



REPARTO ÓPTIMO DEL AGUA EN SITUACIONES DE ESCASEZ. EL CASO DEL OLIVAR JIENNENSE: ¿REGADÍO O SECANO? • Javier Alarcón Luque

**Javier  
Alarcón Luque**



**Reparto óptimo del  
agua en situaciones  
de escasez**

**El caso del olivar  
jiennense: ¿regadío  
o secano?**





**VI Premio de Investigación del  
Consejo Económico y Social de la  
provincia de Jaén**

**REPARTO ÓPTIMO DEL AGUA  
EN SITUACIONES DE ESCASEZ  
EL CASO DEL OLIVAR JIENNENSE:  
¿REGADÍO O SECANO?**

**Jaén, 2015**



**Javier Alarcón Luque**

**REPARTO ÓPTIMO DEL AGUA  
EN SITUACIONES DE ESCASEZ  
EL CASO DEL OLIVAR JIENNENSE:  
¿REGADÍO O SECANO?**



Consejo Económico y Social  
de la provincia de Jaén

Edita: DIPUTACIÓN PROVINCIAL DE JAÉN  
Consejo Económico y Social de la provincia de Jaén

© Del autor: Javier Alarcón Luque  
© De la presente edición: Diputación Provincial de Jaén

I.S.B.N.: 978-84-608-7789-9  
Depósito Legal: J. 161 - 2016

Impreso en España | Unión Europea

# Índice

	<u>Página</u>
RESUMEN .....	13
Sección 1. INTRODUCCIÓN .....	15
Sección 2. OBJETIVOS .....	21
Sección 3. METODOLOGÍA .....	23
3.1. Obtención de funciones de beneficio del agua .....	24
3.2. Reglas de asignación a estudiar .....	28
Sección 4. ESTUDIO DE CASO .....	35
4.1. Déficit de agua en la D. H. del Guadalquivir .....	35
4.2. Tipología del olivar jiennense .....	36
4.3. Datos utilizados .....	38
Sección 5. RESULTADOS .....	43
5.1. Asignación mínimamente rentable .....	43
5.2. Disponibilidad mínima de agua que hace rentable el regadío .....	44
5.3. Ahorro económico con el reparto óptimo .....	47
5.4. Ahorro de agua por no regar .....	49
Sección 6. CONCLUSIONES .....	51
Sección 7. AGRADECIMIENTOS .....	55
Sección 8. REFERENCIAS .....	57





# Índice de figuras

	<u>Página</u>
Figura 1. Evolución histórica de los regadíos en Andalucía. . . . .	16
Figura 2. Recursos y demandas en los sistemas de explotación hídrica de la Cuenca del Guadalquivir . . . . .	36
Figura 3. Extensión ocupada por las grandes clases de olivar en la provincia de Jaén	38
Figura 4. Funciones de beneficio del olivar de regadío en la provincia de Jaén . . . .	44
Figura 5. Pérdidas y superficie regada en el olivar jiennense, en función de la disponibilidad de agua, con el reparto óptimo. Valores relativos a los de referencia . . . . .	45
Figura 6. Pérdidas y superficie regada en el olivar jiennense, en función de la disponibilidad de agua, con la regla de asignación única. Valores relativos a los de referencia . . . . .	46
Figura 7. Pérdidas y superficie regada en el olivar jiennense, en función de la disponibilidad de agua, con la regla proporcional. Valores relativos a los de referencia. . . . .	47



# Índice de tablas

	<u>Página</u>
Tabla 1. Extensión ocupada por las grandes clases de olivar en la provincia de Jaén.	37
Tabla 2. Dotaciones de riego anuales para el olivar de la provincia de Jaén. . . . .	39
Tabla 3. Datos económicos de referencia para el olivar de la provincia de Jaén. Año 2011 . . . . .	40
Tabla 4. Pérdidas y ahorro económico obtenibles aplicando el reparto óptimo de agua al olivar jiennense, con respecto a la regla de asignación única y a la regla proporcional . . . . .	48
Tabla 5. Ahorro de agua según su disponibilidad en el olivar jiennense, aplicando el reparto óptimo en vez de la regla de asignación única y la regla proporcional. . . . .	50



# Resumen

En este trabajo se formula una propuesta para repartir el agua dentro de un colectivo de riego con diferentes unidades productivas, mediante la cual minimizar las pérdidas económicas agregadas derivadas de cualquier situación de escasez de agua. Este reparto óptimo se ha aplicado al olivar jiennense y se ha comparado con la regla de asignación única y con la reducción proporcional. A diferencia de estas dos reglas, el reparto óptimo permite aprovechar más y mejor el agua y, por tanto, hacer un uso más productivo y rentable de este recurso. Así, se ha obtenido que, disponiendo del agua necesaria para asignar unas ciertas dotaciones objetivo al olivar jiennense, la mayor eficiencia del reparto óptimo permitiría alcanzar un ahorro económico de 13,5 €/ha con respecto a la asignación única, y de 5,5 €/ha en relación a la regla proporcional.

Para poder aplicar el reparto óptimo, se precisa conocer el beneficio imputable al agua de riego. Se presenta un método sencillo para estimar funciones de beneficio del agua, a partir de un número reducido de datos, el cual puede ser útil cuando no se dispone de información más detallada. El mismo se ha aplicado a las dos clases mayoritarias de olivar en regadío presentes en la provincia de Jaén: el olivar tradicional mecanizable (OTMR) y el olivar intensivo (OIR). Aunque el análisis debería hacerse a una escala más local, el ámbito provincial puede dar una primera idea de las posibilidades y conveniencia de afinar el reparto de agua en la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir y en otras demarcaciones expuestas a la escasez de recursos hídricos.

Por último, se estudia la escasez de agua que hace que un cultivo deje de ser rentable en regadío, aspecto este que se ha incluido como restricción para aplicar los modelos de reparto. Con esos datos manejados y a partir de una amplia información sobre costes de los sistemas de riego, se ha podido calcular que, para poder compensar los costes fijos, el OTMR y el OIR deberían recibir dotaciones no inferiores a los 1.300 y 840 m<sup>3</sup>/ha, respectivamente. De otro modo, serían más rentables los cultivos equivalentes en secano.



## Sección 1

# Introducción

La conservación y la sostenibilidad de los recursos naturales constituyen un objetivo social de primer orden en el mundo moderno. El agua es en nuestros días uno de los recursos más importantes para el desarrollo económico. Su restricción condiciona gran parte de las actividades económicas y afecta al bienestar humano. La explotación de los recursos hídricos ha ido creciendo con el desarrollo económico de los países y, como consecuencia, los episodios de escasez se suceden cada vez con más frecuencia. Según el último informe de Naciones Unidas en materia de desarrollo hídrico (WWAP, 2015), **en 2050 la agricultura necesitará producir un 60% más** de alimentos a nivel mundial. Esta demanda condiciona la disponibilidad y calidad de los recursos de agua dulce, entre otros.

En la agricultura el agua es un factor clave, generando el regadío cada vez más parte de la producción final y del empleo. A nivel mundial, la agricultura utiliza cerca del 10% de la superficie terrestre y casi un 70% del agua total extraída de acuíferos, ríos y lagos. En España, se destina al regadío cerca de un 75% del total del agua consumida (BOE, 2006). En Andalucía, la agricultura tiene un peso importante en la economía y en la sociedad, siendo una de las actividades que más carácter imprimen a muchas de sus comarcas, en muchos casos, de gran tradición y protagonismo. La producción agraria de Andalucía representa más de la cuarta parte de la nacional, y lo mismo puede decirse con respecto a las unidades de trabajo agrario. Destacan las hortalizas, el aceite de oliva y las frutas. El peso relativo del aceite de oliva en la producción vegetal de Andalucía es de entre un 25 y un 30% (Junta de Andalucía, 2006).

En la agricultura, el uso del agua ha ido en aumento con los años, hasta tal punto que su demanda podría exceder en algunas zonas regables los volúmenes admisibles para que el uso agrario sea sostenible. Además, algunas de las últimas sequías, como la del año hidrológico 2004-2005, han llegado a provocar situaciones de escasez de agua. Estas y otras razones han hecho que en España las políticas precedentes de expansión del regadío y de regulación del agua hayan dado paso a las de mejora, consolidación y modernización de regadíos, dirigidas en buena parte a



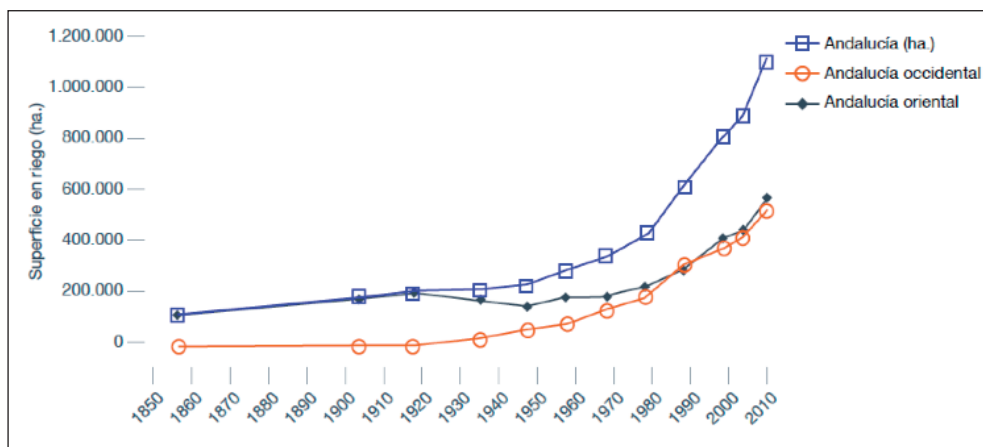
reducir los consumos asociados de agua (BOE, 2006; Lecina *et al*, 2010; López-Gunn *et al*, 2012).

Durante la pasada década, los programas de modernización han mejorado 2 Mha de regadío, habiéndose invertido en torno a 7400 M€ (MAGRAMA, 2012). La modernización se ha justificado para ahorrar agua, aunque también se esperaba incrementar la productividad y la competitividad de los regadíos. Sin embargo, los elevados costes de inversión y de energía que exigen los riegos a presión han sido un importante lastre para algunas explotaciones con escaso margen, todavía con una representatividad importante en España. Esto explica que buena parte de estas inversiones hayan sido subsidiadas. Seguramente, la presión existente por el recurso agua, junto con una inadecuada valoración de ahorros y costes, haya motivado que se hayan realizado modernizaciones que han resultado caras para la Administración o para los propios agricultores (Hardy *et al*, 2012).

De acuerdo con los datos del MAGRAMA (2015), en los últimos 10 años la superficie con riego a presión se ha incrementado en España en aproximadamente 600.000 ha (un 90% con riego por goteo), en buena parte a consecuencia de la modernización de muchos regadíos. El riego por superficie se ha reducido en unas 250.000 ha. Por tanto, la superficie total de regadío ha aumentado en cerca de 350.000 ha. En Andalucía, el incremento en la superficie de regadío ha sido realmente importante: desde el año 1990 al 2010 casi se ha duplicado, como puede apreciarse en la siguiente figura (Junta de Andalucía, 2010). Los regadíos andaluces suponen el 23,7%

**Figura 1**

*Evolución histórica de los regadíos en Andalucía*



FUENTE: Junta de Andalucía (2010).

de la superficie regable nacional. La mayor parte de ellos se localizan en la cuenca del Guadalquivir, que alberga en torno a un 72% de la superficie regada andaluza.

El mayor crecimiento de la superficie de regadío se ha producido en las áreas más dinámicas de la agricultura andaluza, como los invernaderos de Almería, las áreas de cultivo de fresa y cítricos en la provincia de Huelva y el olivar en Jaén. Este consumo supone alrededor del 80% de los recursos hídricos en Andalucía. El riego localizado o riego por goteo se extiende por gran parte del territorio andaluz. No obstante, aún persiste el riego por gravedad en importantes zonas, como el eje del Guadalquivir de la provincia de Sevilla y en pequeños sistemas de riego distribuidos por toda la provincia de Granada. Aunque se prevén mejoras en el uso del agua a causa de la modernización de regadíos, la tendencia actual sigue siendo la de un incremento progresivo de la superficie regada.

En la actualidad, extensos territorios de Andalucía se ven afectados por problemas de escasez de agua. La intensa variabilidad interanual de las precipitaciones y la coincidencia de los niveles de demanda más elevados con los periodos de menores precipitaciones agravan la situación. Por si fuera poco, el cambio climático podría influir negativamente en la disponibilidad de recursos hídricos en régimen natural, al preverse una reducción en las precipitaciones, un incremento en las temperaturas y un aumento de la evapotranspiración (IPCC, 2007). De cumplirse esas predicciones, el regadío andaluz sería muy vulnerable al cambio climático.

La respuesta biológica que tendrán los cultivos ante el cambio climático será diferente, en función de sus necesidades específicas. Es previsible que cultivos como las hortalizas, los de invernadero, los leñosos y los forrajeros vean incrementadas sus necesidades de agua (Junta de Andalucía, 2012). Además de en la agricultura, el cambio climático podría tener efectos en el abastecimiento a poblaciones y en el turismo. Por una parte, ante una mayor evapotranspiración, se necesitaría más agua para el riego de zonas verdes. Por otra parte, el aumento de temperaturas provocaría que se prolongasen los periodos vacacionales y, con ello, el turismo y el ocio asociado al modelo de sol y playa. Es probable, en consecuencia, que en ciertas zonas turísticas se eleve la demanda de agua. Por lo tanto, la incertidumbre de la oferta suscita divergencia de intereses entre el sector urbano y la agricultura, viéndose más expuesta esta última, a causa de la prelación de usos instituida por ley.

Ante esa incertidumbre en las reservas hídricas, una demanda creciente y la previsión de situaciones de escasez, la gestión eficiente del uso del agua se vislumbra como la principal alternativa a la gestión tradicional basada en el aumento de la oferta. La buena gestión del agua pasa por aplicar políticas eficientes y sostenibles desde un punto de vista medioambiental, social y económico. Unas políticas que se adapten a la realidad del recurso (en cantidad y calidad) de cada momento y que no discriminen a ningún sector. Estas políticas habrán de considerar: *i*) la incertidumbre en el suministro; *ii*) el crecimiento de la población; *iii*) las reservas hídricas disponibles;

iv) la producción de nuevos recursos; y v) los costes de los servicios del agua (Braude *et al*, 2015).

La FAO ha propuesto mejorar la eficiencia en el uso de los recursos naturales, como principio básico para asegurar una agricultura sostenible y lograr “un mundo libre de hambre y malnutrición, donde la agricultura contribuya a mejorar los niveles de vida de la sociedad desde una perspectiva económica, social y ambientalmente sostenible” (FAO, 2014). La mejora de la eficiencia física en el uso del agua está relacionada con su conservación (ahorro), mediante el incremento de la fracción de agua que es usada de forma beneficiosa, frente al agua aplicada. El concepto de eficiencia económica es mucho más amplio, y busca el mejor uso económico del agua mediante la combinación de medidas físicas y de gestión (Cai *et al*, 2003).

Por otro lado, la FAO apunta que la sostenibilidad de la agricultura requiere mecanismos responsables y eficaces de gobierno y una acción directa para conservar, proteger y mejorar los recursos naturales, la vida y el bienestar social en las comunidades rurales. Los principios clave para mejorar la gobernanza eficaz de los recursos naturales son, para la FAO, la participación, la responsabilidad, la transparencia, la igualdad y la equidad, la eficiencia, la eficacia y el Estado de Derecho. Cuando los procesos de sostenibilidad están dominados por preocupaciones ambientales genéricas o no lo suficientemente concretas, sin una atención adecuada a las dimensiones sociales y económicas, su aplicabilidad puede resultar dudosa y su efectividad mínima. Una transición a una agricultura sostenible requiere una buena gestión o gobernanza, con marcos legales e institucionales que equilibren las iniciativas privadas y el interés general que debe ser defendido por la Administración (FAO, 2014).

En la mayoría de los países áridos y semiáridos la gestión de los recursos hídricos se ha dejado en manos de los gobiernos, a través de unos derechos o unas licencias de uso (Johansson *et al*, 2002; Burchi, 2004). La justificación de estos derechos, y la de las reglas para su asignación, es facilitar un reparto eficiente del agua con el cual equilibrar la oferta y la demanda, y, en ocasiones, satisfacer además algunos criterios de equidad predeterminados. La predominancia de este sistema puede que radique en su transparencia y en la flexibilidad que ofrece para adaptarse a situaciones cambiantes en la disponibilidad del recurso, mediante una gestión preventiva de la escasez y por aplicación de criterios de modulación en situaciones de alerta y eventual sequía (BOJA, 2010).

En efecto, la evaluación de cualquier reparto de agua entre los usos posibles no sólo debe tener en cuenta el “valor” de la demanda normal, sino también el impacto de las restricciones, bajo diferentes niveles de garantía en el suministro (Hughes y Mallory, 2009). Es en situaciones de escasez cuando cobra especial trascendencia la asignación de los recursos, para poder alcanzar un óptimo social o económico. Como apunta la OCDE (2009), las estrategias de asignación han de buscar soluciones razonables para los diferentes usos en competencia y escenarios de oferta-demanda.

Molle (2009) señala que, si los derechos se pueden transferir, pueden ser fácilmente reasignados entre los usuarios, siguiendo criterios de eficiencia económica. La asignación de derechos es un medio básico para facilitar una gestión eficiente del agua en situaciones de sequía (Lorenzo-Lacruz *et al*, 2013), y un requisito previo para garantizar que los mercados de agua puedan funcionar debidamente. Así mismo, procura un trato de igualdad, en casos de suministro deficiente (Tsur y Dinar, 1995; Molle, 2009).

En comparación con los sistemas de precios, la asignación de derechos goza de una mayor aceptación social y una mayor simplicidad administrativa; y son varios los autores que consideran que ofrece una mayor seguridad para ahorrar agua en el regadío: Bate (2002), Bosworth *et al* (2002), Cornish *et al* (2004) o Dinar y Maria Saleth (2005). No obstante, el régimen concesional debe complementarse con un adecuado sistema de pago, en función del consumo real de agua, con unos precios lo suficientemente altos como para que la demanda sea responsable (Rieu, 2005; Banco Mundial, 2006; o Molle, 2009).

En general, en España el sistema de reparto del agua descansa en buena medida en el orden de prioridad de usos establecido en la Ley o en la normativa de planificación vigente, y, a un menor nivel, en los acuerdos de las comisiones de sequía y de desembalses. En las comunidades de regantes, el agua se suele repartir de manera proporcional, primando a veces los cultivos leñosos y los considerados como sociales, que demandan más mano de obra (Calatrava y Garrido, 2006). La reasignación se articula en las transacciones de derechos al uso del agua, ya sea mediante intercambios voluntarios en mercados de agua o a través de acciones colectivas promovidas en el ámbito de las cuencas hidrográficas o de las comunidades de regantes.

La Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía (2012) publicó una serie de recomendaciones pensadas para reducir la demanda de recursos hídricos y no comprometer su sostenibilidad. Muchas de estas recomendaciones se dirigen a las comunidades de regantes. Así, se habla de evaluar la eficiencia y la productividad (agronómica y económica) del agua aportada, de introducir cultivos menos vulnerables a la escasez de agua y sustituir aquellos más consumidores por otros de menores necesidades hídricas, de mantener en buen estado las conducciones, de mejorar los sistemas de aplicación en parcela y de diseñar calendarios de riego que permitan un mejor reparto del recurso entre los usuarios.

Con respecto al olivar jiennense, el Consejo Económico y Social de la Provincia de Jaén (CESPJ, 2011) expresaba que, para mantener su competitividad, resulta imprescindible “acometer procesos integrales de reestructuración y disminuir los costes de producción mediante la mejora de la eficiencia económica del proceso productivo y la progresiva mecanización de las explotaciones”. La búsqueda de una mayor rentabilidad ha supuesto en muchos casos la sustitución de olivares maduros por nuevos modelos productivos en regadío, y en ocasiones por unos modelos más

intensivos que demandan una mayor cantidad de agua que el regadío tradicional. Como alternativa, se ha propuesto el «olivar intensivo con riego deficitario»: la menor producción por árbol que conlleva un menor riego puede ser compensada con una mayor densidad de plantación.

Como conclusión, se puede afirmar que la explotación de un recurso escaso, como puede ser el agua, ha de estar claramente supeditada a su disponibilidad; y, por tratarse de un bien público, al interés general. Es por ello que las medidas de ahorro de agua a nivel de explotación o parcela deben complementarse con una gestión o administración eficiente de los recursos hídricos, para el bien de todos. La *eficiencia* económica, definida como la asignación que genera el mayor beneficio que puede obtenerse de los recursos disponibles, es un criterio común que se utiliza en la asignación de recursos escasos. Esta maximización se consigue igualando los beneficios marginales de todos los usuarios (ver, p.e., Dinar *et al*, 1997). Hacer esto en la práctica puede llegar a ser difícil, debido a la falta de información, a unas políticas desacertadas o a un funcionamiento inadecuado de las instituciones (Easter *et al*, 1997; Thobani, 1997; Tsur y Dinar, 1997; Spulber y Sabbaghi, 1998).

En el presente trabajo se propone el reparto óptimo del agua de riego, y se aplica, de un modo simplificado, a los grandes sistemas de explotación del olivar jiennense, integrados en su práctica totalidad en la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir. Mediante el reparto óptimo, se maximiza el beneficio económico agregado de los regantes de un colectivo de riego. Su aceptación pasa por que los comuneros asuman un comportamiento empresarial, por el cual se busque ese **máximo** beneficio colectivo. Precisamente, en una provincia tan minifundista y con tan pocos agricultores a tiempo completo como es la de Jaén, la gestión mancomunada o cooperativista del olivar puede ser una buena apuesta, también para la gestión del agua.

Entre las alternativas de reparto debe de estar también la del “no uso”, cuando puede resultar más beneficioso que otros usos que puedan darse al agua. En agricultura, el secano puede ser una mejor opción que el regadío, cuando el cultivo es poco tolerante al estrés hídrico. En este trabajo se investiga qué disponibilidad de agua justificaría el regadío del olivar, pues el reparto óptimo no implica que haya que emplearse toda el agua disponible, pudiendo resultar, en ciertos casos, más rentable no regar. Todo ello se calcula en función de unos ciertos márgenes de explotación y de unos ciertos costes fijos de las instalaciones de riego. Estos márgenes y costes fijos que se tomen como referencia condicionarán por lo tanto los resultados, de modo que cuanto más precisos y adaptados a cada caso sean, más útiles podrán ser aquéllos en la toma de decisiones de gestión o explotación.

## Sección 2

# Objetivos

Dentro del objetivo general de mejora de la gestión del agua de riego en un contexto de escasez, en este trabajo se pretende proporcionar unos criterios metodológicos que podrían ayudar a conseguir un uso sostenible y eficiente de los recursos hídricos. Estos criterios serían de utilidad para asignar de manera eficiente los volúmenes disponibles para riego, en respuesta a las fluctuaciones en las reservas hídricas. También servirían para disuadir a los regantes de hacer consumos inapropiados de agua, evitando con ello incurrir en posibles pérdidas económicas y ocasionar costes de oportunidad a otros usuarios y, en su caso, a la propia comunidad de riego.

Se formulan ciertas reglas de reparto del agua, proponiéndose como novedoso el reparto óptimo. Se comparan estas reglas, testando su eficiencia económica, medida con el criterio de conseguir el mayor beneficio agregado posible de los recursos hídricos disponibles en un colectivo de riego. Buscando esta eficiencia, los métodos irán destinados a orientar a gestores, comunidades de regantes y agricultores sobre la asignación del agua. Y también a los agricultores, en la elección de sus cultivos, tanto en regadío como en secano. Mediante unas expresiones analíticas relativamente sencillas y asequibles, se intenta acercar a unos y otros los métodos propuestos.

Más concretamente, podemos señalar los siguientes objetivos específicos:

1. Mostrar cómo se puede obtener un reparto económicamente óptimo del agua en un regadío con diversidad productiva y en condiciones de escasez.
2. Poner de relieve la información que resulta esencial para poder aplicar un reparto económicamente óptimo del agua.
3. Comparar la eficiencia económica del reparto óptimo con las conocidas y habituales reglas de asignación en una zona regable.
4. Analizar y valorar las condiciones que justificarían el regadío del olivar jiennense, atendiendo a la productividad y la disponibilidad de agua.



## Sección 3

# Metodología

Los modelos de optimización a nivel de explotación o zona regable asignan el agua y la tierra a partir del patrón de cultivos, teniendo en cuenta la limitación y la naturaleza estocástica de los recursos hídricos. En esta sección se explica cómo obtener un reparto económicamente óptimo del agua y la información que se necesita para ello. Así mismo, se pretende poner de relieve el coste de oportunidad que tendría aplicar otras reglas de asignación, tales como la de cuota única o la reducción proporcional.

La base teórica del reparto óptimo de recursos entre distintos individuos o usos es lo que se conoce como asignación óptima de Pareto. Según este principio, los beneficios totales se maximizan cuando el consumo es tal, que los beneficios marginales de todos los usos son iguales en todo momento (Reca *et al*, 2001). Un razonamiento similar puede hacerse considerando, en vez de los beneficios, las pérdidas marginales que pueden surgir en situaciones de escasez de agua.

Las reglas de asignación, si tienen en cuenta el volumen de agua que realmente es utilizado, pueden ser suficientes para que se cumplan las normas de calidad ambiental, pero no producirán generalmente una asignación Pareto-eficiente del agua. La imposición de una misma cuota para todo regante sólo será económicamente eficiente si el grupo es homogéneo; es decir, si todos los regantes obtienen una misma productividad del agua. Sin embargo, un sistema de cuotas específicas por cultivo repercutirá unas menores pérdidas económicas para la comunidad en su conjunto, si el grupo es heterogéneo (ver Alarcón, 2014).

Los efectos de las políticas de asignación del agua pueden ser muy diversos en los agricultores, sobre todo cuando hay diferencias sustanciales en su producción y en sus beneficios. Esto puede desmerecer el objetivo de lograr una cierta equidad en la asignación del agua. Este escollo podría salvarse en buena parte, buscando el mayor beneficio del colectivo o la comunidad de riego (que llamaremos reparto óptimo), como si de una empresa se tratara, y compensando a aquellos que en dicha optimización resultasen desfavorecidos.



### 3.1. Obtención de funciones de beneficio del agua

En los trabajos en los que los rendimientos marginales de los cultivos se relacionan con las cantidades de agua aplicadas, se suelen seleccionar un número limitado de explotaciones, que se clasifican en grupos homogéneos, según su respuesta al agua. Los trabajos de modelización a nivel de explotación por lo general consideran relaciones dosis-respuesta de tipo Leontief, o toman los rendimientos medios de una serie temporal. Otra opción es construir funciones de producción, mediante simuladores biofísicos de crecimiento de los cultivos, como se ha hecho en Goetz *et al* (2005). En relación con esta última opción, *AquaCrop* es un modelo de la FAO que permite simular el rendimiento de los cultivos en respuesta al riego, en una ubicación determinada y bajo diversos escenarios climáticos (FAO, 2015).

A pesar de ello, se puede afirmar que es conveniente completar y adaptar la información disponible, con el fin de facilitar la obtención de funciones de beneficio en relación con el agua que es aplicada. Para aquellos casos en los que no se dispone de información de campo con la que poder efectuar un análisis econométrico, se propone seguidamente un método para determinar las funciones de beneficio en respuesta al agua aplicada, el cual requiere muy pocos datos. No obstante, será preferible obtener dichas funciones por regresión, con un número mayor de datos, con objeto de ganar en representatividad. Los repartos que resulten de las reglas que aquí se analizan y, en concreto, del reparto óptimo, serán tanto más fiables, cuanto que esas funciones sean definidas con mayor precisión para cada explotación.

En el método que aquí se propone, a diferencia de trabajos anteriores (Alarcón, 2014; Alarcón *et al*, 2014 a y b), se contemplan de forma explícita los costes fijos del regadío. Estos costes fijos hacen que el beneficio obtenido cuando no se riega sea inferior al del secano. Lo que es más, bajo ciertos niveles de escasez de agua, el regadío puede resultar poco rentable o no rentable económicamente. Se ha considerado interesante estudiar este aspecto, pues puede orientar sobre la conveniencia en ciertos casos de producir en secano y, en consecuencia, ahorrar una gran cantidad de agua. En esta optimización del binomio secano-regadío habrá que tenerse siempre presente que la producción del secano se ve claramente supeditada a la naturaleza estocástica de las precipitaciones (Sharifi *et al*, 2015).

Los costes fijos de los sistemas de riego se han tomado de Alarcón *et al* (2016). Abarcan, por un lado, la anualidad de la inversión necesaria para transformar un secano en un regadío localizado (tanto en parcela como en redes de conducción y distribución). Y, por otro, los costes fijos anuales de funcionamiento, conservación y mantenimiento del sistema de riego, entre los que se incluyen los costes fijos de la potencia eléctrica instalada y los costes de reparación, reposición y limpieza. Estos costes fijos deben tenerse en cuenta en cualquier estudio de rentabilidad del regadío que considere la recuperación de los costes del agua que propugna la Directiva Marco del Agua (DOUE, 2000).

En una determinada zona regable,  $B$  representa el beneficio económico que puede obtenerse de un cierto cultivo o explotación, mientras que  $BS$  es el beneficio que puede alcanzarse sin riego alguno, en seco, el cual podría tomar valores negativos. Restando  $BS$  a  $B$ , obtendremos el beneficio adicional que se obtiene por el hecho de aplicar una cierta dotación de agua  $q$ :  $BR(q) = B - BS$ . El beneficio marginal,  $BM$ , es la variación de beneficio que resulta de aumentar  $q$  en una unidad:  $BM(Q) = \partial B / \partial q$ .

Dentro de una misma zona regable, puede haber cultivos o explotaciones con diferentes funciones de beneficio  $BR$ . Lo que es más, podría haber otros sectores o actividades que compitieran con el regadío, para satisfacer sus propias demandas de agua, los cuales tendrían unas funciones de beneficio muy diferentes. Aunque podrían manejarse otras funciones, nos limitaremos a presentar las funciones de beneficio cuadráticas y potenciales.

### Funciones de beneficio cuadráticas

El beneficio del riego y su beneficio marginal vendrán definidos por expresiones del tipo

$$BR(q) = B - BS = \frac{m}{2} \cdot q^2 + a \cdot q + k \quad | \quad q \geq 0, \quad m < 0, \quad a > 0, \quad k < 0 \quad (1)$$

$$BM = \frac{dB}{dq} = \frac{dBR}{dq} = m \cdot q + a \quad (2)$$

En donde  $k$  representa los costes fijos del sistema de riego de que se trate:  $k = BR(q_0) = -CF_R = -(a \cdot CI + Cc + CP)$ ; siendo  $CI$  los costes de la inversión,  $a$  la anualidad de la misma,  $Cc$  los costes fijos anuales de conservación y mantenimiento, y  $CP$  los costes fijos anuales de la potencia eléctrica instalada.

Con este simple planteamiento, está claro que regar será de interés si y sólo si se cumplen las dos condiciones siguientes:

- a) El beneficio del riego es positivo,  $BR > 0$ ; pues de otro modo, será preferible el correspondiente cultivo de seco.
- b) El beneficio marginal del riego es positivo,  $BM > 0$ , aun cuando su valor disminuya a medida que se aplica más agua (porque  $m < 0$ ).

En caso de restricción, la asignación de cada regante,  $q$ , será menor o igual que una cierta *asignación de referencia*, sin restricciones,  $q_r$ , con la cual se satisfagan las necesidades del cultivo como para poder obtener el máximo beneficio,  $B_r$ . De este modo, el beneficio estrictamente atribuible al riego será  $BR_r = B_r - BS$ . El punto que define dicho máximo ( $q_r, BR_r$ ) será tomado como punto de referencia. Obsérvese que

la condición de máximo matemático para este punto permite determinar fácilmente los dos coeficientes  $m$  y  $a$ :

$$\left. \begin{aligned} BM_r = 0 &= m \cdot q_r + a \\ BR_r = B_r - BS &= \frac{m}{2} \cdot q_r^2 + a \cdot q_r + k \end{aligned} \right| \rightarrow m = \frac{2}{q_r} (k - BR_r), \quad a = \frac{2}{q_r} (BR_r - k) \quad (3)$$

Podemos introducir ahora una relación,  $q^*$ , que expresa la fracción sobre el volumen de referencia que sea aplicada bajo una restricción de agua:  $q^* = q/q_r$ . Esta relación -en tanto por uno- tendrá su análoga para el incremento de beneficio obtenible con el riego,  $BR^*$ , con respecto a la situación de referencia.

Así pues, con los valores de referencia,  $q_r$  y  $BR_r$ , para una disponibilidad de agua dada, referida como  $q^* = q/q_r$ , las ecuaciones (1) y (2) pueden escribirse:

$$BR = (BR_r - k) \cdot \left( \frac{2q}{q_r} - \left( \frac{q}{q_r} \right)^2 \right) + k = (BR_r - k) \cdot (2q^* - q^{*2}) + k \quad (4)$$

$$BM = \frac{BR_r - k}{q_r} \cdot 2 \cdot (1 - q^*) \quad (5)$$

$$\text{Válidas ambas para } 0 \leq q^* = \frac{q}{q_r} \leq 1$$

La correspondiente pérdida económica o lucro cesante,  $L$ , que se deriva de una menor disponibilidad de agua,  $q^* < 1$ , con respecto a la situación de referencia, se obtendrá de la siguiente expresión:

$$L = B_r - B = BR_r - BR = (BR_r - k) \cdot (1 - q^*)^2 \quad (6)$$

Nótese que, en sintonía con  $q^*$ , podrían abordarse las variables adimensionales  $BM^*$ ,  $BR^*$  y  $L^*$ . Estas variables pueden seguir funciones muy diversas, tener coeficientes o valores de referencia significativamente diferentes, pero, en su forma adimensional, únicamente dependen de la variable  $q^*$ , y su representación es única, como se muestra en Alarcón *et al* (2014a).

En una comunidad de usuarios o en el conjunto de producciones de un mismo usuario, con sus correspondientes funciones definidas por los pares  $(q_{ri}, BR_{ri})$ ,

una vez se haya establecido el criterio de reparto del agua, se tendrá una función representativa del beneficio agregado al agua que es aportada. En su forma adimensional, estas funciones de un conjunto de orientaciones productivas o de toda la comunidad, en función del criterio de reparto y de las diferencias dentro del conjunto, pueden ser iguales o ser algo diferentes a las individuales.

Para referir en adelante las funciones agregadas de un conjunto o de una comunidad de regantes, se usarán las mismas variables pero en negrita, sin cursiva y con mayúsculas. De esta forma,  $\mathbf{Q}_r$  indica la asignación de referencia de toda la comunidad en condiciones de no escasez y  $\mathbf{Q}$  la asignación total de que dispone en un momento dado;  $\mathbf{BR}_r$ , el beneficio neto asociado al agua que obtendría la comunidad en condiciones de no escasez, y  $\mathbf{BR}$  el que le corresponderá a la asignación  $\mathbf{Q}$ . Lógicamente, este último beneficio agregado puede tomar distintos valores, dependiendo del reparto de agua que se haga. Considerando funciones de beneficio cuadráticas, las variables de la comunidad, en función de las de los distintos usuarios, serán entonces:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q} &= \sum q_i = \sum q_{ri} \cdot q_i^* \quad | \quad \mathbf{Q}_r = \sum q_{ri} \\ \mathbf{BR} &= \sum BR_i = \sum (BR_{ri} - k_i) \cdot (2q_i^* - q_i^{*2}) + \sum k_i \quad | \quad \mathbf{BR}_r = \sum BR_{ri} \\ \mathbf{L} &= \sum L_i = \sum (BR_{ri} - k_i) \cdot (1 - q_i^*)^2 \end{aligned} \quad (7)$$

### *Funciones de beneficio potenciales*

Las funciones potenciales ofrecen bastante versatilidad y pueden complementar bien a las cuadráticas. Para ellas, se tendría:

$$BR = B - BS = c \cdot q^e + k \quad | \quad 0 < q \leq q_r, \quad c > 0, \quad 0 < e < 1, \quad k < 0 \quad (8)$$

$$BM = \frac{dB}{dq} = c \cdot e \cdot q^{e-1} \quad (9)$$

Así mismo, se supone que interesa regar si se consigue un beneficio marginal  $BM$  mayor que cero; y también que el beneficio marginal es decreciente con el aumento del agua aplicada. Por ello, el coeficiente  $c$  y el exponente  $e$  serán mayores que cero, y este último será además menor que la unidad. Diferentes exponentes  $e$  pueden ser usados. El término independiente  $BS$  representa el beneficio que se obtiene cuando no hay aporte alguno de agua, y puede tomar valores negativos.

Para determinar las funciones  $BR_r$  y  $BM_r$  serán necesarios dos puntos, uno sólo si se conoce el exponente  $e$ , supuesto éste que, para simplificar, será aquí considerado. En este caso, bastará con un único punto, que lógicamente también puede ser el punto de referencia de la situación sin escasez. En el caso de la función potencial, este punto ( $q_r, BR_r$ ) no tendrá el carácter de máximo matemático.

La pérdida de beneficio o lucro cesante,  $L$ , que se deriva de aplicar una cantidad de agua  $q < q_r$ , es decir, de reducir el riego en una fracción  $q^* < 1$ , se obtendrá de la siguiente expresión, válida para  $0 \leq q^* = \frac{q}{q_r} \leq 1$ :

$$L = B_r - B = BR_r - BR = (BR_r - k) \cdot (1 - q^{*e}) \quad (10)$$

### 3.2. Reglas de asignación a estudiar

Las dos reglas más extendidas para repartir el agua de riego seguramente sean la asignación uniforme o indiferenciada de una cuota o dotación de riego por hectárea y las reducciones de agua proporcionales a unos ciertos consumos de referencia. Estas dos formas clásicas de asignar el agua de riego serán comparadas con el *reparto óptimo*, propuesto en Alarcón (2014) y en Alarcón *et al* (2014 a y b).

Otras reglas podrían ser comparadas, buscando tal vez evitar o limitar agravios comparativos. Podría pensarse, por ejemplo, en igualar las pérdidas absolutas de beneficio por hectárea, o en igualar las pérdidas relativas a los beneficios de referencia, como se hace en Alarcón *et al* (2014b). Pero, como allí se demuestra, estas opciones no resultan tan eficientes como el reparto óptimo.

Consideremos una zona regable en donde se dan varios cultivos y/o variedades; o en la que, aun dándose un mismo cultivo y variedad, los rendimientos que se obtienen en respuesta al riego son diferentes, a razón de las diferencias existentes en las técnicas de producción, en la capacidad de los agricultores, en los suelos, la orografía, la radiación recibida o cualquier otro factor significativo, ya sea técnico o ambiental. En una situación como ésta, habrá tantas funciones de beneficio como combinaciones de variedades de cultivo y agricultores.

Para un cierto cultivo  $i$ , el porcentaje de agua disponible en una campaña de riego, con respecto al volumen de referencia con el cual se alcanzaría, para este cultivo, el beneficio máximo, se ha expresado como  $q_i^* = q_i/q_{ri}$ . Cuando se haga referencia a una comunidad de riego, se emplearán letras mayúsculas en negrita. Por lo tanto, la disponibilidad porcentual de agua en un año en particular, con respecto al año en que no haya restricciones, se escribirá como  $Q^* = Q/Q_r$ .

*Regla 1: Asignar una misma dotación*

Los agricultores asumen una misma dotación, independientemente de los cultivos que rieguen:  $q_i = q = Q/n$ ; y siempre y cuando el beneficio atribuible a esa dotación sea positivo,  $BR(q_i) = B_i - BS_i > 0$ ; de no serlo, sería preferible y se optaría por el cultivo correspondiente de secano ( $q_i = 0$ ). Siendo  $q_0$  la dotación para la cual  $BR(q_0) = 0$ , el riego estará justificado sólo para asignaciones  $q > q_0$ . Incorporando esta restricción como una variable lógica que toma valor unidad cuando es cierta y valor nulo cuando es falsa, la asignación única en función de la disponibilidad de agua se expresará como sigue:

$$\sum_{i=1}^n q_i \leq Q \quad \left| \quad q_i = q \rightarrow q \leq \frac{Q}{n} \cdot (q > q_0) \right. \quad (11)$$

La otra restricción que debe ser tenida en cuenta es que no se sobrepasen las asignaciones de referencia específicas por cultivo:  $q_i \leq q_{ri}$ . En aquellas parcelas en las que las dotaciones iniciales estén por debajo de la nueva asignación, no será exigible reducción alguna de agua. Siempre y cuando no sea necesario aumentar esas dotaciones iniciales, esta situación da lugar a una revisión de las asignaciones, con el fin de ajustar, en un proceso iterativo, el volumen total suministrado al volumen disponible, de un modo tal que las asignaciones finales no serán iguales para todos los cultivos. Así pues, incorporando variables lógicas, que toman el valor 1 cuando son verdaderas y 0 cuando son falsas, la iteración queda definida por

$$q = \frac{Q}{n} \rightarrow q_i = q \cdot (q \leq q_{ri}) + q_{ri} \cdot (q > q_{ri}) \rightarrow q = q + \frac{Q - \sum q_i}{n} \xrightarrow{Q = \sum q_i} q_i \quad (12)$$

$\uparrow$   $Q > \sum q_i$

Según esto, en el caso de emplear funciones de beneficio cuadráticas, la pérdida de beneficio o el lucro cesante para cualquier cultivo  $i$  se podrá expresar en función de la fracción de agua disponible,  $q_i^*$ , del beneficio de referencia en cuestión,  $BR_{ri}$ , y de los costes fijos del regadío,  $k_i$ . La pérdida de beneficio será desigual entre los agricultores, a no ser que tengan idénticas funciones de beneficio marginal.

$$L_i = BR_{ri} - BR_i = (BR_{ri} - k_i) \cdot (1 - q_i^*)^2 \quad (13)$$

Obsérvese que en la expresión anterior, cuando  $BR_i < 0$  y si la explotación pasa a secano, el término a restar será el beneficio del secano,  $BS_i$ .

## Regla 2: Reducir dotaciones proporcionalmente

Mediante esta regla, se aplica a la dotación de referencia de cada una de las explotaciones, una reducción que equivale a la escasez de agua en la comunidad de regantes en cuestión:  $q_i^* = \mathbf{Q}^*$ . Es decir, que la restricción es, en términos relativos, igual para todos e igual a la de toda la comunidad. Y ello, siempre y cuando el beneficio atribuible a la asignación resultante sea positivo,  $BR(q_i) = B_i - BS_i > 0$ , pues, de lo contrario, el cultivo o la explotación se dejarían sin regar ( $q_i = 0$ ). Para que  $BR(q_i) > 0$ , se deberá cumplir que  $q_i > q_0$ , siendo  $q_0$  la dotación para la cual  $BR(q_0) = 0$ . Matizando esta restricción mediante variables lógicas, las asignaciones individuales vendrán definidas por

$$q_i = q_i^* \cdot q_{ri} = \mathbf{Q}^* \cdot q_{ri} \cdot (q_i > q_0) \quad (14)$$

Según esto, empleando funciones de beneficio cuadráticas, la pérdida de beneficio atribuible a un riego con una dotación inferior a la de referencia podrá expresarse como sigue:

$$L_i = BR_{ri} - BR_i = (BR_{ri} - k_i) \cdot (1 - q_i^*)^2 = (BR_{ri} - k_i) \cdot (1 - \mathbf{Q}^*)^2 \quad (15)$$

Obsérvese de nuevo que cuando  $BR_i < 0$ , el término a restar será el beneficio del seco,  $BS_i$ .

## Regla 3: Reparto óptimo

Alternativamente a las dos anteriores u otras reglas, puede buscarse un reparto más eficiente del agua, en el sentido de que se minimicen las pérdidas totales o que el beneficio agregado de la comunidad sea máximo. Es decir, establecer los  $q_i^*$  que hacen que  $\mathbf{L}$  sea mínimo, con la restricción de que la suma de las dotaciones individuales asignadas no supere la cantidad total de agua disponible  $\mathbf{Q}$ , para toda la comunidad de usuarios.

De acuerdo con la teoría económica, en la solución óptima, el beneficio marginal ha de ser igual para todos los que reciben asignación del recurso,  $BM_i$ , e igual al del conjunto,  $\mathbf{BM}$ . Además, habrá de cumplirse que el beneficio estrictamente atribuible a las asignaciones resultantes sea positivo,  $BR(q_i) = B_i - BS_i > 0$ ; de lo contrario, será preferible no regar, ya que se obtendrá mayor beneficio con el seco.

### Reparto óptimo con funciones BR cuadráticas

Siendo pues el beneficio marginal igual para todas las explotaciones e igual al del conjunto, para funciones de beneficio de tipo cuadrático, se tendrá:

$$BM_i = \frac{BR_{ri} - k_i}{q_{ri}} \cdot 2 \cdot (1 - q_i^*) = \mathbf{BM} \quad q_i^* = 1 - \frac{\mathbf{BM}}{2} \cdot \frac{q_{ri}}{BR_{ri} - k_i} \quad (16)$$

Para el valor de  $\mathbf{BM}$  que resulte, por tener que ser todas las asignaciones mayores o iguales a cero ( $q_i > 0 \rightarrow q_i^* > 0$ ), no entrarán en el reparto de agua aquellas explotaciones para las que  $2 \cdot (BR_{ri} - k_i) / q_{ri} < \mathbf{BM}$ . Por otro lado, y al igual que con las reglas anteriores, el beneficio atribuible al riego habrá de ser positivo, pues si no, será preferible el cultivo en seco:  $BR(q_i) > 0$ ; es decir,  $q_i = q_i^* \cdot q_{ri} > q_0$ , siendo  $q_0$  la dotación para la cual  $BR(q_0) = 0$ .

Por tanto, cuando se conozca  $\mathbf{BM}$ , el reparto óptimo se obtendrá con la siguiente expresión, la cual incorpora variables lógicas que toman valor unidad cuando son ciertas y valor nulo cuando son falsas:

$$q_i^* = \left( 1 - \frac{\mathbf{BM}}{2} \cdot \frac{q_{ri}}{BR_{ri} - k_i} \right) \cdot \left( \frac{2 \cdot (BR_{ri} - k_i)}{q_{ri}} > \mathbf{BM} \right) \cdot (q_i^* \cdot q_{ri} > q_0) \quad (17)$$

Cada valor de  $\mathbf{BM}$  se corresponde, por tanto, con una disponibilidad individual de agua,  $q_i$ . Y, al ser  $\mathbf{BM}$  el mismo para todas las explotaciones, la disponibilidad total,  $\mathbf{Q}$ , puede determinarse sumando los valores de  $q_i$  que sean asignados:

$$\mathbf{Q} = \sum q_i = \sum q_{ri} \cdot q_i^* = \sum q_{ri} \cdot \left( 1 - \frac{\mathbf{BM}}{2} \cdot \frac{q_{ri}}{BR_{ri} - k_i} \right) \cdot \left( \frac{2 \cdot (BR_{ri} - k_i)}{q_{ri}} > \mathbf{BM} \right) \cdot (q_i^* \cdot q_{ri} > q_0) \quad (18)$$

Lo normal será sin embargo conocer  $\mathbf{Q}$  y no  $\mathbf{BM}$ , en cuyo caso la determinación de  $\mathbf{BM}$  debe hacerse de forma iterativa. Así, de estimar un valor,  $\mathbf{BM}_x$ , se obtiene con (18) un valor,  $\mathbf{Q}_x$ , el cual será mayor o menor que el  $\mathbf{Q}$  buscado. De ser mayor, habrá que aumentar la estimación de  $\mathbf{BM}_x$ ; de ser menor, habrá que reducirla, hasta que coincidan  $\mathbf{Q}_x = \mathbf{Q}$ .

Conocido finalmente  $\mathbf{BM}$  con (18), y el reparto de agua con (17), pueden obtenerse mediante (7) los beneficios o pérdidas de la comunidad. Y con (1) y (2), los de cada orientación productiva.

La solución óptima es independiente de la situación de partida, y de que ésta sea o no óptima. Es decir, si se parte de una situación de escasez,  $\mathbf{Q}_a^*$ , con un reparto  $q_{ai}^*$  y con un beneficio  $\mathbf{BR}_a^*$ , el cual, con respecto a la situación de referencia, representa una pérdida total  $\mathbf{L}_a^*$  conocida, si se reduce o aumenta la asignación hasta  $\mathbf{Q}^*$ , la menor pérdida o ganancia de beneficio con respecto a la situación anterior produce un reparto que es el mismo que si se partiera de la situación de referencia.



En lo que se refiere a la incidencia en el reparto de los errores en la determinación de los parámetros o puntos de referencia, suponiendo que dichos errores no influyen en el valor del **BM** marcado por la disponibilidad  $Q^*$ , se tendría:

$$\frac{dq}{dq_r} = 2q^* - 1 \rightarrow dq^* = \frac{dq}{q_r} = \frac{dq_r}{q_r} \cdot (2q^* - 1) \quad (19)$$

$$\frac{dq}{dBR_r} = \frac{q_r}{BR_r} \cdot (1 - q^*) \rightarrow dq^* = \frac{dq}{q_r} = \frac{dBR_r}{BR_r} \cdot (1 - q^*) \quad (20)$$

Esto implicaría que un error en  $q_r$  con signo positivo,  $dq_r > 0$ , esto es, suponer más necesidades que las reales, implicaría recibir más agua,  $dq > 0$ , si  $q^* > 0.5$ . Pero, por el contrario, podría suponer recibir menos agua,  $dq < 0$ , si  $q^* < 0.5$ , situación esta última más probable en condiciones de escasez severa. A modo de ejemplo, un error positivo de un 20% en  $q_r$  ( $dq_r / q_r = 0.2$ ), produciría para un  $q^* = 0.75$  un error  $dq^* = 0.10$ ; es decir, haría que se recibiese agua de más en un 10%. Por el contrario, para un año muy seco al que le correspondiera un  $q^* = 0.25$ , el mismo error haría que se recibiera un 10% menos.

Por el contrario, el error positivo en  $BR_r$ ,  $dBR_r > 0$ , tendría como consecuencia recibir más agua,  $dq > 0$ ; y un error negativo, recibir menos agua de la que correspondería sin errores. Obsérvese que la incidencia de este error sería más importante en los años con mayor escasez y en las orientaciones a las que, por ser menos productivas, les correspondiese menos agua. El mismo error positivo de  $\pm 20\%$ , ahora en  $BR_r$  y siendo  $q^* = 0.75$ , implicaría un error de  $\pm 5\%$  en la asignación de agua; por el contrario, sería de un  $\pm 15\%$ , si  $q^* = 0.25$ .

### *Reparto óptimo con funciones BR potenciales*

Tratándose de funciones potenciales, se puede deducir el reparto óptimo despejando de (9).

$$q_j = \left( \frac{\mathbf{BM}}{c \cdot e} \right)^{\frac{1}{e-1}} \rightarrow q_j^* = \left( \frac{\mathbf{BM}}{c \cdot e \cdot q_{rj}^{e-1}} \right)^{\frac{1}{e-1}} \quad (21)$$

Por comparación con lo visto para las funciones cuadráticas, con las funciones potenciales, a los usuarios nunca les corresponderá una asignación nula, puesto que  $q_j^*$  siempre será mayor que cero, por serlo los coeficientes  $c$  y  $e$ . Con las funciones cuadráticas ninguna orientación productiva obtenía la asignación de referencia en condiciones de escasez; por el contrario, con las potenciales, la expresión anterior podría dar valores mayores de la unidad, a los cuales lógicamente se les asignará el valor de referencia ( $q^* = 1$ ). Esto les ocurrirá a todas las clases que tengan un valor de  $c \cdot e \cdot q_{rj}^{e-1} > \mathbf{BM}$  (dado que  $0 < e < 1$ ). Es decir:

$$\mathbf{BM} \leq c \cdot e \cdot q_{rj}^{e-1} \rightarrow q_j^* = 1 \quad (22)$$

Introduciendo variables lógicas, el reparto para un valor conocido de **BM** puede escribirse como sigue. Las variables lógicas que quedan dentro del corchete sirven para que las  $q_j^*$  que resulten no sean mayores a la unidad: la primera condición indica que, si se cumple, se ha de aplicar la fórmula que la precede (la variable lógica vale 1), y, en caso contrario, no (la variable lógica vale 0); la segunda condición indica que, de no cumplirse la primera, la  $q_j^*$  correspondiente toma el valor 1. Por su parte, la última variable lógica expresa la repetida obligación de que la asignación final,  $q_j = q_j^* \cdot q_{rj}$ , sea superior a la dotación mínima,  $q_{0j}$ , para la cual  $BR(q_{0j})=0$ .

$$q_j^* = \left( \frac{\mathbf{BM}}{c \cdot e \cdot q_{rj}^{e-1}} \right)^{\frac{1}{e-1}} \cdot \left[ \left( \mathbf{BM} > c \cdot e \cdot q_{rj}^{e-1} \right) + \left( \mathbf{BM} \leq c \cdot e \cdot q_{rj}^{e-1} \right) \right] \left( q_j^* \cdot q_{rj} > q_{0j} \right) \quad (23)$$

*Reparto óptimo con funciones BR cuadráticas, potenciales o de otro tipo*

De competir usuarios con funciones de beneficio de tipo cuadrático y potencial, al igualar los costes marginales para obtener el óptimo, se tendría:

$$BM_i = \frac{(BR_{ri} - k_i)}{q_{ri}} \cdot 2 \cdot (1 - q_i^*)^2 = BM_j = q_{rj}^{e-1} \cdot c \cdot e \cdot q_j^{*e-1} = \mathbf{BM} \quad (24)$$

Por tanto, a cada **BM** le corresponde un reparto, unos valores  $q_i$  y  $q_j$ , o una disponibilidad **Q**, que puede calcularse de forma explícita. Como consecuencia, conocida la disponibilidad **Q**, el valor **BM** del óptimo puede calcularse resolviendo la siguiente expresión implícita:

$$\mathbf{Q} = \sum q_{ri} \cdot \left( 1 - \frac{\mathbf{BM}}{2} \cdot \frac{q_{ri}}{BR_{ri} - k_i} \right) \cdot \left( \frac{2 \cdot (BR_{ri} - k_i)}{q_{ri}} > \mathbf{BM} \right) \cdot \left( q_i^* \cdot q_{ri} > q_{0i} \right) + \rightarrow \mathbf{BM} \quad (25)$$

$$+ \sum q_{rj} \cdot \left[ \left( \frac{\mathbf{BM}}{c \cdot e \cdot q_{rj}^{e-1}} \right)^{\frac{1}{e-1}} \cdot \left[ \left( \mathbf{BM} > c \cdot e \cdot q_{rj}^{e-1} \right) + \left( \mathbf{BM} \leq c \cdot e \cdot q_{rj}^{e-1} \right) \right] \left( q_j^* \cdot q_{rj} > q_{0j} \right) \right]$$

Estimando un valor de **BM**, por la expresión (25) se puede calcular el valor correspondiente de **Q**. De no coincidir éste con la cantidad de agua disponible, hay que modificar la estimación: reduciendo **BM**, en caso de que **Q** resulte menor, o aumentándolo, en caso contrario, hasta su coincidencia. Actuando de forma similar, puede incluirse en el modelo de reparto óptimo otro tipo de funciones. Obsérvese que en la expresión (25) se ha extendido a funciones potenciales con distintos exponentes  $e$ .

### *Reparto óptimo compensado*

Estando la tierra en distintas manos, puede darse el caso de que el reparto óptimo cause agravios comparativos entre los regantes del colectivo al cual se aplique, aun alcanzando el máximo beneficio agregado. De ser así, y en línea con la filosofía de esta propuesta, cabe introducir algún criterio de compensación entre los usuarios del agua. No obstante, se debe tener en cuenta que esta medida, intervencionista, podría causar rechazo entre algunos agricultores.

Admitiendo como reglas de asignación más extendidas las de cuota única y reparto proporcional, y siendo esta última más eficiente económicamente, como luego se verá en el estudio de caso, se opta por aplicar el siguiente criterio de compensación: repartir equitativamente, entre toda la superficie regada, el ahorro económico que se consigue con el reparto óptimo con respecto a la regla proporcional. De este modo, el beneficio  $B_i$  que resultará de aplicar este criterio de compensación en una unidad de producción  $i$  vendrá dado por:

$$B_i = B_{Pi} + \frac{\sum B_{ROi} - \sum B_{Pi}}{n} \equiv B_{Pi} + \frac{L_P - L_{RO}}{n} \quad (26)$$

En donde  $B_{Pi}$  es el beneficio que se obtiene en dicha unidad  $i$ , tras aplicar la regla proporcional;  $B_{ROi}$  y  $B_{Pi}$  son los beneficios individuales que se obtienen con el reparto óptimo y la reducción proporcional, respectivamente;  $n$  es el número de hectáreas del regadío;  $L_P$  y  $L_{RO}$  son las pérdidas económicas o los lucros cesantes agregados, para todo el colectivo de riego, que resultan de aplicar la regla proporcional y el reparto óptimo ( $L_P \geq L_{RO}$ ).

## Sección 4

# Estudio de caso

Las reglas previamente expuestas han sido aplicadas al olivar de la provincia de Jaén, con la finalidad de estudiar el reparto de agua económicamente más favorable para este cultivo, ante posibles situaciones de escasez, y también la conveniencia en ciertos casos de no regar. En particular, se analizan las ventajas comparativas que ofrece el reparto óptimo propuesto en la sección anterior, con respecto a la regla de asignación o cuota única y a la regla proporcional. Casi la totalidad de la provincia de Jaén, un 96,33%, se enclava en la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir, quedando el resto dentro de la Demarcación del Segura. Ambas demarcaciones son deficitarias en agua, aunque su capacidad de embalsamiento es elevada.

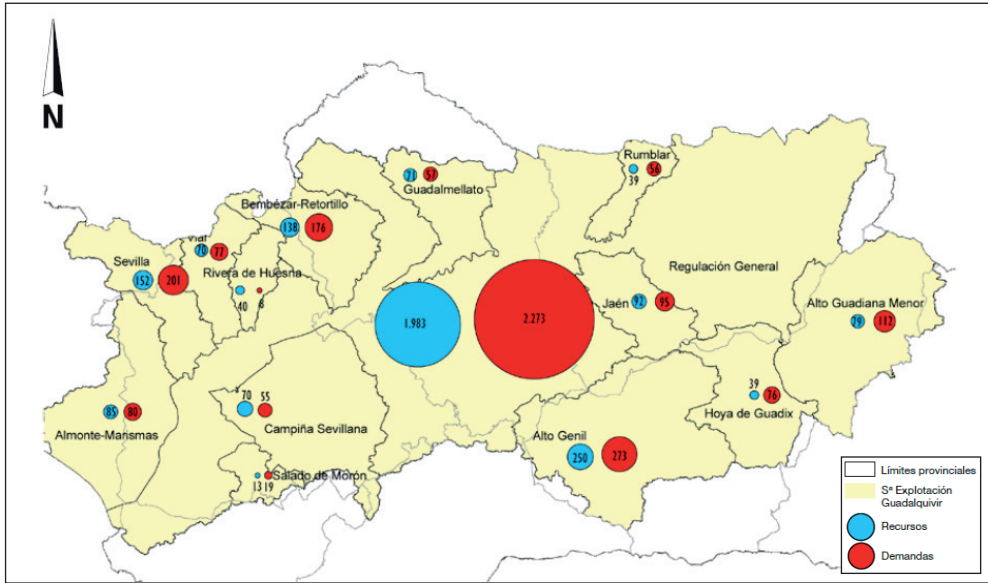
### 4.1. Déficit de agua en la D. H. del Guadalquivir

En la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir los usos agrícolas son los que más cantidad de agua demandan, llegando casi al 90%, mientras que el resto es casi exclusivo del sector urbano, siendo el industrial apenas perceptible. La población que queda abastecida con el agua de la D. H. del Guadalquivir suma casi cinco millones de habitantes (Junta de Andalucía, 2007) y el número de municipios incluidos en la Demarcación es de 478. Las mayores necesidades de agua se producen en verano, cuando el caudal es mínimo y la agricultura requiere unas cantidades mayores de agua en embalse que las demandadas en condiciones de riego a caudal constante (Junta de Andalucía, 2012).

La precipitación media anual en la D. H. del Guadalquivir es de aproximadamente 590 mm. Los recursos disponibles alcanzaron en el año 2007 los 3.362 hm<sup>3</sup>, mientras que la demanda neta se elevó a 3.578 hm<sup>3</sup>. Esto significa que en el año en 2007 el déficit global para la Demarcación fue de 216 hm<sup>3</sup>. En 2009 el déficit alcanzó los 564 hm<sup>3</sup>; y en el año 2010, en que los recursos ascendieron a 3.362 hm<sup>3</sup> y las demandas a 4.016 hm<sup>3</sup>, el balance resultó en 654 hm<sup>3</sup> de déficit. Estos datos demuestran la elevada variabilidad interanual. No obstante, la gran capacidad de embalsamiento de la D. H. del Guadalquivir (7.985,5 hm<sup>3</sup>) permite dar servicio a las demandas, con una cierta independencia de las precipitaciones del año en curso (Junta de Andalucía, 2012).

**Figura 2**

*Recursos y demandas en los sistemas de explotación hídrica de la Cuenca del Guadalquivir*



FUENTE: Junta de Andalucía (2012).

## 4.2. Tipología del olivar jiennense

Aunque el espectro de sistemas de cultivo en el olivar español es muy variado, casi tanto como el número de explotaciones, podemos hablar, de manera simplificada, de olivar tradicional y olivar de alta densidad (intensivo y superintensivo). Estos grandes tipos han sido caracterizados por el Consejo Económico y Social de la Provincia de Jaén (CESPJ, 2011) y la Asociación Española de Municipios del Olivo (AEMO, 2010).

Por *olivar tradicional* se entiende el de amplios marcos de plantación (10-12 m, asociados a 80-120 plantas por hectárea), normalmente de secano, con rendimientos medios o bajos (de 2.000 a 4.000 kg de aceituna por hectárea) y una edad media superior a los 25 años. La mecanización del olivar tradicional es factible para una pendiente del terreno no superior al 20%. Este umbral clinométrico marcaría la separación entre el *olivar de loma* y el *olivar de sierra*. Al de loma se le llama “olivar tradicional mecanizable” (OTM), ya que admite la mecanización de labores, con mayor o menor intensidad, así como el regadío. Por el contrario, el de sierra u “olivar tradicional difícilmente mecanizable” (OTDM) no se da en regadío.

El *olivar intensivo* se presenta con bastantes mayores densidades de plantación (200-600 plantas por hectárea, de un pie o en seto). Además de por la densidad, este tipo se caracteriza por estar normalmente en regadío (con unas dotaciones comprendidas normalmente entre los 1.500 y los 2.500 m<sup>3</sup>/ha), por tener unas producciones altas (8.000-12.000 kg de aceituna por hectárea) y por permitir la completa mecanización de todas las labores, incluso la recolección. Esto último, al ser sólo posible con pendientes nulas o muy suaves, hace que éste sea un *olivar de vega o de campiña*.

Además del anterior, se distingue como olivar de alta densidad el *olivar superintensivo*, con una densidad de plantación aún mayor (1.000-2.000 plantas por hectárea, dispuestas linealmente, en setos). Pero este tipo no es representativo en Jaén, dada la muy reducida extensión que ocupa, por lo cual no se considerará en el presente estudio.

Considerando entonces estos tipos o clases de cultivo, y distinguiendo además entre seco y regadío, CESPJ (2011) y AEMO (2010) manejan la siguiente diferenciación del olivar jaennense, que es la que se empleará en este trabajo:

1. OTDM: Olivar tradicional difícilmente mecanizable (en seco)
2. OTMS: Olivar tradicional mecanizable de seco
3. OTMR: Olivar tradicional mecanizable de regadío
4. OIS: Olivar intensivo de seco
5. OIR: Olivar intensivo de regadío

La extensión que ocupan estas clases de cultivo en la provincia de Jaén se muestra en la siguiente tabla y, para mayor claridad, en la figura que le sigue:

**Tabla 1**

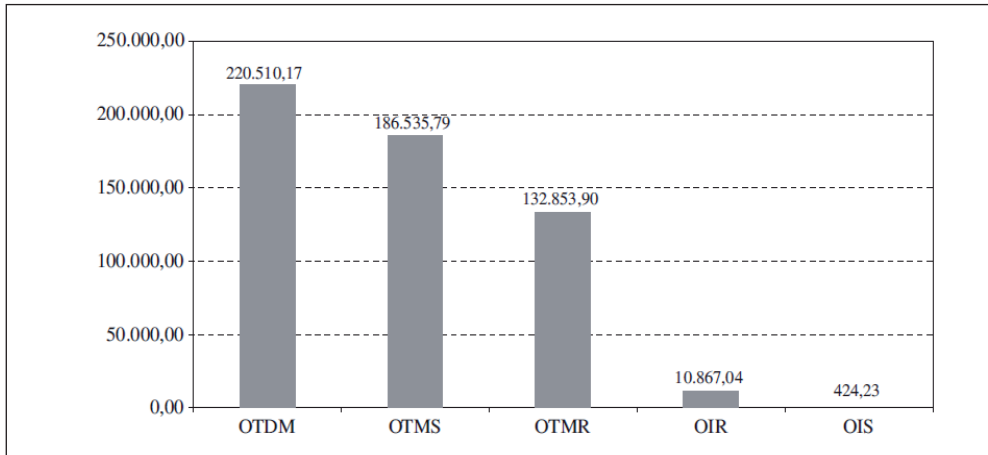
*Extensión ocupada por las grandes clases de olivar en la provincia de Jaén*

Clase	Sistema de cultivo	S (ha)	%
1. OTDM	Olivar tradicional de difícil mecanización	220.510,17	40,01%
2. OTMS	Olivar tradicional mecanizable de seco	186.535,79	33,84%
3. OTMR	Olivar tradicional mecanizable de regadío	132.853,90	24,10%
4. OIS	Olivar intensivo de seco	424,23	0,08%
5. OIR	Olivar intensivo de regadío	10.867,04	1,97%
<i>Olivar de seco</i>		<i>407.470,19</i>	<i>73,93%</i>
<i>Olivar de regadío</i>		<i>143.720,94</i>	<i>26,07%</i>
Total provincia de Jaén		551.191,13	100,00%

FUENTE: Elaboración propia, a partir de CESPJ (2011).

**Figura 3**

*Extensión ocupada por las grandes clases de olivar en la provincia de Jaén*



FUENTE: CESPJ (2011).

### 4.3. Datos utilizados

Los datos que han sido utilizados para aplicar la metodología expuesta en la sección 3 al olivar de la provincia de Jaén se muestran a continuación, en las tablas 2 y 3.

Para las dos clases de olivar en regadío que aquí se estudian (OTMR y OIR), las dotaciones de referencia representan las necesidades hídricas máximas del cultivo. Han sido obtenidas a partir del dato medio de necesidades máximas de riego para olivar en un *año normal* en la C. H. del Guadalquivir (AQUAVIR, 2005), promediando por superficies y mediante la relación entre las dotaciones indicadas en AEMO (2010). Cabe señalar que las dos dotaciones de referencia que han sido estimadas se relacionan con unas producciones que son algo inferiores a las que, para esas mismas aportaciones, se muestran en Corominas (2002).

Las dotaciones iniciales se han obtenido a partir del dato de dotación media para olivar en la C. H. del Guadalquivir (AQUAVIR, 2005), igualmente promediando por superficies y aplicando la relación de las dotaciones señaladas en AEMO (2010). Para diferenciarlas de las otras, a estas últimas las llamamos “dotaciones objetivo”. Según éstas, el OTMR requiere un 25% menos de agua que el OIR (1.500 y 2.000 m<sup>3</sup>/ha, respectivamente). De aplicarse estas últimas dotaciones, se estaría cubriendo un poco menos del 42% de las necesidades hídricas, asumiéndose por lo tanto un riego bastante deficitario.

**Tabla 2***Dotaciones de riego anuales para el olivar de la provincia de Jaén*

CLASE DE CULTIVO		Superficie año 2011	Dotación objetivo	Dotación de referencia <sup>1</sup>	Dotación inicial <sup>2</sup>
		ha	m <sup>3</sup> /ha	m <sup>3</sup> /ha	m <sup>3</sup> /ha
OTMR	Olivar tradicional mecanizable de regadío	132.854,90	1.500	3.588	2.225
OIR	Olivar intensivo de regadío	10.867,04	2.000	4.783	2.967
<i>Totales y promedios</i>		<i>143.720,94</i>	<i>1.537,81</i>	<i>3.678,00</i>	<i>2.281,00</i>

1) Promediadas a partir del dato de 3.678 m<sup>3</sup>/ha/año para olivar en un *año normal* en la C.H. del Guadalquivir (AQUAVIR, 2005).

2) Promediadas a partir del dato de 2.281 m<sup>3</sup>/ha/año para olivar en la C.H. del Guadalquivir (AQUAVIR, 2005).

FUENTE: Elaboración propia, a partir de CESPJ (2011) y AEMO (2010).

Las superficies provinciales, los costes de cada sistema de cultivo y sus producciones de referencia se han tomado de la publicación del CESPJ (2011), al igual que los rendimientos de aceite. El contenido de aceite en la aceituna suele ser de entre un 20 y un 24%, influyendo la variedad y las precipitaciones previas a la recolección.

Los costes fijos del regadío, que han sido descritos en la sección 3 y que son de gran interés para los objetivos del presente trabajo, se han tomado de Alarcón *et al* (2016). Se trata de valores medios en España para los sistemas de riego localizado, los cuales han sido obtenidos a partir de una amplia revisión de proyectos de modernización y referencias bibliográficas. Son los siguientes: 8.993 €/ha, como inversión media para instalar un sistema de riego localizado (tanto en alta, redes de conducción y distribución, como en baja o parcela); 57 €/ha, como costes fijos medios de conservación y mantenimiento; y 66 €/ha, como coste anual de la potencia eléctrica instalada.

La anualidad de la inversión se ha calculado para una vida útil de las obras de modernización de 25 años, es decir, para una tasa de depreciación del 4% y para una tasa de interés del 4%. Con ello, el valor que resulta es  $a = 0.064 \text{ años}^{-1}$ . El coste fijo anual equivalente que resulta de aplicar este valor, así como los costes medios de conservación/mantenimiento y de la potencia eléctrica, se ha repartido entre las dos clases de regadíos estudiadas, proporcionalmente a los correspondientes costes



Tabla 3

Datos económicos de referencia para el olivar de la provincia de Jaén. Año 2011

CLASE DE CULTIVO	Superficie	Producción de aceituna	Rdnto. graso	Producción de aceite	Ingresos <sup>1</sup>	Costes	Beneficio de referencia	Beneficio total máximo
	ha	kg / ha	%	kg / ha	€ / ha	€ / ha	€ / ha	mil €
1.OTDM Olivar tradicional difícilmente mecanizable	220.510,17	1.750	23,5	411	1.196,74	1.023,20	173,54	38.267
2.OTMS Olivar tradicional mecanizable de secano	186.535,79	3.500	24	840	2.444,40	1.448,20	996,2	185.827
3.OTMR Olivar tradicional mecanizable de regadío	132.853,90	6.000	21	1.260	3.666,60	2.197,20	1.469,40	195.216
4.OIS Olivar intensivo de secano	424,23	5.000	22	1.100	3.201,00	1.528,40	1.672,60	710
5.OIR Olivar intensivo de regadío	10.867,04	10.000	19	1.900	5.529,00	2.305,40	3.223,60	35.031
<i>Total</i>	<i>551.191,13</i>							<i>455.050</i>

1) Suma de ingresos de producción y ayudas. El precio tomado es 1,86 €/kg, precio medio POOLred en Noviembre 2010, promedio de aceite de oliva virgen extra (2,04 €/kg), aceite de oliva virgen (1,83 €/kg) y aceite de oliva lampante B, 1º. (1,77 €/kg). La ayuda considerada es 1,05 € por kg de aceite, promedio provincial estimado en 2011 según el sistema de ayudas ligado a la producción histórica (Sistema de Pago Único).

FUENTE: Elaboración propia, a partir de CESPJ (2011) y AEMO (2010).

de inversión reflejados en AEMO (2010). De este modo, para el olivar tradicional mecanizable de regadío (OTMR), se obtiene 692,74 €/ha, y para el olivar intensivo de regadío (OIR), 732,95 €/ha.



## Sección 5

# Resultados

### 5.1. Asignación mínimamente rentable

Con el método propuesto en la sección 3 y con los datos expuestos en la sección 4, se han podido obtener sendas funciones del beneficio imputable al agua de riego, de tipo cuadrático, para las dos clases de cultivo en regadío que aquí se estudian. Estas funciones se corresponden con las líneas a trazos de la siguiente figura 4. En ellas,  $BR$  viene dado en € por hectárea y  $q$  en  $\text{m}^3/\text{ha}$ .

$$\text{Para OTMR (clase 3): } BR = -9,06\text{E-}05 \cdot q^2 + 0,65q - 692,74$$

$$\text{Para OIR (clase 5): } BR = -9,98\text{E-}05 \cdot q^2 + 0,95q - 732,95$$

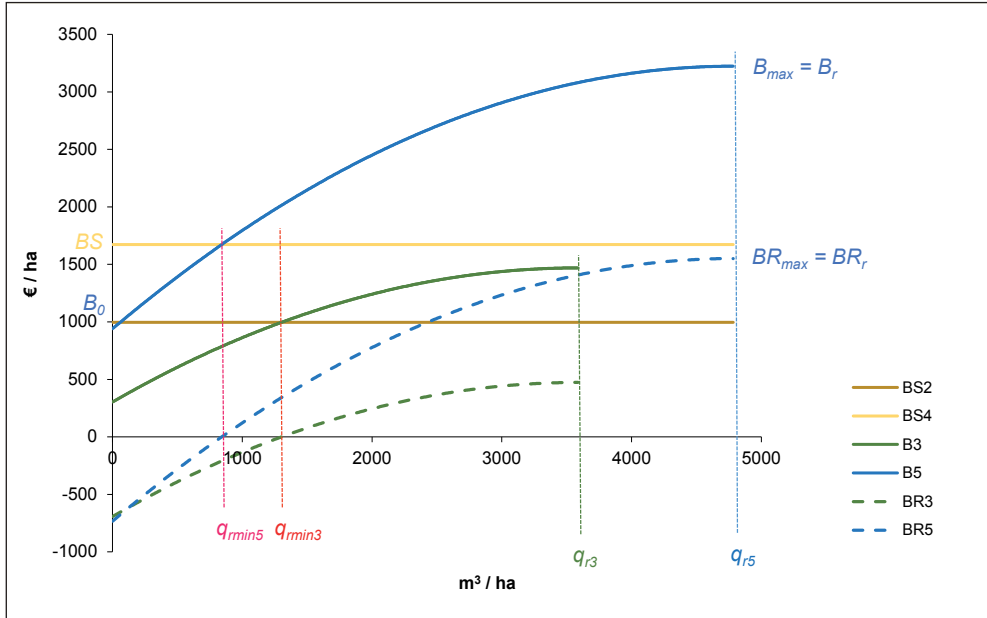
Sumando a las anteriores el beneficio del cultivo equivalente en seco, que es independiente de la dosis de riego aplicada, tenemos el beneficio económico que podría obtenerse de ambos cultivos en regadío. Las funciones que lo representan son las que aparecen con líneas continuas en la figura 4. Sus máximos se corresponden con los valores máximos de beneficio,  $B_r$ , que para cada clase pueden alcanzarse, cuando se aplican unas dotaciones de riego,  $q_{r3}$  y  $q_{r5}$ , que permiten satisfacer completamente las necesidades de agua.

Como puede verse en la figura 4,  $BR$  alcanza valores negativos cuando el beneficio del cultivo no permite compensar los costes fijos de la instalación de riego, costes que hay que pagar incluso cuando no se riega. Para el OTMR, esto se produce con unas dotaciones inferiores a  $q_{\text{min}3} = 1.302 \text{ m}^3/\text{ha}$ ; para el OIR, con unas dotaciones menores a  $q_{\text{min}5} = 841,5 \text{ m}^3/\text{ha}$ . Estas dotaciones serán las asignaciones mínimamente rentables. Por debajo de las mismas será más rentable el cultivo equivalente en seco, pues permite obtener un beneficio superior:  $BS2$  y  $BS4$ , respectivamente.

Llegada una situación de escasez lo suficientemente severa como para que el agua disponible sea inferior a estas dotaciones, el conocer las mismas puede per-

**Figura 4**

*Funciones de beneficio del olivar de regadío en la provincia de Jaén*



BS2: Beneficio del olivar tradicional mecanizable de secano (OTMS)

BS4: Beneficio del olivar intensivo de secano (OIS)

B3: Beneficio del olivar tradicional mecanizable de regadío (OTMR)

B5: Beneficio del olivar intensivo de regadío (OIR)

BR3: Beneficio del agua en el olivar tradicional mecanizable de regadío (OTMR)

BR5: Beneficio del agua en el olivar intensivo de regadío (OIR)

mitir ahorrar agua o bien destinarla a otros usos. Analizando las dos clases de olivar por separado, esta escasez habría de ser tal que la disponibilidad de agua fuera, para el OTMR, de un 36,3%, y para el OIR, de tan sólo un 17,6%, con respecto a sus respectivas dotaciones de referencia.

## 5.2. Disponibilidad mínima de agua que hace rentable el regadío

Haciendo uso de las funciones de beneficio previamente indicadas, se han aplicado a las grandes clases de cultivo del olivar en la provincia de Jaén las tres reglas de asignación presentadas en la sección 3. Con las tres reglas, una clase dejará de ser regada, cuando resulte más rentable su equivalente en secano. Pero sólo con

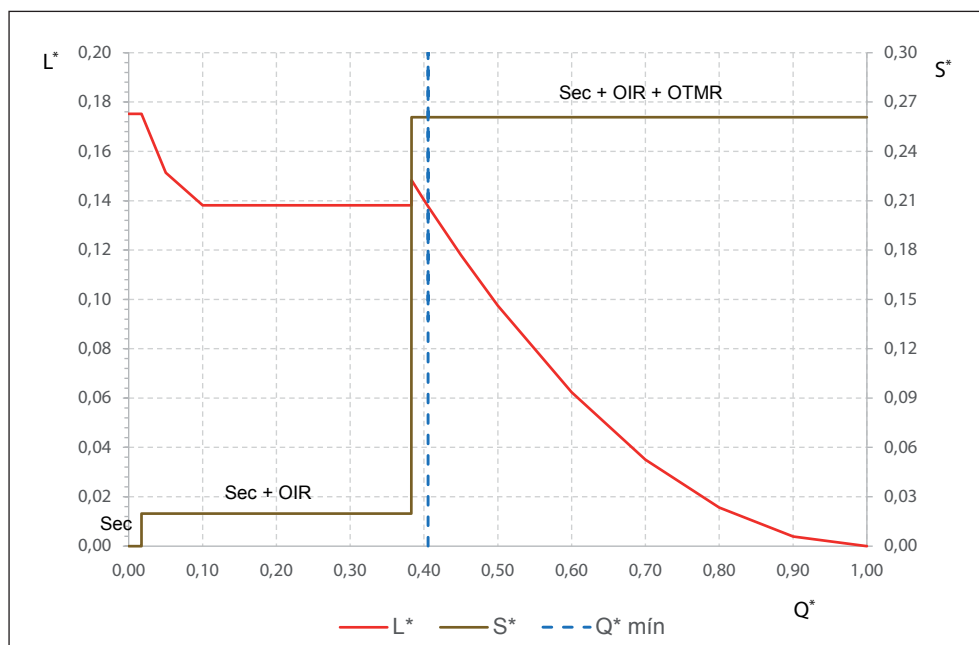
el reparto óptimo, una clase dejará además de ser regada cuando, no habiendo agua suficiente para todo el regadío, se obtenga más beneficio aportándola a otra clase.

En las figuras 5, 6 y 7 se muestran, con cada regla de reparto y a partir de los datos presentados en la sección 4, las pérdidas económicas relativas al beneficio de referencia,  $L^*$ , así como las superficies en riego relativas a las iniciales,  $S^*$ . Una y otra en función de las distintas disponibilidades de agua relativas a las necesidades hídricas del olivar jiennense,  $Q^*$ . Cabe recordar que el beneficio de referencia es el máximo posible, el cual se alcanzaría cuando no hubiera restricción alguna de agua.

En estas tres figuras, la línea vertical de trazos representa la disponibilidad mínima de agua, por debajo de la cual no interesaría regar el olivar tradicional (OTMR). Analizando primero el reparto óptimo, puede observarse en la figura 5 que dicha disponibilidad sería de un 40,5% de sus necesidades hídricas o, lo que es lo mismo, un 59,5% de escasez o restricción. De seguir regando el OTMR con dotaciones menores, sus costes fijos serían superiores a su beneficio; hasta llegar a  $Q^* = 38,3\%$ , a partir de la cual el modelo asignaría toda el agua al olivar intensivo (OIR),

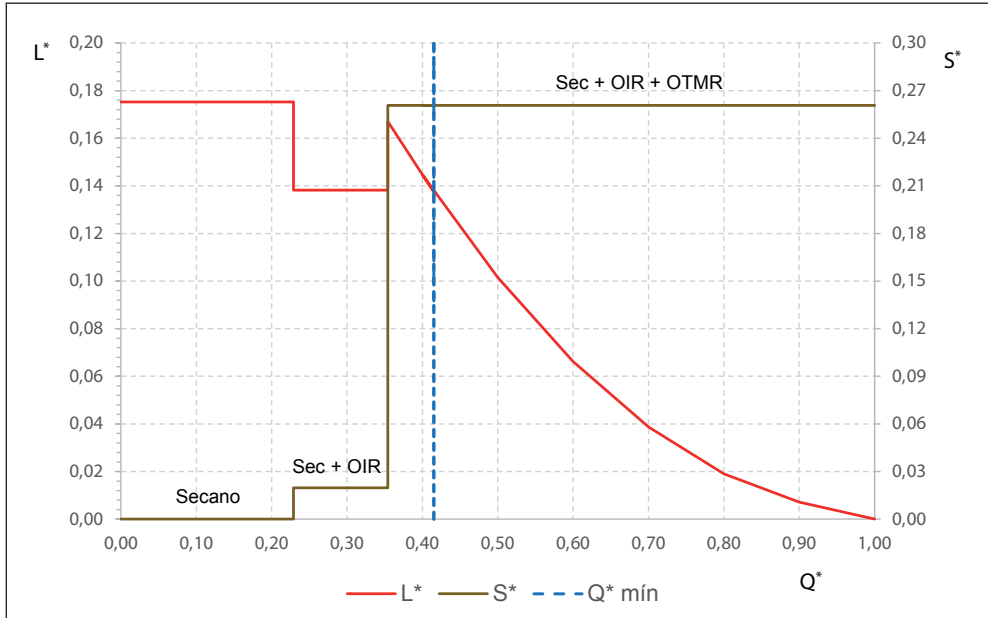
**Figura 5**

*Pérdidas,  $L^*$ , y superficie regada,  $S^*$ , en el olivar jiennense, en función de la disponibilidad de agua,  $Q^*$ , con el reparto óptimo. Valores relativos a los de referencia*



**Figura 6**

*Pérdidas,  $L^*$ , y superficie regada,  $S^*$ , en el olivar jiennense, en función de la disponibilidad de agua,  $Q^*$ , con la **regla de asignación única**. Valores relativos a los de referencia*



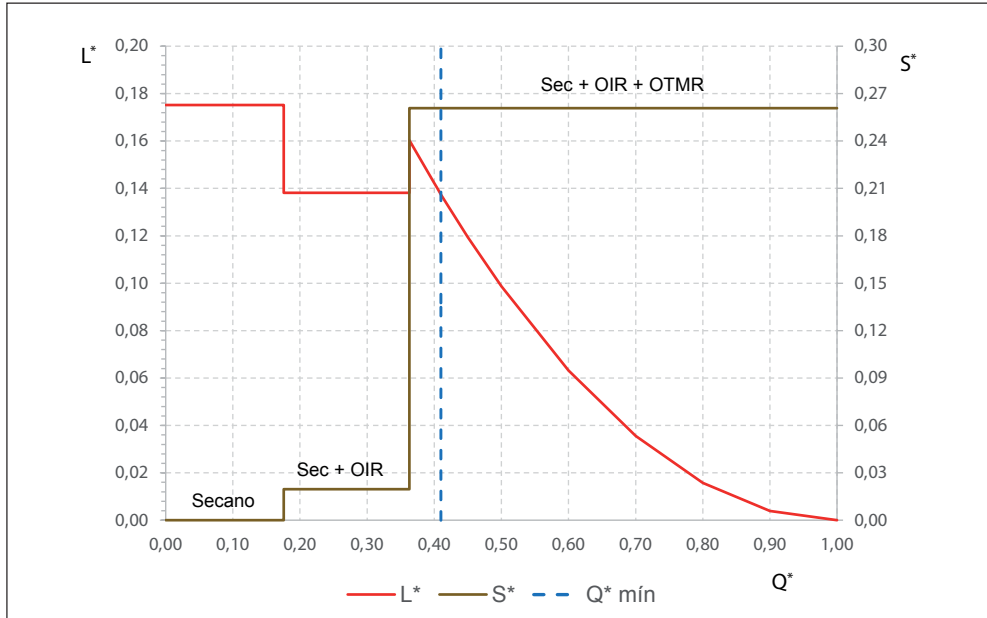
más rentable. El OIR es suficientemente rentable como para regarse con prácticamente cualquier dotación: tan sólo deja de serlo a partir de  $Q^* = 1,7\%$ . No obstante, por encima del 38,3%, el modelo no le asigna toda el agua disponible, sino que la reparte entre las dos clases de cultivo.

Con la regla de asignación única y la regla proporcional, como puede verse en las figuras 6 y 7, la disponibilidad mínima de agua para que interesara regar el olivar tradicional (OTMR), marcada por las líneas verticales de trazos, se sitúa en un 41,5% y en un 41% de las necesidades totales, respectivamente. Es decir, que con ambas reglas se llegaría a aprovechar menos el agua de riego que con el reparto óptimo, desde un punto de vista económico.

Como puede apreciarse también en comparación con el reparto óptimo, con estas dos reglas se aguantaría más regando el OTMR, con el consiguiente coste de oportunidad que ello puede suponer, al incurrirse en unas pérdidas bastante mayores que con el reparto óptimo (ver figuras). Además, el OIR dejaría de regarse bastante antes que con el reparto óptimo (a partir de una disponibilidad del 23%, en el caso de la regla de asignación única). Todo ello se debe a que el reparto óptimo permite

**Figura 7**

*Pérdidas,  $L^*$ , y superficie regada,  $S^*$ , en el olivar jiennense, en función de la disponibilidad de agua,  $Q^*$ , con la **regla proporcional**. Valores relativos a los de referencia*



redistribuir las dotaciones para un mayor beneficio conjunto, por lo que, en vez de malgastar una dotación insuficiente para rentabilizar el OTMR, la misma se destinaría al OIR.

### 5.3. Ahorro económico con el reparto óptimo

Utilizando los datos mostrados en la anterior tabla 3, y asumiendo la simplificación correspondiente y las limitaciones que ello pueda suponer, se han calculado el beneficio y las pérdidas económicas que conllevaría la aplicación de las tres reglas de asignación aquí estudiadas al olivar de la provincia de Jaén. Dichas pérdidas,  $L$ , resultan de restar el beneficio obtenido en cada caso al beneficio máximo posible o de referencia, que es aquel que se consigue cuando no hay restricción alguna de agua de riego. Se expresan en términos absolutos o valor agregado para toda la provincia y en términos relativos a ese beneficio de referencia,  $L^* = L/B_r$ .

Además, dado que el reparto óptimo permite alcanzar, por definición, el máximo beneficio del agua, en la tabla 4 se incluye el ahorro o coste evitado de aplicar



dicho reparto en vez de las otras dos reglas de asignación, igualmente, para distintas disponibilidades de agua,  $Q^*$ . El mismo se da tanto en valor agregado para toda la provincia de Jaén, como por hectárea de riego. Puede observarse que este ahorro aumenta con la escasez de agua, al menos hasta llegar a una disponibilidad del 40%, en torno a la cual se sitúa la disponibilidad mínima, por debajo de la cual no interesaría en ningún caso regar el olivar tradicional (OTMR). Con esa disponibilidad del 40%, equivalente a una escasez del 60% (con respecto a las necesidades de referencia), se podría conseguir para toda la provincia ahorros de 1.955.000 € y 848.000 €, aplicando el reparto óptimo en vez de, respectivamente, la regla de asignación única y a la reducción proporcional.

**Tabla 4**

*Pérdidas y ahorro económico obtenibles aplicando el reparto óptimo de agua al olivar jiennense, con respecto a la regla de asignación única y a la regla proporcional*

$Q^*$	Pérdidas económicas							Ahorro con RO			
	q media	Asignación única (AU)		R. Proporcional (RP)		Reparto óptimo (RO)		respecto a AU		respecto a RP	
	m <sup>3</sup> /ha	L (mil €)	L'	L (mil €)	L'	L (mil €)	L'	mil €	€/ha	mil €	€/ha
0,00	0	79 721	0,18	79 721	0,18	79 721	0,18	0	0,00	0	0,00
0,10	368	79 721	0,18	79 721	0,18	62 866	0,14	16 855	117,27	16 855	117,27
0,20	736	79 721	0,18	62 866	0,14	62 866	0,14	16 855	117,27	0	0,00
0,30	1 103	62 866	0,14	62 866	0,14	62 866	0,14	0	0,00	0	0,00
0,35	1 290	62 866	0,14	62 866	0,14	62 866	0,14	0	0,00	0	0,00
0,40	1 471	65 806	0,14	64 699	0,14	63 852	0,14	1 955	13,60	848	5,90
0,50	1 839	46 202	0,10	44 930	0,10	44 341	0,10	1 861	12,95	589	4,10
0,60	2 207	30 147	0,07	28 755	0,06	28 378	0,06	1 769	12,31	377	2,62
0,70	2 575	17 642	0,04	16 175	0,04	15 963	0,04	1 679	11,68	212	1,47
0,80	2 942	8 686	0,02	7 189	0,02	7 094	0,02	1 592	11,08	95	0,66
0,90	3 310	3 280	0,01	1 797	0,00	1 774	0,00	1 507	10,48	23	0,16
1,00	3 678	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00

*Ahorro económico para la disponibilidad que satisface las dotaciones objetivo*

Las “dotaciones objetivo” que indica AEMO (2010) son 1.500 m<sup>3</sup>/ha para el OTMR y 2.000 m<sup>3</sup>/ha para el OIR. Aportando estas dotaciones, como se ha dicho, no se llegaría al 42% de las necesidades hídricas totales, habida cuenta de que, res-

pectivamente, esas necesidades o dotaciones de referencia se han estimado en 3.588 y 4.783 m<sup>3</sup>/ha.

Aplicando una asignación única, ésta habría de fijarse en unos 1.538 m<sup>3</sup>/ha, muy inferior a las necesidades de ambas clases. Esto supondría, redondeando, unas pérdidas económicas de 381 €/ha para el OTMR y de 1.051 €/ha para el OIR, con respecto al beneficio de referencia; y, en toda la provincia, 61.992.624 €.

Con la regla de reducción proporcional, el OTMR recibiría 1.500 m<sup>3</sup>/ha y el OIR 2.000 m<sup>3</sup>/ha, es decir, las dotaciones objetivo. Esto provocaría, con respecto al beneficio de referencia, unas pérdidas económicas de unos 395 €/ha y 773 €/ha, respectivamente; y, en toda la provincia, 60.852.439 €.

Por último, aplicando el reparto óptimo, las asignaciones resultarían de 1.432 m<sup>3</sup>/ha para el OTMR y de 2.827 m<sup>3</sup>/ha para el OIR, alcanzando el beneficio marginal del agua un valor de 0,39 €/m<sup>3</sup>. Las pérdidas económicas se cifrarían, redondeando, en 421 y 382 €/ha, respectivamente, y las pérdidas totales ascenderían a 60.054.652 €. Esto supone un ahorro económico para todo el olivar jiennense de 1.937.972 € (13,5 €/ha), con respecto a la asignación única, y de 797.787 (5,5 €/ha), en relación a la regla proporcional.

Como se ve, con el reparto óptimo, el olivar tradicional se vería privado de agua en favor del olivar intensivo, lo cual invita a introducir algún criterio de compensación. Repartiendo equitativamente entre todas las hectáreas de regadío el ahorro que se obtiene con respecto a la regla proporcional, conseguimos que las pérdidas sean 389 €/ha para OTMR y 768 €/ha para OIR. Con ello, se mejoran los resultados de la regla proporcional para ambos sistemas de cultivo, manteniéndose lógicamente el ahorro conjunto señalado a nivel provincial.

## 5.4. Ahorro de agua por no regar

En teoría, las tres reglas de asignación analizadas emplearían el agua que esté disponible en cada situación. Sin embargo, habrá situaciones de escasez para las que, bajo cualquiera de las reglas, no sea rentable regar ciertos cultivos. De ahí que se haya introducido la restricción de que sea positivo el beneficio atribuible al agua de riego,  $BR_i > 0$ . En esos casos, habrá un volumen sobrante de agua, el cual podría destinarse a otros usos. Esto puede observarse en la siguiente tabla 5. Según los datos empleados, con  $Q^* \leq 0,35$  dejaría de regarse el olivar tradicional (OTMR), pues el beneficio que se consigue es inferior al del cultivo equivalente en seco.

Como se ha visto, con el reparto óptimo se dejará de regar antes la clase menos rentable (el OTMR), y su dotación se destinará a la clase más rentable (OIR). De este modo, satisfaciendo las necesidades de la clase más rentable, dada la restricción  $q_i \leq q_r$ , el agua en exceso podrá ser ahorrada. Ahora bien, la posibilidad que ofrece

el reparto óptimo de distribuir el agua buscando el mayor beneficio colectivo, hace que se pueda apurar más el agua disponible, lo cual permite ahorrar menos agua, aunque sólo en situaciones de escasez severa. Esto se pone de manifiesto en la tabla 5, para disponibilidades de agua menores del 30% ( $Q < 0,30$ ) y del 20% ( $Q < 0,20$ ), en comparación, respectivamente, con la asignación única y la regla proporcional. No obstante, y como se ha visto en la anterior tabla 4, cuando la escasez hace que ciertos cultivos no sean rentables, un reparto más eficiente del agua hace que las pérdidas del conjunto sean menores.

**Tabla 5**

*Ahorro de agua según su disponibilidad en el olivar jiennense, aplicando el reparto óptimo en vez de la regla de asignación única y la regla proporcional*

Q*	q media	Ahorro de agua por no regar OTMR					
		Asignación única		R. Proporcional		Reparto óptimo	
	m <sup>3</sup> /ha	hm <sup>3</sup>	% Q <sub>i</sub>	hm <sup>3</sup>	% Q <sub>i</sub>	hm <sup>3</sup>	% Q <sub>i</sub>
0,00	0	0	-	0	-	0	-
0,10	368	52,86	100,00	52,86	100,00	0,88	1,66
0,20	736	105,72	100,00	53,74	50,83	53,74	50,83
0,30	1 103	106,60	67,22	106,60	67,22	106,60	67,22
0,35	1 290	133,42	71,96	133,42	71,96	133,42	71,96
0,40	1 471	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
...	...	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,00	3 678	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

En definitiva, a diferencia de la asignación única y la regla proporcional, que establecen unas dotaciones fijas, con el reparto óptimo puede hablarse de una cierta flexibilidad en la asignación, en función del beneficio obtenible. Esta flexibilidad permite apurar más el agua y, por tanto, hacer un mayor uso de este recurso. Por la misma, se lograría un resultado similar al de introducir un mercado de derechos al uso del agua, una vez fuesen asignados éstos mediante, por ejemplo, cualquiera de las otras dos reglas: se realizarían intercambios hasta alcanzar un mismo beneficio marginal para todos los regantes, el mismo que resultaría de aplicar el reparto óptimo, siempre y cuando la información fuese completa y no hubiera costes de transacción (ver Alarcón *et al*, 2014c).

## Sección 6

# Conclusiones

Según apuntan diversas fuentes, es probable que los episodios de escasez hídrica se intensifiquen, con consecuencias significativas en la agricultura. Es conveniente por ello tener capacidad suficiente de reacción y contar con soluciones para resolver y afrontar de manera adecuada y eficaz este tipo de situaciones. Habrá de mejorarse entonces la eficiencia del regadío, especialmente de los sistemas de riego por gravedad. Y también la productividad de las explotaciones, repartiendo eficientemente el agua disponible y reorientando la producción con especies de menores necesidades y menor vulnerabilidad al estrés hídrico.

En el presente trabajo se formula una propuesta para repartir el agua dentro de un colectivo de riego con diferentes clases o unidades productivas, concebida para minimizar las pérdidas económicas agregadas, ante situaciones de escasez o restricción de agua. Se entiende por reparto óptimo aquél que, a partir del agua disponible, reporta un mayor beneficio económico al conjunto de los regantes del colectivo al cual se dirige. La solución al correspondiente problema de optimización es la de “equimarginalidad”, por la cual se igualan los beneficios marginales de todos los regantes.

El reparto óptimo del agua se ha aplicado al olivar jiennense y se ha comparado con la regla de asignación única y con la regla de reducción proporcional. Siendo, como son en este caso, heterogéneas las unidades productivas, las diferencias económicas que resultan son de interés, dependiendo de las restricciones de agua. A diferencia de esas dos reglas, que establecen unas dotaciones fijas, con el reparto óptimo puede hablarse de una cierta flexibilidad en la asignación, en función del beneficio obtenible con cada uso o cultivo. Esta flexibilidad permite aprovechar más y mejor el agua disponible y, por tanto, hacer un uso más productivo y rentable de este recurso.

Con los datos medios utilizados, que adolecen de una alta simplificación, se han obtenido sendas funciones cuadráticas del beneficio imputable al agua de riego, para las dos clases mayoritarias de olivar en regadío presentes en la provincia de Jaén:

el olivar tradicional mecanizable de regadío (OTMR) y el olivar intensivo de regadío (OIR). Aunque es lógico pensar que un análisis de estas características debería hacerse a una escala bastante más detallada o local, el ámbito provincial puede dar una primera idea de las posibilidades y conveniencia de afinar el reparto de agua en la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir y en otras demarcaciones expuestas a la escasez de recursos hídricos.

Las instalaciones de regadío tienen unos costes fijos anuales que pueden ser más o menos elevados, dependiendo de la inversión realizada. Son costes de depreciación, costes de conservación y mantenimiento y costes de la potencia eléctrica instalada. Tal vez estos costes no se tengan suficientemente en cuenta a la hora de analizar la viabilidad del regadío. Cuando el beneficio que se obtenga de un cultivo en regadío sea insuficiente para compensar esos costes fijos, dicho cultivo dejará de ser rentable. Para el OTMR, esto se produce con dotaciones inferiores a los 1.300 m<sup>3</sup>/ha, que pueden darse en ciertas zonas y años, y que no están muy por debajo de las dotaciones consideradas objetivo para este tipo de cultivo (1.500 m<sup>3</sup>/ha). Para el OIR, sin embargo, las pérdidas tendrían lugar con unas dotaciones menores a 840 m<sup>3</sup>/ha. Ambos valores son relevantes, pues informan de cuándo serán más rentables los cultivos equivalentes en secano (OTMS y OIS).

Con el reparto óptimo, a diferencia de con otras reglas de asignación, al alcanzar una restricción lo suficientemente severa como para hacer que el riego de un cultivo no sea rentable, el modelo reasigna el agua a otros cultivos que resulten más rentables, como es el caso del olivar intensivo (OIR). El OIR es suficientemente rentable como para regarse con prácticamente cualquier dotación. Pero sólo con el reparto óptimo puede llegar a recibir volúmenes del OTMR, aun cuando éste no entre en pérdidas, a causa del mayor beneficio que genera el agua en la primera clase. Con ello, se podría alcanzar un mayor beneficio agregado, aunque sea a costa del OTMR, circunstancia ésta que incita a buscar criterios de compensación para el regadío tradicional.

De acuerdo con la información manejada, las dotaciones objetivo para el olivar jiennense representan menos del 40% de sus necesidades o dotaciones de referencia, por lo que aquéllas pueden considerarse bastante deficitarias. Esta disponibilidad de agua equivale a una escasez de poco más del 60%. Disponiendo de agua suficiente para asignar esas dotaciones objetivo, la mayor eficiencia del reparto óptimo permitiría alcanzar un ahorro económico para todo el olivar jiennense de 1.937.972 € (13,5 €/ha) con respecto a la asignación única, y de 797.787 (5,5 €/ha) en relación a la regla proporcional.

La utilización de variables adimensionales, en términos relativos a los valores máximos o de referencia, simplifica considerablemente las formulaciones analíticas y facilita la interpretación de las gráficas. La representación gráfica de las pérdidas económicas y la superficie regada en función de la disponibilidad de agua, ayuda a

comparar las reglas de reparto y, con ello, a una posible toma de decisiones por parte de los gestores del agua o los propios agricultores. Así mismo, permite observar con claridad a partir de qué grado de escasez hídrica no resulta rentable el olivar en regadío y es preferible el secano, aspecto este que puede ser de una gran trascendencia.

En el caso de que el conjunto sobre el que se aplica el reparto óptimo sea de diferente titularidad, su aceptación pasa por que los comuneros asuman un comportamiento asociativo, por el cual se busque ese máximo beneficio colectivo, como si de una misma empresa se tratase. Esta circunstancia podría limitar pues el éxito del reparto óptimo más allá del ámbito empresarial. Es por ello que, en comunidades de regantes con diferentes clases productivas, y el caso estudiado es un buen ejemplo, el reparto óptimo debería ir acompañado de algún criterio de compensación como el que se ha planteado en este trabajo, y ser aceptado de común acuerdo entre los comuneros.

No obstante, si el colectivo no funcionara como una empresa, el beneficio marginal de la solución podría servir para orientar un mercado de derechos al uso del agua y/o gestionar cesiones de agua, a cambio de compensaciones. La solución del reparto óptimo sería la misma que la de un mercado, si la información utilizada para aplicar aquel fuese suficiente, y, a su vez, los costes de transacción del mercado fuesen lo suficientemente bajos. Además, la relación entre el agua disponible y su beneficio marginal podría orientar sobre la conveniencia de invertir en infraestructuras e instalaciones de riego, acceder a nuevos recursos hídricos o, por el contrario, vender agua a otros usuarios.

Además del acuerdo entre las partes, para poder aplicar con éxito el reparto óptimo, es necesario prever en cada campaña de riego la disponibilidad de recursos hídricos, así como disponer de una información pormenorizada y localizada sobre la demanda de agua y los márgenes de explotación. Como sucede con cualquier recurso natural, el conocimiento es la base para poder llevar a cabo una mejor gestión del agua en un territorio. Las redes agroclimáticas y las redes contables pueden ayudar a obtener esta información necesaria. En este sentido, un importante avance es el desarrollo de métodos y técnicas de detección temprana de la sequía, que integran datos climáticos y de reservas en los embalses. Y puede serlo la futura red de información contable agrícola sobre las rentas y la economía de las explotaciones agrícolas en la Unión Europea, que se prevé en el Reglamento de Ejecución (UE) 2015/220 de la Comisión, de 3 de febrero de 2015.

No obstante, una acertada asignación del agua debería atender algunos otros aspectos no abordados en la metodología expuesta, como pueden ser los ambientales. La preservación de la función ambiental de los sistemas de agua dulce es una prioridad (la Directiva Marco del Agua es clara en este sentido), y dicha preservación implica una negociación permanente sobre los flujos ambientales que generan los diversos usos del agua. Los paisajes agrícolas también realizan funciones ambien-

tales, y el límite entre las necesidades de agua del medio ambiente y la demanda de agua de riego a menudo no está clara.

Además, la agricultura intensiva, normalmente más rentable que la tradicional, puede deteriorar la calidad del agua. A falta de una valoración fiable de las posibles externalidades, debe recurrirse a una regulación estricta en este y otros sentidos, e incluso incentivarse la reducción de la contaminación de origen agrícola mediante el pago por los servicios ecosistémicos generados por la agricultura (como se ha hecho en varios países europeos). Sea como fuere, los beneficios del regadío deben quedar justificados razonadamente, ante otras posibles alternativas menos contaminantes y menos consumidoras de agua.

## *Sección 7*

# Agadecimientos

Quisiera expresar mi agradecimiento al profesor D. Luis Juana Sirgado, por su contribución a mi tesis doctoral, parte de la cual inspiró este trabajo posterior.





## Sección 8

# Referencias

- Alarcón, J. (2014). Tarificación, asignación, rentabilidad y ahorro de agua: propuestas para un nuevo marco económico del regadío. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Alarcón, J., Garrido, A. y Juana, L. (2014a). Optimal water allocation in shortage situations as applied to an irrigation community. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 140(3): 04013015.
- Alarcón, J., Garrido, A. y Juana, L. (2014b). Managing irrigation water shortages: A comparison between five allocation rules built on crop benefit functions. *Water Resources Management* 28: 2315-2329.
- Alarcón, J., Garrido, A. y Juana, L. (2014c). The optimal allocation rule and the water market as the most effective tools of managing water shortage in an irrigation district. VI Congreso de la Asociación Hispano-Portuguesa de Economía de los Recursos y el Medio Ambiente (AERNA), Girona, 4-6 de Septiembre de 2014.
- Alarcón, J., Garrido, A. y Juana, L. (2016). Modernization of irrigation systems in Spain: review and analysis for decision-making. *International Journal of Water Resources Development* (en prensa).
- AEMO (2010). Aproximación a los costes del cultivo del olivo. Cuaderno de conclusiones del seminario AEMO, Córdoba, Junio de 2010. Asociación Española de Municipios del Olivo.
- AQUAVIR (2005). Superficie de los cultivos de regadío y sus necesidades de riego en la Demarcación de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Sociedad Estatal Aguas de la Cuenca del Guadalquivir S.A. (AQUAVIR). Sevilla.
- Banco Mundial (2006). Reengaging in agricultural water management: Challenges, opportunities, and trade-offs. Water for Food Team, Agriculture and Rural Development Department (ARD). World Bank, Washington, DC.
- Bate, R. (2002). Water - can property rights and markets replace conflict? En: Morris J. (ed), Sustainable development: promoting progress or perpetuating poverty? Profile Books, London.

- BOE (2006). Real Decreto 287/2006, de 10 de marzo, por el que se regulan las obras urgentes de mejora y consolidación de regadíos, con objeto de obtener un adecuado ahorro de agua que palie los daños producidos por la sequía. Boletín Oficial del Estado Núm. 60, 11/03/2006.
- BOJA (2010). Ley 9/2010, de 30 de julio, de Aguas para Andalucía. Boletín Oficial de la Junta de Andalucía nº 155, de 9 de agosto de 2010.
- Bosworth, B., Cornish, G., Perry, C. y van Steenberg, F. (2002). Water charging in irrigated agriculture. Lessons from the literature. Report OD 145. HR Wallingford. 90 pp.
- Braude, E., Hauser, S., Sinuany-Stern, Z. Oron, G. (2015). Water allocation between the agricultural and the municipal sectors under scarcity: A financial approach analysis. *Water Resources Management* 29(10): 3481-3501.
- Burchi, S. (2004). Water laws for water security in the twenty-first century. En J. Trottier y P. Slack (eds.), *Managing Water Resources: Past and Present*. Oxford University Press, Oxford, pág. 117-129.
- Cai, X.M., Rosegrant, M.W., Ringler, C. (2003). Physical and economic efficiency of water use in the river basin: Implications for efficient water management. *Water Resources Research*, 39(1): 1-12.
- Calatrava, J. y Garrido, A. (2006). Difficulties in adopting formal water trading rules within user's associations. *Journal of Economic Issues* 40(1): 27-44.
- CESPJ (2011). Análisis de la rentabilidad económica de las explotaciones de olivar en la provincia de Jaén. Consejo Económico y Social de la Provincia de Jaén. URL: [http://www.dipujaen.es/export/sites/default/galerias/galeriaDescargas/diputacion/dipujaen/CES/otras-imagenes/DICTAMEN\\_DEL\\_CES\\_2010documento\\_final1.pdf](http://www.dipujaen.es/export/sites/default/galerias/galeriaDescargas/diputacion/dipujaen/CES/otras-imagenes/DICTAMEN_DEL_CES_2010documento_final1.pdf).
- Cornish, G., Bosworth, B., Perry, C. y Burke, J. (2004). Water charging in irrigated agriculture: An analysis of international experience, Water Report 28, FAO. Roma.
- Corominas, J. (2002). Racionalización del uso de las aguas subterráneas en el olivar. Jornadas sobre "Presente y futuro de las aguas subterráneas en la provincia de Jaén", Linares (Jaén), 1-3 de Octubre de 2001. Instituto Geológico y Minero. Madrid. pág. 139-145.
- Dinar, A., Rosegrant, M.W. y Meinzen-Dick, R. (1997). *Water Allocation Mechanisms: Principles and Examples*. World Bank Policy Research Working Paper 1779. Washington DC, World Bank.
- Dinar, A. y Maria Saleth, R. (2005). Issues in water pricing reforms: from getting correct prices to setting appropriate institutions. En: Folmer H. y Tietenberg T. (eds), *The international yearbook of environmental and resource economics 2005/2006*. Edward Elgar, Cheltenham.
- DOUE (2000). Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. Diario Oficial de la Unión Europea nº L 327 de 22/12/2000.

- Easter, K.W., Becker, N. y Tsur, Y. (1997). Economic Instruments for Water Resource Management. En A.K. Biswas (ed.), *Water Resources: Environmental Planning, Management and Development*. McGraw-Hill Pub. Co., Nueva York. 1997: 579-621.
- FAO (2014). Building a common vision for sustainable food and agriculture: Principles and approaches. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Roma. URL: <http://www.fao.org/3/919235b7-4553-4a4a-bf38-a76797dc5b23/i3940e.pdf>.
- FAO (2015). Software AquaCrop. URL: [http://www.fao.org/nr/water/infores\\_databases\\_aquacrop.html](http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_aquacrop.html). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma.
- Goetz, R.U., Martínez, Y. y Rodrigo, J. (2005). Eficiencia de las reglas de asignación de agua en el regadío: asignación a través de mercados, de la regla proporcional y de la regla uniforme. *Economía Agraria y Recursos Naturales* 5(9): 115-138.
- Hardy, L., Garrido, A. y Juana, L. (2012) Evaluation of Spain 's Water-Energy Nexus. *Water Resources Development* 28(1): 151-170.
- Hughes, D.A. y Mallory, S.J.L. (2009). The importance of operating rules and assessments of beneficial use in water resource allocation policy and management. *Water Policy* 11: 731-741.
- IPCC (2007). Cambio Climático 2007: Impacto, adaptación y vulnerabilidad. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (AR4). 976 pp. URL: [www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_ipcc\\_fourth\\_assessment\\_report\\_wg2\\_report\\_impacts\\_adaptation\\_and\\_vulnerability.htm](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg2_report_impacts_adaptation_and_vulnerability.htm).
- Johansson, R.C., Tsur, Y., Roe, T.L., Doukkali, R.M. y Dinar, A. (2002). Pricing and Allocation of Irrigation Water: A Review of Theory and Practice. *Water Policy* 4: 173-199.
- Junta de Andalucía (2006). Anuario Estadístico de Andalucía 2006. Instituto de Estadística de Andalucía, Consejería de Economía y Hacienda, Junta de Andalucía. Sevilla. URL: <http://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadistica/anuario/anuario06/index.htmIMA>.
- Junta de Andalucía (2007). Sistema de Información Multiterritorial de Andalucía (SIMA) del Instituto de Estadística de Andalucía. Distrito Hidrográfico Guadalquivir. Consejería de Economía y Hacienda, Junta de Andalucía. Sevilla. URL: [http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/web/menuitem.a5664a214f73c3df81d8899661525ea0/?vgnnextoid=d3699f28b07c3210VgnVCM1000001325e50aRCRD&vgnnextchannel=8d0157e12beb4210VgnVCM1000001325e50aRCRD&lr=lang\\_es](http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/web/menuitem.a5664a214f73c3df81d8899661525ea0/?vgnnextoid=d3699f28b07c3210VgnVCM1000001325e50aRCRD&vgnnextchannel=8d0157e12beb4210VgnVCM1000001325e50aRCRD&lr=lang_es).
- Junta de Andalucía (2010). Borrador Agenda del Regadío Andaluz, Horizonte 2015. Consejería de Agricultura y Pesca, Junta de Andalucía. Sevilla. URL: <http://www.feragua.com/file/87853/>
- Junta de Andalucía (2012). Estudio Básico de Adaptación al Cambio Climático. Sector Recursos Hídricos. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía. Sevilla.

- Lecina, S., Isidoro, D., Playán, E. y Aragües, R. (2010). Irrigation modernization and water conservation in Spain: the case of Riegos del Alto Aragón. *Agricultural Water Management* 97: 1663–1675.
- López-Gunn, E., Zorrilla, P., Prieto, F. y Llamas, M.R. (2012). Lost in translation? Water efficiency in Spanish agriculture. *Agricultural Water Management* 108: 83-95.
- Lorenzo-Lacruz, J., Morán-Tejeda, E., Vicente-Serrano, S.M. y López-Moreno, J.I. (2013). Streamflow droughts in the Iberian Peninsula between 1945 and 2005: Spatial and temporal patterns. *Hydrology and Earth System Sciences* 17: 119-134.
- MAGRAMA (2012). Plan Nacional de Regadíos. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid. URL: <http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/gestion-sostenible-de-regadios/plan-nacional-de-regadios/texto-completo/default.aspx>.
- MAGRAMA (2015). Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos. Informe sobre Regadíos en España. 2014. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid. URL:<http://publicacionesoficiales.boe.es/>
- Molle, F. (2009). Water scarcity, prices and quotas: a review of evidence on irrigation volumetric pricing. *Irrigation and Drainage Systems*, 23: 43–58.
- OCDE (2009). Managing Water for All: An OECD Perspective on Pricing and Financing. OECD Publishing, Paris.
- Reca, J., Roldán, J., Alcaide, M., López, R. y Camacho, E. (2001). Optimisation model for water allocation in deficit irrigation systems, I. Description of the model. *Agricultural Water Management* 48: 103-116.
- Rieu, T. (2005). Water pricing for agriculture between cost recovery and water conservation: Where do we stand in France? OEDC Workshop on Agriculture and Water: Sustainability, Markets and Policies. Adelaida (Australia). 14-18 de Noviembre de 2005.
- Sánchez, J.D. y Gallego, V.J. (2011). La nueva reconversión productiva del olivar jiennense: aproximación inicial a sus fundamentos y limitaciones. *Cuadernos Geográficos* 49 (2011-2): 95-121.
- Sharifi, E., Unami, K., Yangyuoru, M., Fujihara, M. (2015). Verifying optimality of rainfed agriculture using a stochastic model for drought occurrence. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. Publicación online: 28/07/2015.
- Spulber, N. y Sabbaghi, A. (1998). Economics of Water Resources: from Regulation to Privatization. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Thobani, M. (1997). Formal Water Markets: Why, when, and how to Introduce Tradable Water Rights. *The World Bank Research Observer* 12 (2): 161-179.
- Tsur, Y. y Dinar, A. (1995). Efficiency and equity considerations in pricing and allocating irrigation water. Policy Research Working Paper 1460. The World Bank, Washington, DC. 40 pp.

- Tsur, Y. y Dinar, A. (1997). On the relative efficiency of alternative methods for pricing irrigation water and their implementation. *World Bank Economic Review* 11: 243-262.
- WWAP (2015). The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World. United Nations World Water Assessment Programme, UNESCO. Paris. URL: <http://unesdoc.unesco.org/images/0023/002318/231823E.pdf>.



Este libro,  
"Reparto óptimo del agua en situaciones de escasez.  
El caso del olivar jiennense: ¿regadío o seco?",  
del que es autor Javier Alarcón Luque,  
VI Premio de Investigación del  
Consejo Económico y Social de la provincia de Jaén,  
se terminó de imprimir el día  
30 de mayo de 2016.



