



Universidad
Politécnica
de Cartagena



***Caracterización energética y medioambiental de la
aplicación de riego deficitario con agua
regenerada en un cultivo de pomelo***



TRABAJO FINAL DE GRADO

Alumna: Cristina García Lorenzo

Director: José Francisco Maestre Valero

Octubre 2017

ÍNDICE

1.	Justificación del proyecto.....	1
2.	Introducción.....	5
2.1.	El cultivo de pomelo en el Mundo, en España y en la Región de Murcia.....	5
2.1.1.	Producción mundial.....	5
2.1.2.	Producción en España	8
2.1.3.	Producción en la Región de Murcia.....	12
2.2.	Caracterización energética y de emisiones de la agricultura de regadío.....	16
2.2.1.	Importancia de la agricultura de regadío	16
2.2.2.	Impacto energético y emisiones de GEI	17
2.2.3.	Mitigación de las emisiones, del impacto energético y medioambiental	18
2.3.	Nexos Agua – Energía – Emisiones.....	20
2.4.	Recursos hídricos disponibles para riego en la Cuenca del Segura.....	22
2.4.1.	Efectos del cambio climático.....	24
2.4.2.	Estrategias de riego deficitario.....	26
2.4.3.	Riego con recursos no convencionales.....	28
2.4.4.	Sostenibilidad del riego deficitario con aguas no convencionales.....	30
3.	Objetivos	31
4.	Materiales y métodos.....	33
4.1.	Zona de estudio y tratamientos de riego	33
4.1.1.	Zona de estudio y diseño del experimento	33
4.1.2.	Tratamientos de riego	34
4.2.	Unidades funcionales y límites del sistema	34
4.3.	Adquisición de datos.....	35
4.3.1.	Análisis de inputs.....	35
4.3.2.	Análisis de la producción y rendimientos.....	41
4.4.	Selección de factores de conversión energéticos y de emisiones.....	41
4.4.1.	Selección de factores de conversión energéticos	41
4.4.2.	Selección de factores de conversión de emisiones.....	44
4.5.	Análisis estadístico	47
4.6.	Balances e identificación de indicadores.....	47

5. Resultados y discusión.	49
5.1. Caracterización del consumo y distribución de la energía.	49
5.2. Caracterización y distribución de las emisiones de CO ₂	54
6. Conclusiones y recomendaciones.	61

Resumen.

La agricultura de regadío aporta numerosos beneficios socioeconómicos, aunque demanda una gran cantidad de energía, lo que se traduce en problemas medioambientales de emisiones de gases de efecto invernadero. Con la escasez de agua existente en la Cuenca del Segura, para poder mantener la actividad agraria, los agricultores están incrementando el uso de recursos hídricos no convencionales, tales como el agua regenerada y haciendo uso de técnicas de conservación de agua como el riego deficitario controlado. Este proyecto cuantifica la producción y el consumo de energía y la emisión de gases de efecto invernadero en un cultivo de pomelo regado de forma convencional y bajo riego deficitario controlado, con agua regenerada y con agua proveniente del trasvase Tajo-Segura. Los análisis se han realizado considerando cuatro etapas diferentes del ciclo de cultivo. La evaluación de la energía y las emisiones de gases de efecto invernadero se realizaron para cada estudio en base a un inventario de inputs de la parcela seleccionada y los correspondientes factores de conversión de energía y gases de efecto invernadero. Los resultados indican que, bajo las condiciones de este estudio, el uso de agua regenerada y de estrategias de riego deficitario controlado no tuvieron efecto significativo en la productividad de la energía y las emisiones de gases de efecto invernadero, independientemente de la etapa del ciclo analizada. Además, para aumentar la eficiencia energética de la parcela y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, se debería reducir el consumo de energía asociado al transporte de agua a la finca, la fabricación del sistema de riego y la fabricación y transporte de los fertilizantes.

1. Justificación del proyecto

Debido al aumento de la población, va a ser necesario incrementar la producción con un uso más reducido del agua, sobre todo en países con limitación de recursos hídricos y aumentar el uso de recursos hídricos no convencionales, como puede ser el agua regenerada, y de esta forma sustituir los recursos convencionales, debido a la escasez que hay.

La Cuenca del Segura (CS; Murcia), es la única en España cuyos recursos naturales no pueden cubrir la demanda de agua. El principal uso es el agrícola, con un porcentaje del 84% (CHS, 2009). Por esta razón, el uso de las aguas regeneradas en la agricultura murciana es especialmente importante. En Murcia, existen en funcionamiento 93 plantas depuradoras, las cuales producen un volumen de 105 hm³ al año (ESAMUR, 2017). El mayor problema asociado al uso del agua regenerada en Murcia, es la salinidad ya que el 93% de las aguas residuales tratadas, tienen una conductividad eléctrica superior a 2 dS/m y el 63% una conductividad eléctrica superior a 3 dS/m (ESAMUR, 2005). Por lo tanto, cuando estos recursos son utilizados para el riego, es necesario el uso de estrategias adecuadas. Pero la tecnificación de la agricultura lleva asociado un gasto energético mayor, y debido a esto se produce un aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Desde 1979, la Cuenca del Segura, en el sureste de España, recibe del trasvase Tajo-Segura una media de 196 hm³/año para complementar sus propios recursos hídricos (CHS, 2015). Esta fuente de agua complementaria ha supuesto (i) un incremento significativo la superficie dedicada a riego de 170.000 ha en 1979 a 263.000 ha en 2015 (CHS, 2015), (ii) la adquisición de derechos de agua de más de

80.000 propietarios de la Cuenca (Claver, 2016) y (iii) un significativo aumento de la inversión en modernización de las infraestructuras hidráulicas y de riego para convertir la agricultura de secano y de riego por inundación en sistemas de riego localizado eficientes (Playán y Mateos, 2006), entre otros.

En el caso de la Región de Murcia, que supone el 58,8% del área de la cuenca, dichas fuentes complementarias han supuesto el incremento de la superficie de cultivos leñosos de 63.947 ha en 1979 a 93.770 ha en 2015. Para los cítricos, esos valores son 21.917 ha y 38.245 ha, respectivamente (CREM, 2015); representando el último el 40,1% de la superficie ocupada por cultivos leñosos bajo irrigación en la región (ESYRCE, 2015).

A pesar de la existencia de esta fuente de agua complementaria, la Cuenca del Segura tiene un déficit de agua de aproximadamente 400 hm³ por año (CHS, 2015), pero es indispensable para mantener la agricultura de regadío y así proveer de alimento a una población en continuo aumento (WWAP, 2012; Faurès et al., 2013).

Para asegurar la producción alimentaria se requiere disponer de energía y agua. La seguridad alimentaria requiere seguridad energética y agua (Bundschuh et al., 2014). Los agricultores, para poder hacer frente a la escasez de agua y continuar con una agricultura sostenible, se ven obligados a complementar los recursos hídricos convencionales con los no convencionales (como las aguas regeneradas) y a hacer uso de estrategias de riego deficitario controlado (Maestre-Valero et al., 2016). Cabe destacar que el volumen de agua regenerada en la Región de Murcia es de 105 hm³, que restablecen alrededor del 10% de los recursos renovables anuales (CHS, 2015).

El desarrollo de las tierras de regadío está asociado a importantes beneficios socioeconómicos regionales. Sin embargo, la modernización de la tecnología agrícola para poder conseguir una agricultura muy productiva, ha aumentado la cantidad de energía utilizada en la producción de cultivos (Rathke y Diepenbrock, 2006). Ese consumo intensivo de energía también genera problemas ambientales atribuidos principalmente a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que contribuyen al calentamiento global (Zahedi et al., 2015).

De esta forma, los análisis de energía input-output representan una valiosa herramienta que permite comparar diferentes sistemas de producción evaluando la eficiencia del uso de la energía, los efectos ambientales y su sostenibilidad (Khoshnevisan et al., 2014). El aumento de la eficiencia energética no sólo ayuda a aumentar la productividad y la rentabilidad, sino que también hace que disminuyan las emisiones de gases de efecto invernadero y los impactos ambientales (Alluvione et al., 2011).

La relación energética input-output ha sido estudiada en una amplia gama de cultivos como los cítricos (Ozkan et al., 2004; Martin-Gorriz et al., 2014), albaricoque (Sartori et al., 2005), oliva (Guzmán y Alonso, 2008), cereza (Kizilaslan, 2009), legumbres (Koocheki et al., 2011), tomate (Rezvani-Moghaddam et al., 2011), ciruela (Tabatabaieet al., 2012), remolacha azucarera (Asgharipour et al., 2012; Yousefi et al., 2014), algodón (Zahedi et al., 2014), hortalizas y cultivos leñosos (Martin-Gorriz et al., 2014).

También se han calculado las emisiones de gases de efecto invernadero por la producción del cultivo en lechuga (Gunady et al., 2012), fresa (Khoshnevisan et al.,

2014b), algunos cultivos de hortalizas y leñosos (Martin-Gorriz et al., 2014), cereales (Mohammadi et al., 2014) o tomate (Ntinas et al., 2017).

La mayoría de estos estudios analizan los inputs y outputs energéticos y las emisiones de gases de efecto invernadero basándose en un escenario general, sin tener en cuenta el efecto de otras variables significativas que podrían afectar al análisis como (i) el uso de técnicas de riego de conservación de agua, (ii) el uso de recursos hídricos no convencionales o (iii) las diferentes etapas del ciclo de cultivo.

2. Introducción.

2.1. El cultivo de pomelo en el Mundo, en España y en la Región de Murcia

2.1.1. Producción mundial

El pomelo, dentro del total de la producción de cítricos es el que menos representación tiene, con un 6%. Las naranjas predominan con un 57% del total, las mandarinas representan cerca del 26%, y por último limones y limas el 11% (Sanfeliu, 2016).

La producción de pomelo se encuentra en continuo aumento (Figura 1). En el siguiente gráfico queda reflejada la tendencia que sigue la producción. Se observa un incremento significativo entre 2007 y 2008 y entre 2010 y 2012. En el período 2007-2014 se aprecia un incremento del 17%.

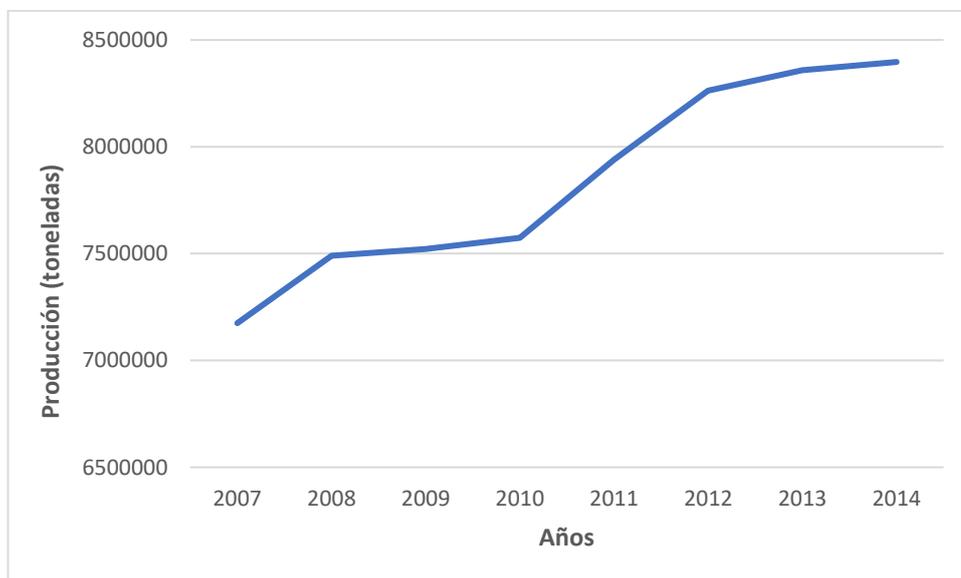


Figura 1. Evolución de la producción mundial de 2007 a 2014.

Fuente: FAOSTAT, 2017

La evolución de la superficie cultivada de pomelo en el mundo sigue la misma tendencia que la producción, a pesar de sufrir altibajos en los últimos años (Figura 2). La superficie de pomelo en el mundo ha aumentado un 5% en el período comprendido entre 2007 y 2014.

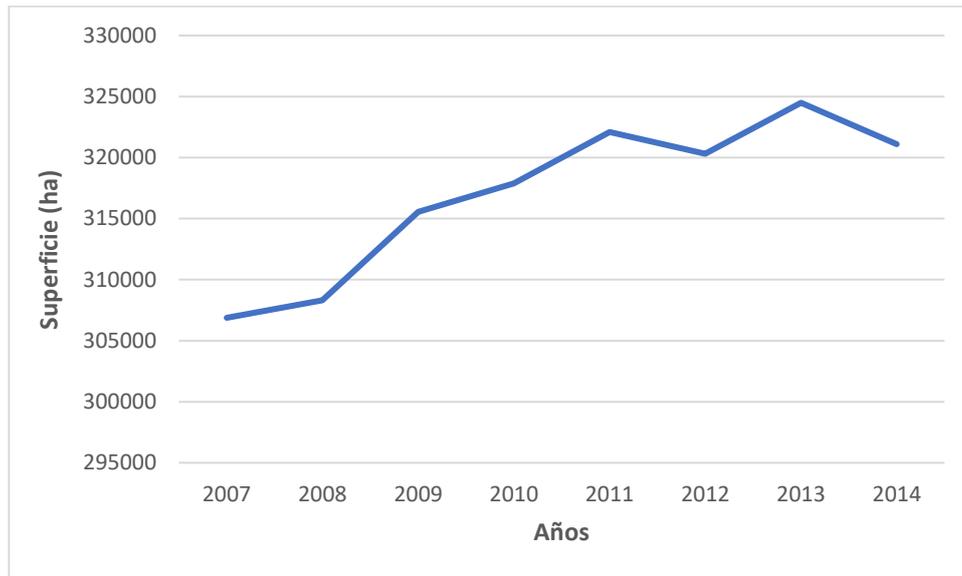


Figura 2. Evolución de la superficie cultivada en el mundo de 2007 a 2014.

Fuente: FAOSTAT, 2017

El principal país productor de pomelo en el mundo es China, con 3,7 millones de toneladas en 2014, seguido de Estados Unidos con 949.822 toneladas, en tercer lugar, México con 424.678 toneladas, en cuarta posición se encuentra Sudáfrica con 417.613 toneladas. Detrás de ellos están India (248.500 t), Tailandia (242.150 t), Turquía (229.555 t), Israel (227.126 t), y Argentina (197.761 t) (Figura 3). España se encuentra en una posición bastante alejada con una producción de 68.516 toneladas (FAOSTAT, 2017).

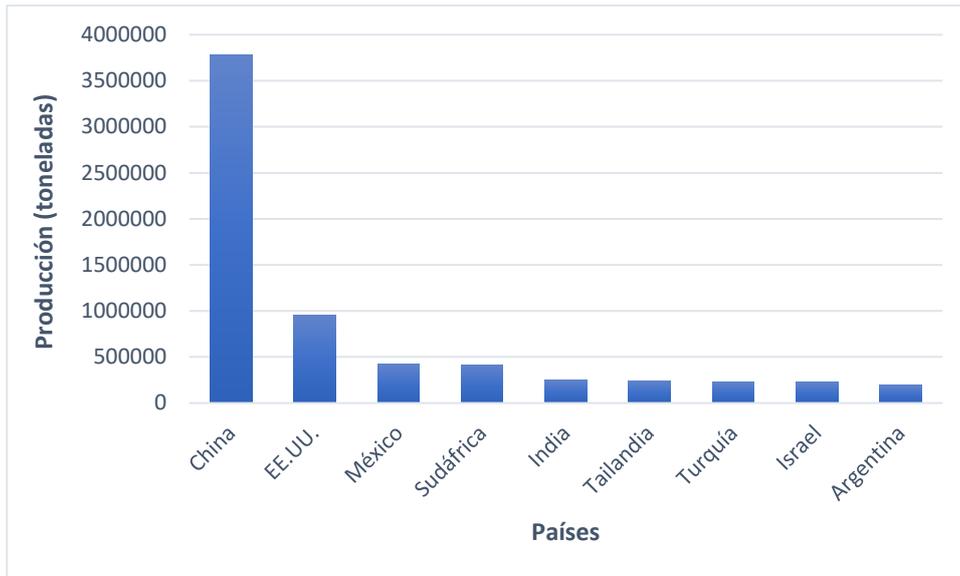


Figura 3. Principales países productores del mundo y producción asociada en el período 2007 -2014.

Fuente: FAOSTAT, 2017

En el hemisferio norte los principales países productores son los siguientes: Turquía con una producción en 2015 de 82.000 toneladas y produciéndose un aumento del 82% desde el año 2000. En Israel la producción fue de 39.000 toneladas, reduciéndose en un 28% la producción en los últimos 15 años. Dentro de Estados Unidos, el estado con mayor producción de pomelo es Florida, con 32.000 toneladas y una disminución en la producción del 70% respecto al año 2000. En España la producción ese año fue de 50.000 toneladas con un aumento del 113% respecto al 2000 (AILIMPO, 2017).

2.1.2. Producción en España

España es el principal productor y exportador de pomelos en Europa con el 73% de la producción, de la cual el 93,4% se destina a la exportación. La calidad de los pomelos alicantinos, murcianos y valencianos es muy apreciada. En los últimos años algunas provincias andaluzas como Sevilla, Málaga y Almería han incrementado su producción con vistas a los mercados europeos (<http://www.frutas-hortalizas.com>)

En España el pomelo no se cultivó con fines comerciales hasta finales de los años setenta y principios de los ochenta. En la actualidad se dedican unas 1.500 hectáreas a su cultivo. Aproximadamente el 60% de la producción se concentra en Murcia. Le sigue en importancia Andalucía, con cerca del 26% de la producción española y en tercer lugar se encuentra la Comunidad Valenciana con el 13% de la producción (AILIMPO, 2017).

En 2016 el pomelo representó el 0,45% de la producción total de cítricos. La naranja el 51%, después se encuentra la mandarina con el 33% y por último el limón con casi el 15%. En ese año la superficie dedicada al cultivo de pomelo fue de 1.524 hectáreas. De las cuales 46 se encontraban en secano, lo que representa un 3,02% y 1.478 hectáreas en regadío, con un porcentaje del 96,98% (ESYRCE, 2016).

En España solo hay cuatro comunidades autónomas que tengan plantaciones de pomelo con superficies representativas (Figura 4), sin tener en cuenta Canarias y Baleares, con 4 y 7 hectáreas respectivamente. Por orden de superficie cultivada está la Comunidad Valenciana en primer lugar (523 ha), seguida por la Región de Murcia (491 ha), Andalucía en tercera posición (436 ha) y en cuarto lugar con bastante diferencia se encuentra Cataluña (74 ha).

Casi la totalidad de la producción se encuentra en regadío, ya que sólo hay superficie en secano en la Comunidad Valenciana (17 ha) y Andalucía (29 ha), ambas con un porcentaje muy reducido respecto al total en dichas comunidades, como se puede observar en el siguiente gráfico.

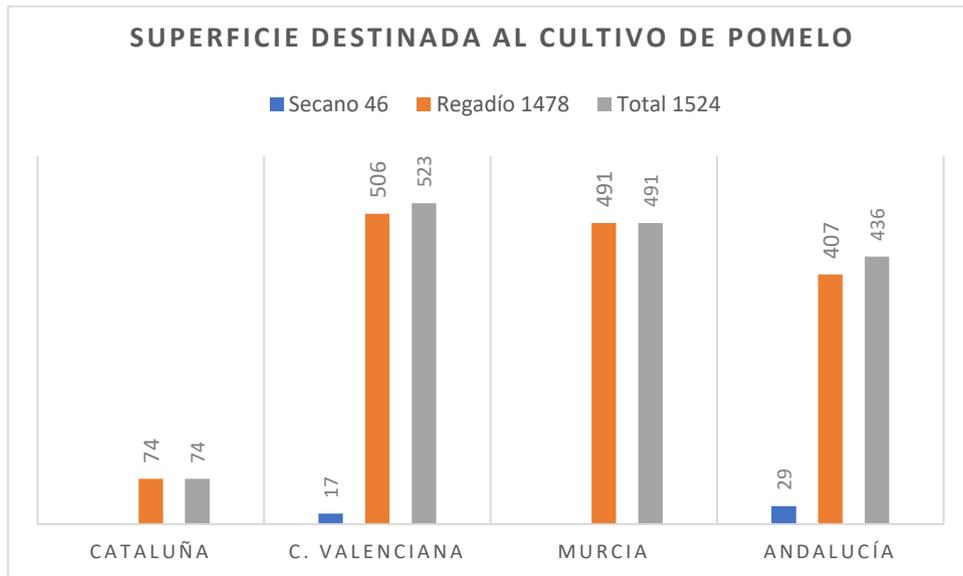


Figura 4. Superficie en 2016 destinada al cultivo de pomelo en España por CC.AA. (ha) y modalidad de riego.

Fuente: ESYRCE, 2016

La superficie destinada al cultivo de pomelo ha aumentado a lo largo de los años. En 2004 era de 1.117 hectáreas, valor que se mantuvo prácticamente estable hasta llegar al año 2008, en la que aumentó a 1.640 hectáreas. A partir de entonces y hasta el año 2014 la superficie se mantuvo en un valor alrededor de 1.800 hectáreas (Figura 5). La producción ha aumentado de forma más estable, con 29.771 toneladas en 2004 y obteniendo 68.545 toneladas en 2014 (Figura 6), habiéndose producido un aumento del 130%.

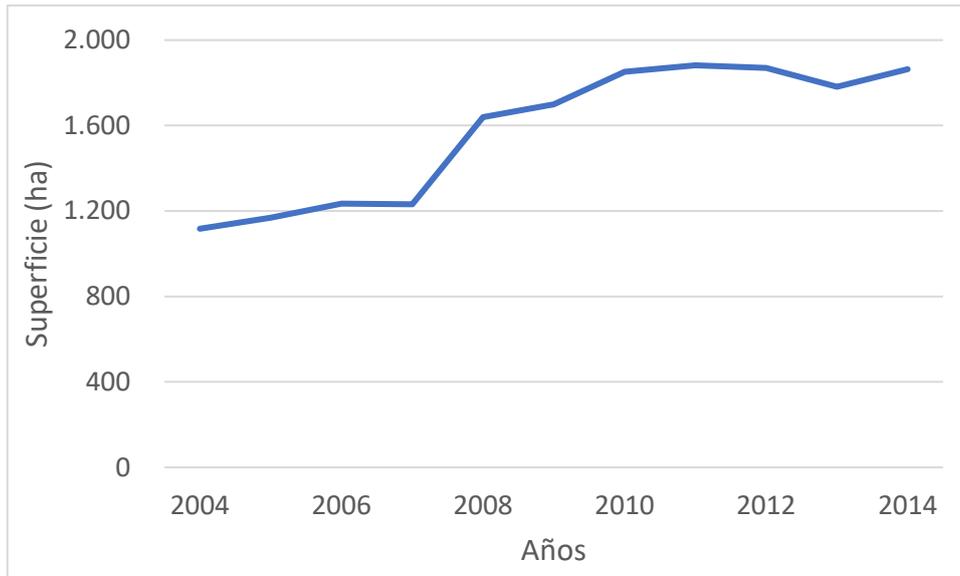


Figura 5. Evolución superficie cultivada en España 2004 – 2014.

Fuente: MAGRAMA, 2017

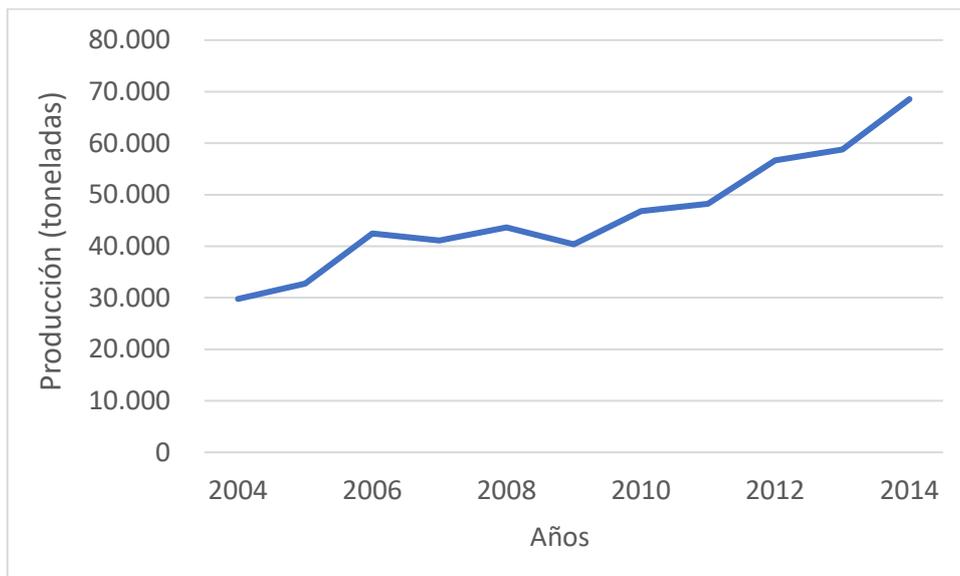


Figura 6. Evolución de la producción de pomelo en España 2004 – 2014.

Fuente: MAGRAMA, 2017

En la campaña 2013/2014 el total de hectáreas destinadas al cultivo de pomelo era de 1.864, de las cuales había 1.753 en producción. El rendimiento de la superficie en producción fue de 39.100 kg/ha y se obtuvieron 68.545 toneladas.

En la campaña 2014/2015 la producción fue de 81.900 toneladas, que tuvieron como destino principal la exportación a los mercados de la UE (61.000 toneladas), con importantes incrementos en países como Alemania, Francia o Reino Unido, con tasas de aumento de la presencia del pomelo español entre el 20 y 30% de media.

Una pequeña cantidad se exportó a los mercados de países terceros (2.100 toneladas) donde destacan las primeras exportaciones a Arabia Saudí y Emiratos Árabes. Por su parte, el mercado interior se estima en 7.000 toneladas con un ligero crecimiento año tras año, y una mayor presencia del pomelo en los lineales de los supermercados y fruterías. Finalmente, la industria transformó 9.000 toneladas, usando la fruta de menor calidad.

En el campo andaluz ha tenido lugar un aumento de la producción de pomelo en los últimos años. En 2014/15, los agricultores de la región produjeron un 43,7% más respecto a los últimos cuatro años. En cuanto a la superficie, ésta se mantuvo estable respecto a la campaña anterior (597 hectáreas), aunque la producción aumentó un 16% con respecto al año anterior gracias a las condiciones meteorológicas y al buen manejo en campo, como se observa a partir de las cifras de rendimiento, que rondaron las 37.238 toneladas por hectárea (72,3% respecto al periodo 2010-2014).

Aunque el consumo de pomelo en España no es tan habitual como en el resto de Europa, cada vez se hace más común. Fuera de nuestras fronteras, uno de los países con más consumo es Inglaterra, donde se dirigen gran parte de las exportaciones, que en la campaña 2014/15 sumaron 6.000 toneladas, un 15% más que en la campaña anterior.

Para la campaña 2015/2016 se confirmó una previsión de cosecha en España de 72.000 toneladas, una cifra un 12% inferior a la campaña anterior en la que se alcanzó una cifra de 81.900 toneladas.

Al igual que en el resto de los cítricos, la merma se debe a las condiciones climatológicas adversas en la fase de floración y cuaje en la primavera, lo que supone un menor número de piezas y un ligero aumento de los calibres medios. (ALLIMPO, 2017).

2.1.3. Producción en la Región de Murcia

La Región de Murcia es una de las principales provincias en la producción de frutas y hortalizas debido al clima mediterráneo semiárido que se da en la zona a pesar de que el agua es muy escasa, ya que se aprovecha con la máxima eficacia. Entre las frutas más destacadas están los cítricos, y entre ellos predominan limones y pomelos.

La superficie de pomelo en la Región ha sufrido cambios a lo largo de los últimos años (Figura 7), manteniéndose constante entre 2010 y 2012 (alrededor de 660 hectáreas) para después disminuir en 2013 (570 ha). A partir de ese año y hasta 2015, volvió a aumentar llegando a 748 hectáreas y de nuevo en 2016 descendió hasta valores cercanos a los registrados en 2013 (579 ha) (CARM, 2016).

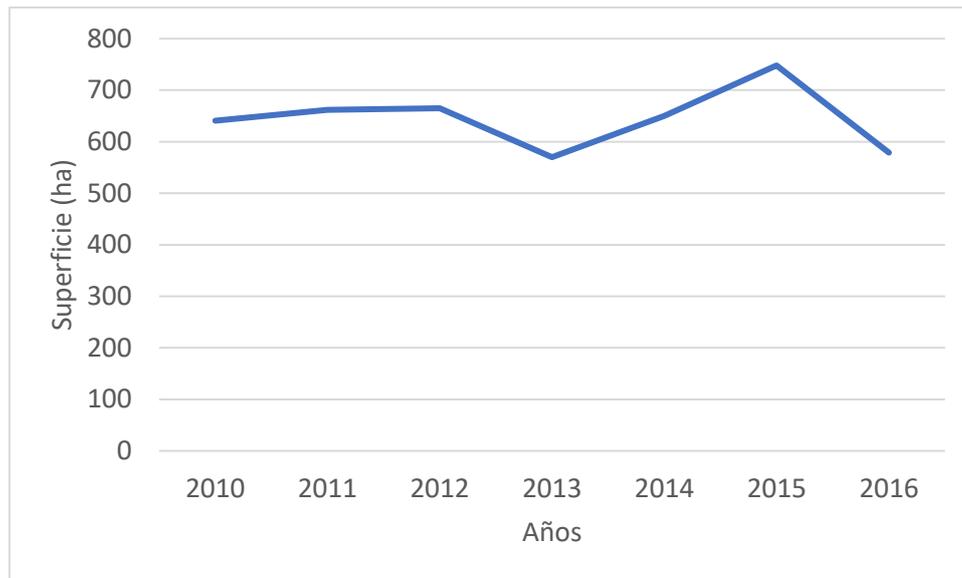


Figura 7. Evolución de la superficie cultivada de pomelo en la Región en 2010 – 2016.

Fuente: CARM, 2016

En la Región de Murcia toda la producción de cítricos se encuentra en regadío. Actualmente existen 579 hectáreas destinadas a la producción de pomelo, de las cuales 560 se encuentran en producción. Esta superficie supone el 1,53% de las hectáreas destinadas a la producción total de cítricos. El limonero ocupa casi un 63%, el naranjo un 21%, el mandarino un 14,6% y el limero abarca una superficie de tan sólo el 0,14% del total de cítricos (CARM, 2016).

Dentro de la Región de Murcia, la superficie cultivada de pomelo se concentra entre Murcia y Lorca, con un 32% y un 28% respectivamente, quedando el resto repartido entre el resto de municipios (Figura 8).

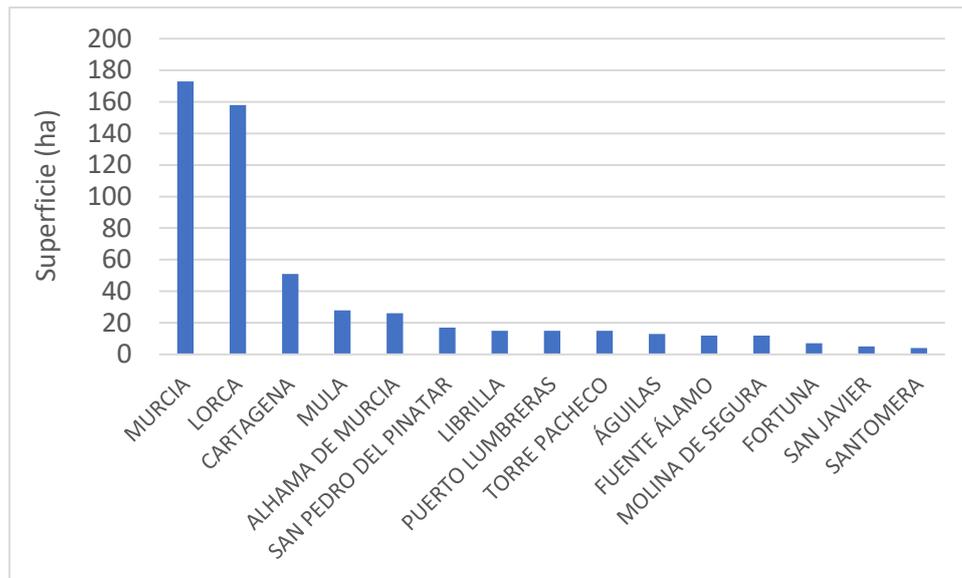


Figura 8. Municipios de la Región de Murcia con superficie en producción de pomelo.

Fuente: CARM, 2016

La producción de pomelo en el año 2015 alcanzó las 34.639 toneladas, lo que supone el 5% de la producción de cítricos. La producción de limón abarca el 59%, el naranjo el 19% y el mandarino el 16%.

Desde el año 1975 la producción de pomelo se ha incrementado considerablemente pasando de tan solo 341 toneladas hasta las casi 35.000 de 2015. Pero el aumento no fue constante, sino que la producción ha sufrido altibajos hasta conseguir su valor máximo en 2015 para al año siguiente volver a disminuir (Figura 9).

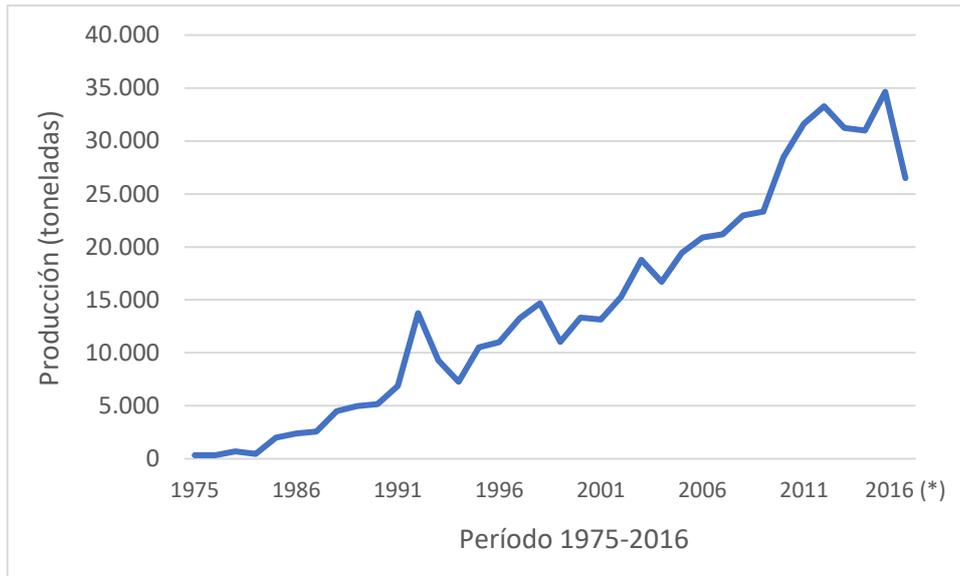


Figura 9. Evolución producción de pomelo en la Región de Murcia desde 1975.

Fuente: CARM, 2016

Analizando la producción de los últimos 7 años, se observa que la producción se incrementó ligeramente hasta 2012 cuando alcanzó las 33.280 toneladas, a partir de ese año disminuyó y en 2015 alcanzó la producción máxima con 34.639 toneladas. En 2016 se produjo una disminución del 23%, obteniendo 26.500 toneladas ese año (Figura 10).

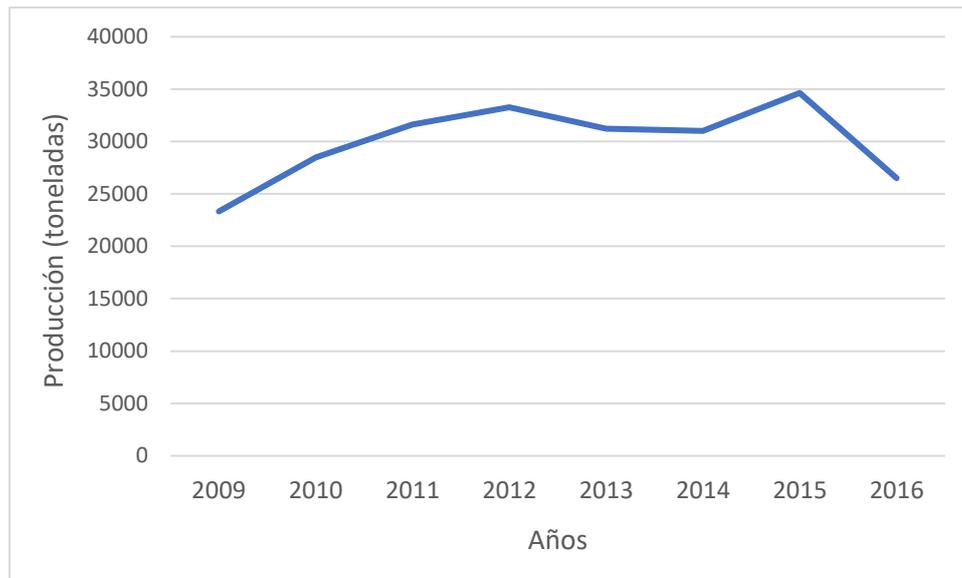


Figura 10. Evolución de la producción en la Región de Murcia en los últimos 7 años.

Fuente: CARM, 2016

2.2. Caracterización energética y de emisiones de la agricultura de regadío.

2.2.1. Importancia de la agricultura de regadío

En España predominan las zonas secas y semiáridas de clima mediterráneo. El rango de temperaturas es el idóneo para la producción agrícola, pero esta zona presenta un déficit de humedad del suelo debido a las escasas precipitaciones. Por esta razón el regadío ha sido una medida eficaz para reducir la fuerte limitación que el régimen de lluvias impone a la agricultura, permitiendo incrementar la productividad de la tierra y garantizar una producción permanente.

La importancia que el regadío tiene en la agricultura española se basa en su contribución a la producción final y al comercio exterior de productos agrícolas, al desarrollo agroindustrial y al asentamiento de población en el medio rural. Contribuye a la obtención del 60% de la producción final agrícola ya que la productividad del

regadío es siete veces superior a la del secano, a pesar de que la agricultura bajo riego no es intensiva en todo el país.

En 2016 había 3.655.417 hectáreas con regadío en España. Lo que supone un 21,5% del total de la superficie cultivada (16.987.299 ha). El 78,5% restante corresponde a las 13.331.882 hectáreas que se encuentran en secano. Los sistemas de riego utilizados dicho año fueron; en primer lugar, el riego localizado con un 50,63%, en segundo lugar, el sistema de gravedad con un 25,8%, seguido de riego por aspersión con un valor del 15,04% y por último está el sistema de riego automotriz con el 8,53% (ESYRCE, 2016).

En la Región de Murcia hay 182.737 hectáreas en regadío, lo que supone el 39,61% de su superficie cultivada. Las 278.603 hectáreas restantes son de secano, lo que supone el 60,39% restante. Es la Comunidad que presenta una tasa mayor de regadío sobre superficie geográfica, con un 16,59% en 2016. De esta superficie regada la mayor parte lo está mediante riego localizado (83,48%), un 15,96% mediante riego por gravedad y solamente un 0,56% por sistemas de aspersión. El riego automotriz es anecdótico en los últimos años, este sistema se caracteriza por la distribución de agua a presión mediante mecanismos que se desplazan de forma autónoma. La tendencia en la distribución de la superficie regada en la región es aumentar el riego localizado y a disminuir los sistemas por gravedad (ESYRCE, 2016).

2.2.2. Impacto energético y emisiones de GEI

El regadío proporciona importantes beneficios a la sociedad pero genera un gran impacto medioambiental por ser una importante fuente de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, asociada al empleo de fertilizantes (nitrogenados,

fosfatos, potásicos, etc.) y productos fitosanitarios (insecticidas, herbicidas, fungicidas); y por el uso intensivo de insumos con un gran consumo energético (como combustibles, electricidad, fertilizantes, pesticidas y maquinaria) que está provocando un gran aumento de la demanda de energía en este sector.

Además, hay que tener en cuenta la gran diferencia entre la productividad de la agricultura de secano y la de regadío, que provoca una importante tendencia hacia la transformación del secano a regadío, con lo que se agravan todos los problemas medioambientales asociados a la escasez de los recursos hídricos (<http://elregadio.blogspot.com.es>).

Otro de los problemas que genera la actividad agrícola es la emisión de gases de efecto invernadero como consecuencia del empleo de combustibles fósiles, electricidad, maquinaria y fertilizantes. Las más importantes son las de óxido nitroso (N₂O) producido en los suelos a partir de los fertilizantes nitrogenados, el metano (CH₄) generado en el proceso digestivo de los rumiantes y el dióxido de carbono (CO₂) (IPCC, 2017).

2.2.3. Mitigación de las emisiones, del impacto energético y medioambiental

Con el objeto de identificar cuáles son las acciones a realizar para mitigar los impactos de las actividades agrícolas, se debe realizar en la explotación un inventario de actividades que forman parte del proceso productivo y sus respectivos impactos energéticos y de emisiones. Este estudio permite determinar sobre qué inputs sería recomendable reducir su uso o por cuales se podrían sustituir para que sean medioambientalmente más sostenibles.

En la actualidad, se están tomando diversas medidas para conseguir una sostenibilidad en la agricultura de regadío. Algunas de ellas son:

- El empleo de las TIC para reducir la aplicación de agua, el consumo de energía, de fertilizantes y productos fitosanitarios y tener así una mayor eficiencia y productividad.
- La realización de auditorías energéticas, para conseguir una reducción del consumo de energía.
- La utilización de cubiertas vegetales y el mantenimiento de la fertilidad del suelo mediante la realización de buenas prácticas agrícolas, evita que se produzca la degradación la cual lleva asociada la pérdida de la estructura, el aumento de las pérdidas de carbono orgánico, el aumento de la lixiviación de nitratos entre otros factores que contribuyen al cambio climático.
- Aplicar estrategias de riego como el riego deficitario controlado, la aplicación de agua regenerada o el uso de sistemas de riego muy eficientes. Fomentar la recogida de agua de lluvia en las parcelas y la cubrición de las balsas de riego para evitar la evaporación.
- Aumentar el uso de variedades resistentes a plagas y enfermedades y de depredadores naturales para evitar el empleo de productos fitosanitarios.
- Aumentar el uso de plásticos biodegradables para el acolchado de los cultivos.
- Emplear técnicas de plantación y de laboreo para disminuir la erosión del suelo, aprovechar el agua de lluvia y reducir consumo de energía de maquinaria agrícola.
- Aplicar los protocolos de calidad y las normas medioambientales, como la ISO 14001.

- Dar una formación continua a los agricultores y asegurar la presencia de técnicos cualificados en las explotaciones agrícolas. Y, por último, fomentar la colaboración entre regantes, administración, centros de investigación y universidades. (<http://elregadio.blogspot.com.es>)

2.3. Nexos Agua – Energía – Emisiones.

El nexo agua-energía se denomina así debido a la fuerte interrelación existente entre ambos insumos, ya que son necesarios para cualquier desarrollo social. Se encuentra ligado al cambio climático ya que el ahorro de agua implica ahorro de energía y, por tanto, minimiza la emisión de gases de efecto invernadero. En España mientras el consumo de agua por hectárea se ha reducido un 21% entre 1950 y 2007, la demanda de energía ha aumentado un 657% (Corominas, 2009).

La agricultura pertenece al sector primario. Dicho sector consume el 11% de la energía de la Región de Murcia aproximadamente. El consumo se puede dividir en los productos petrolíferos (70%), que se emplean principalmente en la maquinaria, y la electricidad (30%), que se emplea para el abastecimiento de agua de riego.

La progresiva modernización de los sistemas de riego y el creciente aumento de superficie de regadío hace que se establezca una relación intensa entre el agua y la energía, ya que se requiere una gran cantidad de agua y el suministro, transporte y aplicación de la misma requiere una gran cantidad de energía. Esta relación hace que el uso del agua afecte al uso de la energía y las decisiones de gestión del agua a las decisiones de gestión de la energía (<http://elregadio.blogspot.com.es>).

El continuo aumento de la población mundial y en consecuencia de la demanda de alimentos; la mejora del nivel de vida de los habitantes, que demandan productos

de calidad; la competencia con otros sectores por el agua junto con la escasez debida a las sequías y la sobreexplotación de acuíferos; el creciente uso de fertilizantes y el aumento en el precio del combustible, hace necesario llevar a cabo mejoras técnicas y de gestión para obtener una mayor productividad del agua y la energía.

En cultivos de regadío, la energía asociada es la necesaria para extraer, transportar y aplicar agua al cultivo, y el agua es la necesaria para obtener un aumento de biomasa. En estos cultivos, en épocas de sequía se precisa la extracción de agua de pozos o el transporte de la misma desde un lugar lejano con el aumento de energía y por tanto aumento de la relación energía-agua.

La agricultura en particular libera grandes cantidades de metano y óxido nitroso, dos potentes gases de efecto invernadero. Se puede liberar metano por el estiércol y los residuos orgánicos almacenados en los vertederos. Las emisiones de óxido nitroso son un producto indirecto de los fertilizantes nitrogenados orgánicos y minerales.

La agricultura ha sido la responsable del 10% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero de la UE en 2012. Entre 1990 y 2012, las emisiones de la agricultura de la Unión se redujeron un 24% gracias a una disminución significativa de la cabaña ganadera, a una aplicación más eficiente de los fertilizantes y a una mejor gestión del estiércol.

Para facilitar su adaptación al cambio climático, los agricultores pueden recurrir a algunos Fondos de la UE en, como el Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER), la política agrícola común (PAC) y los préstamos del Banco Europeo de Inversiones (BEI). La PAC también dispone de otros fondos destinados a reducir las

emisiones de gases de efecto invernadero generadas por las actividades agrarias. Una gestión eficiente de los cultivos puede conducir a que los mismos actúen como sumidero de CO₂, una vez descontadas las emisiones necesarias para su producción (AEMA, 2016).

2.4. Recursos hídricos disponibles para riego en la Cuenca del Segura.

El origen del agua utilizada para riego en la Región de Murcia es muy variable. Por un lado se encuentran las aguas superficiales que provienen de los ríos Segura y Mundo, los afluentes Moratalla, Argos, Quípar y Mula, de las ramblas del Judío, Moro, Tinajón, Salada y Abanilla, estos últimos de muy reducida importancia, el río Guadalentín y por último las ramblas litorales. Las aguas superficiales de la Cuenca presentan una conductividad eléctrica media superior a 3 dS/m, por tanto, existe un riesgo grave de salinización. La mejor calidad la presenta el agua de la zona de la Vega Alta con una CE de 1,51 dS/m y la del Noroeste con una CE de 1,58 dS/m.

También se usan las aguas subterráneas, cuyos recursos se estiman en 546 hm³/año. Se lleva produciendo una sobreexplotación de los acuíferos en la Cuenca desde finales de los 80, que aumenta en períodos de sequía para poder satisfacer la demanda hídrica de los cultivos cuando la disponibilidad de otros recursos disminuye notablemente. El valor medio de la CE de las aguas subterráneas es de 2,64 dS/m. La mejor CE se da en la zona del Noroeste y en la Vega Alta con valores de 0,60 y 0,73 dS/m respectivamente, mientras la zona del litoral presenta unos valores medios muy altos, de 3,97 dS/m.

El volumen asignado para riego agrícola del Trasvase Tajo-Segura es de 400 hm³, pero en la práctica el valor medio es muy inferior, de 204 hm³/año.

Agua procedente de la desalinización. En la última década se han construido numerosas desalinizadoras, ante la necesidad de incrementar los recursos hídricos en los períodos de sequía. Se estima que la producción total de agua desalada en la Cuenca para riego durante la última década está entre 50 y 101 hm³/año. Un inconveniente es el alto coste de producción debido al elevado consumo energético de estas plantas, por lo que muchas solo se ponen en marcha en el caso de no disponer de agua proveniente de otros recursos.

Para los regadíos estas aguas presentan un elevado coste por lo que tan sólo son competitivas en situaciones puntuales de muy grave escasez, producciones de alta rentabilidad, o en caso de disponibilidad de agua con otro origen y a coste inferior para su mezcla. Otro inconveniente es el alto nivel de emisiones de gases de efecto invernadero. La principal ventaja de la desalinización es que se trata de un recurso inagotable y que no se encuentra sujeto a variaciones climáticas, por lo que resulta idóneo para aumentar la disponibilidad de recursos hídricos para riego en zonas deficitarias.

La última opción es la del agua regenerada. La reutilización es muy valiosa para la agricultura, dado que garantiza el recurso de forma continua y se puede usar como medida para solucionar los problemas de la escasez de agua. El organismo encargado de la depuración de las aguas urbanas en la Región de Murcia es la Entidad Regional de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales (ESAMUR). Se trata de una Empresa Pública Regional adscrita a la Consejería de Agricultura y Agua de la Comunidad Autónoma. Los volúmenes de agua depurados durante el periodo 2002-11 en la Región

de Murcia han tenido un valor medio anual de 103 hm³. Actualmente se reutiliza más del 98% de las aguas depuradas (CRCC, 2015).

2.4.1. Efectos del cambio climático.

El calentamiento atmosférico ha alterado la duración de la estación de crecimiento en grandes partes de Europa. Las épocas de floración y cosecha de los cereales se han adelantado varios días.

La productividad agraria del norte de Europa podría aumentar al prolongarse la estación de crecimiento y el período sin heladas. El aumento de las temperaturas y la prolongación de las temporadas de crecimiento también podrían facilitar la producción de nuevos cultivos. En el sur de Europa, sin embargo, las olas de calor extremo y la reducción de las precipitaciones y del agua disponible limiten la productividad agraria. También es previsible que el rendimiento anual de las cosechas varíe cada vez más debido a los episodios meteorológicos extremos y a otros factores como plagas y enfermedades.

En algunas zonas del Mediterráneo, el estrés hídrico y térmico extremo de los meses de verano podría obligar a desplazar la producción de algunos cultivos estivales al invierno. Las variaciones de las temperaturas y de las estaciones de crecimiento podrían afectar a la proliferación y propagación de algunas especies, como insectos, malas hierbas invasoras, o enfermedades, lo que podría afectar a las cosechas. Parte de las pérdidas se podrían evitar con prácticas agrarias como la rotación de cultivos para adaptarlos a la disponibilidad de agua, ajustar las épocas de siembra a las pautas de temperatura y precipitación y utilizar variedades de cultivos más adecuadas a las nuevas condiciones.

El cambio climático también se ve afectado por la agricultura ya que ésta libera grandes cantidades de metano y óxido nitroso, como producto indirecto de los fertilizantes nitrogenados orgánicos y minerales. En la producción de alimentos se liberan gases de efecto invernadero a la atmósfera. Dada la gran importancia de los alimentos para la sociedad, es difícil reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de la agricultura. Sería útil el uso de técnicas innovadoras en los métodos de producción, como la captura del metano emitido por el estiércol o una mayor eficiencia en el uso de los fertilizantes.

Para aumentar la productividad de la tierra destinada a la agricultura suele ser necesario el empleo de fertilizantes nitrogenados, que a su vez liberan emisiones de óxido nitroso y contribuyen al cambio climático. La agricultura intensiva y la aplicación de fertilizantes también liberan nitratos al suelo y a las masas de agua. Aunque no están directamente relacionadas con el cambio climático, las altas concentraciones de nutrientes (especialmente fosfatos y nitratos) presentes en las masas de agua causan eutrofización. La eutrofización favorece el crecimiento de algas y agota el oxígeno del agua, hecho que tiene graves repercusiones para la vida acuática y la calidad del agua.

La creciente necesidad de más tierra de uso agrícola está propiciando la deforestación, fundamentalmente fuera de la Unión Europea. Pero esto no es una solución, ya que este proceso genera emisiones de gases de efecto invernadero.

Desde aproximadamente 1950 se han observado cambios en muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos. Algunos de estos cambios han sido asociados con influencias humanas, como por ejemplo la disminución de las temperaturas frías extremas, el aumento de las temperaturas cálidas extremas, la elevación de los niveles

máximos del mar y el mayor número de precipitaciones intensas en diversas regiones (AEMA, 2016).

2.4.2. Estrategias de riego deficitario.

A nivel mundial, la mayoría de las zonas de regadío tienen como criterio de 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 es insostenible en regiones con escasos recursos hídricos.

En la cuenca mediterránea, se da un clima propicio para la fotosíntesis y producción de los cultivos. Pero la escasez e irregularidad de las precipitaciones unido a la alta demanda evaporativa son las causas del desarrollo de fuertes déficits hídricos estacionales. De ahí que el agua sea el principal factor de producción. Por ello es imprescindible mejorar la gestión de este recurso.

La Región de Murcia se caracteriza por tener un clima árido – semiárido. En estas condiciones es obligatorio utilizar el agua de riego eficientemente. Para ello además de la innovación tecnológica de los sistemas de riego es necesario introducir cambios sustanciales en el manejo del riego, a partir del conocimiento de la respuesta de los cultivos al déficit hídrico.

Por otro lado, el creciente coste del agua obliga a aprovechar mejor este recurso para que al menos se puedan reducir los costes de producción. Los sistemas de riego localizado, altamente automatizados, han logrado altas eficiencias de riego, sin embargo, puede que el ahorro de agua derivado del cambio de riego sea insuficiente para mantener muchos de los sistemas agrícolas actuales, por lo que será necesario desarrollar prácticas agrícolas que sean compatibles con el medio natural y capaces de

mantener e incluso incrementar el desarrollo agrario alcanzado (Domingo y Ruiz-Sánchez, 1995).

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.

El riego deficitario es una alternativa para mejorar la eficiencia del riego y reducir los aportes de agua en zonas con escasa disponibilidad de agua. Se debe repartir uniformemente el déficit de agua durante todo el ciclo para evitar que haya estrés severo en el algún momento. En su concepto más amplio consiste en el riego deliberado y sistemático con menos agua de la que necesitan los cultivos para su máxima producción.

La economía del riego deficitario ha sido objeto de numerosos estudios, en los que se ha comprobado que con el riego deficitario se pueden maximizar los ingresos por unidad de agua aplicada siempre que se tenga un conocimiento preciso de cómo aplicarlo correctamente. También repercute beneficiosamente en la calidad del fruto por el efecto regulador sobre el crecimiento vegetativo de la planta. En situaciones donde el factor limitante es el agua y no la superficie regable puede ser una alternativa económicamente viable (Castel, 1999).

Se debe estudiar si es mejor aplicar un déficit hídrico a lo largo de todo el ciclo o en períodos fenológicos concretos, riego deficitario controlado. El riego deficitario controlado (RDC) consiste en reducir el aporte de agua en aquel momento en que el cultivo es menos sensible al déficit hídrico, regando normalmente el resto del año. Se

ha observado que el RDC no solo aumenta la productividad del agua sino que también puede producir un incremento en los azúcares del fruto, como se comprobó en un estudio en naranja Sultana (Castel y Buj, 1993).

2.4.3. Riego con recursos no convencionales.

La climatología en España, y especialmente en el sur y sureste del país, donde existen zonas de baja pluviometría y largos períodos de sequía, obliga a racionalizar y optimizar la gestión del agua. Esta condición, junto con el aumento de la demanda, provoca la necesidad de buscar nuevos recursos complementarios o alternativos. Las aguas residuales depuradas y regeneradas, y las aguas desalinizadas son un recurso viable y óptimo.

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 (Bouwer, 1992; Arrojo, 1998; Vergés, 1998).

Una técnica de incremento de las disponibilidades es la desalinización del agua, que consiste en tratar aguas saladas o salobres procedentes del mar o de acuíferos salinos y quitarles las sales, transformándolas en aguas aptas para usos como el de abastecimiento a poblaciones o los riegos.

Otra opción es la del agua regenerada, que se entiende como agua residual que después de ser sometida a un proceso de tratamiento, adquiere una calidad satisfactoria para un uso en particular (Asano, 1998). 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 es cada vez más importante en el manejo del agua en aquellas regiones donde existen problemas de escasez.

La región Mediterránea, debido a sus condiciones hidroclimáticas, necesita incorporar la reutilización de agua dentro del balance de sus recursos hídricos como estrategia. 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. Actualmente el sector agrícola consume un 75% del agua regenerada en España. Murcia con un total de 93 plantas depuradoras trató 105 hm³ de agua residual (ESAMUR, 2017), destinada mayoritariamente a uso agrícola. Este volumen supone un 13% de los recursos hídricos utilizados en la agricultura murciana (CARM, 2016).

Hay que prestar especial atención a la presencia de nutrientes, exceso de salinidad, la toxicidad por iones y los microelementos al usar agua regenerada. 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 al aumento de la presión osmótica, 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. Los problemas de salinidad en el suelo se pueden reducir mediante lavado y drenaje.

2.4.4. Sostenibilidad del riego deficitario con aguas no convencionales.

El interés en la aplicación de aguas regeneradas junto con estrategias de gestión eficiente del agua, como el riego deficitario controlado, se ha visto motivado por la escasez de agua. De esta forma se tiene una mayor productividad y eficiencia del uso del agua. La combinación de agua regenerada y riego deficitario tiende a producir niveles altos de estrés y 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, 2008). La combinación de estrategias de riego deficitario controlado y uso de agua regenerada puede verse afectada a largo plazo debido a la acumulación de sales y boro en el suelo (Pedrero, 2011).

3. Objetivos

Este trabajo tiene dos objetivos. Por una parte, analizar el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero tras hacer uso de diferentes estrategias de riego: riego convencional (riego para satisfacer totalmente la demanda evapotranspirativa del cultivo; ETc) y riego deficitario controlado combinado o no con agua regenerada, en un cultivo de pomelo “Star Ruby”. Se incluye la novedad de considerar cuatro fases del ciclo de cultivo. Por otra parte, se evalúan los principales inputs que afectan a la demanda de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero bajo cada uno de los sistemas productivos. De esta forma se obtiene una vista general de sobre qué aspectos se podría actuar para aumentar la eficiencia de estos sistemas.

4. Materiales y métodos.

4.1. Zona de estudio y tratamientos de riego

4.1.1. Zona de estudio y diseño del experimento

El estudio se llevó a cabo en una finca comercial de 0,5 hectáreas, situada en Campotéjar (Murcia), en el sureste de España (38°07'18'' N; 1°13'15'' O). En 2004 se plantó la parcela con pomelos "Star Ruby" (*Citrus paradisi* Macf.), injertados sobre patrón "*Citrus Macrophylla* Wester". El marco de plantación es de 6 x 4 metros (Figura 11).

En total se utilizaron 192 árboles para el estudio. El diseño del experimento fue al azar, teniendo cuatro zonas y cuatro parcelas experimentales por zona. Una parcela estándar estaba compuesta de doce árboles, de forma que hubiera tres filas de cuatro árboles cada una. Los dos árboles centrales de la fila del centro se usaban para las mediciones de rendimiento y el resto de árboles servían para eliminar el posible efecto borde.



Figura 11. Vista aérea de la parcela de estudio.

4.1.2. Tratamientos de riego

Se establecieron cuatro casos de estudio en base a la combinación de las dos fuentes de agua con los dos tratamientos de riego que se utilizaron. Una de las fuentes de agua es la procedente del trasvase Tajo – Segura (AT), con una conductividad eléctrica (CE) de 1 dS/m. La otra fuente de agua era agua salina que provenía de una estación de tratamiento de aguas residuales (AR). Esta fuente se mezclaba automáticamente con la del trasvase con el fin de reducir su CE a valores de 3 dS/m, para poder tener una conductividad eléctrica constante durante el experimento. La mezcla consistía en un 63% de agua de la EDAR y un 37% de agua del trasvase.

Por una parte, los tratamientos con AT y AR consistieron en aplicar el total del agua perdida por la evapotranspiración diaria del cultivo durante toda la temporada. Por otro lado, los tratamientos de riego deficitario controlado (RDC) se basaban en la aplicación del 100% de la ET_c excepto en la segunda fase de crecimiento del fruto, 55-65 días entre finales de junio y mediados de septiembre. En este periodo recibió el 50% del agua aplicada en el control. La fracción de lixiviación no se añadió a las dosis de riego. El riego deficitario con agua regenerada comenzó a partir de 2008. De 2005 a 2007 la totalidad de la plantación fue regada con agua del trasvase al 100% de la ET_c .

4.2. Unidades funcionales y límites del sistema

Para realizar las comparaciones de la demanda de energía y las emisiones de GEI entre los diferentes casos de estudio, se eligieron dos unidades funcionales para este estudio. Una unidad funcional de masa definida como 1 kg de pomelos durante un período anual de cultivo (rendimiento comercial de los cultivos, kg/año) y una unidad funcional definida como 1 hectárea de cultivo por año.

Los límites del sistema se consideraron desde la extracción de la materia prima utilizada en la parcela hasta la producción de pomelo. Los procesos y flujos del sistema incluyen entradas y salidas hasta la producción de pomelo. El consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas del tratamiento de las aguas residuales para producir agua regenerada se consideraron en el estudio (Figura 1).

La producción de plantas en vivero (i), (ii) las emisiones de GEI de la producción, mantenimiento al final de la vida útil de los inputs, (iii) la eliminación de materiales o desechos, (iv) y la fabricación y construcción de una nave para el almacenamiento de maquinaria agrícola y una valla para la finca no fueron incluidos en la evaluación.

4.3. Adquisición de datos.

4.3.1. Análisis de inputs

Para realizar el análisis se creó un inventario desde 2004 a 2014 para las cuatro fases del ciclo de cultivo: (i) establecimiento del cultivo a finales del año 2004, (ii) fase juvenil (improductiva) desde 2005 a 2007, (iii) fase productiva joven desde 2008 a 2010 y (iv) fase productiva adulta desde 2011 a 2014. El inventario se realizó en base a los siguientes aspectos (Tabla 1).

a) Labor humana

Es una forma de energía directa y renovable. Se tomó como labor humana toda aquella actividad relacionada con las diferentes tareas realizadas en la parcela. Como, por ejemplo: la excavación del embalse, instalación de las tuberías de riego, mantenimiento del sistema de riego, la realización de hoyos para plantación, la implantación del cultivo, aplicación de fertilizantes y pesticidas, eliminación de malas

hierbas, realización de la poda, el triturado de los restos de poda y la recolección. Los recursos y la duración de estas actividades se han recogido de Maestre Valero et al. (2016).

b) Maquinaria

Se trata de una variable indirecta y no renovable que hace referencia a las distintas tareas realizadas por la maquinaria. Para el inventario se consideró el peso (kg) de la maquinaria asociada a cada una de las actividades realizadas en el cultivo durante las diferentes fases. Es decir, para la excavación del embalse (excavadora y tractor de 92 kW), hoyos para plantación (cavador de hoyos y tractor de 60 kW), establecimiento del cultivo (tráiler y tractor de 60 kW), aplicación de pesticidas (tanque de pulverización o pulverizador y tractor de 60 kW) y triturado de restos de poda (trituradora y tractor de 60 kW).

c) Combustible

Variable directa y no renovable, que se mide en litros. El consumo de diésel (L), fue aquel asociado al uso de la maquinaria en las diversas actividades realizadas en la parcela.

d) Fertilizantes

Se considera como una variable de entrada indirecta y no renovable. Los cuatro casos recibieron la misma cantidad de fertilizantes aplicados a través del sistema de riego por goteo. En 2005, las cantidades aplicadas fueron 89-45-64 kg/ha/año (N - P₂O₅ - K₂O), y se fue incrementando un 15% cada año hasta llegar a la fase adulta del cultivo.

e) Fitosanitarios

Engloba a herbicidas, fungicidas y plaguicidas. Se trata de productos de elevado coste energético de producción pero que se emplean relativamente en pequeña cantidad. Para el control de plagas se realizaron las técnicas habituales usadas por los agricultores de la zona. 3 kg/ha/año en la fase juvenil improductiva, 5 kg/ha/año en la fase productiva juvenil y 7 kg/ha/año en la fase adulta. No se permitió el desarrollo de malas hierbas en la parcela.

f) Electricidad

La electricidad es una variable energética directa y no renovable. Para el caso del agua que proviene del trasvase, la electricidad se evaluó teniendo en cuenta (i) tanto el coste de la energía utilizada para el transporte desde la fuente de agua hasta los puntos de abastecimiento de cada zona de riego y después la asignación a cada hidrante, establecida en 0,85 kW·h/m³; como (ii) el coste de riego dentro de la finca, establecido en 0,17 kW·h/m³ (MAGRAMA, 2014; Martin-Gorriz et al., 2014).

Por lo tanto, se utilizaron 1,02 kW·h/m³ para proporcionar cada m³ de agua del trasvase hasta la parcela.

En el caso del agua regenerada, la electricidad fue principalmente la asociada a la energía necesaria para producir agua regenerada en la EDAR (0,72 kW·h/m³), al transporte del agua a la parcela (0,07 kW·h/m³), y la energía necesaria para el riego en la finca (0,17 kW·h/m³) (Martin-Gorriz et al., 2014).

La electricidad se calculó como el producto del porcentaje usado en la mezcla de agua del trasvase (37%) por su energía asociada (1,02 kW·h/m³) y el producto del

agua procedente de la EDAR (63%) y la energía necesaria para producir, transportar y aplicar cada m^3 de agua ($0,96 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$) (Martin-Gorriz et al., 2014).

En resumen, se necesitó una energía media de $0,98 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ para proporcionar cada m^3 de agua regenerada a la parcela.

g) Embalse de riego

Se estimó un movimiento de tierras de 11.600 m^3 para la construcción de un embalse de 10.000 m^3 de capacidad. Dicha capacidad se fijó considerando un almacenamiento de agua suficiente para abastecer el riego durante 21 días consecutivos en el período de máxima demanda (Pérez-Pérez et al., 2010; Alcón et al., 2013). Además, se excavaron 145 metros de zanjas para enterrar las tuberías terciarias.

Se consideró también la instalación de una membrana impermeable de PE de alta densidad de 3.300 m^2 para evitar fugas de agua por infiltración.

h) Sistema de riego

El sistema de riego consiste en un cabezal de riego compuesto por bombas, un equipo de fertirrigación, electroválvulas, un programador para la automatización de los riegos y filtros. El cabezal bombeaba agua a la parcela a través de una tubería terciaria de PVC de 145 metros de longitud. Se instaló un total de 17 laterales de PE de 100 metros de longitud en la superficie del suelo cercana a los troncos. Se colocaron tres goteros autocompensantes de 4 L/h distanciados un metro y situados a un metro del tronco. Uno de los emisores se instaló en el establecimiento del cultivo (2004), mientras que los otros dos se instalaron a finales de 2006.

Las dosis de riego se programaron semanalmente en base a la evapotranspiración diaria del cultivo (ET_C) acumulada en la semana previa. Los valores de ET_C se estimaron a partir de la evapotranspiración de referencia (ET_0), calculada con el método de Penman–Monteith (Allen et al., 1998), y el coeficiente cultural (K_C). Los valores de K_C se modificaron durante la fase juvenil y la de producción inicial (de 2005 a 2010), con los coeficientes reductores de 0,50 y 0,75, respectivamente. Estos coeficientes representan la progresiva disminución de la evapotranspiración debida a la cobertura parcial del suelo por la superficie foliar del cultivo (Fereres et al., 1982).

Los caudales totales aplicados se cuantificaron con medidores de flujo de agua en línea, colocados en cada una de las cuatro zonas de estudio. El riego estaba automatizado mediante un programador en el cabezal de riego y electroválvulas.

Ud/ha	2004	2005-2007	2008-2010				2011-2014				
			AT	AT-RDC	AR	AR-RDC	AT	AT-RDC	AR	AR-RDC	
A. Entradas											
A.1. Entradas directas											
A.1.1. Labor humana h											
Excavación embalse	234.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Instalación tuberías	32.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Preparación del suelo	34.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Plantación	69.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Mantenimiento finca	-	4.0	-	-	4.4*	-	-	-	5.6	-	
Preparación de fertilizantes	-	8.7	-	-	8.7	-	-	-	8.7	-	
Preparación de pesticidas	-	6.0	-	-	12.0	-	-	-	20.0	-	
Poda	-	71.0	-	-	141.0	-	-	-	211.5	-	
Recolección	-	104.3	-	-	139.0	-	-	-	208.5	-	
Total Labor humana	370.6	194.0			305.1				454.3		
A.1.2. Diésel l											
Excavación embalse	6714.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Preparación del suelo	271.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Plantación	271.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Aplicación de pesticidas	-	14.7	-	-	29.4	-	-	-	49.0	-	
Poda	-	14.7	-	-	29.4	-	-	-	49.0	-	
Total Diésel	7256.5	29.4	58.8	58.8	58.8	58.8	98.0	98.0	98.0	98.0	
A.1.3. Electricid. dentro parcela	kW·h	-	255.3	543.2a	472.0b	543.2a	472.0b	1006.4a	871.3b	1006.4a	871.3b
A.1.4. Electricid. fuera parcela	kW·h	-	1276.4	2716.0a	2360.1b	2611.1a	2268.9b	5032.0a	4356.3b	4837.6a	4188.1b
Total electricidad		-	1531.7	3259.2a	2832.1b	3154.3a	2740.9b	6038.4a	5227.6b	5844.0a	5059.3b
A.2. Entradas indirectas											
A.2. 1. Fertilizantes kg											
N	-	99.2	-	-	152.7	-	-	-	252.8	-	
P ₂ O ₅	-	49.6	-	-	76.3	-	-	-	114.7	-	
K ₂ O	-	71.5	-	-	110.3	-	-	-	170.8	-	
A.2. 2. Pesticidas kg											
Fungicidas	-	2.0	-	-	3.0	-	-	-	4.0	-	
Insecticidas	-	1.0	-	-	2.0	-	-	-	3.0	-	
A.2. 3. Material vegetal ud											
A.2. 4. Maquinaria h											
Excavación embalse	234.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Preparación del suelo	34.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Plantación	34.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Aplicación de pesticidas	-	6.0	-	-	12.0	-	-	-	20.0	-	
Poda	-	1.5	-	-	2.0	-	-	-	3.0	-	
Total Maquinaria	303.7	7.5			14.0				23.0		
A.2. 5. Agua para riego	m³	-	1501.6	3195.3a	2776.6b	3195.3a	2776.6b	5920.0a	5125.1b	5920.0a	5125.1b
A.2. 6. Sistema de riego											
Cabezal	kg	150.0	-	-	-	-	-	-	-	-	
Tuberías PE	m	1700.0	-	-	-	-	-	-	-	-	
Tuberías PVC	m	145.0	-	-	-	-	-	-	-	-	
Emisores	m	417.0	834.0	-	-	-	-	-	-	-	
Lámina HDPE - Embalse	m ²	3300.0	-	-	-	-	-	-	-	-	
Movimiento tierras - Embalse	m ³	11,600.0	-	-	-	-	-	-	-	-	
Movimiento tierras - Zanjas	m	145.0	-	-	-	-	-	-	-	-	
B. Salida de energía											
B.1. Rendimiento	kg	-	3475.0	28,614.7	26,592.2	25,544.4	23,331.3	76,860.0	71,399.7	74,825.6	65,569.8
C. Otros											
C.1. Productividad del agua	kg/m³	-	2.3	9.2	10.4	8.6	8.7	13.0	13.9	12.8	12.8

* Cuando se muestra sólo un valor en una línea dentro de una etapa del ciclo de vida del cultivo, significa que ese valor es igual para todos los casos de estudio.

** Las letras indican diferencias significativas entre los tratamientos siguiendo el Test de Tukey (P<0,05).

Tabla 1. Inventario de los inputs y outputs involucrados en el balance energético y las emisiones de gases de efecto invernadero para la producción de 1 ha de pomelos.

4.3.2. Análisis de la producción y rendimientos.

Para determinar el rendimiento del cultivo se seleccionaron ocho árboles centrales por tratamiento. El rendimiento en cada etapa del cultivo corresponde con la media de ese período. Los datos del periodo 2008-2010 fueron publicados por Pedrero et al. (2015). La productividad del agua de riego se calculó para cada uno de los experimentos como el ratio entre el rendimiento anual (kg/ha) y el agua aplicada (m^3/ha) durante un año. Únicamente se realiza en las fases productivas (Tabla 1).

4.4. Selección de factores de conversión energéticos y de emisiones.

4.4.1. Selección de factores de conversión energéticos

Los input y output de energía se calcularon anualmente desde 2004 a 2014 a partir de los inputs detallados en la Tabla 1 y aplicando los equivalentes energéticos de la Tabla 2, extraídos de la bibliografía. Los inputs de energía de 2004 para labor humana, consumo de diésel, material vegetal, maquinaria y sistema de riego atribuidos al establecimiento del cultivo, se distribuyeron anualmente considerando la vida útil de los materiales instalados y los trabajos llevados a cabo.

La determinación del balance energético en agricultura debe considerar inputs y outputs, y a su vez los inputs se deben dividir en energía directa e indirecta. Por una parte, la demanda de energía directa cubre la labor humana, la electricidad y el diésel usados en la producción del cultivo (Pimentel, 1992). La energía para labor humana y diésel se calculó multiplicando la cantidad de energía requerida por el sistema por sus respectivas unidades energéticas (Tabla 2). La electricidad usada para riego, ha sido calculada a partir del consumo de agua por parte del cultivo y la energía específica para cada caso de estudio. Las pérdidas en la generación y transporte de energía se

han estimado en un 70%, y por lo tanto 1 kW·h es equivalente a 12,1 MJ (Guzmán y Alonso, 2008). Por otra parte, el uso de energía indirecta incluye los inputs de energéticos de los materiales consumidos y los procesos de producción de fertilizantes, pesticidas, material vegetal, sistema de riego, el embalse y la maquinaria agrícola (Pimentel, 1992).

Los fertilizantes, pesticidas, material vegetal, depósito de agua y el sistema de riego se evaluaron multiplicando las cantidades usadas en el sistema por sus unidades de energía (Tabla 1). Las unidades energéticas de los fertilizantes y pesticidas fueron calculadas en base a Helsel (1992), que incluía empaquetado y transporte de materias primas y productos, y excluía el coste de distribución porque en el caso de los fertilizantes éstos se añadían directamente al agua de riego. La energía asociada al material vegetal se determinó en base a la metodología propuesta por Heichel (1980). El sistema de riego se ha calculado a partir de los datos de Batty y Keller (1980), considerando los factores de conversión actualizados de los inputs energéticos de las materias primas (Tabla 2).

La maquinaria ha sido calculada siguiendo la metodología propuesta por Bowers (1992), sumando la energía específica de las materias primas (86,77 MJ/kg) y la del proceso de fabricación (8,80 MJ/kg). Se añadió un 55% adicional al valor del proceso de fabricación para considerar la energía requerida en el mantenimiento de la maquinaria durante su ciclo de vida (Fluck, 1985).

En cuanto a los outputs, la energía de la producción del cultivo se tomó de la Base de Datos Española de Composición de Alimentos (BEDCA, 2017).

Por último, para la comparación entre los casos de estudio, se utilizaron los siguientes índices de energía para analizar la eficiencia de la producción del cultivo: (i) eficiencia energética (adimensional), también denominada relación de energía (RE), como el ratio entre la energía de los output (MJ/ha) y la de los inputs (MJ/ha) y (ii) la productividad energética (PE; kg/MJ) como el rendimiento (kg/ha) dividido por la energía total utilizada (MJ/ha).

Tipo	Unidad	Equivalente energético	Referencia
A. Entrada energía directa			
Labor humana	h	2.2	Fluck (1992)
Diésel	l	38.68	Bowers (1992)
Electricidad	kW·h	12.1	Guzmán y Alonso (2008)
B. Entrada energía indirecta			
Maquinaria	kg	95.57	Bowers (1992)
Fertilizantes			
N	kg	76.5	
P ₂ O ₅	kg	15.9	Helsel (1992)
K ₂ O	kg	12.7	
Pesticidas			
Fungicidas	kg	199	Helsel (1992)
Insecticidas	kg	92	
Material vegetal			
Árboles jóvenes	ud	9	Heichel (1980)
Sistema de riego			
Cabezal	kg	148	
Tubería PE	kg	112	
Tubería PVC	kg	49	Batty y Keller (1980)
Lámina HDPE - depósito	kg	8.5	
Movimiento de tierras - zanjas	m	0.375	
Movimiento de tierras - embalse	m ³	25.4	ELCD (2009)
C. Salida/Output			
Pomelo	kg	1.5	BEDCA (2017)

Tabla 2. Equivalentes energéticos de inputs y outputs.

4.4.2. Selección de factores de conversión de emisiones

Los GEI de la producción agrícola se evaluaron en base a cuatro grandes grupos de fuentes de emisión: (i) emisiones de GEI debidas al uso de combustibles fósiles y electricidad (Iberdrola, 2017; IPCC, 2006), (ii) emisiones de GEI de la maquinaria y el sistema de riego (Berge, 2009), (iii) las emisiones de GEI debidas a la producción, transporte, almacenamiento y transferencia de productos químicos agrícolas (Lal, 2004) y por último (iv) las emisiones de GEI del N₂O de los suelos debidos a la aplicación de fertilizantes nitrogenados (IPCC, 2006). Las emisiones de GEI se trataron/gestionaron como CO₂ equivalente (CO_{2eq}).

Las emisiones de CO_{2eq} se han calculado anualmente de 2004 a 2014 a partir de los inputs agrícolas detallados en la Tabla 1 y aplicando los factores de emisión presentados en la Tabla 3.

Las emisiones de CO_{2eq} en la etapa de establecimiento en 2004, atribuidas al establecimiento de la plantación, se distribuyeron anualmente considerando la vida útil de los materiales instalados y obras realizadas.

La Tabla 3 recoge los factores de emisión de CO_{2eq} asociados a los inputs agrícolas. Las emisiones de CO_{2eq} se calcularon como el producto entre la tasa de aplicación de inputs (electricidad, diésel, maquinaria, sistema de riego, fertilizantes y plaguicidas) y sus correspondientes factores de emisión de CO_{2eq}.

En el caso específico de la electricidad, el factor de emisión incluye las emisiones indirectas que se atribuyen a la extracción, producción y transporte de electricidad, así como a la pérdida de electricidad en la distribución en la red. Para estos cálculos, se

asumió que la electricidad en España es generada por varias fuentes. Por lo tanto, el factor de emisión correspondiente a la mezcla de energías renovables y no renovables de la empresa de suministro eléctrico fue de 0,30 kg CO_{2eq}/kW·h entre 2005 y 2007, 0,26 kg CO_{2eq}/kW·h entre 2008 y 2010 y 0,23 kg CO_{2eq}/kW·h entre 2011 y 2014 (Iberdrola, 2017).

Como resultado de las evaluaciones energéticas, se utilizaron los siguientes índices de CO_{2eq}: (i) emisiones específicas de GEI (kgCO_{2eq}/kg), calculadas como la relación entre la cantidad total de emisiones de CO_{2eq} (kgCO_{2eq}/ha) y el rendimiento (kg/ha), y (ii) las emisiones de gases de efecto invernadero (kgCO_{2eq}/ha) calculadas como la relación entre las emisiones de CO_{2eq} por hectárea.

Actividad	Gas	Unidad	Factor de emisión	Referencia
A. Emisiones de GEI debidas al uso de combustible y electricidad				
Electricidad		kg CO _{2eq}	0.30 – 0.23	Iberdrola
Diésel	CO ₂	kg CO _{2eq} MJ ⁻¹	74.1 x 10 ⁻³	IPCC (2006)
	CH ₄	kg CO _{2eq} MJ ⁻¹	21 x 10 ⁻⁵	
	NO ₂	kg CO _{2eq} MJ ⁻¹	19 x 10 ⁻⁵	
B. Emisiones de GEI de la maquinaria y el sistema de riego				
Maquinaria	CO ₂	kg CO _{2eq} MJ ⁻¹	74.1 x 10 ⁻³	Berge (2009)
Sistema de riego				
Lámina PVC	CO ₂	kg CO _{2eq} m ⁻²	5.7	Berge (2009)
Tubería PE	CO ₂	kg CO _{2eq} kg ⁻¹	2.2	
Tubería PVC	CO ₂	kg CO _{2eq} kg ⁻¹	3.0	
Cabezal	CO ₂	kg CO _{2eq} kg ⁻¹	1.8	
Lámina HDPE – Embalse	CO ₂	kg CO _{2eq} kg ⁻¹	2.2	
C. Emisiones de GEI debidas a la producción, transporte, almacenamiento y transferencia de productos químicos agrícolas				
Fertilizantes				
N	CO ₂	kg CO _{2eq} kg ⁻¹	1.3	Lal (2004)
P ₂ O ₅	CO ₂	kg CO _{2eq} kg ⁻¹	0.2	
K ₂ O	CO ₂	kg CO _{2eq} kg ⁻¹	0.15	
Pesticidas				
Fungicidas	CO ₂	kg CO _{2eq} kg ⁻¹	3.9	Lal (2004)
Insecticidas	CO ₂	kg CO _{2eq} kg ⁻¹	5.1	
D. Emisiones de GEI del NO₂ de los suelos debidos a la aplicación de fertilizantes nitrogenados				
N ₂ O directo de inputs nitrogenados (fertilizantes)	NO ₂	kg CO _{2eq} kg ⁻¹ N input	4.87	
N ₂ O directo de N por lixiviación o escorrentía	NO ₂	kg CO _{2eq} kg ⁻¹ N input	1.096	IPCC (2006)
N ₂ O indirecto de la descomposición atmosférica de N volatilizado como NH ₃ y NO _x				
Fertilizante sintético	NO ₂	kg CO _{2eq} kg ⁻¹	0.487	

Tabla 3. Factores de emisiones de GEI que provienen de los inputs.

4.5. Análisis estadístico

Los resultados obtenidos a partir de los diferentes tratamientos se analizaron por separado por etapas del ciclo de vida, es decir, las etapas productivas joven y adulta.

Se utilizó un análisis de varianza de un factor/unidireccional (ANOVA) para probar la hipótesis de igualdad de medias. Además, cuando las diferencias eran significativas, se realizó el Test de Tukey, con un nivel de confianza del 95%.

4.6. Balances e identificación de indicadores.

La relación output-input se refiere a la cantidad de producto que se obtiene después del uso de las variables que se incorporan al sistema.

Por productividad se entiende el nivel de producción obtenido (kg) por unidad de energía empleada (MJ). Por medio de la productividad se pone a prueba la capacidad del sistema de producción y el nivel en el cual se aprovechan los recursos disponibles. Es preciso señalar que una mayor productividad supone un aumento de la rentabilidad.

$$\text{Productividad de la energía (kg/MJ)} = \frac{\text{Producción (kg/ha)}}{\text{Entrada de energía (MJ/ha)}} \text{ (Ec. 1)}$$

La energía específica se define como la energía (MJ) que entra al sistema por unidad de producción (kg). Esta expresión es inversamente proporcional a la productividad de la energía de tal forma que a mayor cantidad de energía requerida para producir un kg de producto mayor será la energía específica.

$$\text{Energía específica (MJ/kg)} = \frac{\text{Entrada de energía (MJ)}}{\text{Producción (kg)}} \text{ (Ec. 2)}$$

La productividad del agua se expresa mediante la relación entre la producción obtenida (kg) y el agua empleada (m³) en su obtención. A menor cantidad de agua necesaria para producir un kg de un determinado producto mayor será la productividad de la misma.

$$\text{Productividad del agua (kg/m}^3\text{)} = \frac{\text{Producción (kg)}}{\text{Agua (m}^3\text{)}} \text{ (Ec. 3)}$$

Las emisiones específicas de CO₂ (g/kW·h) expresan las emisiones de CO₂ asociadas a la generación de la electricidad que se consume, y se convierte en un indicador de las fuentes energéticas que se utilizan para producir electricidad. Cuanto más baja es la relación, mayor es la contribución de fuentes energéticas bajas en carbono.

$$\text{Emisiones específicas de CO}_2 \text{ (g/kW} \cdot \text{h)} = \frac{\text{CO}_2 \text{ (g)}}{\text{Electricidad (kW} \cdot \text{h)}} \text{ (Ec. 4)}$$

La huella hídrica se define como el volumen de agua dulce necesario (m³) por unidad de producto obtenido (kg). Esta expresión es inversamente proporcional a la productividad del agua.

$$\text{Huella hídrica (m}^3\text{/kg)} = \frac{\text{Agua (m}^3\text{)}}{\text{Producción (kg)}} \text{ (Ec. 5)}$$

5. Resultados y discusión.

5.1. Caracterización del consumo y distribución de la energía.

La Tabla 4 presenta la conversión energética de los inputs para los cuatro casos de estudio y las cuatro etapas del ciclo de vida del cultivo.

En la etapa de establecimiento del cultivo, los inputs de energía directa e indirecta fueron de 202.260,9 MJ/ha (Figura 12), los valores máximos se atribuyeron a los materiales del sistema de riego (70,6% de los inputs energéticos totales) (Figura 13a). Se debe tener en cuenta que los inputs energéticos en esta etapa también se han distribuido entre todos los años de la vida de la plantación. En cuanto a las entradas de energía directa, los valores más altos se atribuyeron al consumo de diésel destinado a la excavación del embalse, la preparación del suelo y la plantación del cultivo (46.939,5 MJ/ha, 99,3% del total de insumos directos y 23,2% del total de insumos). Mientras que en el caso de las entradas indirectas, los valores más altos de energía fueron asociados a los materiales del sistema de riego (142.762,6 MJ/ha, 92,1% de los insumos indirectos totales); especialmente a la lámina de PE para la impermeabilización del embalse (53.295,0 MJ/ha).

Como norma general, para las etapas de cultivo juvenil (2005-2007), joven (2008-2010) y adulto (2011-2014), los inputs energéticos máximos se atribuyeron a la electricidad para el riego (valor medio del 46,8% de la energía total entradas, la figura 3a y el 72,5% de las entradas directas totales). En segundo lugar, los inputs energéticos también estuvieron asociados a la producción, transporte y almacenamiento de fertilizantes nitrogenados (valor medio del 17,7% de los inputs energéticos totales y del 50,3% de los inputs indirectos totales).

En el caso de la etapa improductiva, los inputs energéticos directos (22.751,4 MJ/ha) e indirectos (18.436,5 MJ/ha) alcanzaron un valor de 41.187,9 MJ/ha (Figura 12). En esta etapa, la productividad del agua fue baja (2,03 kg/m³), como consecuencia de la relación entre el agua utilizada para el riego (1501,6 m³/ha) y el bajo rendimiento obtenido (3475 kg/ha) (Tabla 1). Estos resultados también se manifestaron en los valores bajos de RE (0,13) y PE (0,08 kg/MJ) observados (Tabla 4).

En las etapas joven y adulta, los inputs energéticos fueron de 66.492,2 ± 3014,7 MJ/ha y 109.756,8 ± 7409,7 MJ/ha, respectivamente. En la etapa adulta, estos resultados fueron bastante similares a los calculados por Martin-Gorriz et al. (2014) para limonero, mandarina y naranjo en el sureste de España (98.481,3 ± 6871,7 MJ/ha) y notablemente superiores a los presentados por Ozkan et al (2014) en Turquía (57.589 ± 7646 MJ/ha). En este último caso, se debió a las menores cantidades de agua y electricidad utilizadas para el riego; 330 m³/ha y 624,9 kW·h, respectivamente. En estas dos etapas, las diferencias entre los casos de estudio sólo se observaron en los inputs indirectos totales, específicamente los asociados a la cantidad y el tipo de recurso hídrico utilizado para el riego. Se observaron resultados similares al analizar los valores de energía acumulados de 2008 a 2014 (Tabla 6). Como era de esperar, RE y PE aumentaron conforme al crecimiento del cultivo al volverse este más eficiente (Tabla 4).

En cuanto a las estrategias de RDC, el ahorro de agua (alrededor del 13%) condujo a reducciones directas del consumo de energía del 11,4% en la etapa joven y del 12,1% en la etapa adulta, independientemente del tipo de agua utilizada para el riego; agua del trasvase o regenerada (Tabla 4). Además, este ahorro de agua también

redujo los outputs energéticos en un 7,1% en el caso de usar agua del trasvase para riego, un 8,7% en el caso de usar agua regenerada en la etapa joven y un 12,4% en el uso de la misma durante la etapa adulta (Figura 14). En la etapa joven, independientemente del tipo de agua utilizada, los porcentajes de reducción para los inputs, outputs y rendimiento fueron muy similares y por tanto los valores de RE y PE también fueron muy similares; 0,62 y 0,41 kg/MJ para los casos de estudio AT y AT-RDC y 0,56 y 0,37 kg/MJ para los casos de estudio AR y AR-RDC (Tabla 4). En la etapa adulta, el ahorro de AT condujo a reducciones similares para los outputs (7,1%), inputs (8,5%) y rendimiento (7,1%), obteniendo también relaciones RE y PE similares (1,01 y 0,67 kg/MJ). Sin embargo, la reducción de AR condujo a mayores reducciones del rendimiento y de los outputs (alrededor del 12,1%) en comparación con los inputs (8,4%) (Figura 14), reduciendo así el RE y PE de 1,01 y 0,67 kg/MJ en el caso de estudio de agua regenerada a 0,95 y 0,63 kg/MJ en el caso de riego deficitario con agua regenerada (Tabla 4).

El riego con agua regenerada no tuvo ningún efecto sobre los inputs energéticos, y sólo se observaron ligeras variaciones en el cálculo de la electricidad para riego (reducciones del 3,2% para los inputs energéticos directos, independientemente de la etapa del ciclo de vida del cultivo). El rendimiento fue muy similar entre los casos de estudio de AT y AR (Tabla 1) y, por tanto, los outputs energéticos fueron también muy similares (reducciones de 10,7% y 2,6% para las producciones de energía en las etapas joven y adulta, respectivamente). En la etapa joven, como el porcentaje de reducción de la energía producida (10,7%) fue mayor que el de los inputs energéticos (1,8%), el RE se redujo de 0,62 en el caso del uso de AT y a 0,56 en el caso de AR. Además, como el rendimiento se redujo en un 10,7% en el caso

de AR, la PE también se redujo de 0,41 kg/MJ en el caso de AT a 0,37 kg/MJ en el caso de AR (Tabla 4). En la etapa adulta, los porcentajes de reducción para los outputs (2,65%), los inputs (2,00%) y el rendimiento (2,65%) fueron bastante similares, por lo que se obtuvieron resultados similares de RE (1,00) y PE (0,66 kg/MJ) (Tabla 4).

Caracterización energética y medioambiental de la aplicación de riego deficitario con agua regenerada en un cultivo de pomelo

	2004	2005-2007	2008-2010				2011-2014				
			AT	AT-RDC	AR	AR-RDC	AT	AT-RDC	AR	AR-RDC	
A. Entradas											
A.1. Entradas directas											
A.1.1. Labor humana											
Excavación embalse	51.6	2.6		2.6*				2.6			
Instalación tuberías	70.4			3.5				3.5			
Preparación suelo	76.5	3.8		3.8				3.8			
Plantación	152.9	7.6		7.6				7.6			
Mantenimiento finca	-	8.8		9.7				12.3			
Preparación de fertilizantes	-	19.1		19.1				19.1			
Preparación de pesticidas	-	13.2		26.4				44.0			
Poda	-	156.2		310.2				465.3			
Recolección	-	229.4		305.8				458.7			
Total Labor humana	351.3	444.2		688.7				1017.0			
A.1.2. Diésel											
Excavación embalse	25.971.0	1298.6		1298.6				1298.6			
Preparación suelo	10.484.2	524.2		524.2				524.2			
Plantación	10.484.2	524.2		524.2				524.2			
Aplicación de pesticidas	-	1137.2		2274.4				3790.6			
Poda	-	290.1		386.8				580.2			
Total diésel	46939.5	3774.3		5008.2				6717.8			
A.1.3. Electric. dentro parcela	-	3088.8	6572.7a	5711.4b	6572.7a	5711.4b	12177.4a	10542.3b	12177.4a	10542.3b	
A.1.4. Electric. fuera parcela	-	15444.1	32863.3	28556.9	31593.9	27453.9	60887.2a	52711.4b	58535.5a	50675.5b	
Total Electricidad	-	18532.9	39435.9a	34268.3b	38166.6a	33165.3b	73064.6a	63253.7b	70712.9a	61217.7b	
Total Entradas directas de energía	47290.8	22751.4	45132.8a	39965.1b	43863.5a	38862.2b	80799.4a	70988.4b	78447.7a	68952.5b	
A.2. Entradas indirectas											
A.2. 1. Fertilizantes											
N	-	7587.7		11679.0				19335.7			
P ₂ O ₅	-	788.5		1213.7				1823.3			
K ₂ O	-	908.6		1401.2				2169.8			
Total Fertilizantes	-	9284.9		14.293.9				23.328.7			
A.2. 2. Pesticidas											
Fungicidas	-	398.0		597.0				796.0			
Insecticidas	-	92.0		184.0				276.0			
Total pesticidas	-	490.0		781.0				1072.0			
A.2. 3. Material vegetal	3753.0	187.7		187.7				187.7			
A.2. 4. Maquinaria											
Excavación embalse	2736.5	136.8		136.8				136.8			
Preparación suelo	1660.0	83.0		83.0				83.0			
Plantación	4057.9	202.9		202.9				202.9			
Aplicación de pesticidas	-	741.1		1482.2				2470.4			
Poda	-	164.2		219.0				328.5			
Total Maquinaria	8454.5	1328.1		2124.0				3221.6			
A.2. 5. Sistema de riego											
Cabezal	22200.0	1110.0		1110.0				1110.0			
Tuberías PE	11424.0	571.2		571.2				571.2			
Tuberías PVC	25175.4	1258.8		1258.8				1258.8			
Emisores	116.8	13.6		17.5				17.5			
Lámina HDPE – Embalse	53295.0	2664.8		2664.8				2664.8			
Movimiento tierras – Embalse	29464.0	1473.2		1473.2				1473.2			
Movimiento tierras - Zanjas	1087.5	54.4		54.4				54.4			
Total Sistema de riego	142762.6	7138.1		7149.8				7149.8			
Total Entradas indirectas de energía	154970.1	18436.5		24536.4				34959.8			
Total Entradas de energía	202260.9	41187.9	69669.1a	64501.5b	68399.8a	63398.5b	115759.2a	105948.3b	113407.5a	103912.3b	
B. Outputs											
B.1. Rendimiento	0	5212.5	42.922.0	39.888.4	38.316.6	34.997.0	115.289.9	107.099.5	112.238.4	98.354.7	
C. Otros											
C.1. Ratio energético (output/input)	-	0.13	0.62	0.62	0.56	0.55	1.00	1.01	0.99	0.95	
C.2. Productividad de la energía (kg/MJ)	-	0.08	0.411	0.412	0.37	0.37	0.66	0.67	0.66	0.63	

* Cuando se muestra sólo un valor en una línea dentro de una etapa del ciclo de vida del cultivo, significa que ese valor es igual para todos los casos de estudio.

** Las letras indican diferencias significativas entre los tratamientos siguiendo el Test de Tukey (P<0,05).

Tabla 4. Balance de energía considerando los inputs agrícolas y el rendimiento de los cuatro casos de estudio (AT, AT-RDC, AR, AR-RDC) y las cuatro etapas del ciclo de vida del cultivo (establecimiento, juvenil improductiva, joven y adulta). Unidades en MJ/ha.

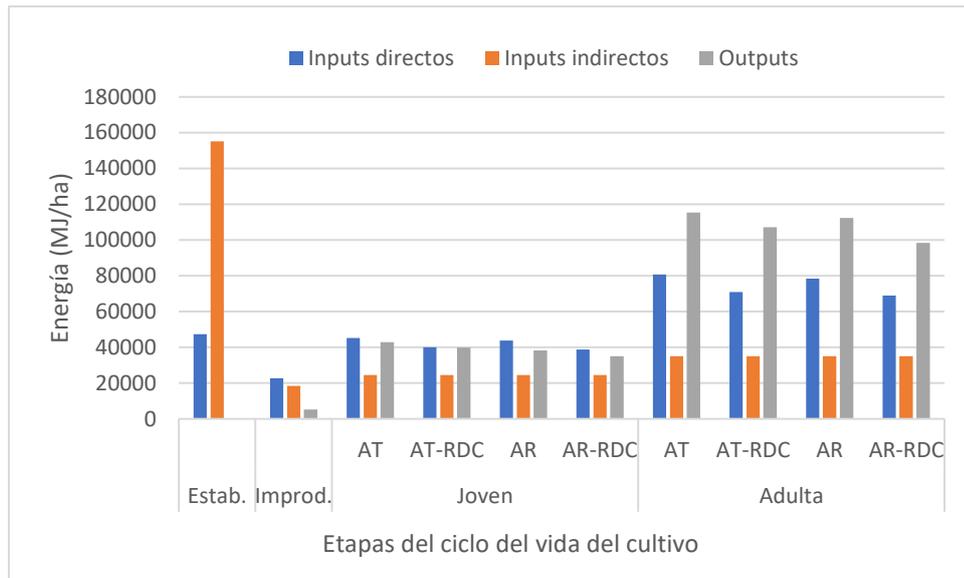


Figura 12. Inputs energéticos directos e indirectos para los cuatro casos de estudio y las cuatro etapas del ciclo de vida del cultivo.

5.2. Caracterización y distribución de las emisiones de CO₂.

La Tabla 5 muestra las emisiones de GEI para los cuatro casos de estudio y las cuatro etapas del ciclo de vida de los cultivos.

En la etapa de establecimiento, se atribuyeron las mayores emisiones de GEI al sistema de riego (21.984,3 kgCO₂/ha, 84,2% de las emisiones totales de GEI) (Tabla 5, Figura 13b), mientras que el diésel utilizado por la maquinaria para la excavación del embalse, la preparación del suelo y la plantación del cultivo desempeñaron un papel secundario (13,4% de las emisiones totales de GEI). Se debe tener en cuenta que las emisiones de GEI en esta etapa también se han distribuido entre todos los años del ciclo de vida del cultivo.

En general, para las etapas de cultivo juvenil (2005-2007), joven (2008-2010) y adulto (2011-2014), las emisiones máximas de GEI se asociaron con la fertilización nitrogenada (33,1%, de las cuales el 5,8% corresponde a las emisiones de GEI debidas a la producción, transporte y almacenamiento de nitrógeno y el resto a las emisiones de NO_2 de los suelos como consecuencia de la aplicación de fertilizantes nitrogenados), el 27,3% al sistema de riego (valor medio del 23,3%) y la electricidad para el riego un valor medio de 25,8% (figura 13b).

En la fase juvenil, hasta dos tercios de las emisiones totales de GEI (2.741,1 kgCO_2/ha) se asocian principalmente al sistema de riego (40,1%) y a los fertilizantes nitrogenados (28,0%). En esta etapa, la electricidad para el riego se encuentra en tercer lugar, ya que los árboles sólo cubrían parcialmente el suelo y por lo tanto el suministro de agua para el riego (ET_c) se redujo a la mitad (Fereres et al., 1982).

En las etapas joven y adulta, las emisiones totales de GEI se incrementaron hasta $3766 \pm 75 \text{ kgCO}_2/\text{ha}$ y $5540 \pm 141 \text{ kgCO}_2/\text{ha}$, respectivamente. En ambas etapas se observaron diferencias asociadas específicamente a la cantidad y tipo de recurso hídrico utilizado para riego. Estas diferencias también se observaron al realizar el análisis acumulativo de las emisiones de GEI entre 2008 y 2014 (Tabla 6). Como se mencionó anteriormente para el consumo de energía, estos resultados fueron muy similares a los calculados por Martin-Gorriz et al (2014) para limonero, mandarino y naranjo ($3737,0 \pm 456,3 \text{ kgCO}_2/\text{ha}$) en el sureste de España. Cabe destacar que el intercambio neto de una plantación de cítricos adultos puede oscilar entre 5500 kgCO_2/ha y 6500 kgCO_2/ha (Liguori et al., 2009; Consoli et al., 2013; Maestre-Valero et al., 2017); valor que es más alto que las emisiones de CO_2 calculadas en cualquier caso

de estudio y por lo tanto evidenciando la potencial capacidad de sumidero de las explotaciones de cítricos.

Las estrategias de RDC, independientemente del tipo de agua utilizada, dieron lugar a reducciones de las emisiones de GEI del 3,3% y 4,3% en la etapa joven y adulta, respectivamente (Tabla 5). Así como los porcentajes de reducción en el rendimiento en los casos de estudio de RDC (7,1% y 8,7% en los casos de AT-RDC y AR-RDC en la etapa joven, respectivamente y 7,1% y 12,4% en los casos de AT-RDC y AR-RDC durante la etapa adulta, respectivamente) fueron mayores que aquellos para las emisiones de GEI, las emisiones específicas de GEI fueron ligeramente mayores en los casos de RDC (0,140 kgCO₂/kg y 0,158 kgCO₂/kg para los casos de AT-RDC y AR-RDC en la etapa joven, respectivamente y 0,076 kgCO₂/kg y 0,082 kgCO₂/kg para los casos de estudio AT-RDC y AR-RDC en la etapa adulta, respectivamente (Tabla 5).

Como se observó para el consumo de energía, el riego con agua regenerada apenas tuvo efecto en las emisiones de GEI, ya que sólo se observaron ligeras variaciones en el cálculo de la electricidad para riego (reducciones del 3,2% independientemente del ciclo de vida del cultivo).

En la etapa joven, el rendimiento de la zona de la parcela regada con agua regenerada se redujo en un 10,7%, mientras que las emisiones de GEI sólo se redujeron en 0,8%. Por consiguiente, las emisiones específicas de GEI aumentaron hasta 0,149 kgCO₂/kg; es decir, un 11,1% mayor que la zona de la parcela regada con agua del trasvase (Tabla 5).

En la etapa adulta, el riego con agua regenerada condujo a porcentajes similares de reducción en rendimiento (2,6%) y emisiones (0,9%), por lo que no se

detectó ningún efecto para emisiones específicas de GEI (aproximadamente 0,077 kgCO₂/kg para todos los casos de estudio). Es de destacar que cuanto mayor es la plantación, mayores son las emisiones de gases de efecto invernadero y menores las emisiones específicas de GEI.

	2004	2005-2007	2008-2010				2011-2014			
			AT	AT-RDC	AR	AR-RDC	AT	AT-RDC	AR	AR-RDC
A. Emisiones de GEI debidas al uso de combustible y electricidad										
A.1. Electricidad										
Electric. fuera de parcela para riego	-	382.9	814.8a	708.0b	783.3a	680.7b	1509.6a	1306.9b	1451.3a	1256.4b
Electric. dentro de parcela para riego	-	76.6	163.0a	141.6b	163.0a	141.6b	301.9a	261.4b	301.9a	261.4b
Total Electricidad	-	459.5	977.8a	849.6b	946.3a	822.3b	1811.5a	1568.3b	1753.2a	1517.8b
A.2. Diésel										
Excavación embalse	1934.8	96.7		96.7*				96.7		
Preparación suelo	781.1	39.1		39.1				39.1		
Plantación	781.1	39.1		39.1				39.1		
Aplicación de pesticidas	-	84.7		169.4				282.4		
Poda	-	21.6		28.8				43.2		
Total Diésel	3497.0	281.2		373.1				500.5		
Total Grupo A	3497.0	740.7	1220.5a	1109.5b	1193.2a	1085.8b	1768.5a	1598.3b	1727.7a	1562.9b
B. Emisiones de GEI de la maquinaria y el sistema de riego										
B.1. Maquinaria										
Excavación embalse	202.8	10.1		10.1				10.1		
Preparación suelo	123.0	6.2		6.2				6.2		
Plantación	300.7	15.0		15.0				15.0		
Aplicación de pesticidas		54.9		109.8				109.8		
Poda		12.2		16.2				16.2		
Total Maquinaria	626.5	98.4		157.4				238.7		
B.2. Sistema de riego	21984.3	1100.7		1099.2				1099.2		
Total Grupo B	22610.8	1199.2		1256.6				1337.9		
C. Emisiones de GEI debidas a la producción, transporte, almacenamiento y transferencia de productos químicos agrícolas										
C.1. Fertilizantes										
N	-	128.9		198.5				328.6		
P ₂ O ₅	-	9.9		15.3				22.9		
K ₂ O	-	10.7		16.6				25.6		
Total Fertilizantes	-	149.6		230.3				377.1		
C.2. Pesticidas										
Fungicidas	-	7.8		11.7				15.6		
Insecticidas	-	5.1		10.2				15.3		
Total Pesticidas	-	12.9		21.9				30.9		
Total Grupo C	-	162.5		252.2				408.0		
D. Emisiones de GEI del NO₂ de los suelos debidos a la aplicación de fertilizantes nitrogenados										
D.1. N₂O directo de inputs nitrogenados (fertilizantes)										
	-	483.0		743.5				1230.9		
D.2. N₂O directo de N por lixiviación o escorrentía										
	-	108.7		167.3				277.0		
D3. N₂O indirecto de la descomposición atmosférica de N volatilizado como NH₃ y NO_x										
Fertilizante sintético	-	48.3		74.3				123.1		
Total grupo D	-	640.0		985.2				1631.0		
Emisiones de GEI por superficie (kg CO_{2eq}/ha)	26107.8	2742.4	3844.8a	3716.7b	3813.3a	3689.3b	5689.0a	5445.7b	5630.7a	53953b
Emisiones específicas de GEI (kg CO_{2eq}/kg)	-	0.789	0.134	0.140	0.149	0.158	0.074	0.076	0.075	0.082

* Cuando se muestra sólo un valor en una línea dentro de una etapa del ciclo de vida del cultivo, significa que ese valor es igual para todos los casos de estudio.

** Las letras indican diferencias significativas entre los tratamientos siguiendo el Test de Tukey (P<0,05).

Tabla 5. Fuentes de emisión de GEI para los cuatro casos de estudio y las cuatro etapas del ciclo de vida de los cultivos. Unidades en kg CO_{2eq}/ha.

	Inputs energéticos (MJ/ha)				Emisiones de GEI (kg CO _{2eq} /ha)			
	AT	AT -RDC	AR	AR -RDC	AT	AT -RDC	AR	AR -RDC
Electr. en parcela	68427.7a	59303.3b	68427.7a	59303.3b	1696.56a	1470.33b	1696.56a	1470.33b
Electr. fuera parcela	342138.6	296516.3	328923.7	285063.5	8482.78a	7351.64b	8155.13a	7067.69b
Total electricidad	410566.3a	355819.5b	397351.4a	344366.8b	10179.33a	8821.97b	9851.69a	8538.02b

* Cuando se muestra sólo un valor en una línea dentro de una etapa del ciclo de vida del cultivo, significa que ese valor es igual para todos los casos de estudio.

Tabla 6. Energía acumulada y emisiones de GEI para la electricidad durante el período 2008 - 2014 para los cuatro casos estudiados.

En la distribución de los inputs energéticos se observa que en el establecimiento del cultivo tiene mayor representación el sistema de riego, mientras que en el resto de etapas del ciclo de cultivo y para todos los tratamientos de riego el que más porcentaje tiene es la electricidad utilizada para riego, siendo menor en los tratamientos de RDC.

Por otra parte, las mayores emisiones de GEI se atribuyeron al sistema de riego en la etapa de establecimiento. Mientras en el resto de etapas y para todos los tratamientos las mayores emisiones se atribuyeron a tres grupos: la electricidad, el sistema de riego y las emisiones de N₂O (Figura 13).

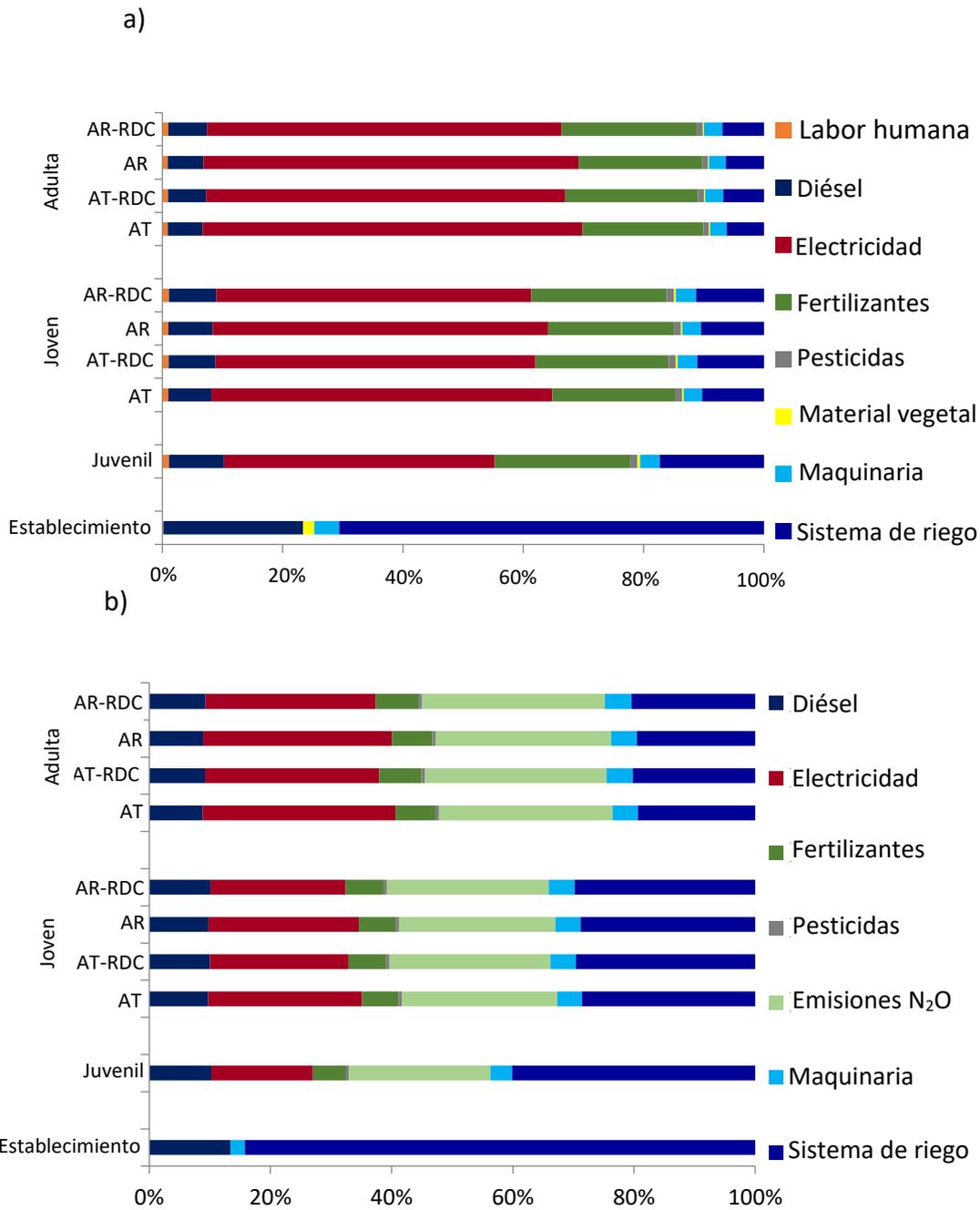


Figura 13. Distribución de los principales inputs energéticos (a) y emisiones de GEI (b) asociados a la producción por hectárea de pomelo para las cuatro etapas del ciclo de vida y los cuatro casos de riego considerados en el estudio.

Tanto en la etapa joven del cultivo como en la adulta, las mayores reducciones de emisiones de GEI se obtienen al reducir los inputs en los tratamientos de RDC. Consiguiendo una mayor reducción al combinarlo con agua regenerada, sobre todo en la etapa adulta, donde se alcanza una reducción del 12% aproximadamente.

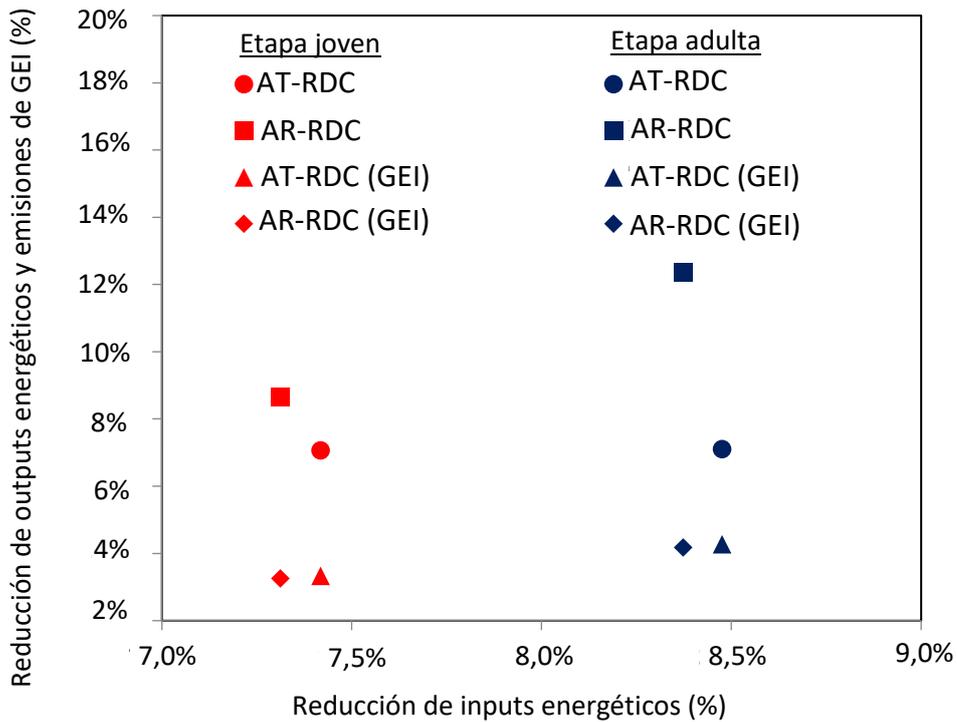


Figura 14. Relación entre el porcentaje de reducción de los inputs energéticos y el porcentaje de reducción de los productos y las emisiones de gases de efecto invernadero para las etapas jóvenes y adultas cuando se realizó riego regulado y con agua del trasvase (AT) y agua regenerada (AR).

6. Conclusiones y recomendaciones.

Este estudio ha evaluado, en una finca de pomelo, el consumo de energía y las emisiones de GEI de la aplicación de estrategias de riego deficitario controlado y/o riego con agua regenerada. El análisis ha considerado cuatro ciclos de vida diferentes del cultivo; el establecimiento de la plantación a finales de 2004, la etapa juvenil (improductiva) de 2005 a 2007, la etapa productiva joven de 2008 a 2010 y la etapa productiva adulta de 2011 a 2014.

En la etapa de establecimiento del cultivo, el sistema de riego fue el principal consumidor de energía con las mayores emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). En consecuencia, se pueden utilizar materiales reciclados o con mayor vida útil, que pueden requerir menos consumo de energía y emitir menos GEI, para reducir el impacto ambiental.

Para el resto de etapas de cultivo evaluadas (etapa juvenil, joven y adulta), la electricidad para el transporte y distribución de agua y los fertilizantes nitrogenados representan la mayor proporción de consumo de energía y emisiones de GEI. Por lo tanto, en el caso de la electricidad para el transporte de agua, los esfuerzos deben dirigirse a sustituir, en la medida de lo posible, la energía no renovable con energía renovable; es decir, electricidad generada por energía solar o eólica, con el fin de reducir notablemente el consumo de energía directa. Se debe tener en cuenta que el distribuidor de energía eléctrica del estudio utiliza actualmente un 55% de energía renovable (Iberdrola, 2017). Además, es necesario realizar una gestión de riego más eficiente, como las estrategias de riego deficitario controlado.

En el caso de los fertilizantes, se deben emplear soluciones respetuosas con el medio ambiente:

- La adopción de técnicas más eficientes en la producción de fertilizantes, especialmente fertilizantes nitrogenados.
- La sustitución de fertilizantes químicos por fertilizantes orgánicos.
- Determinar las necesidades exactas de nutrientes de los cultivos mediante la caracterización periódica del suelo y del agua.

La aplicación de estrategias de riego deficitario o el uso de agua regenerada tuvieron un efecto menor sobre la relación energética, la productividad energética y las emisiones específicas de GEI. Por lo tanto, bajo las condiciones de este estudio y teniendo en cuenta la limitación de disponibilidad de recursos hídricos convencionales, las estrategias de riego deficitario y el uso de agua regenerada se pueden adoptar como alternativas ambientalmente viables para mantener una agricultura sostenible. Se debe tener en cuenta que la fuente regular de agua utilizada para riego en este estudio proviene de la cuenca del Tajo, en el centro de España, con una energía específica media de 1,02 kWh/m³. Por lo tanto, la energía calculada y las emisiones de GEI en otras regiones con acceso a las aguas superficiales, con una energía específica mucho menor, podrían mostrar los casos de agua regenerada y estrategias de riego deficitario con agua regenerada como escenarios más desfavorables desde el punto de vista ambiental.

Referencias

- AEMA, 2016. Artículo: La agricultura y el cambio climático, Agencia Europea de Medio Ambiente.
- AILIMPO, 2017. Asociación Interprofesional de Limón y Pomelo, Murcia.
- Alcón, F., Martín-Ortega, J., Pedrero, F., Alarcón, J.J., de Miguel, M., 2013. Incorporating non-market benefits of reclaimed water into cost-benefit analysis: a case study of irrigated mandarin crops in southern Spain. *Water Resour. Manage.* 27, 1809–1820.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*. Rome, Italy, pp 15–27.
- Alluvione, F., Moretti, B., Sacco, D., Grignani, C., 2011. EUE (energy use efficiency) of cropping systems for a sustainable agriculture. *Energy* 36, 4468–81.
- Arrojo, P., 1998. Perspectivas socio-económicas del uso del agua en el regadío en España. *Tecnología del Agua*.
- Asano, T., 1998. Editor. *Wastewater Reclamation and Reuse*. Vol. 10. *Water Quality Management Library*. Technomic Publishing Inc. Lancaster, PA EE.UU.
- Asgharipour, M.R., Mondani, F., Riahinia, S., 2012. Energy use efficiency and economic analysis of sugar beet production system in Iran: A case study in Khorasan Razavi province. *Energy* 44, 1078–1084.
- Batty, J.C., Keller, J., 1980. Energy requirements for irrigation. In: Pimentel D, editor. *Handbook of energy utilization in agriculture*. Boca Raton, FL: CRC Press. p. 35–44.

BEDCA. Base de Datos Española de Composición de Alimentos. Ministerio de Ciencia e Innovación.

Berge, B., 2009. The ecology of building materials, ed. Elsevier, Oxford, UK.

Bouwer, H., 1992. Agricultural and municipal use of wastewater. Water Science and Technology.

Bowers, W., 1992. Agricultural field equipment. In: Fluck RC, editor. Energy in world agriculture, vol. 6. Amsterdam: Elsevier. p. 117–29.

Bundschuh, J., Chen, G., Mushtaq, S., 2014. Towards a sustainable energy technologies based agriculture. In: Sustainable Energy Solutions in Agriculture. CRC Press, The Netherlands, pp 3–15.

CARM, 2016. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, Consejería de Agua y Agricultura, Listados Oficiales. Estadística Agraria Regional.

Castel, J.R. 1999. Riego deficitario controlado. Aplicación a frutales. En: Ahorro y Reutilización de Agua. Máster en gestión y uso eficiente del agua. Universidad Politécnica de Valencia. p. 6.3-6.15.

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.

CHS, 2015. Estudio General sobre la Demarcación Hidrográfica del Segura. Confederación Hidrográfica del Segura, Murcia.

- Claver, J.M., 2016. The Tagus-Segura water transfer: a vital and sustainable Infrastructure for the southeast of Spain. Informe técnico Sindicato Central de Regantes Acueducto Tajo Segur; SCRATS. 13 pp.
- CRCC, 2015. El regadío en la Región de Murcia: Caracterización y análisis, Mariano Soto García. Enero 2015.
- CREM, 2015. Centro regional de estadística de Murcia.
- Consoli, S., Facini, O., Motisi, A., Nardino, M., Papa, R., Rossi, F., Barbagallo., S., 2013. Carbon balance and energy fluxes of a Mediterranean crop. J. Agric. Eng. XLIV(s2): e6.
- Corominas Massip, J. 2009, Agua y energía en el riego, en la época de la sostenibilidad, Jornadas de Ingeniería del Agua, Madrid, 27 y 28 de octubre de 2009.
- Domingo, R. y Ruiz-Sánchez, M.C. 1995. Respuesta de los cítricos al riego deficitario. Limonero. En: Riego Deficitario Controlado. Fundamentos y Aplicaciones. Colección Cuadernos VALUE 1. Mundi Prensa/Unión Europea. p. 121-171.
- 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.
- ELCD, European Life Cycle Database. European Commission. 2017. Available from: <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/index.xhtml?stock=default> .
- ESAMUR, 2017. Entidad Regional de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales de Murcia.
- ESYRCE, 2016. Encuesta sobre Superficies y Rendimientos Cultivos.

- FAOSTAT, 2017. Evolución de la producción de pomelo a nivel mundial período 2007-2014. Y principales países productores y producción en el mismo período.
- Faurès, J.M., Bartley, D., Bazza, M., Burke, J., Hoogeveen, J., Soto, D., Steduto, P., 2013. Climate Smart Agriculture Sourcebook. FAO, Rome, pp. 557.
- Fereres, E., Martinich, D.A., Aldrich, T.M., Castel, J.R., Schulbach, E.H., 1982. Drip irrigation saves money in young almond orchards. Calif. Agric. 36, 12–13.
- Fluck, R.C., 1985. Energy sequestered in repairs and maintenance of agricultural machinery. Trans ASAE 28, 738–44. doi:10.1016/j.envint.2004.03.005.
- Fluck, R.C., 1992. Energy in human labor. In: Fluck RC, editor. Energy in world agriculture, vol. 6. Amsterdam: Elsevier. p. 31-7.
- Gunady, M.G.A., Biswas, W., Solah, V.A., James, A.P., 2012. Evaluating the global warming potential of the fresh produce supply chain for strawberries, romaine/cos lettuces (*Lactuca sativa*), and button mushrooms (*Agaricus bisporus*) in Western Australia using life cycle assessment (LCA). J. Clean. Prod. 28, 81–87.
- Guzmán, G.I., Alonso, A.M., 2008. A comparison of energy use in conventional and organic olive oil production in Spain. Agric. Syst. 98, 167–76.
- Heichel, G.H., 1980. Assessing the fossil energy costs of propagating agricultural crops. In: Pimentel D, editor. Handbook of energy utilization in agriculture. Boca Raton, FL: CRC Press. p. 27–34.
- Helsel, Z.R., 1992. Energy and alternatives for fertilizer and pesticide use. In: Fluck RC, editor. Energy in world agriculture, vol. 6. Amsterdam: Elsevier. p. 177–201.
- Iberdrola, 2017. Disponible en: <http://www.iberdrola.es>.

IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. 2006. In: Eggleston HAS, Biennia L, Miwa K, Negara T, Tanabe K, editors. Prepared by national greenhouse gas inventories programme. Japan: Eggleston Published, IGES.

IPCC, 2017. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambio Climático, Informe de Síntesis.

Khoshnevisan, B., Rafiee, S., Omid, M., Mousazadeh, H., Clark, S., 2014a. Environmental impact assessment of tomato and cucumber cultivation in greenhouses using life cycle assessment and adaptive neuro-fuzzy inference system. *J. Clean. Prod.* 73, 183–192.

Khoshnevisan, B., Shariati, H.M., Rafiee, S., 2014b. Comparison of energy consumption and GHG emissions of open field and greenhouse strawberry production. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 29, 316–324.

Kizilaslan, H., 2009. Input–output energy analysis of cherries production in Tokat Province of Turkey. *Appl. Energy*, 86: 1354-1358.

Koocheki, A., Ghorbani, R., Mondani, F., Moradi, R., Alizade, Y., 2011. Pulses production systems in term of energy use efficiency and economical analysis in Iran. *Inter. J. Energy Eco. Poli.* 1, 95–106.

Lal, R., 2004. Carbon emission from farm operations. *Environ. Int.* 30, 981–990

Liguori, G., Gugliuzza, G., Inglese, P., 2009. Evaluating carbon fluxes in orange orchards in relation to planting density. *J. Agric. Sci.* 147, 637–645.

- Maestre-Valero, J.F., Martin-Gorriz, B., Alarcón, J.J., Nicolás, E., Martínez-Alvarez, V., 2016. Economic feasibility of implementing regulated deficit irrigation with reclaimed water in a grapefruit orchard. *Agric. Water Manage.* 178, 119–125.
- Martin-Gorriz, B., Soto-García, M., Martínez-Alvarez, V., 2014. Energy and greenhouse-gas emissions in irrigated agriculture of SE (southeast) Spain. Effects of alternative water supply scenarios. *Energy* 77, 478–488.
- MAGRAMA, 2014. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Resolución de 11 de noviembre de 2014, de la Dirección General del Agua, por la que se publica el Acuerdo de Consejo de Ministros de 7 de noviembre de 2014, por el que se aprueban las nuevas tarifas para el aprovechamiento del acueducto Tajo-Segura.
- MAGRAMA, 2017. Superficies y producciones. Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.
- MAGRAMA, 2017. Guía para la Aplicación del R.D. 1620/2007 por el que se establece el Régimen Jurídico de la Reutilización de las Aguas Depuradas, Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.
- Mohammadi, A., Rafiee, S., Jafari, A., Keyhani, K., Mousavi-Avval, S.H., Nonhebel, S., 2014. Energy use efficiency and greenhouse gas emissions of farming systems in north Iran. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 30, 724–733.
- Ntinis, G.K., Neumair, M., Tsadillas, C.D., Meyer, J., 2017. Carbon footprint and cumulative energy demand of greenhouse and open-field tomato cultivation systems under Southern and Central European climatic conditions. *J. Clean. Prod.* 142, 3617–3626.

- Oron, G.; Armon, R.; Mandelbaum, R.; Manor, Y.; Campos, C.; Gillerman, L.; Salgot, M.; Gerba, C.; Klein, I.; y Enríquez, C. 2001. Eliminación de aguas residuales secundarias para el riego de cultivos. Ciencia y Tecnología del Agua.
- Ozkan, B., Akcaoz, H., Karadeniz, F., 2004. Energy requirement and economic analysis of citrus production in Turkey. Energy Convers. Manage. 45, 1821–30.
- Pedrero, F., 2011. Gestión sostenible del riego con agua regenerada. Tesis doctoral. Departamento de Riego. Centro de Edafología y Biología aplicada al Segura. CEBAS-CSIC, Murcia, España. 143pp.
- Pedrero, F., Maestre-Valero, J.F., Mounzer, O., Nortes, P.A., Alcobendas, R., Romero-Trigueros, C., Bayona, J.M., Alarcón, J.J., Nicolás, E. 2015. Response of young 'Star Ruby' grapefruit trees to regulated deficit irrigation with saline reclaimed water. Agric. Water manage. 158, 51–60.
- Pérez-Pérez, J.G., García, J., Robles, J.M., Botía, P., 2010. Economic analysis of navel orange cv: 'Lane late' grown on two different drought-tolerant rootstocks under deficit irrigation in Southeastern Spain. Agric. Water Manage. 97, 157–164.
- Pimentel, D., 1992. Energy inputs in production agriculture. In: Fluck RC, editor. Energy in farm production, vol. 6. Amsterdam: Elsevier, p. 3-29.
- Playán, E., Mateos L., 2006. Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity. Agric. Water Manage. 80, 100–116.
- Rathke, G.W., Diepenbrock, W., 2006. Energy balance of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) cropping as related to nitrogen supply and preceding crop. Europ. J. Agron. 24, 35–44.

- Rezvani-Moghaddam, P., Feizi, H., Mondani, F., 2011. Evaluation of tomato production systems in terms of energy use efficiency and economical analysis in Iran. *Not. Sci. Biol.* 3, 58–65.
- Sanfeliu, 2016. *La citricultura en España: presente y futuro*. Inmaculada Sanfeliu Feliu. Valencia.
- Sartori, L., Basso, B., Bertocco, M., Oliviero, G., 2005. Energy Use and Economic Evaluation of a Three Year Crop Rotation for Conservation and Organic Farming in NE Italy. *Biosyst. Eng.* 91(2): 245–256.
- Tabatabaie, M.H., Rafiee, S., Keyhani, A., 2012. Energy consumption flow and econometric models of two plum cultivars productions in Tehran province of Iran. *Energy*, 44, 211–6.
- Vergés, C. 1998. *El agua regenerada como nuevo producto en el mercado del abastecimiento y saneamiento de las aguas*. Tecnología del Agua.
- WWAP (World Water Assessment Programme). 2012. *The United Nations world water development report 4: managing water under uncertainty and risk*. Paris: UNESCO.
- Yousefi, M., Khoramivafa, M., Mondani, F., 2014. Integrated evaluation of energy use, greenhouse gas emissions and global warming potential for sugar beet (*Beta vulgaris*) agroecosystems in Iran. *Atmos. Environ.* 92, 501–505.
- Zahedi, M., Eshghizadeh, H.R., Mondani, F., 2014. Energy use efficiency and economical analysis in cotton production system in an arid region: a case study for Isfahan Province. *Iran. Inter. J. Energy Eco. and Poli.* 4, 43–52.

Zahedi, M., Mondani, F., Eshghizadeh, H.R., 2015. Analyzing the energy balances of double-cropped cereals in an arid region. *Energy Rep.* 1, 43–49.

Enlaces web

<http://www.frutas-hortalizas.com> (Acceso febrero 2017)

<http://elregadio.blogspot.com.es> (Acceso febrero 2017). Artículos:

- Agua para la energía y energía para el agua, 2013.
- Por una gestión sostenible de la agricultura de regadío, 2014.