de cítricos por Maas (1993) como el nivel límite de $1,3 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ para cultivos sensibles propuesto por Baruth et al. (2006), en los que se engloban a los cítricos. Este hecho es especialmente importante en AD-RDC, cuyo nivel de CEe representa un preocupante riesgo de salinización del suelo, según Baruth et al. (2006), ya que se encuentra muy cerca del valor de $4 \text{ dS } \text{m}^{-1}$. Estudios en zonas similares, con respecto a suelos y condiciones climáticas, observaron incrementos en la salinidad del suelo tras dos años de aplicación de aguas regeneradas, similares a las observadas en nuestro ensayo (Morugán-Coronado, et al., 2011). De los análisis realizados, se observa que la evolución de la CE se vió afectada tanto por el tipo de agua empleada,

como por la estrategia de riego usada. El incremento de la CE en los tratamientos RDC, es debido a que la baja aportación de agua no es suficiente para el lavado del sustrato por lo que se acumulan sales en él, de aquí la importancia de aplicar la fracción de lavado cuando se utilizan estas técnicas de riego.

Se observaron importantes diferencias en la RAS dependiendo del tipo de agua utilizada. Los tratamientos AT obtuvieron valores de 4, mientras que los tratamientos AD valores de RAS próximos a 9 y los tratamientos AM obtuvieron un valor intermedio de $7 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (figura 13). Según Bresser et al., (1982) los valores de RAS superiores a $10 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ suponen un alto riesgo de deterioro de la estructura del suelo a medio y largo plazo, debido principalmente a fenómenos de dispersión de la arcilla. En este parámetro (RAS), los tratamientos de AD se encuentran cerca de este umbral y por lo tanto requieren de un seguimiento continuado a largo plazo para evaluar los posibles riesgos.

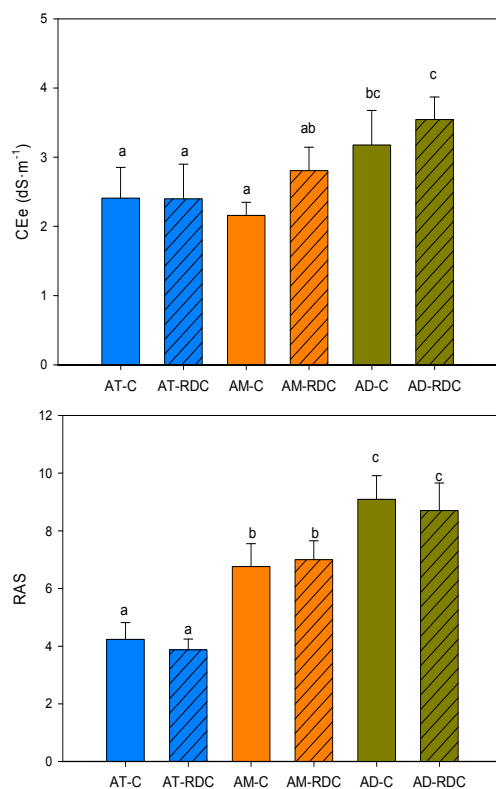


Figura 13: Conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada (CEe) ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) y la relación de absorción de sodio (RAS), medido en muestras de suelo en 2008 y 2009 en tres muestras tomadas a 20,40 y 60 cm de profundidad y a 30 cm del emisor. Cada columna representa el promedio de los dos años. El azul representa el agua de transvase (AT), el verde corresponde al agua regenerada (AD) y el naranja al agua de la Comunidad de Regantes de Campotejar (AM), las columnas ralladas representan el riego deficitario controlado (RDC) y las no ralladas el riego control (C). Las letras indican diferencias significativas según $\text{LSD}_{0.05}$.

3.3 Contenido del agua en el suelo

El contenido de agua en el suelo (stock hídrico) se mantuvo a capacidad de campo (200-250 mm·m⁻¹) en los tratamientos control (figura 14). Durante los periodos de RDC, tanto en 2008 como en 2009, el contenido de agua del suelo se reduce en todos los tratamientos de RDC. La reducción del stock hídrico en 2008 es similar para los tres tipos de aguas. En 2008, se observa una mayor disminución del agua en el suelo con respecto a 2009, debido al mayor déficit hídrico impuesto. En 2009, en el periodo RDC, el tratamiento AD llega a valores mínimos de 160 mm·m⁻¹, mientras que en AT llegó a valores de 110 mm·m⁻¹. Este menor agotamiento del agua en el suelo en AD, fue debido a que la mayor concentración de sales en el suelo producen un efecto osmótico que retiene el agua en el bulbo húmedo del árbol (figura 14). Estos resultados son muy similares a los que muestra Pedrero (2011), en mandarina orogrande y Zekri y Koo (1993) donde se observó un aumento del volumen de agua en el suelo en cultivos regados con agua regenerada.

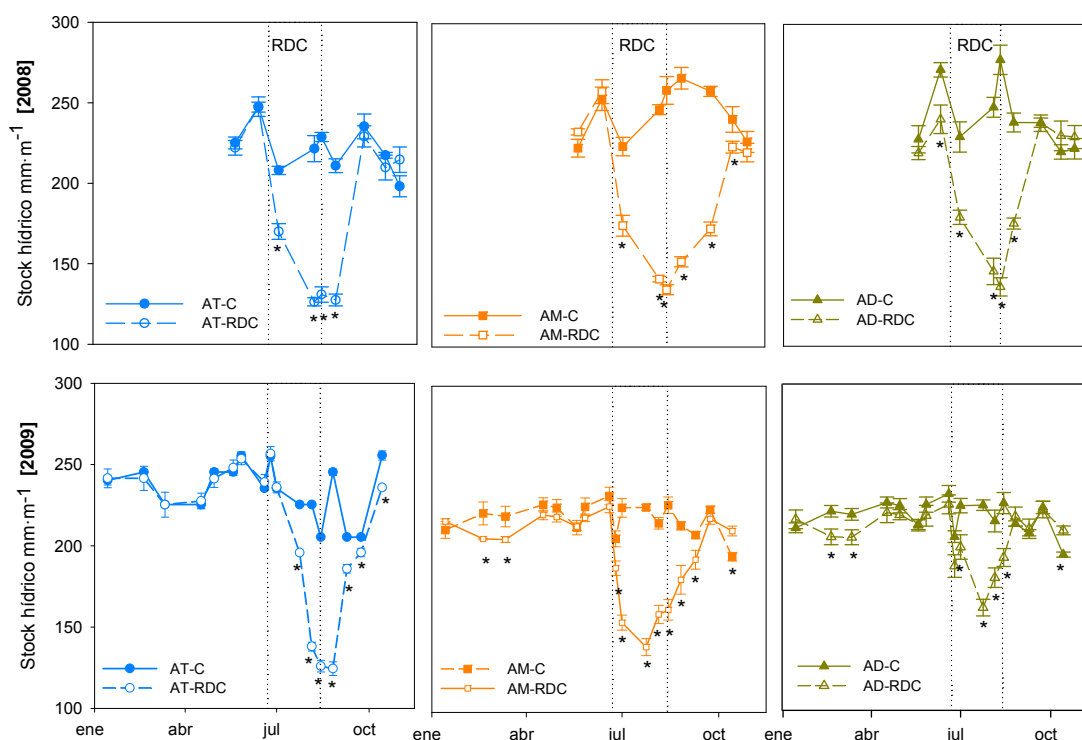


Figura 14: Evolución del contenido de agua en el suelo, medido en la capa superior de 1m de profundidad durante el periodo 2008-2009 (Stock hídrico, mm·m⁻¹). Cada color representa una fuente de agua de riego, agua del transvase, AT, color azul, agua regenerada, AD, color verde y agua de la Comunidad de Regantes, AM, color marrón, los símbolos rellenos y líneas continuas pertenecen al riego Control y los vacíos y líneas discontinuas al riego RDC. * Indica diferencias significativas según LSD_{0,05}

3.4 Relaciones planta-agua

El Ψ_{tallo} se mantuvo superior a -1MPa durante los dos años del experimento, sin verse diferencias de comportamiento entre los diferentes tratamientos, excepto en los periodos RDC, donde se observó un descenso de hasta -1.4 MPa (figura 15). Después del periodo RDC se observa en ambos años la completa recuperación del potencial hídrico en todos los tratamientos (figura 15). Estos datos son similares a los obtenidos por Pedrero (2011), y por Pérez-Pérez et al., (2008), donde los árboles de cítricos bien regados se mantuvieron con valores de Ψ_{tallo} cercanos a -1MPa a lo largo de toda la experiencia. En esta experiencia no se encontraron diferencias entre las diferentes fuentes de agua utilizadas (figura 15), lo que no corrobora los estudios realizados por Paranychianakis et al., (2004), en los cuales las relaciones planta-agua se vieron afectadas tanto por la disponibilidad como por la calidad del agua.

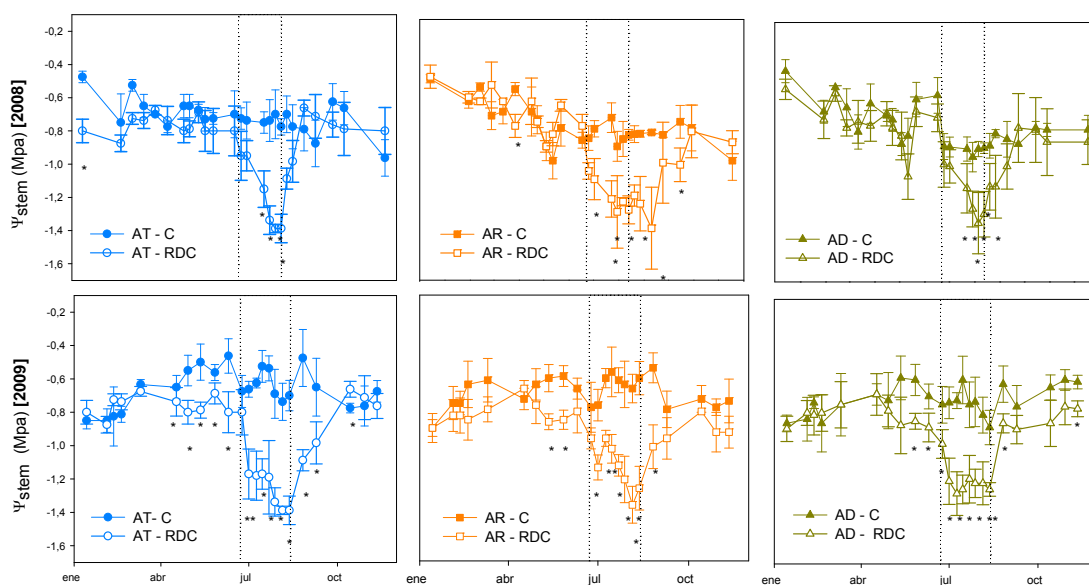


Figura 15: Evolución del potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallos}) durante el periodo 2008-2009. Cada punto es el promedio de medición de dieciséis medidas. Cada fuente de agua de riego está representada con un color, agua del transvase, AT, color azul, agua regenerada, AD, color verde y el agua de la Comunidad de Regantes, AR, color naranja. Los símbolos rellenos se refieren a los tratamientos Control y los vacíos a los tratamientos RDC. Las líneas discontinuas representan los periodos RDC. * Indica diferencias significativas según $LSD_{0.05}$.

Aunque es claro que el estrés salino reduce el uso del agua y la fotosíntesis neta (P_n), los mecanismos subyacentes están todavía en debate. La mayoría de los mecanismos que rodean las limitaciones salinas inducidas en el intercambio gaseoso siguen el mismo argumento de la relativa importancia del estrés osmótico frente a la

toxicidad inducida. El estrés osmótico de suelos salinos indudablemente reduce el uso del agua y los valores de conductancia estomática (g_s), pero la magnitud de esta reducción depende de la velocidad a la cual el estrés salino se desarrolla y su duración (Levy y Syvertsen, 2004). Probablemente debido a la primera razón, en esta experiencia no se observó ninguna diferencia en ambos años en el comportamiento de g_s y P_n , entre tratamientos regados con agua de diferente calidad (figura 16, 17). Pese a que algunos estudios previos realizados en cítricos demostraron que la reducción fotosintética en hojas de cítricos estaba asociada con una toxicidad específica de Cl, Na y/o Boro (Bañuls et al., 1997; Levy y Syvertsen, 2004), en nuestro caso, a corto plazo, no se vieron dichas reducciones (figura 16, 17).

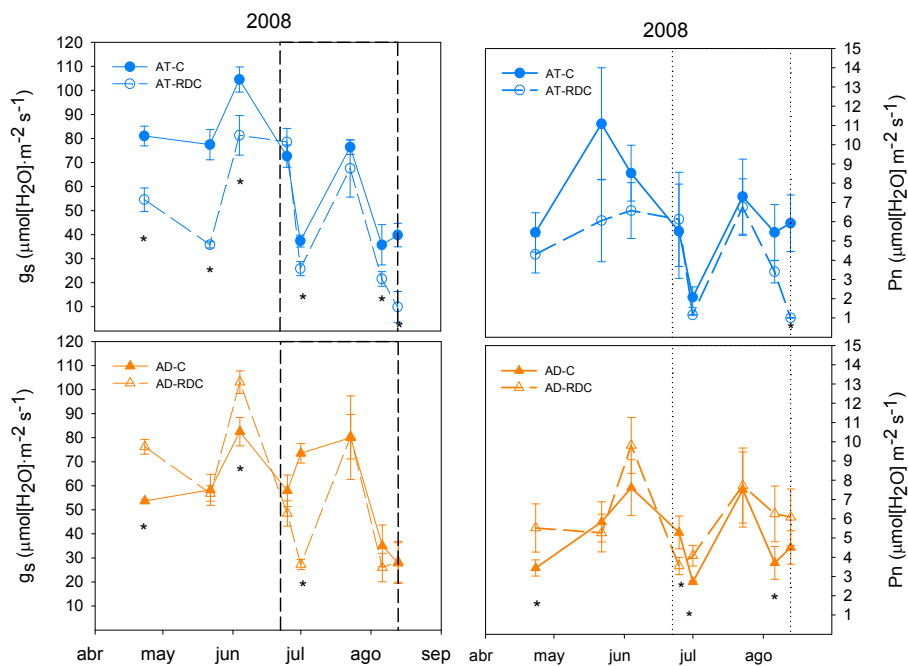


Figura 16: Fotosíntesis neta (P_n) y la conductancia estomática (g_s) en 2008. Cada punto representa el promedio de medición de dieciséis medidas, la región punteada representa el periodo RDC. Los tratamientos representados son el agua del transvase, AT, en azul y el agua regenerada, AD, en naranja. * Indica diferencias significativas según $LSD_{0.05}$.

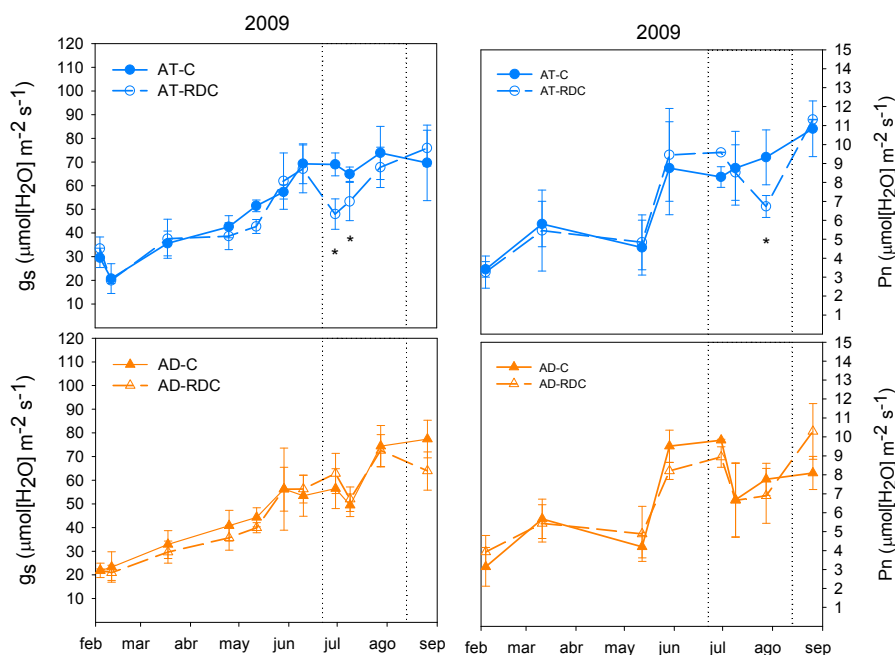


Figura 17: Fotosíntesis neta (Pn) y la conductancia estomática (g_s) en 2009. Cada punto representa el promedio de medición de dieciséis medidas, la región punteada representa el periodo RDC. Los tratamientos representados son el agua del transvase, AT, en azul y el agua regenerada, AD, en naranja. * Indica diferencias significativas según $LSD_{0.05}$.

3.5 Análisis de hoja

La toxicidad en boro es uno de los principales problemas del uso del agua regenerada para riego de cultivos frutales. En numerosos estudios se ha demostrado que el exceso de boro reduce el crecimiento de los árboles y la productividad, y favorece la defoliación y el daño foliar (Chapman, 1968).

Los análisis de hoja realizados mostraron una gran diferencia de concentración en boro entre tratamientos. En 2008 no se vieron grandes diferencias entre los tratamientos control y los RDC. Las concentraciones rondaron los 50 ppm en AT, mientras que en AD la concentración fue más alta llegando a valores de 66 ppm en el tratamiento AD-RDC (figura 18). En 2009 la concentración de boro se duplicó en todos los tratamientos respecto a 2008 (figura 18). En los tratamientos AT se llegó a valores de 110 ppm, mientras en los tratamientos AD se alcanzaron valores próximos a 140 ppm (figura 18). En este año (2009) todos los tratamientos superaron el nivel fitotóxico de 100 ppm reportado por Legaz et al., (1995), pero no se apreciaron síntomas de toxicidad en las hojas de pomelo, al igual que en el ensayo realizado por Pedrero (2011), donde también se obtuvieron valores elevados de boro sin síntomas visibles. Estos resultados se corroboran con los estudios de Maurer et al. (1995), que obtuvieron valores máximos de 78 y 121 ppm en pomelo regado con agua regenerada

en el primer y segundo año de ensayo, respectivamente. Reboll et al. (2000) obtuvieron valores de boro superiores a 150 ppm para cítricos en la Comunidad Valenciana.

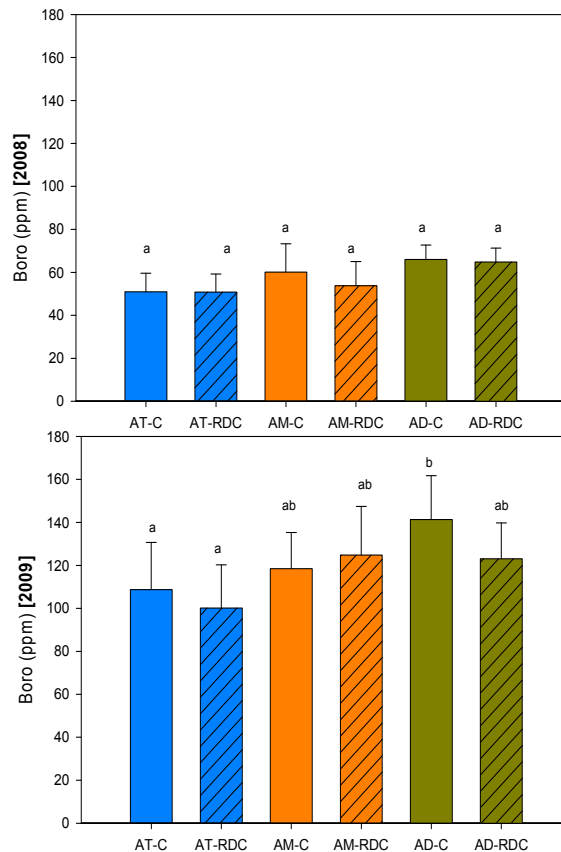


Figura 18: Concentración media de Boro (ppm) en 2008 y 2009. Las columnas azules representan los tratamientos AT, agua transvase, el color naranja indica los tratamientos AM, agua de la comunidad de regantes y el color verde indica los tratamientos AD, agua regenerada. Las columnas lisas son corresponden a tratamientos control y las ralladas a tratamientos RDC. Las letras en cada columna indican las diferencias significativas de acuerdo con $LSD_{0.05}$.

La concentración de cloro no muestra muchas diferencias si comparamos los tratamientos en 2008 y 2009. En 2008 se aprecia una mayor concentración en los tratamientos AT y los AM, superando el 0,6 % tanto el control como el RDC, mientras que los tratamientos AD apenas llegan al 0,4%. El mismo comportamiento aparece en 2009, con valores de AT y AM superiores a 0,7%, mientras que AD se mantiene sobre el 0,4% (figura 19). Todos los tratamientos se mantienen en el rango inferior de toxicidad de 1% del peso de materia seca de las hojas para cultivos sensibles, de acuerdo con Ayers y Westcot, (1985). Pese a la mayor concentración de cloruros en las aguas regeneradas, las hojas de los tratamientos AD presentaron la menor

concentración tanto en 2008 como en 2009. Algunos autores han propuesto que, cuando se emplea agua regenerada para el riego, otros elementos presentes en la solución del suelo, como Ca y K, son muy efectivos en la reducción del transporte de Na y Cl desde la raíz a la hoja (Bar-Tal et al., 1991; Zekri y Koo, 1993; Zekri y Parsons, 1990; Zid y Grignon, 1985; Zekri y Parsons, 1992).

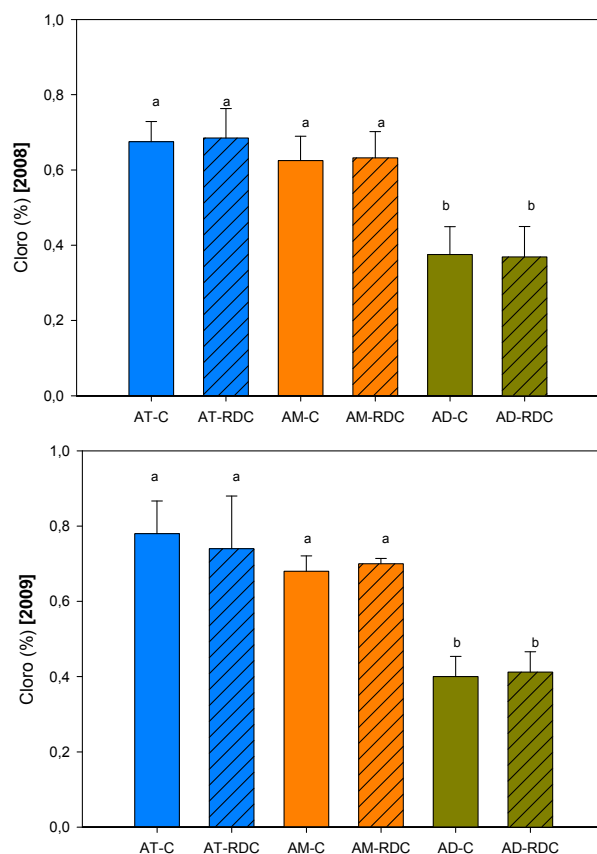


Figura 19: Concentración media de Cloro (%) en 2008 y 2009. Las columnas azules representan los tratamientos AT, agua transvase, el color naranja indica los tratamientos AM, agua de la comunidad de regantes y el color verde indica los tratamientos AD, agua regenerada. Las columnas lisas son corresponden a tratamientos control y las ralladas a tratamientos RDC. Las letras en cada columna indican las diferencias significativas de acuerdo con $LSD_{0.05}$.

Los valores de las concentraciones de sodio no variaron considerablemente en 2008 y 2009, aunque se aprecia un ligero descenso en 2009. En 2008 se obtuvieron concentraciones cercanas a 0,3% en todos los tratamientos, excepto el tratamiento AM-C que no llegó a sobrepasar los 0,2% de Na (figura 20). En 2009 se mantienen los valores en los tratamientos AM y AD, y se aprecia un ligero descenso en los tratamientos AT, con el mínimo valor en AT-RDC de 0,17%. Ninguno de los

tratamientos supera el límite de toxicidad de 0,50% del peso de materia seca en hoja (Ayers y Westcot, 1985; Ramos, 1996). Resultados similares se obtuvieron en estudios realizados en cítricos, como el intervalo obtenido para mandarina de 0,1 - 0,2% (Pedrero, 2011), y 0,1% para pomelo regado con agua regenerada (Maurer et al., 1995).

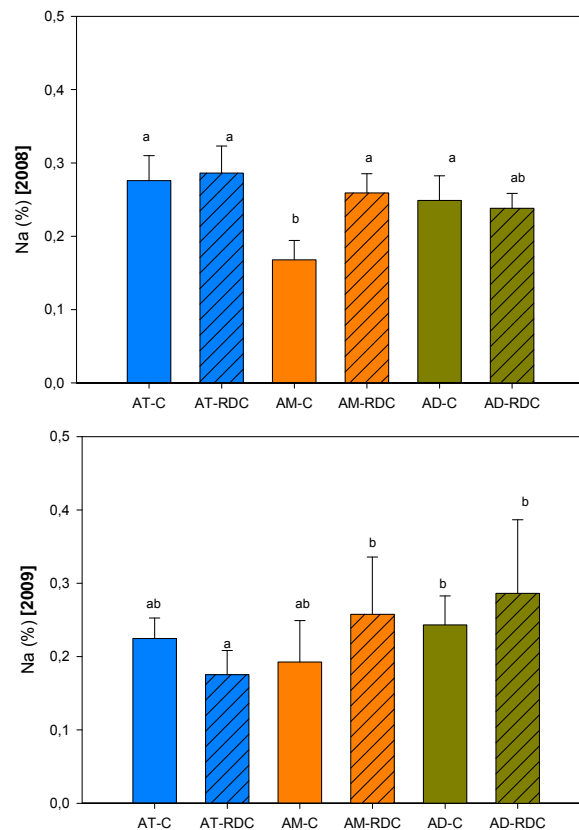


Figura 20: Concentración media de Sodio (Na) en %, en 2008 y 2009. Las columnas azules representan los tratamientos AT, agua transvase, el color naranja indica los tratamientos AM, agua de la comunidad de regantes y el color verde indica los tratamientos AD, agua regenerada. Las columnas lisas son corresponden a tratamientos control y las ralladas a tratamientos RDC. Las letras en cada columna indican las diferencias significativas de acuerdo con $LSD_{0.05}$.

3.6 Crecimiento vegetativo, producción y calidad del fruto

Al comienzo de la experiencia, en 2007, los árboles de la parcela experimental presentaban un volumen de copa similar, aunque con algunas diferencias con respecto al grosor del tronco (tabla 1). En 2008, el crecimiento vegetativo se vio afectado por el tipo de agua aplicada para riego. El mayor volumen de copa medido tras la recolección, fue en el tratamiento de AD-C, mientras que el menor valor se

registró en AM-RDC (tabla 1). En 2009, al final de la experiencia, el crecimiento de copa se mantuvo en igual proporción que en 2008, siendo el tratamiento de AD-C el que mayor volumen de copa obtuvo. Resultados similares a largo plazo se obtuvieron en cítricos regados con aguas regeneradas (Morgan et al., 2008). Sin embargo, estudios en la misma parcela, realizados por Pedrero (2011) en mandarino oro grande injertado sobre patrón carrizo, mostraron una reducción en el volumen de copa en las plantas regadas con agua regenerada. Esto pone de manifiesto la importancia en cítricos de la elección de patrones resistentes a la salinidad. El espesor de tronco al final de la experiencia se mantuvo similar para todos los tratamientos (tabla 1).

Tabla 1: Medidas de copa de árbol (m^3) y diámetro de tronco (mm). (AT- agua transvase, AD - agua regenerada, AM - agua de la Comunidad regantes, C – riego control, RDC – riego deficitario controlado). En 2007, 2008 y 2009. Valores medios \pm error. Las letras en cada columna indican diferencias significativas según $LSD_{0.05}$.

	2007		2008		2009	
	Copa	Tronco	Copa	Tronco	Copa	Tronco
AT - C	1.12 \pm 0.03 a	43.56 \pm 1.26 b	2.66 \pm 0.06 b	64.43 \pm 2.40 ab	3.61 \pm 0.58 b	80.50 \pm 5.97 a
AT - RDC	1.10 \pm 0.02 a	47.55 \pm 0.61 a	2.36 \pm 0.07 b	65.34 \pm 0.61 ab	3.34 \pm 0.50 b	73.75 \pm 5.25 a
AM - C	1.11 \pm 0.03 a	45.85 \pm 0.69 ab	2.37 \pm 0.02 b	67.34 \pm 0.07 a	3.47 \pm 1.65 b	78.00 \pm 19.87 a
AM - RDC	1.12 \pm 0.02 a	43.60 \pm 1.10 b	1.96 \pm 0.09 c	63.77 \pm 1.58 b	3.45 \pm 1.52 b	74.50 \pm 7.05 a
AD - C	1.07 \pm 0.03 a	45.53 \pm 0.83 ab	3.46 \pm 0.08 a	66.66 \pm 0.65 a	4.48 \pm 1.24 a	78.50 \pm 0.31 a
AD -RDC	1.12 \pm 0.03 a	43.79 \pm 0.03 b	2.40 \pm 0.05 b	60.54 \pm 0.06 c	2.95 \pm 1.51 c	80.00 \pm 5.23 a

En 2007 la producción no fue contabilizada debido a que los árboles eran muy jóvenes y la producción fue prácticamente nula. La mayor producción en 2008 fue obtenida en AD-C (73 Kg árbol⁻¹) y la menor AM-RDC (44 Kg árbol⁻¹). Los tratamientos AT tuvieron una producción muy similar (58 y 55 Kg árbol⁻¹ para control y RDC respectivamente), mientras que en los tratamientos AD y AM hubo más diferencia entre el Control y el RDC. En 2009 la producción fue distinta, y los tratamientos que menor producción obtuvieron fueron los AD, siendo AD-RDC el menos productivo (52 Kg árbol⁻¹) (tabla 2).

Los tratamientos RDC obtuvieron valores de Uso Eficiente del Agua (UEA) ligeramente superiores a los controles en 2008, aunque en 2009 ambos tratamientos obtuvieron valores muy similares (tabla 2).

En 2009, también se observó una tendencia en la reducción del número de frutos por árbol en los tratamientos regados con agua regenerada, especialmente en la combinación de agua regenerada y RDC (tabla 2).

La fluctuación obtenida durante la experiencia, demuestra la importancia de la realización de experiencias de este tipo a largo plazo y también la necesidad, descrita por algunos autores, de poseer un conocimiento amplio sobre la aplicación de estrategias de riego deficitario, sobre la intensidad y el periodo de aplicación del déficit hídrico (Egea et al., 2008).

Tabla 2: Datos de producción en 2008 y 2009. Kg-árbol⁻¹, nº de frutos-árbol⁻¹ y UEA (uso eficiente del agua). AT- agua transvase, AD - agua regenerada, AM - agua de la Comunidad regantes, C – riego control, RDC - riego deficitario controlado. Las letras en cada columna indican diferencias significativas según LSD_{0.05}.

	2008			2009		
	Kg-árbol ⁻¹	nºfrutos-árbol ⁻¹	UEA	Kg-árbol ⁻¹	nºfrutos-árbol ⁻¹	UEA
AT- C	58,78 ab	142,38 ab	12,01 b	68,21 b	219,54 b	7,17 b
AT-RDC	55,52 b	145,68 ab	14,30 a	70,43 b	234,61 ab	8,48 a
AM- C	62,85 ab	115,90 c	12,33 b	79,44 a	255,50 a	8,35 a
AM- RDC	44,64 c	131,89 b	12,27 b	68,10 b	221,81 b	8,20 a
AD- C	73,17 a	151,04 a	13,69 ab	61,87 c	193,37c	6,50 b
AD- RDC	62,75 ab	149,12 a	14,46 a	52,07 d	164,13 d	6,27 b

Existen estudios que reflejan que las estrategias de RDC pueden mejorar la calidad de la fruta (Gelly et al., 2003; Girona et al., 2003;), aumentando el contenido en Vitamina C (Pedrero, 2011) y sin afectar al tamaño del fruto (Crisosto et al., 2000; Li et al., 1898). En general, en los valores promedio de 2008 y 2009 de parámetros de calidad de la fruta registrados en nuestro ensayo, podemos ver que el espesor de corteza en los tratamientos AT y AD-C tiene un valor muy similar (7.5 mm), mientras que en AM-RDC supera los 8 mm y en AM-C llega a valores promedios de 9.5 mm. El volumen de zumo es mayor en AM-C, llegando a los 206 ml, y el menor es registrado en AT-RDC con 121 ml, los demás tratamientos se sitúan entre valores de 142 y 170 ml (tabla 3). Se han obtenido valores de contenido de sólidos solubles (CSS) entre 10 (AD-C) y 7,9 (AM-C) °Brix, al igual que los obtenidos por Porras et al. (2010), en pomelo Flame, donde también coinciden los valores de acidez total, siendo prácticamente similares en todos los tratamientos, alrededor de 1 (mg g⁻¹). El índice de madurez también es constante en todos los tratamientos, alrededor de 20, y por último la vitamina C no fue afectada por el déficit hídrico en AT, si que fue afectada en AD (73 frente a 66 mg 100g⁻¹ para C y RDC respectivamente). Finalmente en AD el contenido

en vitamina C fue muy similar en C y RDC, 78 y 71 (mg 100g⁻¹), respectivamente. El mayor valor de vitamina C fue obtenido en el tratamiento AD-C (tabla 3).

Tabla 3: Parámetros medios de calidad del fruto en 2008 y 2009. Espesor piel (mm), volumen de zumo (ml), contenido de sólidos solubles (CSS) (°Brix), acidez total (mg g⁻¹), índice de madurez y vitamina C (mg 100g⁻¹) (AT- agua transvase, AD - agua regenerada, AR - agua de la Comunidad Regantes, C – riego control, RDC – riego deficitario controlado).

	Espesor corteza	Volumen de zumo	CSS	Acidez total	Índice de madurez	Vitamina C
AT - C	7,85 ± 0,18 c	145,8 ± 10,57 bc	9,97 ± 0,08 a	0,9 ± 0,1 a	19,7 ± 0,49 a	36,2 ± 7,93 a
AT - RDC	7,65 ± 0,21 c	121,7 ± 4,14 d	8,63 ± 0,67 b	0,9 ± 0,0 a	20,6 ± 0,35 b	35,7 ± 7,42 a
AM - C	9,58 ± 0,38 a	206,9 ± 10,7 a	7,9 ± 0,00 d	1,0 ± 0,1 a	21,7 ± 0,45 c	73,1 ± 2,62 bc
AM - RDC	8,33 ± 0,36 b	156,1 ± 5,95 c	8,37 ± 0,67 c	1,0 ± 0,1 a	21,1 ± 0,40 c	66,5 ± 2,12 b
AD - C	7,52 ± 0,29 c	142,0 ± 7,32 c	10,1 ± 0,23 a	1,0 ± 0,1 a	20,6 ± 1,27 b	78,6 ± 6,58 c
AD -RDC	8,51 ± 0,34 b	170,8 ± 11,1 b	8,03 ± 0,67 d	1,1 ± 0,1 a	21,2 ± 0,43 b	71,8 ± 3,06 bc

4. Conclusiones

Las producciones entre los diferentes tratamientos variaron a lo largo de la experiencia, siendo necesarios estudios más a largo plazo para evaluar los efectos tanto de las estrategias de RDC como del uso de aguas de diferente calidad.

Se demostró que con ahorros de agua entre 13 y 14% se pueden obtener producciones similares.

Se observó una tendencia en la reducción del número de frutos en los tratamientos de agua regenerada, siendo esta reducción más pronunciada en la combinación con RDC.

Entre los parámetros de calidad, cabe destacar que la vitamina C fue mayor en los frutos de los tratamientos con agua regenerada, lo que indica el interés de continuar con estudios de este tipo para corroborar la mejora de ciertos parámetros de calidad en fruto al usar aguas regeneradas para el riego.

Las relaciones hídricas en la planta no se vieron afectadas por el uso de aguas regeneradas. El estrés hídrico en los tratamientos RDC produjo algunas reducciones en el potencial de tallo y crecimiento de la planta, que fueron recuperadas inmediatamente cuando el déficit hídrico desapareció.

El mayor problema del agua regenerada en Murcia es la salinidad. La concentración de Na, B y cloruros excedió el nivel de fitotoxicidad en el agua

regenerada. Especialmente relevante fue la concentración foliar de B, que superó el nivel de fitotoxicidad foliar recomendado para cítricos.

En áreas áridas y semiáridas, la combinación de estrategias de RDC y el uso de aguas regeneradas para el riego, puede inducir problemas a largo plazo a causa de la acumulación de sales y boro. Se observó una tendencia de acumulación de sales en el suelo durante la última temporada en el tratamiento AD-RDC.

5. Bibliografía

- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes and Smith., M., 1998. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. *Irrig. Drain.* 56, FAO, Rome.
- Angelakis, A. y Spyridakys, S., 1996. The status of water resources in Minoan times: a preliminary study. Angelakis and Issar Editores, *Diachronic Climatic Impact on Water Resources in Mediterranean Region.* Springer-Verlag, Heidelberg, Alemania.
- APHA-AWWA-WEF, 1985. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1998).* 20th Ed., American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington DC, USA.
- Asano, T., 1998. Editor. *Wastewater Reclamation and Reuse.* Vol. 10. Water Quality Management Library. Technomic Publishing Inc. Lancaster, PA EE.UU.
- Asano, T., 2001. Water from (waste)water – The dependable water resource (The 2001 Stockholm Water Prize Laureate Lecture). *Water Science and Technology*, Vol. 45, No 8 pag. 23-33.
- Asano, T. y Levine, A., 1996. *Wastewater Reclamation, Recycling and Reuse: Past, Present and Future.* *Water Science and Technology.* Vol. 33, No 10-11 pag. 1-14.
- Arrojo, P., 1998. *Perspectivas socio-económicas del uso del agua en el regadío en España.* Tecnología del Agua.
- Ayers, R. S. y Westcot, D.W., 1985. *Water quality for agriculture.* FAO Irrigation and Drainage Paper 29. Rome (Reprinted, 1989, 1994).
- Bailenger, J., 1979. Mechanisms of parasitological concentration in coprology and their practical consequences. *J. Amer. Med. Tech.* 41:65-71.
- Bañuls, J., Serna, M.D., Legaz, F., Talon, M. and Primo-Millo, E.. 1997. Growth and gas exchange parameters and water relations of citrus plants stressed with different salts. *J. of Plant Physiol.* 150: 194–199.
- Bar-Tal, A., Feigenbaum, S. and Sparks, D.L., 1991. Potassium-salinity interactions in irrigated corn. *Irrig. Sci.* 12: 27-35.
- Barty-King, H., 1992. *Water The Book, an Illustrated History of Water Supply and Wastewater in the United Kingdom.* Quiller Press Limited, London, U.K.

-
- Baruth, B., Genovese, G. and Montanarella, L., 2006. New soil information for the MARS Crop Yield Forecasting System. Joint Research Centre of European Commission, Ispra.
http://eusoils.jrc.it/projects/sinfo/pdf/mars_crop_yield_forecasting_system.pdf, p. 95.
- Basiouny, F. M., 1984: "The use of municipal treated effluent for peach tree irrigation", *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, nº 97, 345-347.
- Bole, J. B. y R. G. Bell., 1978: "Land application of municipal sewage wastewater: Yield and chemical composition of forage crops", *Journal of Environmental Quality*, nº 7, 222-226.
- Bouwer, H., 1992. *Agricultural and municipal use of wastewater*. Water Science and Technology.
- Bresser, E., McNeal, B.L., Carter, D.L., 1982. *Saline and Sodic Soils. Principles-Dynamics-Modeling*. SpringerVerlag. New York, NY.
- Burton, T. M. y J. E. Hook, .1979: "A mass balance study of application of municipal wastewater to forest in Michigan", *Journal of Environmental Quality*, nº 8, 589-596.
- Blancas, C.; López, J.; Castillo, A.; Cabrera J.J.; Fernández, M.P.; García-Villanova, B.; Hernández J.A.; Laguna, J.; Nogales, R.; Picazo, J., 1994. *Reutilización aguas residuales. Criterios para la evaluación sanitaria de proyectos de reutilización directa de aguas residuales urbanas depuradas*. Junta de Andalucía. Consejería de Salud. Fundación Empresa Universidad de Granada. 255 pp.
- Campbell, W. F., 1983: "Alfalfa, sweet corn, and wheat responses to long-term application of municipal wastewater to cropland", *Journal of Environmental Quality*, nº 12, 234-249.
- CARM, 2007. *El Agua y la Agricultura en la Región de Murcia*. Consejería de Economía y Hacienda. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.
- CARM, 2009. *Estadísticas agrícolas*. Consejería de Agricultura y Agua de la Región de Murcia.

-
- Castel, J.R., Bautista, I., Ramos, C. and Cruz, G. 1987. Evapotranspiration and irrigation efficiency of mature orange orchards in Valencia (Spain). *Irrig. Drain. Syst.* 3: 205-217.
- Castel, J. R. y Buj, A. 1993. Riego por goteo deficitario en naranjos adultos Salustiana durante siete años. *Revista Investigación Agraria: Producción y Protección Vegetal*, v.8, n.2, p.191-204.
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2002., <http://hispagua.cedex.es>, desalación.
- Chalmers, D.J., Mitchell, P.D. and Van Heek L., 1981. Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density and summer pruning. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*106: 307–312.
- Chapman, H.D., 1968. The mineral nutrition of Citrus. In: W. Reuther, L.D. Batchebor and H.J. Webber, eds., *The Citrus industry*, pp. 127-274.
- Consejería de Agricultura y Agua de la Región de Murcia (CARM), 2007. *El Agua y la Agricultura en la Región de Murcia. Un modelo de eficiencia.*
- Crisosto, C.H., Day, K.R., Johnson, R.S. and Garner, D. 2000. Influence of in-season foliar calcium sprays on fruit quality and surface discoloration incidence of peaches and nectarines. *J. Am. Pomol. Soc.* 54: 118–122.
- CHS, Confederación Hidrográfica del Segura, 2009.
- Dyson, T. 1999. World food trends and prospects to 2025. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA* 96, 5929–5936.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W.O. 1986. Las necesidades de agua de los cultivos. Paper 24. *FAO of the United Nations. Roma (Italia)*, 194 pp.
- Egea, G.; Baille, A; Nortes, P. A.; Domingo, R.; González-Real; M^a.M., 2008. *El Riego Deficitario y sus Implicaciones para una Gestión Eficiente del Agua en Explicaciones Frutícolas.* Universidad Politécnica de Cartagena.
- Entidad Regional de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales de Murcia (ESAMUR). www.esamur.com

-
- ESYRCE, 2010. Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos en España, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Feigin, A., I. Vaisman y H. Bieloraí 1984: "Drip irrigation of cotton with treated municipal effluents: II Nutrient availability in soil", *Journal of Environmental Quality*, nº 13, 234-238.
- FEPEX, 2010. Federación Española de Asociaciones de Productores y Exportadores de Frutas, Hortalizas, Flores y Plantas Vivas.
- Fereres, E. y Connor, D.J., 2004. Sustainable water management in agriculture. In: Cabrera, E., CoBacho, R., eds. *Challenges of the new water policies for the XXI century*. Lisse, The Netherlands: A.A.
- Fereres, E. y Goldhamer, D.A., 1990. Deciduous fruit and nut trees. In: *Irrigation of Agricultural Crops*. B.A. Steward and D.R. Nielsen (Eds.), *Agronomy* no 30. Published by ASA, CSSA y SSA, Madison. Wisconsin. USA. 987-1017.
- Fereres, E. y Soriano, M^a A., 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. Instituto de Agricultura sostenible, CSIC, Córdoba y Departamento de Agronomía, Universidad de Córdoba, España.
- Gelly, M., Recasens, I., Mata, M., Arbones, A., Rufat, J., Girona, J. and Marsal, J., 2003. Effects of water deficit during stage II of peach fruit development and postharvest on fruit quality and ethylene production. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 78: 324–330.
- Gil, M. I., Ferreres, F. and Tomás-Barberán, F. A., 1999. Effect of postharvest storage and processing on the antioxidant constituents (flavonoids and vitamin C) of fresh-cut spinach. *J. Agric. Food Chem.* 47: 2213–2217.
- Girona, J., Mata, M., Arbonés, A., Alegre, S., Rufat, J. and Marsal, J., 2003. Peach tree response to single and combined regulated deficit irrigation regimes under shallow soils. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 128: 432–440.
- González-Altozano, P. and Castel, J.R., 1999. Regulated deficit irrigation in 'Clementina de Nules' citrus trees. I. Yield and fruit quality effects, *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 74 (6): 706–713.
- Grobicki, A. y Cohen, B., 1999. A flow balance approach to scenarios for water reclamation. *Water SA*. Vol. 25. No. 4.

-
- Hasek, R. F., 1986: "Water conservation and recycling in ornamentals production", *Hortscience*, nº 21 (1), 35-38.
- Hutchinson, D.J., 1977. Influence of rootstock on the performance of "valencia" sweet orange. *Proc. Int. Soc. Citriculture Cong. (Orland)*. 2: 523-525.
- IEA., 2010. Reutilización de aguas regeneradas. Aspectos tecnológicos y jurídicos. *Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua*. 9: 171-193.
- INE. Instituto Nacional de Estadística.
- Kijne, J.W., 2003. Water productivity under saline conditions. In: Kijne, J.W., Barker, R., Molden, D. (Eds.), *Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement*. CABI Publishing, Wallingford, UK, pp. 89–102.
- Lapeña, L.; Escorín, V.; Cerezo, M.; Flors, V.; García, P., 2002. Riego con agua residual urbana depurada en la Plana de Castellon: Un estudio de diez años. *Dpto. Ciencias Experimentales ESTCE. Area de Fisiología Vegetal. Universitat Jaume I de Castellón*.
- Lazarova, V. y Bahri, A., 2005. *Irrigation with Recycled Water: Agriculture, Turfgrass and Landscape*, CRC Press, catalogue no. L1649, ISBN 1-56670-649-1, Boca Raton, FL, USA.
- Legaz, F., Serna, M.D., Ferrer, P., Cebolla V. and Primo-Millo, E., 1995. Análisis de hojas, suelos y aguas para el diagnóstico nutricional de plantaciones de cítricos. *Procedimiento de toma de muestras*. Generalitat Valenciana.
- Levy, Y. y Syvertsen J.P., 2004. Irrigation water quality and salinity effects in citrus trees. *Horticultural Reviews*. 30: 37–82.
- Li GB, Li YK, Xu TW, Lio YZ, Jin H, Yang PL, Yan DZ, Ren SM, Tian ZF., 2011. Effects of average velocity on the growth and surface topography of biofilms attached to the reclaimed wastewater drip irrigation system laterals. *Irr Sci* (DOI 10.1007/s00271-011-0266-4).
- Li, S.H., Huguet, J.G., Schoch, P.G. and Orlando, P., 1989. Response of peach tree growth and cropping to soil water deficit at various phonological stages of fruit development. *J. Hort. Sci*. 64: 541–552.

-
- Manafi, M. and Kneifel, M., 1989. A combined chromogenic-fluorogenic medium for the simultaneous detection of total coliforms and *E. coli* in water. *Zentralabl. Hyg.* 189; 225- 234.
- MARM. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Maas, E.V., 1993. Salinity and citriculture. *Tree Physiol.* 12: 195-216.
- Maurer, M.A., Davies, F.S., and Graetz, D. A., 1995. Reclaimed wastewater irrigation of reaser Marsh grapefruit trees. Hortucultural Sciencie Dept., Soil and Water Science Dept. University of Florida, Gainesville, Fla. 32611. *Proc.Fla. State Hort. Soc.* 108:93-99.
- McCutchan, H. and Shackel, K.A., 1992. Stem-water potential as a sensitive indicator of water stress in prune trees (*Prunus domestica* L. cv French). *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 117: 607–611.
- Mitchell, P.D., Chalmers, D.J., Jerie, P.H. and Burge, G., 1986. The use of initial with holding of irrigation and tree spacing to enhance the effect of regulated deficit irrigation on pear trees. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*111: 858–861.
- Mitchell, P.D. and Chalmers, D.J., 1982. The effect of reduced water supply on peach tree growth and yields. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*107: 853–856.
- Mohsen, M.S. y Al-Jayyousi, O.R., 1999. Brackish water desalination: an alternate for water supply enhancement in Jordan.
- Morgan, K.T., Wheaton, A., Parsons, L.R. and Castle,W.S., 2008. Effects of Reclaimed Municipal Waste Water on Horticultural Characteristics, Fruit Quality, and Soil and Leaf Mineral Concentration of Citrus. *Hort. Sci.* 43(2):459–464.
- Morugán-Coronado, A., García-Orenes F., Mataix-Solera, J., Arcenegui, V., Mataix-Beneyto, J., 2011. Short-term effects of treated wasteeater irrigation on Mediterranean calcareous soil. *Soil & Tillage Reserch* 112, 18-26.
- Naor, A., Gal, Y. and Peres, M., 2006. The inherent variability of water stress indicators in apple, nectarine and pear orchards, and the validity of a leaf-selection procedure for water potential measurements. *Irrig. Sci.* 24: 129–135.
- Neilsen, G. M., D. S. Stevenson y J. J. Fitzpatrick, 1989a: “The effect of municipal wastewater irrigation and rate on N fertilization on petiole composition, yield and

quality of Okanagan Riesling grapes”, Canadian Journal of Plant Science, n° 69, 1285-1294.

Neilsen, G. M., D. S. Stevenson, J. J. Fitzpatrick y C. H. Brownlee, 1989b: “Yield and plant nutrient content of vegetables trickle-irrigated with municipal wastewater”, Hortscience, n° 24, 249-252.

Nicholaichuk, W., Leyshon, A.J., Jame, Y.W. and Campbell, C.A., 1988. Boron and salinity survey of irrigation projects and the boron adsorption characteristics of some Saskatchewan soils. Can. J. Soil Sci. 68: 77-90.

Olcina, C. J., 2002. Planificación hidrológica y recursos de agua no convencionales en España. Insuficiencias hídricas y Plan Hidrológico Nacional. Edición de A. Gil Olcina y A. Morales Gil. Edición digital basada en la edición, Alicante, Caja de Ahorros del Mediterráneo, Instituto Universitario de Geología, 2002. <http://cervantesvirtual.com/>.

ONU, 2005. www.worldmapper.org/spanish/011_population_2050_es.pdf

Oron, G.; Armon, R.; Mandelbaum, R.; Manor, Y.; Campos, C.; Gillerman, L.; Salgot, M.; Gerba, C.; Klein, I.; y Enríquez, C. 2001. Secondary wastewater disposal for crop irrigation with minimal risks. Water Science and Technology.

Oweis, T.Y., Hachum, A. and Bruggeman, A., 2004. Indigenous Water-Harvesting Systems in West Asia and North Africa. International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA), Aleppo, Syria.

Paranychianakis, N.V., Chartzoulakis, K.S. and Angelakis, A.N., 2004. Influence of rootstock, irrigation level and recycled water on water relations and leaf gas exchange of Sultana grapevines. Environ. and Exp. Botany. 52: 185–198.

Parsons, L.R. and Wheaton, T.A. 1996. Florida citrus irrigation with municipal reclaimed water. Proc. Int. Soc. Citriculture. 2:692-695.

Pedrero, F., 2011. Sustainable irrigation management with reclaimed water. Tesis doctoral. Departamento de Riego. Centro de Edafología y Biología aplicada al Segura. CEBAS-CSIC, Murcia, España. 143pp.

Pérez-Pérez, J.G., Romero, P., Navarro, J.M. and Botía, P., 2008. Response of sweet orange cv ‘Lane late’ to deficit irrigation in two rootstocks. I: water relations, leaf gas exchange and vegetative growth. Irrig. Sci. 26: 415–425.

-
- PHCS, Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura, 1995.
- PNUMA, 2000. Programa de las Naciones Unidas para el Medioambiente.
www.pnuma.org.
- Porras, I. Manera, F.J. Conesa, A. Fernández-Zapata, J.C. Ruiz, G. Córdoba, F. Yuste, L. Pérez Tornero, O., 2010. Resultados preliminares del pomelo Flame en el campo de Cartagena. IMIDA. Departamento de Física y Arquitectura de Computadores y el Departamento de producción Vegetal y Microbiológica. Universidad Miguel Hernández, Orihuela, Alicante.
- Postel, S., 1997. Last Oasis: Facing Water Scarcity. New York: W.W. Norton & Co.
- Qadir, M. and Oster, J.D., 2004. Crop and irrigation management strategies for saline-sodic soils and waters aimed at environmentally sustainable agriculture.
- Ramos, C., 1996. El riego con aguas residuales. Aprovechamiento del agua depurada en la Comunidad Valenciana. Sanejament d'Aigües-Generalitat Valenciana (eds) pp. 49-63.
- Reboll, V., Cerezo, M., Roig, A., Flors, V., Lapeña, V. and García-Agustín, P., 2000. Influence of wastewater vs groundwater on young Citrus trees. J. Sci. Food Agric. 80: 1441-1446.
- Rhoades, J. D., 1982. Soluble salts, in Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R.: Methods of soil analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties. 2nd edn., Agronomy No 9(2), American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA, pp.167-178.
- Richards, L.A., 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkaline Soils, 60. U.S. Dept. Agric. Handbook, pp. 110-118.
- Seguí, L.A. 2004. Sistemas de regeneración y reutilización de aguas residuales. Metodología para el análisis Técnico-Económico y casos. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, España. 256pp.
- SIAM. Sistema de Información Agraria de Murcia. <http://siam.imida.es>
- Sopper, W. E. y L. T. Kardos., 1973: "Recycling treated municipal wastewater and sludge through forest and cropland", Pennsylvania, The Pennsylvania State University Press.

-
- Thompson, J.N., 1982. *Interaction and Coevolution*, New York, John Wiley & Sons. 179 pp.
- Turner, N.C., 1988. Measurements of plant water status by pressure chamber technique. *Irrig Sci.* 9: 289–308.
- UNECE, 2009. Standard concerning the marketing and commercial quality control of citrus fruit. New York and Geneva. 12 pp.
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) and USAID (U.S. Agency for International Development). 2004. *Guidelines for Water Reuse*. Washington D.C.
- Vergés, C. 1998. El agua regenerada como nuevo producto en el mercado del abastecimiento y saneamiento de las aguas. *Tecnología del Agua*.
- Voutchkov, N., 2004. *The Ocean: a new resource for drinking water*.
- York, D. W., Holden R., Sheikh, B. and Parsons, L., 2008. Safety and Suitability of Recycled Water for Irrigation of Edible Crops. In: *Proceedings of the 23rd Annual WaterReuse Symposium*. Dallas: WaterReuse Association.
- Zapata, S. and Dufour, J. P., 1992. Ascorbic, dehydroascorbic and isoascorbic IWith simultaneous determinations by reverse phase ion interaction HPLC. *J. Food Sci.* 57: 506–511.
- Zekri, M. and Parsons, L.R., 1990. Calcium influences growth and leaf mineral concentration of citrus under saline conditions. *Hort. Sci.* 25: 784-786.
- Zekri, M. and Parsons, L.R., 1992. Salinity tolerance of citrus rootstocks: effects of salt on root and leaf mineral concentrations. *Plant Soil.* 147: 171-181.
- Zekri, M. and Koo., R.C.J., 1993. A reclaimed water citrus irrigation project. *Proc. Fla. State Hortic. Soc.* 106:30–35.
- Zid, E. y Grignon, C., 1985. Sodium-calcium interactions in leaves of *Citrus aurantium* grown in the presence of NaCl. *Physiol. Veg.* 23: 895-90.