

Papeles de Agua Virtual

Análisis y evaluación de las relaciones entre el agua y la energía en España

Laurent Hardy
Alberto Garrido

Número 6



PAPELES DE AGUA VIRTUAL

Número 6

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LAS RELACIONES ENTRE EL AGUA Y LA ENERGÍA EN ESPAÑA

Laurent Hardy y Alberto Garrido

Centro de Estudios e Investigación para la Gestión de Riesgos Agrarios y Medioambientales. Universidad Politécnica de Madrid.

Autor asociado para la parte de agua y agricultura:

Luis Juana Sirgado. Departamento de Ingeniería Rural, Escuela Técnica de Ingenieros Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid.

Madrid 30 de septiembre de 2010

Estudio realizado a partir del Convenio Específico entre la Fundación Botín y la Universidad Politécnica de Madrid para la realización del trabajo de investigación: “Análisis y evaluación de las relaciones entre el agua y la energía en España, suscrito el 1 de noviembre de 2009.



<http://www.fundacionmbotin.org>

Papeles de Agua Virtual. Observatorio del Agua
Edita: Fundación Marcelino Botín. Pedrueca, 1 (Santander)
www.fundacionmbotin.org

ISBN: 978-84-96655-23-2 (obra completa)

ISBN: 978-84-96655-78-2 (Número 6)

Depósito legal: M. 52.508-2010

Impreso en REALIGRAF, S.A. Madrid, noviembre de 2010

AGRADECIMIENTOS

Los autores querrían agradecer a Joan Corominas (Junta de Andalucía) su visión global y muy bien documentada sobre las relaciones entre el agua y la energía en el sector agrario español. Su disposición a ayudar ha sido constante en estos meses, como también lo ha sido al facilitarnos muchos datos y resultados por él elaborados.

Este nuevo campo de investigación no podría haber existido en España sin la contribución de Manuel Ramón Llamas, presidente del Observatorio del Agua de la Fundación Marcelino Botín.

También queremos agradecer a José Roldán Cañas (Catedrático de Ingeniería Hidráulica Universidad de Córdoba), Pedro Linares Llamas (ETS Ingeniería ICAI - IIT Universidad Pontificia Comillas), por hacernos el honor de revisar la totalidad del estudio antes de su publicación definitiva. Los comentarios, todos ellos muy pertinentes, que hemos recibido nos han permitido darle al estudio los retoques necesarios para poner al día toda la información mencionada. También nos sentimos muy agradecidos por los comentarios e ideas en la parte de tratamiento de aguas de Carlos Naeslund (Asesoramiento técnico en tratamiento de aguas).

En último lugar, a Ramón Eduardo Figueroa Castro (Departamento de depuración de agua del Ayuntamiento de Madrid) y Ricardo Abadía Sánchez (Profesor Titular de Hidráulica y Riegos en la Universidad Miguel Hernández Escuela Politécnica Superior de Orihuela) por sus aportacio-

nes. A Maite Martínez Aldaya (Universidad de Twente) y a los investigadores y miembros del CEIGRAM por sus contribuciones directas e indirectas.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO	15
ABREVIATURAS Y UNIDADES	21
1. Antecedentes	23
1.1. Introducción	23
1.1.1. Energía empleada en sector del agua.....	25
1.1.2. Agua para la generación de energía .	26
1.1.3. Agua para la elaboración de biocar- burantes.....	28
1.1.4. Importancia del tema	30
1.2. Objetivos del estudio.....	30
1.3. Estructura del estudio	32
2. Estudios previos	33
2.1. Estudios globales y conceptos previos.....	33
2.1.1. Hidronomía física (Uche & Martínez 2010).....	33
2.1.2. California's Water-Energy Relation- ship (CEC 2005).....	35
2.1.3. Estudio de las interdependencias energía-agua y la demanda emer- gente de energía de recursos hídricos (Pate et al. 2007)	38
2.1.4. Balances energéticos del ciclo del agua y experiencias de reutilización planificada en municipios de la Costa Brava (Sala 2007)	40
2.1.5. Implications for water of the world energy scenarios (Linares & Sáenz de Miera 2009)	42

2.1.5.1. Evolución del uso y consumo de agua en el sector de la energía	42
2.1.5.2. Limitaciones del estudio.....	44
2.2. Estudios que abordan aspectos técnicos, sectoriales o parciales.....	46
2.2.1. Agua y energía en el riego, en la época de la sostenibilidad (Corominas 2009)	46
3. La relación entre el Agua y la Energía.....	50
3.1. El ciclo de utilización del agua	50
3.2. La energía empleada en el manejo del agua	51
3.3. La intensidad energética del ciclo de utilización del agua.....	54
3.4. Energía consumida en el uso final del agua .	59
3.4.1. Residencial, servicios e industrial ...	59
3.4.2. Agricultura	61
3.4.3. Energía	67
4. Abastecimiento y transporte del agua.....	68
4.1 Fuentes primarias de agua en España	69
4.1.1. Intensidad energética de las fuentes primarias	69
4.1.2. Aguas superficiales	71
4.1.3. Aguas subterráneas	71
4.1.4. Desalación.....	72
4.1.5. Aguas recicladas	73
5. Tratamiento y distribución de agua y aguas residuales	73
5.1. Tratamiento del agua	74
5.1.1. Potabilización de agua para uso doméstico	74
5.1.2. Desalación.....	76

5.2. Distribución del agua.....	83
5.3. Tratamiento de las aguas residuales	84
5.3.1. La recogida de las aguas residuales .	84
5.3.2. Aguas tratadas en estación de depu- ración	85
5.3.3. Aguas destinadas a ser recicladas...	89
5.3.4. Aguas aptas para ser vertidas en las fuentes.....	89
5.4. Un enfoque tri-etápico para lograr mejoras de eficiencia (GWRC, 2008).....	90
6. Eficiencia del uso final del agua	91
6.1. Eficiencia del uso del agua y de la energía en el regadío	92
6.2. Consideraciones técnico-económicas sobre el uso de energía en el regadío.....	98
6.2.1. Bases conceptuales	102
6.2.1.1. Ahorro, eficiencia y consumo.	102
6.2.1.2. Agua, energía y coste.....	108
6.2.2. Eficiencia del uso del agua y necesi- dades de energía según métodos de riego.....	113
6.2.2.1. Valores potenciales	113
6.2.3. Valores observados.....	118
6.2.4. Coste que justifica un ahorro de agua.	125
6.2.5. Síntesis.....	131
6.3. Evaporación de agua en embalses hidro- eléctricos y otros embalses y balsas	133
7. Generación de electricidad y consumo de agua.	140
7.1. Situación del sector de generación de elec- tricidad	140
7.2. Consumo de agua en centrales de genera- ción de electricidad	141

7.3. Previsiones a largo plazo del impacto de las plantas termosolares.....	145
7.4. Sistemas de refrigeración.....	147
8. Impacto de los biocarburantes en la utilización de agua.....	152
8.1. Perspectiva general.....	152
8.1.1. Terminología de los biocombustibles.....	153
8.1.2. Breve estado del arte de los biocarburantes.....	154
8.1.3. Situación actual y futura, preguntas acerca de la sostenibilidad de los biocarburantes en Europa.....	155
8.1.4. Problemas de los biocarburantes de primera generación.....	156
8.2. Consecuencias de la expansión de los biocarburantes.....	160
8.2.1. Necesidades de agua de los biocarburantes.....	162
8.2.1.1. Consumo de agua en la fase de producción de biomasa ..	163
8.2.1.2. Consumo de agua en la fase industrial de producción de biocarburantes.....	166
8.2.2. Necesidades de tierras agrícolas	167
8.2.3. Estudio de impacto de los biocarburantes de primera generación.....	167
8.2.3.1. Supuestos de la estimación ..	167
8.2.3.2. Consumo de agua en el año 2008.....	169
8.2.3.3. Consumo de agua en el año 2020.....	172
8.2.4. Comparación con algunos países	175
9. Aspectos jurídicos del nexo agua-energía.....	177

9.1. El orden de prioridad de usos.....	177
9.2. La fijación de caudales ecológicos.....	179
9.3. La regulación del mercado eléctrico y las afecciones a los usuarios agrarios	180
10. Conclusiones	183
11. Referencias bibliográficas	189

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Intensidad energética en las etapas del ciclo de utilización del agua en Califor- nia.....	36
Tabla 2-2: Consumos totales de energía en la ges- tión del agua potable	41
Tabla 2-3: Demanda futura de utilización de agua para el sector de la energía respecto al suministro total actual de agua.....	43
Tabla 2-4: Evolución del consumo de energía para riego en España.....	47
Tabla 2-5: Energía gastada en relación con el agua utilizada para diversos sistemas de rie- go y fuentes de suministro	48
Tabla 3-1: Energía relacionada con el agua en Es- paña en el año 2007.....	53
Tabla 3-2: Intensidad energética de las etapas del ciclo del agua en España	55
Tabla 3-3: Intensidad energética en diversos paí- ses y empresas (kWh/m ³).....	55
Tabla 3-4: Uso final de electricidad asociado a con- sumidores urbanos	60
Tabla 3-5: Consumo de electricidad en el sector de la agricultura para utilización y consu- mo de agua en el año 2008	63

Tabla 3-6: Evolución del regadío español en superficie según la tecnología de riego empleada	64
Tabla 3-7: Consumo energético unitario en el regadío según la fuente de agua y el tipo de regadío realizado	66
Tabla 3-8: Volumen de agua utilizada y consumida en el sector de la energía	68
Tabla 4-1: Capacidad de desalación en España, situación actual y planeada	72
Tabla 5-1: Comparación Trasvase - Desalación.....	83
Tabla 5-2: Consumo eléctrico de una planta de tratamiento de aguas residuales tipo (190 ML/día)	87
Tabla 6-1: Costes de desalación de agua del mar ..	110
Tabla 6-2a: Resultados potenciales según métodos de riego.....	117
Tabla 6-2b: Uniformidad de riego alcanzable y rendimiento de aplicación potencial (asume riego adecuado como se definió previamente)	117
Tabla 6-3: Relación entre el volumen necesario para evapotranspiración V_{Et} y el volumen enviado para su satisfacción V_{su}	118
Tabla 6-4: Resultados de evaluaciones de la eficiencia del riego en California	119
Tabla 6-5: Rango del rendimiento de aplicación para varios sistemas de riego	120
Tabla 6-6: Estimación de rendimientos y costes por método de riego en el Estado de Colorado.	121
Tabla 6-7: Rendimiento final R_{a2} de igualación en función del incremento energético y el rendimiento inicial R_{a1}	128
Tabla 6-8: Rendimiento final R_{a2} de igualación en función del incremento de coste y el rendimiento inicial R_{a1}	129

Tabla 6-9: Volumen unitario de agua evaporado en embalse según a superficie o la capacidad del embalse.....	135
Tabla 6-10: Estimación del volumen del volumen evaporado en los embalses en España ..	136
Tabla 7-1: Movilización y consumo de agua por unidad de electricidad producida según el tipo de central de producción en España.....	145
Tabla 7-2: Cantidades de agua transportada para la producción de electricidad.....	146
Tabla 7-3: Previsiones de utilización/consumo de agua en plantas termosolares en España.....	147
Tabla 7-4: Volumen de agua utilizado involucrado en el sistema de enfriamiento en circuito abierto.....	148
Tabla 7-5: Volumen de agua utilizado en el sistema de enfriamiento en circuito cerrado con torre de enfriamiento.....	150
Tabla 7-6: Volumen de agua utilizado en el sistema de refrigeración en circuito cerrado con balsa de enfriamiento	150
Tabla 8-1: Volumen de agua verde y azul necesario para la producción de los cultivos destinados a biocarburantes.....	165
Tabla 8-2: Volumen de agua necesario en la fase industrial de elaboración de biocarburantes	166
Tabla 8-3: Rendimiento en volumen y producción de biocarburante.....	169
Tabla 8-4: Rendimiento en toneladas por hectárea de los cultivos destinados a biocarburantes.	169
Tabla 8-5: Estimaciones para el año 2007 de las necesidades en materia prima, superficie	

	agraria y volumen de agua para la producción de la materia prima necesaria para la elaboración de los biocarburantes	170
Tabla 8-6:	Resultados recapitulativos de la producción de biocarburantes en España en el año 2008	171
Tabla 8-7:	Estimaciones para el año 2020 de las necesidades en materia prima, superficie agraria y volumen de agua para la producción de la materia prima necesaria para la elaboración de los biocarburantes	173
Tabla 8-8:	Resultados recapitulativos de la producción de biocarburantes en España en el año 2020	174
Tabla 8-9:	Necesidades de agua para la elaboración completa de biocarburantes de primera generación según el cultivo y según la técnica de riego	175
Tabla 8-10:	Características de la producción de etanol para biocarburante en Toscana.	176

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 3-1:	Proporción entre fuentes de agua utilizada en el riego agrario	61
Gráfico 3-2:	Evolución conjunta del regadío español con el consumo eléctrico neto	65
Gráfico 3-3:	Consumo energético a la hectárea por tipo de riego y fuente de agua	67
Gráfico 4-1:	Intensidad energética de las fuentes primarias de agua	70
Gráfico 5-1:	Porcentaje del consumo energético total de la planta	76

Gráfico 5-2: Evolución del coste energético de la desalación de agua frente a la evolución de la capacidad instalada en España	78
Gráfico 6-1: Evolución del consumo eléctrico neto en el regadío español.....	93
Gráfico 6-2: Evolución de los precios de potencia y de energía en España.....	95
Gráfico 6-3: Relación entre evapotranspiración y producción.....	107
Gráfico 6-4: Relación generalizada entre la reducción del rendimiento $(1-Y_a/Y_m)$ y la evapotranspiración relativa $(1-ET_a/ET_m)$..	107
Gráfico 6-5: Evaporación de agua (volumen) en embalses según su superficie NMN (arriba) y su capacidad NMN (abajo)	137
Gráfico 7-1: Producción bruta de electricidad en España para el año 2007	140
Gráfico 7-2: Agua utilizada y consumida en la generación de electricidad en España en el año 2007	142
Gráfico 7-3: Agua utilizada en la generación de electricidad en España en el año 2007 (excepto hidráulica)	143
Gráfico 7-4: Agua consumida en la generación de electricidad en España en el año 2007 (excepto hidráulica)	144
Gráfico 8-1: Situación mundial de la producción de etanol y de biodiesel desde 1975 hasta hoy (para el año 2009, datos estimados.	161

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 3-1: Ciclo de utilización del agua en España	51
--	----

Ilustración 4-1: Ciclo de utilización del agua en España	69
Ilustración 5-1: Ciclo de utilización del agua en España	74
Ilustración 6-1: Ciclo de utilización del agua en España	92
Ilustración 7-1: Sistema de enfriamiento “circuito abierto” (“open-loop” u “once-through”) en centrales de producción de electricidad	148
Ilustración 7-2: Sistema de enfriamiento “circuito cerrado” (“close-loop” o “cooling towers” o “evaporation ponds”) en centrales de producción de electricidad.....	149
Ilustración 7-3: Sistema de enfriamiento en seco (dry cooling).....	151
Ilustración 8-1: Proceso tecnológico de producción de biodiesel a partir de microalgas.	159

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 5-1: Esquema de deionización capacitiva	80
Figura 6-1: Esquema típico de sistema de distribución para riesgo por superficie.....	103
Figura 6-2: Esquema de un tanque de clase A.....	134

RESUMEN EJECUTIVO

Hasta hace pocos años, el nexo agua-energía se circunscribía a los aspectos técnicos, económicos y ambientales de la producción de energía hidroeléctrica. Con toda la importancia que esta fuente de energía renovable tiene y ha tenido desde hace décadas, las relaciones entre el sector energético y el del agua constituyen hoy un aspecto esencial para lograr mejoras en ambos sectores que contribuyan a un desarrollo económico y un uso de recursos más sostenibles. La constatación de que la gestión integral del agua es muy exigente en consumo energético y, consecuentemente, de que ambos sectores deben planificarse de manera conjunta y coordinada es muy reciente. Cualquiera que sea el escalón o la etapa del ciclo del agua, el consumo energético se destaca como el principal factor de coste variable. Las tecnologías de uso y tratamiento de aguas han evolucionado muy rápidamente en los últimos años para disminuir riesgos para la salud, aumentar la eficiencia y precisión con que se usa el agua y disminuir la carga de contaminantes con que se devuelve a las fuentes naturales o se reintegra en el ciclo de usos. En todas ellas, el uso de energía es importante y creciente. Muy especialmente en los usos agrarios, donde el riego por gravedad se ha transformado en riegos a presión (se estima en un 45% el aumento en superficie del riego localizado entre los años 2002 y 2009), siempre provocando aumentos del gasto en energía que se suman a los necesarios para el bombeo de aguas superficiales y subterráneas e incluso el pre-tratamiento de las mismas para hacerlas aptas para el riego. Pero también en la potabilización de aguas o reutilización y depuración de aguas residuales, con un empleo creciente de membranas y en el tratamiento de

los lodos y los materiales sólidos, el consumo energético es creciente.

También muy recientemente se ha comprobado que el empleo de ciertas fuentes de energía renovables puede requerir agua en cantidades no despreciables para garantizar los procesos de refrigeración, problema que ya había sido objeto de atención con las centrales nucleares, y las térmicas de gas y carbón. Sin embargo, el hecho de que las zonas más aptas para el desarrollo de la energía termosolar sean áridas o semi-áridas o que las demandas de agua para los cultivos energéticos compitan con las que requieren los cultivos convencionales ha aumentado la dimensión del problema. Un problema más para el agua, pero, sin duda, una oportunidad colosal para lograr otros objetivos políticos prioritarios.

Muchos organismos internacionales, gobiernos y centros de investigación trabajan en los numerosos aspectos y dimensiones del nexo agua-energía. Este informe trata de ofrecer una visión amplia y actualizada del problema, y presenta los resultados de un estudio original, que combina fuentes de otros informes y publicaciones, sobre el gasto de energía del sector del agua en España, así como las necesidades de agua para la producción de la energía. Por la gran diversidad de campos involucrados en esta investigación, no ha sido posible profundizar en todos ellos, si bien se entra en mayor detalle en el ciclo integral de utilización de agua y en el cálculo de la huella hídrica de la producción de biocarburantes de primera generación.

Se ha estimado que el sector del agua en España requiere un gasto energético que en términos porcentuales puede representar aproximadamente el 7,0% del gasto energético total. Las dos etapas del ciclo que más energía eléctrica requieren son el abastecimiento y tratamiento del agua, con

un 62% del gasto energético total, y en segundo término el tratamiento y en su caso el reciclaje de las aguas residuales. En el caso del regadío, la componente energética en términos de kWh por metro cúbico utilizado para el riego ha aumentado hasta 0,34 kWh/m³ en el año 2008, con respecto a 0,15 kWh/m³ en el año 1990 (Corominas 2009). La liberalización del mercado eléctrico, sumado al aumento del gasto de la energía, ha producido alzas en la cuenta de energía de las explotaciones agrarias y de las comunidades de regantes del 50% en términos de potencia contratada y del 200% en términos de consumo (Sirasa 2010). El régimen tarifario para los regantes ha sido fuertemente contestado por el sector y el Gobierno ha aceptado modificar el régimen de tarifas que le es aplicable (FENACORE 2009). En todo caso, una política emblemática de los últimos años, como la de modernización y consolidación de los regadíos, que ha gozado de gran aceptación por parte de especialistas y administraciones y que ha tenido aplicación en un tercio del regadío español, súbitamente se ha encontrado con que el incremento de la cuenta de energía compromete seriamente la viabilidad económica e incluso su propia sostenibilidad ambiental.

Por otro lado, de acuerdo con los cálculos realizados en este trabajo, la expansión del uso de los biocarburantes de primera generación para cumplir con el objetivo “20 20” de la Comisión Europea (que plantea llegar al 10% de biocarburantes en el volumen total de carburante utilizado en el transporte) con materia prima producida en España supondría —si no pasamos a la segunda generación a gran escala— ocupar unos 3 millones de hectáreas en secano (unos 1,5 Mha en regadío) y aumentar el consumo del agua para la agricultura en un 10% en secano (y un 30% en regadío). Estas estimaciones confirman serias dudas sobre la sostenibilidad de la alternativa para producir biocarburantes: la competencia por suelo agrario y agua sería de tal magnitud

que afectaría muy seriamente al sector agrícola. Hasta que los biocarburantes de segunda generación no tengan un desarrollo industrial, cumplir el objetivo “20 20 by 2020” de la Comisión Europea solo puede hacerse mediante la importación masiva de cereales y oleaginosas, trasladando las huellas hídricas, de CO₂ y ambientales al resto del mundo.

Estos son solo algunos de los resultados obtenidos en este informe, pero nos muestran la dimensión del problema. Por el lado de la regulación de ambos sectores, se comprueba la necesidad imperiosa de coordinar las políticas sectoriales. Por ejemplo, el tradicional orden de prioridad de usos establecido en el ordenamiento jurídico del agua en España, o la más reciente figura del contrato de cesión de concesiones, son elementos que restan flexibilidad a la gestión del agua en la medida que no facilitan el acceso a recursos a nuevos usuarios, por ejemplo, titulares de centrales termosolares, por su consideración de usuario industrial o simplemente por no ser previamente titulares de derechos y por tanto no poder celebrar contratos de cesión. Aspectos como el precio del agua, el sistema de asignación de recursos escasos, la planificación hidrológica o la gestión de los regadíos no pueden desligarse o gestionarse de manera separada de la regulación del mercado eléctrico o las políticas de mitigación del cambio climático. De igual forma, el enfoque seguido hasta el presente en la modernización de regadíos y el estímulo a los riegos por aspersión o localizados debe reevaluarse con vistas a integrar el consumo energético en el análisis económico y ambiental de estas políticas.

Tres son las conclusiones principales de este trabajo. En primer lugar, el sector de la energía debe considerarse como un usuario del agua prioritario, en pie de igualdad con los usuarios agrarios, pues no hay ninguna razón de orientación general de la economía que supedita la producción agrícola sobre la de kilowatios generados sin el empleo de com-

bustibles fósiles. Como quiera que los documentos de planificación hidrológica difícilmente pueden predecir qué fuentes de energía renovable serán más eficientes en el futuro, es preciso eliminar restricciones en la asignación del agua que carecen de justificación ambiental, social o económica. El sector de la energía debe por su parte mejorar su eficiencia en el uso del agua, eliminando o reduciendo al mínimo el gasto neto en los procesos de refrigeración. El cálculo de la huella hídrica de cada producto o servicio generado en la economía, medida tanto en unidades físicas como monetarias debe ayudar en la toma decisiones.

En segundo lugar, el sector de la energía precisa una regulación menos propicia a prácticas oportunistas, en este caso de particulares o emprendedores pero también de las Comunidades Autónomas, que encarecen el coste general de la energía, generan demandas de agua artificiales y exigen cambios continuos en el marco de regulación. El marco regulador de las energías renovables debe mejorar y fortalecerse.

Y en tercer y último lugar, el elevado gasto de energía del sector del agua aconseja que se aumenten las inversiones en I+D+i para mejorar la eficiencia de los procesos de tratamiento y utilización del agua. Por un lado, cuanto más completo sea el tratamiento que se desee dar a las aguas residuales, mayor será el gasto energético, de ahí que la aplicación de la Directiva Marco del Agua acarree necesariamente aumentos del uso de energía. Pero por otro, y con especial importancia en el uso agrícola, los aumentos de eficiencia en el uso que acarreen incrementos en el uso de energía deben analizarse en profundidad, pues no en todos los casos están justificados.

En síntesis, en una economía globalizada los sectores productivos usuarios de energía y de agua deben ser estimula-

dos para producir de acuerdo con la mejor tecnología disponible, respondiendo a los precios de los bienes y servicios, a los precios de los factores e internalizando los costes ambientales. Cualquier distorsión de los mercados que favorezca sectores menos productivos o eficientes eco-ambientalmente acarrea el doble coste de la propia distorsión y su consiguiente pérdida de eficiencia económica, así como el mayor impacto ambiental por unidad de renta generada.

ABREVIATURAS Y UNIDADES

Convenio de escritura: el punto (.) se utilizará para separar los miles y la coma (,) para los decimales.

APPA: Asociación de Productores de Energía Renovable

SIRASA: Sociedad de Infraestructuras Rurales Aragonesas, S.A.

FENACORE: Federación Nacional de Comunidades de Regantes de España

ACV: Análisis de Ciclo de Vida

ASA: American Society of Agronomy

ASABE: American Society of Agricultural and Biological Engineers

CSSA: Crop Science Society of America

COAG: Comisión de Modernización de los Riegos del Alto Aragón

dS (dissolved Solids): Sólidos disueltos

EIA: Energy Information Administration

Emasesa: Empresa Municipal de Abastecimiento y Saneamiento de Aguas de Sevilla S.A.

ER: Entorno de Referencia

GEI: Gases con efecto invernadero

GWh: Giga Watt hora [10^9 Wh]

IEA: International Energy Agency

MARM: Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino

Mha: Mega hectáreas [10^6 ha]

MITYC: Ministerio de Industrias, Turismo y Comercio

Mm³: Millones de metros cúbicos [10^6 m³]

Mtermias [10^6 termias]: o Mtherms (US), unidad americana obsoleta de calor y energía usada para recursos energéticos y estimaciones de reservas

NMN: Nivel Máximo Normal de la lamina de agua en un embalse

PNR-H2008: Plan Nacional de Regadío-Horizonte 2008

ppm: partes por millón

SEIASAS: Sociedades mercantiles estatales para la ejecución de obras e infraestructuras de modernización y consolidación de regadío

SSSA: Soil Science Society of America

TDS (Total Dissolved Solids): Sólidos Disueltos Totales

tep: toneladas equivalentes petróleo

USDA: United States Department of Agriculture

USDE: United States Department of Energy

USDEOS: U.S. Department of Energy Office of Science

VAB: Valor Añadido Bruto

1. ANTECEDENTES

1.1. Introducción

Es común hablar en el contexto de la relación Agua-Energía de cantidad de energía producida por las centrales hidroeléctricas, de caudales turbinados y de centrales hidroeléctricas. Con el auge de las fuentes de energía renovables, y el interés estratégico de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, el agua se ha convertido en un recurso de creciente importancia para la producción de energía.

Recientemente ha cobrado igual o mayor importancia la cantidad de energía necesaria para hacer funcionar el ciclo integral del agua. En ambas direcciones, el uso del agua para producir energía y la energía para gestionarla, el problema se presenta como relevante, actual y necesitado de estudios técnicos y científicos.

La razón por la cual el binomio agua-energía ha ascendido en las prioridades de la comunidad científica es debida a que se ha cobrado plena conciencia de todas las implicaciones del crecimiento de la demanda de energía en el mundo, y también de sus consecuencias ambientales.

Es un hecho que la intensidad energética de las economías industrializadas está disminuyendo y se espera que mantenga una evolución descendente en las próximas décadas. No así las economías emergentes o en desarrollo, que precisan incrementos notables de energía y posiblemente sus economías aumenten su intensidad energética. De acuerdo con IEA (2007; citado por Garnaut *et al.* 2009), globalmente se

necesitan 0,21 Mtep de energía primaria para producir 1.000 millones de dólares (del año 2000 en paridad de poder adquisitivo). Las previsiones para 2015 y 2030 de IEA es que el indicador disminuya a 0,17 y 0,11 respectivamente. En términos per cápita, algunos estudios demuestran que a medida que aumenta la riqueza per cápita la intensidad energética tiende a estancarse en 0,15 tep/1.000 \$ (Garnaut *et al.* 2009, pg. 93). Sin embargo, estos resultados tienen una base empírica actual que puede no ser aplicable en el futuro. La preocupación por el aumento de la demanda de energía en el mundo está, además de por su sostenibilidad, naturalmente ligada al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero. En este caso, se prevé un deterioro de las emisiones de GEI por unidad de energía de 2,3 Mt CO₂/Mtep a 2,4 Mt CO₂/Mtep, siendo China e India dos países que verán empeorados estos indicadores. En el caso de España, el observatorio de la sostenibilidad afirma para el sector de la energía: *“...que las emisiones de GEI han crecido superacopladas (sic) al VAB del sector, ya que para el periodo considerado éstas aumentaron un 62,6% frente al 47,76% del VAB del sector. En un análisis desglosado por gases, las emisiones de CO₂ crecieron, a su vez, superacopladas al VAB, representando el 98,59% del total, al igual que ocurrió con las de N₂O y SF₆ (incrementos de 169,95% y 408,02%, respectivamente). Las de NO_x también aumentaron pero lo hicieron a un nivel inferior al VAB del sector (21,60%). El resto de emisiones consideradas (CO, COVM, SO_x y CH₄) se encontraban desacopladas al crecimiento del sector. Aunque para ciertas presiones la tendencia está mejorando, no se puede hablar propiamente de ecoeficiencia en el sector de la energía, ya que las emisiones de GEI crecen superacopladas al sector”* (OSE 2010, pg. 102).

La preocupación con relación al nexo agua-energía es doble; primero es preciso saber si el sector del agua necesita una atención particular en cuanto a su consumo de energía (CEC 2005, USDE 2006, Cabrera *et al.* 2008). Es decir, se

trata de averiguar si las exigencias derivadas de asegurar mejoras en la calidad ecológica de las aguas y de aumentar la eficiencia en su utilización comportan incrementos relevantes del uso de energía.

En segundo término, debido al aumento del consumo de energía primaria que se prevé para el futuro, según las prospectivas del *World Energy Outlook del 2007 (IEA 2007)*, es pertinente preguntarse si la utilización del agua para la producción de energía será compatible con los demás usos o será una causa más de tensiones en su reparto, elevando la competencia entre usuarios y conservación. Son muchos los países que sufren la escasez estructural o coyuntural de agua. Para España la práctica totalidad de las proyecciones derivadas del cambio climático coinciden en señalar reducciones de recursos y aumentos de la frecuencia de fenómenos extremos. Si producir energías renovables exige aumentar el consumo de agua —otro recurso renovable— habrá que estudiar qué usos o aprovechamientos hay que sacrificar y bajo qué supuestos es aconsejable favorecer la sustitución de usos.

1.1.1. Energía empleada en el sector del agua

El agua es un recurso vital que utilizamos cada día. Para que los consumidores finales dispongan de un servicio de agua potable garantizado es necesario consumir energía. La cantidad de energía necesaria para llevar a cabo las operaciones necesarias para servirla al consumidor final depende mucho de las condiciones locales y de la calidad del agua. Se han realizado diversos estudios con enfoques distintos (la necesidad de energía en el sector urbano, en la agricultura o en la industria) pero muy pocos con un enfoque global, como es el estudio llevado a cabo en California (CEC 2005), en el cual se ha calculado de manera muy detallada el consumo de energía

ligado al manejo de agua. Otros como los de Cabrera *et al.* (2008); King *et al.* (2008); Murgui *et al.* (2009); o Corominas (2009) son estudios de cierta profundidad, si bien tienen un enfoque algo más sectorial como referiremos a continuación.

Es cierto que en Estados Unidos, la investigación científica respecto al binomio “energía para agua” está algo más avanzada que en Europa. La componente energética de cada etapa del ciclo integral de utilización de agua no es auxiliar sino que aparece en la mayoría de los estudios técnicos realizados en plantas que manejan el agua. King *et al.* (2008) o CEC (2005) por ejemplo, —a escala local— han recopilado los datos medios de consumo de energía vinculado a las etapas del ciclo del agua: abastecimiento y transporte, potabilización, distribución y recolección más tratamiento de las aguas residuales. Estos autores señalan claramente que son las etapas de potabilización y tratamiento de aguas y aguas residuales las que más energía requieren y donde ha de enfocarse la investigación científica. Aquí en España —y en Europa en general— ésta componente energética no cuenta con estudios tan detallados, lo que seguramente dificulta completar una dimensión esencial del nexo agua-energía.

1.1.2. Agua para la generación de energía

El agua no solo permite producir electricidad de manera directa, también es necesaria para alimentar los ciclos de refrigeración de las centrales nucleares, de gas, carbón o fuel, y de las plantas termosolares. Muchos autores y/o organismos han estudiado el impacto que el sector de la energía tiene en el uso y consumo de agua (Pate *et al.* 2007, Hutson *et al.* 2004, CATF 2003, EPRI 2002, Feeley *et al.* 2007, King *et al.* 2008, Torcellini *et al.* 2003, UCS 2009), evaluando el volumen de agua usado y consumido por unidad de energía producida.

En la producción de biocarburantes, se puede contabilizar la huella hídrica, tanto de agua azul como de agua verde (Gerbens-Leenes *et al.* 2008 y 2009, Galan-del-Castillo y Velázquez 2009). Por su parte, los análisis del ciclo de vida de las diversas fuentes de energía incorporan el agua como un factor más a valorar (Lechón *et al.* 2005), de la misma forma que se hace con la energía en los productos que incorporan mucha agua en su producción (productos agrarios; ver por ejemplo Ribal *et al.* 2009).

Por otro lado, desde que el agua se capta de las fuentes hasta que se devuelve al medio ambiente, debido a su transporte, almacenamiento y tratamiento, se hace un consumo de energía que ha de evaluarse para conocer y planificar las dependencias y relaciones entre sectores. La planificación hidrológica toma en cuenta el gasto de energía en el transporte del agua en España (MARM 2008b) pero siempre de una manera teórica. No se ha realizado en España hasta la fecha un estudio sistemático de las relaciones bidireccionales del nexo agua-energía.

Si las centrales hidroeléctricas permiten transformar la energía potencial en energía eléctrica, esa transformación requiere un volumen de agua no despreciable que será en su mayoría devuelto de inmediato al medio ambiente (Rio Carrillo & Frei 2009, MARM 2007b), solo una pequeña parte es consumida en el proceso, debido a la evaporación en los embalses. Sin embargo, sectores como la agricultura y la energía, que son fuertes utilizadores de agua, se abastecen en gran medida de los caudales que regulan las presas, lo que puede llevar a una competencia de recurso natural entre ellos. Es sabido que la producción hidroeléctrica en años secos se reduce notablemente. En periodos secos, se puede llegar a plantear la parada de centrales eléctricas debido al consumo de agua de su sistema de enfriamiento, como ocurrió en el 2003 en Francia, donde un 15% de las

centrales nucleares y un 20% de las centrales hidroeléctricas tuvieron que cerrar cinco semanas (Hightower & Pierce 2008). Además, parte del agua acumulada en los embalses se evapora, lo que agrega un volumen de agua directamente consumida. Sin embargo, solo se pueden evitar las pérdidas por evaporación si se emplean reservas subterráneas, en cuyo caso hace falta energía de bombeo y no se produce energía hidroeléctrica. Nuevamente, nos encontramos con el binomio agua-energía, y la ambigüedad resultante de tener ganancias por un lado y pérdidas por otro, que se acenúa por la dificultad de medir los efectos con la misma unidad de medida (véase el apartado 6.3 Evaporación de agua en embalses hidroeléctricos y otros embalses y balsas).

Las centrales térmicas o nucleares no tienen una huella hídrica muy importante en lo que supone la producción de los combustibles o materias primas (Gleick 1994). Sin embargo, sus procesos de funcionamiento requieren caudales considerables que en mayoría son de uso no consuntivo por lo que pueden afectar a los caudales. Las diferencias en cuanto a su consumo de agua varían según la tecnología del sistema de enfriamiento utilizado (EPRI 2002). Las nuevas tecnologías generadoras de electricidad se espera reduzcan considerablemente el consumo de agua, llegando incluso a reducirse o eliminarse por completo mediante sistemas de refrigeración por aire que, en contrapartida, tienen una intensidad energética más alta que los sistemas de refrigeración con agua (Rio Carrillo & Frei 2009, Wolfe 2009, Abengoa 2010).

1.1.3. Agua para la elaboración de biocarburantes

La producción de combustibles es un sector que siempre ha necesitado agua en el proceso de extracción y refinado de las materias primas que son el carbón, el petróleo y el gas (Gleick 1994). A día de hoy, existe interés creciente por los biocarbu-

rantes —biodiesel y bioetanol— debido al objetivo “20 20 by 2020” de la Comisión Europea titulado “*Europe’s climate change opportunity*” sobre cambio climático (MARM 2008a). Es lógico preguntarse si los objetivos de utilización de biocarburantes acarrearán aumentos sensibles del consumo de agua, con respecto al consumo total del sector energético, y al mismo tiempo estudiar en qué países o regiones se produce su huella hídrica y qué porcentaje de ésta es agua azul y agua verde. La capacidad de producción de biomasa por los sectores de la agricultura, silvicultura y residuos para Europa ya ha sido estudiada (EEA 2006), concluyendo que en España en el año 2030, la biomasa que se podrá aprovechar de manera sostenible alcanzará los 25,1 Mtep (es decir un poco más de la mitad de los 41,3 Mtep de carburante para el transporte que se consumió en España en el año 2007 (EuroStat 2007b).

Una parte de la preocupación actual con respecto a los biocarburantes radica en el consumo de agua requerida en su proceso de elaboración (Gerbens-Leenes *et al.* 2008, Gerbens-Leenes *et al.* 2009, Reidy 2006, Keeney *et al.* 2006). Las conclusiones que cuestionan la viabilidad del sector de los biocarburantes se basan en estudios locales que son difíciles de generalizar en estudios globales. Su imparcialidad ha sido puesta en cuestión por el sector en España (APPA 2009), lo que ha motivado la realización de nuevos estudios para evaluar el volumen de agua usado en la elaboración de biocarburantes en varias regiones del mundo (Chiu *et al.* 2009 o Hill *et al.* 2006 para Estados Unidos; Moreira J.R. u Días de Oliveira *et al.* 2005 para Brasil; EEA 2006 para Europa).

Otras preocupaciones se refieren a las necesidades de suelo agrícola, que compiten con el necesario para producir alimentos, al balance energético que no siempre está a favor del uso de los biocarburantes, ya que en algunos casos requieren más energía que la que pueden aportar, y también las relativas al saldo neto de emisiones de CO₂, que, por razones de cambio

de uso de tierra, puede llegar a ocasionar aumentos netos de la emisión de gases de efecto invernadero a muy largo plazo.

1.1.4. Importancia del tema

A medida que los sistemas de distribución, transporte y tratamiento del agua se tecnifican y modernizan para lograr ahorros de agua, es difícil evitar que aumente el consumo de energía. Esta constatación, presente en cualquier sector—desde el riego al del tratamiento de efluentes y de aguas contaminadas— es la principal motivación de este y otros muchos estudios, y la razón de que se haya acuñado el término nexo agua-energía. El caso del regadío es tal vez más llamativo, pero no es el único. Al transformar y modernizar los regadíos tradicionales, basados en acequias y sistemas de distribución a cielo abierto en regadíos más tecnificados y eficientes, se logran aumentos de la productividad del agua y de la tierra, se mejora la calidad de los productos y de la vida de los productores, pero inevitablemente aumenta considerablemente el consumo de energía.

En definitiva, los sectores del agua y la energía no se pueden analizar por separado, porque los propios usuarios de agua o los generadores de energía analizan sus procesos tomando en cuenta ambos. Si la escasez de agua puede limitar el desarrollo y utilización de energías renovables, el aumento de la eficiencia en las etapas del ciclo del agua implica necesariamente un mayor consumo de energía.

1.2. Objetivos del estudio

El antecedente más inmediato de este estudio es el realizado para el Estado de California, *California's Water-Energy Relationship* (CEC 2005). Al igual que en CEC

(2005), la principal finalidad del presente estudio es poner en evidencia con estimaciones cuantitativas el volumen de agua utilizada y/o consumida en España, destacando los distintos sectores de actividad, para cada fuente energética, y a la inversa, presentar, con la ayuda de datos y estudios científicos, conclusiones sobre el papel de la energía para lograr un uso más sostenible del agua.

Hoy en día es fácil encontrar en diversos medios, académicos y de divulgación, comentarios sobre los graves problemas de disponibilidad de agua del mundo, debido al alto nivel de consumo de agua de algunos sectores como el agroalimentario, del que se alimentan las personas (Formas 2008, *Science* del 12 Febrero de 2010), o al aumento de las necesidades de energía (UNESA 2007, IIT 2005, Fundación Ideas 2009), y el volumen de agua que requiere satisfacerlas; o a un cambio sectorial como el del transporte que, en el caso de una utilización masiva de los biocarburantes, podría llegar a tener consecuencias en la disponibilidad de agua para los demás sectores de utilización y de consumo. Por otro lado, las proyecciones de los impactos del cambio climático plantean interrogantes sobre si los recursos hídricos disponibles en España serán suficientes para satisfacer la demanda de producción en los sectores mencionados antes en los próximos años (Bates *et al.* 2008).

Es por tanto oportuno estudiar las múltiples relaciones que existen entre el agua y la energía para poder cuantificar los flujos de agua y energía y adoptar medidas para el futuro. De manera concreta, se pretende responder las siguientes preguntas:

1. ¿Cuáles son las relaciones entre agua y energía en España? ¿cuál es su importancia —como parte de la demanda nacional de electricidad— del manejo del agua en España?

2. ¿Qué riesgos procedentes del sector del agua deben afrontar las iniciativas de generación de energías renovables en España?
3. ¿Qué impactos podemos esperar de una introducción a gran escala de biocarburantes de primera generación en España?
4. ¿Qué relaciones se pueden establecer entre el ahorro y la conservación del agua en los diferentes sectores y el consumo de energía, especialmente el del regadío que es el mayor usuario del agua?

1.3. Estructura del estudio

El estudio se articula en tres partes distintas según los objetivos mencionados en el apartado anterior: cuantificación de la energía empleada en el manejo del agua; cuantificación del volumen de agua usado en el sector de la energía; y la estimación de la viabilidad —respecto al uso del agua— de la producción a largo plazo de biocarburantes de primera generación en España.

En cada una de estas tres partes, se ha procedido identificando en el ciclo integral de utilización del agua, todas las etapas relevantes en las que intervienen agua y energía. Para cuantificar la energía empleada en el manejo del agua, se ha seguido el curso natural de las etapas (desde la captación hasta el uso final del agua y los vertidos de aguas tratadas a las fuentes); para cuantificar el volumen de agua implicado en el sector de la energía, se analizan tanto las diversas tecnologías empleadas en los sistemas de enfriamiento y que constituyen la etapa en la cual se utiliza el agua en ese sector, como la situación de la producción de energía en España; para la tercera parte del estudio, la estimación del volumen de agua implicado en la producción actual y po-

tencial de biocarburantes de primera generación, se ha procedido según la serie lógica de operaciones que llevan a la elaboración del combustible final. En algún caso, como el de los regadíos se entra en mayor detalle debido a la importancia que tiene la conservación del agua en este sector y al creciente uso de energía requerida para lograr ahorros.

2. ESTUDIOS PREVIOS

En primer lugar, se repasan los estudios que han analizado el nexo agua-energía desde una óptica global, siendo claros antecedentes de este trabajo. Posteriormente, se presenta un resumen de los trabajos académicos e informes que abordan cuestiones parciales o inciden en sectores productivos o energéticos específico. El tema ha suscitado un enorme interés tanto en la comunidad académica como en los sectores empresariales, administraciones y organismos internacionales. De ahí que se trate de revisar sólo lo que es más relevante.

2.1. Estudios globales y conceptos previos

2.1.1. Hidronomía física (Uche & Martínez 2010)

La principal herramienta de la hidronomía física es la construcción de perfiles exergéticos. El análisis exergético es un método que contrasta con el análisis sobre el estado del agua de una masa de agua estudiando los distintos usos, la calidad y las medidas de remediación, a partir de los cuales se diseña un plan de planificación que se acompaña de un análisis coste-eficacia.

Con esa nueva metodología, llamada exergía (unidades: cantidad de energía), es posible evaluar, por ejemplo, cuál

es el proceso más de eficiente de tratamiento de las aguas de una masa de agua (como puede ser un río), ya que todo se cuantificará en una sola variable: la exergía. Brevemente (podemos encontrar explicaciones detalladas de la metodología en Martínez & Uche 2010), el cálculo de la exergía refleja el potencial termodinámico de un recurso natural (por ejemplo el agua), de no estar en equilibrio con su entorno de referencia (ER), o de no estar en un estado de muerte relacionado con el entorno (ya que el valor termodinámico de un recurso natural es definido por el trabajo mínimo (exergía) necesario para producirlo a partir de materiales comunes en el ER (Valero *et al.* 2009). Se debe entonces determinar el ER por el entorno natural y es definido como aquel en que la altura, la presión, la temperatura, la composición..., tienen una exergía cero. El mejor entorno que puede servir de referencia es el agua de mar, porque una vez que las aguas llegan al mar, su uso potencial (sea urbano, agrario o industrial) se puede considerar prácticamente perdido. Esas aguas tienen una exergía nula por convención. Mientras el agua de mar tendrá una exergía nula, una masa de agua disponible desde su fuente y considerada como agua pura tendrá una exergía máxima que decrecerá a lo largo del curso de los ríos.

La exergía específica de una masa de agua viene determinada por su flujo de masa y seis parámetros: temperatura, presión, composición, concentración, velocidad y altura. Luego se asocia cada parámetro a su componente de exergía: térmica, mecánica, química, cinética y potencial.

Ese método ya se ha validado para dos pequeñas cuencas internas de Cataluña (La Muga y el Foix): los resultados obtenidos por esa metodología corroboran los obtenidos por una evaluación económica convencional (Martínez 2009).

2.1.2. *California's Water-Energy Relationship* (CEC 2005)

El estudio de California aborda las interrelaciones entre los sectores del agua y de la energía a través de grupos de trabajo públicos, reuniones y encuentros de profesionales. El resultado clave del estudio y principal antecedente del presente es el cálculo de la magnitud de las relaciones funcionales que tiene cada sector con el otro. Por un lado, el análisis del ciclo de utilización del agua muestra en sus diversas etapas el consumo energético que requiere (en GWh); y, por otro, la intensidad energética, definida como la cantidad de energía consumida por unidad de agua con el fin de llevar a cabo una determinada acción en el manejo del agua (en kWh/m³).

El uso de agua en el estado de California es del entorno a 53.000 Mm³ en un año normal, siendo el 79% de ese volumen el que utiliza la agricultura (42.000 Mm³).

En California en el año 2001, la energía consumida en el sector del agua alcanzó unos 48.000 GWh de electricidad, 4.200 Mtermias (123.000 GWh) de gas natural y 330.000 m³ (3.760 GWh) de diesel. Esto equivale al 19% de la demanda anual de electricidad, que alcanzó unos 250.000 GWh en el año 2001; y un 32% de la demanda anual de gas natural, que alcanzó unos 13.500 Mtermias (395.500 GWh) en el año 2001 del Estado de California (CEC 2005). El informe CEC 2005 realiza también un análisis sectorial.

El sector de la agricultura utiliza alrededor de 42.000 Mm³ cada año para los cultivos de regadío, requiriendo 10.500 GWh de energía eléctrica y 1.200 GWh equivalente de diesel y gas natural para bombear y desplazar el agua necesaria. Es decir que el uso de agua en el sector de la agricultura tiene una intensidad energética media de unos 0,28 kWh/m³.

Los sectores residencial, comercial e industrial utilizan unos 28.000 GWh de energía eléctrica y 4.200 Mtermias (123.000 GWh) de gas natural (en ambos casos, el 48% del consumo energético es imputable al sector residencial). Se debe notar que en el sector residencial, se tuvo en cuenta el consumo energético relacionado con la higiene personal, el lavado de la vajilla y ropa, el baño, el riego de los jardines, el agua enfriada y hielo en neveras así como el mantenimiento de las piscinas y los spas.

La Tabla 2-1 recoge el desglose de la intensidad energética del ciclo de utilización de agua en California.

TABLA 2-1. *Intensidad energética en las etapas del ciclo de utilización del agua en California*

<i>Etapas del ciclo de utilización de agua</i>	<i>Rango de intensidad energética (kWh/m³)</i>	
	<i>Valor inferior</i>	<i>Valor superior</i>
Abastecimiento y transporte	0	3,70
Tratamiento	0,03	4,23
Distribución	0,18	0,32
Recolección y tratamiento de aguas residuales	0,29	1,22
Vertidos	0	0,11
Tratamiento y distribución de aguas recicladas	0,11	0,32

Fuente: CEC 2005.

El amplio rango de valores observado a la Tabla 2-1 es debido a que en el Estado de California, existe una gran variabilidad de numerosos parámetros que a continuación describimos:

Abastecimiento y transporte: La intensidad energética dependerá del volumen de agua tratado, de la distancia de transporte, así como de la topografía sobre la que se

asientan las redes de transporte. Las variaciones meteorológicas son muy acentuadas en California, lo que puede aumentar considerablemente el volumen de agua que se ha de transportar. Las disponibilidades superficiales (eskorrentías) se sitúan en un 70% en el Norte de California aunque el 80% del consuno de agua se sitúa en el Sur.

Tratamiento: Según la importancia del tratamiento que tiene que sufrir el agua antes de ser distribuida, la intensidad energética del proceso tendrá un valor diferente. Ciertas aguas no necesitan casi tratamiento, otras como las aguas salobres necesitan un tratamiento mucho más importante. También dependerá del nivel de calidad requerido por el tipo de usuario final: aguas destinadas a la agricultura o a la industria no necesitan un tratamiento tan importante como lo necesita el agua para uso doméstico o comercial. Por supuesto, la tecnología empleada para tratar las aguas tendrá una influencia mayor en la intensidad energética: las tecnologías de desinfección como el tratamiento ultravioleta u ozonación, tienen una intensidad energética mucho más elevada.

Distribución: Algunos sistemas de distribución de agua solo necesitan gravedad, la mayoría necesita un bombeo. El sector que más impacto tiene en ese sentido es el sector urbano.

Recolección de aguas residuales: De igual forma, bastará la gravedad o un sistema de bombeo simple para elevarla.

Tratamiento de aguas residuales: Todos los sistemas de tratamiento necesitan energía, algunos más que otros, dependiendo del nivel de contaminación y del nivel de calidad requerido del agua que se ha de tratar.

Vertidos: Algunos vertidos solo requieren la gravedad para devolver el agua al medioambiente, otros van a requerir energía para elevar o transportar el agua.

Aguas recicladas y distribución: Dependiendo del nivel de contaminación de las aguas destinadas a estar recicladas y del tratamiento previsto para aquellas, la intensidad energética puede cambiar. Cuanto más tratamiento se aplica a las aguas destinadas a estar recicladas, más costoso en energía estará el proceso.

El estado de California tiene un consumo energético relacionado con el agua relativamente elevado (un 19% de la demanda de energía del estado de California). La razón principal es que el 60% de la energía relacionada con el agua consumida en California es imputable a los sectores residencial (29%), comercial (18%) e industrial (13%), y en el sector residencial, se ha contabilizado el calentamiento de agua en los puntos de consumo final (incluidos los hogares), lo que explica la magnitud del resultado final. No está claro, en opinión de los autores, que se deba imputar al sector del agua el gasto energético de los servicios de agua caliente en el hogar o derivados del uso de electrodomésticos (lavadoras, lavavajillas...).

2.1.3. Estudio de las interdependencias energía-agua y la demanda emergente de energía de recursos hídricos (Pate et al. 2007)

Existen preocupaciones con relación al nexo agua-energía debido, por una parte, a las importantes obras realizadas para el aprovechamiento de las fuentes de agua en Estados Unidos desde el siglo pasado y al volumen de agua considerable que se necesita para su uso en el sector de la energía, además del que se va a necesitar para las nuevas tecnologías relacionadas con el sector de la energía, y por otra parte, al consumo energético no despreciable de las instalaciones de aprovechamiento, tratamiento y distribución de agua. Esta es la motivación del estudio encargado en 2007 con el fin de poner en evidencia las interdependencias entre ambos sectores: “la producción de

energía y la generación de electricidad necesitan agua, y el bombeo de agua, el tratamiento, el suministro, y el acondicionamiento de la utilización final necesitan energía. Ya que aumenta la demanda de esos dos recursos, así como limitaciones crecientes en el suministro, la energía y el agua deben de estar considerados como recursos críticos altamente interdependientes que se han de manejar juntos” (pg. 1).

La utilización de agua en Estados Unidos supera ya la disponibilidad de agua verde (es decir el agua de lluvia), especialmente en el suroeste, las llanuras del Norte, California and Florida, donde justamente se prevé un aumento de la población entre un 30% hasta un 50% entre el año 2000 y 2025. En el territorio de EE.UU., en general, el nivel de agua de los acuíferos descendió considerablemente (275 m en el acuífero de la región del Lake Michigan, a razón de 5 m por año). Ello tuvo como consecuencia un alza directa de la intensidad energética del bombeo del agua subterránea.

A su vez, el sector energético en EE.UU. prevé un aumento considerable de las necesidades para el año 2030: un 38% para el petróleo, un 20% para el gas natural, un 54% para el carbón, un 14% para el nuclear y un 58% para las energías renovables. Considerando todas las fuentes de energía en presencia, eso nos lleva a un aumento del 53% para el año 2030 (según el informe *Annual Energy Outlook 2006* con proyecciones a 2030 (EIA 2006).

En el año 2000, el sector de la energía en Estados Unidos (sin considerar el volumen utilizado en plantas hidroeléctricas) representaba alrededor del 50% (unos 270.000 Mm³ anuales) del conjunto del agua dulce y salina utilizado en Estados Unidos (respectivamente casi el 100% de agua salina y el 39% de agua dulce). La mayor parte de este volumen de agua se empleó en los sistemas de enfriamiento de las plantas termoelectricas.

Sin embargo, a largo plazo, EIA (2006) prevé un aumento del consumo de electricidad de un 50% para el año 2030, pasando de un consumo de 3.700 TWh en el 2005 a 5.500 TWh en el 2030. En sus proyecciones, el EIA sugiere que el aumento será mayoritariamente generado por plantas termoeléctricas de carbón (unos 1.300 TWh) y un aumento modesto de las demás tecnologías: unos 200 TWh para el conjunto de plantas termoeléctricas con gas natural y plantas de energía alternativa, y unos 100 TWh de energía nuclear. Las proyecciones no incluyen un aumento mayor de generación mediante plantas hidroeléctricas. El aumento del volumen de agua como consecuencia del aumento de la producción eléctrica va a depender de la tecnología de enfriamiento de las instalaciones empleada, cuyas necesidades de agua varían considerablemente (para más información, véase el estudio de Pate *et al.* 2007 y el apartado 7.4 Sistemas de refrigeración del presente estudio).

2.1.4. Balances energéticos del ciclo del agua y experiencias de reutilización planificada en municipios de la Costa Brava (Sala 2007)

El objetivo del trabajo de Sala fue, en primer lugar, comparar los consumos energéticos entre las diferentes etapas del ciclo del agua, y en segundo término, el de contraponer el concepto de sostenibilidad con el hecho de favorecer la reutilización del agua, que supone un aumento en el consumo energético. El trabajo fue realizado en los municipios de la Costa Brava, con el fin de compararlos entre sí —tras la evaluación de su consumo energético relacionado con el agua— en términos de sostenibilidad, definida en este caso a partir de los ahorros tanto de agua como de energía, empleando tecnologías de regeneración y posterior reutilización de las aguas depuradas (Sala 2007).

En la Tabla 2-2, presentamos los rangos de consumo en el conjunto de los municipios de la Costa Brava para las etapas de abastecimiento y transporte de agua y el tratamiento biológico y de regeneración.

Sobre la eficiencia energética, Sala concluye que puede servir para comparar la huella ecológica de las diferentes partes del ciclo del agua.

TABLA 2-2. *Consumos totales de energía en la gestión del agua potable*

<i>Tipo y fuente de agua</i>	<i>Rango consumo energético (kWh/m³)</i>	
	<i>Valor inferior</i>	<i>Valor superior</i>
<i>Suministro de agua potable (incluido transporte hasta depósitos principales)</i>		
Agua superficial	0,0002	1,74
Agua subterránea	0,37	1,32
Desalación	4,94	5,41
Tratamiento biológico de las aguas residuales		
Fangos activados	0,43	1,09
Aireación prolongada	0,49	1,01
Lagunaje convencional	0,05	—
Tratamiento de regeneración para eliminación de patógenos (a)		
Filtración directa (filtros lecho pulsado) + desinfección (UV y cloro)	0,18	—
Filtración directa (filtros cerrados) + desinfección (UV y cloro)	0,50	1,21
“Title-22” + desinfección (UV y cloro) (b)	0,20	0,63

(a) Consumo de la distribución del agua regenerada no incluido debido a la gran variabilidad en función de la ubicación del usuario.

(b) “Title-22” se refiere al tratamiento completo según normativa californiana consistente en coagulación, floculación, decantación y filtración como tratamientos previos a la desinfección.

Fuente: Sala 2007.

2.1.5. *Implications for water of the world energy scenarios* (Linares & Sáenz de Miera 2009)

El objetivo del estudio de Linares y Sáenz de Miera es la evaluación —a nivel mundial— de nuevos usos del agua en relación con varios escenarios energéticos, y el impacto que puedan tener esos usos en algunas regiones del mundo. Los cortes de electricidad debidos a insuficientes caudales para turbinar son frecuentes en el mundo, incluidos países como Brasil, Chile o África del Sur —que mayoritariamente dependen de energía hidroeléctrica, disminuciones de capacidad de los acuíferos por exceso de bombeo. 80 países según el Banco Mundial están amenazados por la escasez de agua mientras un 40% de la población del mundo— 2.000 millones de personas —no tienen acceso al agua dulce o agua en condiciones de salubridad. Es previsible que en el futuro aumente la competencia por el recurso, no solo entre sectores de utilización, pero también entre las regiones que disponen del recurso. El cambio climático no va a ayudar a mejorar la situación ya crítica, razón por la cual una política de agua debe de estar basadas en principios de eficiencia, promoviendo menos utilización y/o consumo de agua y mejor rendimiento en todos los usos. No obstante, las proyecciones del CC sobre las precipitaciones todavía están sujetas a numerosas incertidumbres (Schiermier 2010).

2.1.5.1. Evolución del uso y consumo de agua en el sector de la energía

Basándose en el estudio de la Agencia Internacional de la Energía (IEA 2007) para evaluaciones de necesidades de energía, en varios estudios (EPRI 2002, Gleick 1994) para la evaluación del volumen de agua (utilización de agua y consumo de agua) necesario en el sector de la energía, y en el estudio del Pacific Institute (Pacific Institute 2008) para la evaluación de los recursos hídricos mundiales, los autores

han calculado un rango expresando en porcentaje del agua que se necesitará en el sector de la energía en el año 2030 según dos escenarios: uno de referencia, básicamente un escenario “business-as-usual”; y el otro “alternativo”, en el cual se tienen en cuenta los impactos de eficiencia energética y de políticas de cambio climático. A continuación se exploran los resultados obtenidos por sus estimaciones.

Con respecto al **agua utilizada** (no consumida, pero referida al total de los recursos hídricos sostenibles) no se prevé que cause problemas en el ámbito mundial (pues supone entre un 0% y un 2% del agua tanto en el caso del escenario de referencia como en el alternativo). Sin embargo, en ámbitos más regionales, se puede esperar que regiones como América Latina, y países como India o China pueden llegar a dedicar una fracción bastante importante de sus recursos hídricos sostenibles, como se muestra en la Tabla 2-3.

TABLA 2-3. *Demanda futura de utilización de agua para el sector de la energía respecto al suministro total actual de agua*

	2005	2030 <i>Escenario de referencia</i>	2030 <i>Escenario alternativo</i>
China	0% - 22%	0% - 29%	0% - 26%
India	0% - 14%	0% - 47%	0% - 37%
Latino América	0% - 26%	0% - 54%	0% - 46%

Fuente: Linares y Sáenz de Miera, 2009.

Con respecto al **agua consumida** (respecto al total de los recursos hídricos sostenibles), no se prevé que sea fuente de problemas en el ámbito mundial ni tampoco a nivel regional (los rangos no sobrepasan el 2% en ambos escenarios), excepto en la región del Oriente Medio, donde el consumo de agua podría alcanzar entre el 1% y el 27% en el año 2030 en el caso del escenario de referencia (las proyecciones en el caso del escenario alternativo no incluyen la

producción de petróleo, lo que no permite comparar juntos los dos escenarios).

Si se analiza el **agua consumida** (respecto al total del agua consumida en la actualidad) la situación presenta perfiles más preocupantes. Los resultados muestran que en muchas regiones del mundo, el rango del consumo de agua para el sector energético puede alcanzar hasta un 10% o un 20% del volumen total de agua consumida; lo que, sin duda, puede aumentar la competencia de manera importante entre usuarios diversos del agua como el sector energético, la irrigación o el abastecimiento alimentario.

2.1.5.2. Limitaciones del estudio

Se ha tratado de analizar el uso y el consumo de agua por usos energéticos frente el volumen total de los recursos sostenible de agua, pero se tendría también que incorporar la componente económica del uso de agua respecto a su disponibilidad, ya que no toda el agua dulce está igualmente accesible. Según el World Water Development Report 3 (United Nations 2003), un 54% del volumen anual de agua de escorrentía es accesible al ser humano, pero hay grandes variaciones entre regiones.

Se ha considerado en el estudio el volumen máximo teórico de los recursos hídricos sostenibles para cada región considerada (tomando en cuenta la totalidad de las aguas superficiales internas de escorrentía, así como el volumen de agua en los acuíferos recargados por agua de lluvia); pero no se puede descartar el hecho de que la disponibilidad de agua para cubrir la demanda social y económica está sujeta a limitaciones económicas y técnicas, lo que nos lleva a tener que considerar un volumen de agua considerablemente inferior al máximo disponible

Otras cuatro limitaciones son de mención obligada. Primero, la variación estacional del volumen de las precipitaciones, que no está reflejada en las estimaciones anuales que se han realizado pero que pueden afectar considerablemente la planificación a nivel de la cuenca y de reserva. Segundo, los países de cierta dimensión encierran realidades climáticas muy diversas y puntos heterogéneos de concentración de población. Tercero: en los datos utilizados no se destaca la proporción de aguas verdes que contribuyen al mantenimiento de los ecosistemas, ni tampoco el volumen de agua disponible de otras fuentes (como puede ser la desalación, la reutilización de agua o la utilización no sostenible de agua subterránea). Y cuarto: para considerar el abastecimiento de agua de una región, se tendrá que tener en cuenta regulación de los recursos hídricos, que son los que suelen permitir el desarrollo de aquellos mismos.

En conclusión, Linares y Sáenz de Miera advierten que los resultados de United Nations (2003) carecen de precisión, en razón al nivel de integración de los datos y a la dificultad de estimar correctamente la demanda de agua asociada a la producción de energía. Las fuentes tendrían también que estar actualizadas y se ha de tener en cuenta las limitaciones inherentes al indicador de recursos hídricos renovables, que indica un máximo teórico de los recursos disponibles para un país.

El estudio permite indicar, sin embargo, que la demanda de agua para energía no va a aumentar dramáticamente a nivel global según los escenarios energéticos considerados, especialmente en el caso del escenario alternativo. Por lo tanto, no parece que la energía será un factor crítico respecto a la demanda global de agua. Pero en regiones como Oriente Medio o América Latina, los problemas ya han adquirido relevancia, principalmente debidos a la creciente demanda de agua para energía, y podrían agravarse en el futuro si no se

tiene en cuenta esa problemática a la hora de diseñar el sistema de producción de energía (lo mismo podría pasar en China, India y las economías en transición de manera general).

2.2. Estudios que abordan aspectos técnicos, sectoriales o parciales

2.2.1. Agua y energía en el riego, en la época de la sostenibilidad (Corominas 2009)

El trabajo de investigación de Corominas (2009) tiene como objetivo subrayar la evolución de la implicación del consumo energético en la agricultura desde los últimos 50 años, poniendo especial atención en el uso de sistemas de riego localizado, y las necesidades de mantener las redes a presión. Corominas ha tratado de evaluar el aumento del consumo de energía ligado a la evolución de las prácticas agrícolas.

A lo largo del siglo XX, la relación agua-energía ha seguido un proceso de intensificación, aumentando el consumo de agua, energía e inputs variables, como fertilizantes (también muy demandantes de energía). Las necesidades de todos los sectores de consumo han seguido idénticos procesos de intensificación: el sector doméstico, agrícola e industrial. En palabras del autor, la consecuencia de esta progresión es que “es conveniente que reflexionemos sobre los límites que deberemos introducir en esta relación, en una época que nos preocupa nuestro bienestar actual, pero también la sostenibilidad del mismo.” (pg. 2)

En la Tabla 2-4 se puede apreciar el ritmo de intensificación de la relación agua-energía. Tanto la utilización y el consumo de agua como el consumo de energía han aumentado desde los años 1950.

TABLA 2-4. *Evolución del consumo de energía para riego en España*

Año	Superficie (Mha)	Uso de agua (Mm ³)	Consumo de agua (Mm ³)	Consumo de energía (GWh)
1900	1,00	9.000	5.400	0
1930	1,35	12.150	7.594	182
1940	1,50	12.750	8.288	191
1950	1,50	12.375	8.353	309
1970	2,20	17.600	12.320	1.056
1980	2,70	20.925	14.648	2.093
1990	3,20	24.000	17.400	3.480
2000	3,41	23.870	18.499	4.893
2007	3,76	24.440	20.163	5.866
2007/1950	2,5	2,0	2,4	19,0

Fuente: Corominas 2009 (datos del MARM y del MITYC)

Nota: elaboración propia del autor a partir de datos del MARM y del MYTIC. Para llevar a cabo el análisis de la evolución del uso de los recursos en el sector agrario, el autor ha utilizado estimaciones en campo y diversas fuentes bibliográficas históricas para ciertos parámetros (como pueden ser el uso unitario de agua, el coeficiente de retorno y el consumo unitario de energía).

En la Tabla 2-4, se aprecia la magnitud de los cambios experimentados por el sector agrícola de riego desde 1950. Desde entonces, la superficie de regadío se multiplicó por 2,5 y sus necesidades energéticas por un factor 19. Lo que lleva el gasto energético a la hectárea a unos 1.560 kWh/ha y las necesidades de agua a unos 0,24 kWh/m³. Corominas calcula que la eficiencia del uso del agua durante este periodo mejoró un 21% pero el consumo de agua solo disminuyó un 3,7%. Córcoles et al. (2009) llegan a la conclusión en un estudio de Benchmarking en Castilla-La Mancha de que no hay demasiadas diferencias entre el riego por aspersión y el localizado (0.96 kWh/m³ y 0.89 kWh/m³, respectivamente, incluyendo captación y bombeo). Se puede calcular, por otra parte, que desde el año 1995 hasta ahora mientras la superficie de regadío aumentó un 12%, el consumo de energía lo hizo en un 33%.

En la Tabla 2-5, se han estimado las necesidades de energía en relación al agua utilizada para diversos sistemas de riego y fuentes de suministro.

TABLA 2-5. *Energía gastada en relación con el agua utilizada para diversos sistemas de riego y fuentes de suministro*

Sistema de riego	Energía gastada (kWh / m ³)						
	BAJA			ALTA			TOTAL
	Sistema de riego	Captación		Transporte y tratamiento			
		Superficial	Subterráneo	Trasvase	Desalación	Reutilización	
				Zona de (BAJA)			
Gravedad	0,00	0,02	0,15	1,20	3,70	0,25	0,04
Aspersión y Automotriz	0,24	0,05	0,25	1,20	3,70	0,25	0,35
Localizado	0,18	0,10	0,50	1,20	3,70	0,25	0,43
Total regadío	0,13	0,06	0,39	1,20	3,70	0,25	0,28
							0,07
							0,35
							0,53
							0,34

Fuente: Corominas 2009 (elaboración propia).

El riego en España precisa de un consumo de energía que varía: 0,28 kWh/m³ cuando solo se considera el gasto de energía en las etapas de captación y distribución, elevándose a 0,34 kWh/m³ al agregar las etapas de tratamiento y transporte del agua de riego. Las variaciones de consumo energético son amplias: un sistema de riego por gravedad y con agua superficial tendrá un consumo energético del orden de 0,02 kWh/m³ mientras que un sistema localizado con agua subterránea tendrá un consumo energético del orden de 0,68 kWh/m³.

Con estas estimaciones se puede llegar a calcular la demanda de energía requerida por el sector de la agricultura. En zona de riego (BAJA), se llega a un consumo total de energía para regadío de 5.752 GWh, lo que equivale al 1,98% de la demanda nacional anual de electricidad. Cuando se le agrega el transporte y el tratamiento (BAJA y ALTA), llegamos a 6.873 GWh, es decir un 2,37% de la demanda de electricidad (Corominas 2009).

El aumento creciente de las necesidades de energía en el sector de la agricultura pone en cuestión la sostenibilidad del sistema del regadío. Sin embargo, son numerosos los factores que explican la creciente utilización de energía para el manejo del agua de riego, pero destacan la disminución de la utilización del factor trabajo (con mayor uso de automatismos y controles programados), la expansión del regadío a zonas de mayor cota y terrenos de mayor pendiente y la búsqueda de sistemas de riego de mayor precisión (lo que implica el empleo de redes presurizadas, electroválvulas y sistemas de aspersión o riegos localizados).

Ya se comprobó con los datos de la Tabla 2-4 que a lo largo de la segunda mitad del siglo XX hasta el presente, aunque las mejoras en el uso del agua hicieron que disminuyera el volumen de agua utilizado por hectárea en un 21%, el consumo energético al hectárea aumentó de un 657% en el mis-

mo periodo. Es decir que desde los años 50, el consumo de energía aumentó considerablemente en el sector de la agricultura, empeorando la eficiencia energética del sector.

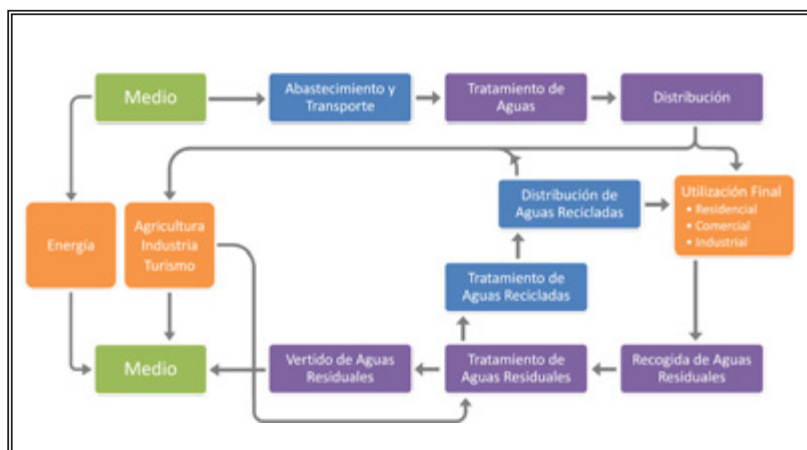
La actividad del regadío en España sería responsable del 2,5% de las emisiones de CO_2 producidas por el sector eléctrico y el 0,6% del conjunto de las emisiones correspondientes a la producción de energía primaria en España. Hoy en día, las emisiones de CO_2 por los regadíos alcanzan un promedio de 2,66 toneladas de CO_2 a la hectárea, incluyendo las etapas de captación, distribución, tratamiento y transporte (datos del MITYC y PNR-H2008).

3. LA RELACIÓN ENTRE EL AGUA Y LA ENERGÍA

3.1. El ciclo de utilización del agua

La Ilustración 3-1 representa el ciclo de utilización del agua en España, cual se ha diferenciado en verde las fuentes de agua, en azul el suministro de agua, en violeta el tratamiento de las aguas y de las aguas residuales, el uso final del agua —por sectores— está en naranja. Según la disposición de las “cajas” en naranja en la ilustración, hacemos una diferencia entre los sectores que realizan captaciones directas para su uso de agua de los que consumen agua potabilizada para su uso final.

De manera esquemática, podemos distinguir en el ciclo del agua en España dos vías diferenciadas. Una es la de los sectores de la agricultura y de la industria con captaciones directas (incluyendo el sector de la producción de energía); la otra es la de las aguas servidas para usuarios comerciales, industrias y hogares, con tratamientos previos. Mientras que para este ciclo de aguas pretratadas se necesita un complejo proceso de potabilización, recogida y tratamiento

ILUSTRACIÓN 3-1. *Ciclo de utilización del agua en España*

Fuente: elaboración propia.

del agua —que puede, o no, llegar a la redistribución de aguas recicladas; la vía de los sectores de la agricultura y de la industria casi no utiliza agua de la primera vía, sino que es directamente captada de fuentes superficiales o subterránea. Una tercera vía, mixta, compleja y de creciente importante, es la que regantes e industrias siguen al tratar aguas captadas de fuentes contaminadas, salinas o salobres para adaptarlas a las necesidades de calidad requeridas. El agua que es solamente utilizada (agua de proceso o que percola) vuelve al medio ambiente, una fracción de la misma es consumida (retención hídrica o evaporación) sale temporalmente del ciclo pero retorna vía evaporación o evapotranspiración a la atmósfera para luego precipitar.

3.2. La energía empleada en el manejo del agua

En cada etapa del ciclo del agua que hemos visto en la Ilustración 3-1 se necesita cierta cantidad de energía. La

obtención de datos sobre este consumo de energía no es sencilla ya que los contadores no suelen diferenciar la energía relacionada con el agua del resto de los consumos. Por otro lado, al igual que en el caso de California, existen enormes variaciones entre zonas, sistemas de explotación y necesidades de transporte, tratamiento y depuración.

Presentamos en la Tabla 3-1 las cantidades de energía que se han necesitado en cada etapa del ciclo del agua. Las fuentes mencionadas adelantan que se trata de electricidad, con lo cual se supone que sea lo mismo para todas las etapas del ciclo de utilización del agua. Puede que con esa suposición, se cometa un cierto error, pero en conjunto, el uso de bombas con motor de combustión para de ese tamaño no es frecuente. Otra cosa que se ha de mencionar es que siempre hemos trabajado con rangos, por lo cual, los resultados presentados en la Tabla 3-1 resultan de un promedio o de un cálculo realizado para acercarse lo más posible de la situación tal como se puede conocer en España.

La Tabla 3-1 cuantifica el consumo de energía eléctrica según el ciclo presentado a la Ilustración 3-1. En esa tabla, hemos dividido el ciclo de utilización del agua en sus etapas más importantes. La etapa de abastecimiento y tratamiento de agua incluye la energía consumida por la red de abastecimiento público para bombear el agua desde las fuentes disponibles y llevarla hasta las estaciones de potabilización para elevar su calidad a las normas requeridas para el consumo humano; esta etapa representa el 64% de toda la energía relacionada con el agua.

Por etapa de “distribución / uso de agua”, se entiende el transporte del agua desde su sitio de bombeo (o en el caso de que haya sufrido un tratamiento particular, desde la planta de tratamiento) hasta los puntos de consumo final; esta etapa representa el 20% de toda la energía relacionada con el agua.

TABLA 3-1. *Energía relacionada con el agua en España en el año 2007*

Etapas del ciclo	Uso de agua	Electricidad	
	Volumen (Mm ³)	Consumo (GWh)	(%)
Suministro/Captación/Abastecimiento y tratamiento de agua		11 861	64
Urbano	4 526	5 979	33
Desalación	694	2 276	12
Agrícola	20 360	4 196	23
Energía	8 759	1 656	9
Distribución / uso de agua		3 629	20
Residencial	2 544	441	2,4
Comercio	852	148	0,8
Municipal y Otro	96	17	0,1
Industrial	1 840	349	1,9
Agrícola	20 360	2 469	13
Agua no registrada	1 191	206	1,1
Tratamiento de aguas residuales		2 893	16
Recogida de agua	5 204	260	1,4
Depuración de agua	4 570	2 338	13
Agua reciclada (tratamiento y distribución)	501	294	1,6
Total de la energía relacionada con el agua		18.354	
Demanda total de energía en España		260.073	
Porcentaje		7,0%	

Fuente: elaboración propia con datos de Ayuntamiento Madrid 2010, CEC 2005, Bernat *et al.* 2009, Corominas 2009, Cramwinckel 2009, Eltawil 2008, Emasesa 2005, Guillamón 2007, GWI DesalData/IDA 2009b, MARM 2009b, Murgui *et al.* 2009, Ródenas & Guillamón 2005, Sala 2007, SEE 2003a y 2003b.

La etapa de tratamiento de aguas residuales comprende la energía consumida para la recogida del agua, el tratamiento de aquella en centrales de depuración y el tratamiento y la distribución del agua reciclada; esta etapa representa el 16% de toda la energía relacionada con el agua. Las plantas de tratamiento de aguas residuales tratan el 60% del volumen de agua utilizado en los sectores urbano, comercial, municipal e industrial (AEAS 2002). En ese volumen, puede que no sea incluida el agua no registrada (que

pueden ser pérdidas o fraudes), pero que no podemos tener en cuenta debido al desconocimiento sobre su utilización.

La electricidad relacionada con el ciclo integral de utilización de agua en California (véase el apartado 2.1.2 California's Water-Energy Relationship (CEC 2005) representa un 19% de la demanda anual de electricidad, muy por encima del 7,0% que estimamos para España. Sin embargo, se ha de notar que las estimaciones en California para el sector urbano (residencial, comercial e industrial) incluyen el coste energético de las etapas de tratamiento de aguas, calentamiento, circulación de agua caliente, enfriamiento, circulación de agua, en algunos casos, el bombeo de agua subterránea en pozos privados y mucho más para los sectores comercial e industrial según el sector de actividad. Nuestras estimaciones para España no incluyen los gastos energéticos vinculados a las operaciones dentro de cada sector. Esto explica porqué la distribución de agua en el sector urbano en California consume 27.887 GWh al año aunque el mismo sector en España solo alcanza 1.160 GWh. Para poder comparar los dos resultados resulta imprescindible tener la misma base. El uso de agua en el sector urbano (residencial interior y exterior, comercial, industrial y agua no registrada) suma en California 8.585 Mm³ (Gleick *et al.* 2003) contra 6.523 Mm³ en España (véase Tabla 3-1). Si ajustamos el resultado para el sector urbano en California (3,25 kWh/m³) a lo que es en España (0,18 kWh/m³) teniendo en cuenta la pequeña diferencia de volumen utilizado, obtendríamos un consumo de electricidad del 8,6% de la demanda anual.

3.3. La intensidad energética del ciclo de utilización del agua

Las diferentes etapas que constituyen el ciclo de utilización del agua tienen cada una de ellas una intensidad ener-

gética específica (expresada en kWh/m³). La Tabla 3-2 ilustra la variabilidad que pueda existir entre las etapas del ciclo del agua en España.

TABLA 3-2. *Intensidad energética de las etapas del ciclo del agua en España*

Etapas del ciclo	Rango de intensidad energética (kWh/m ³)		
	Mín.	Medio	Max.
Abastecimiento y transporte de agua	0,00	0,24	2,10
Tratamiento de agua	0,11	0,57	4,67
Distribución de agua	0,12	0,21	0,22
Tratamiento de aguas residuales	0,41	0,53	0,61
Tratamiento y distribución de agua reciclada	0,32	0,59	0,85
Vertido de aguas residuales	0,00	0,05	0,11
Ciclo total	≈ 0,52		

Fuente: elaboración propia con datos de Ayuntamiento Madrid 2010, CEC 2005, Bernat et al. 2009, Corominas 2009, Cramwinckel 2009, Eltawil 2008, Emasesa 2005, Guillamón 2007, GWI DesalData/IDA 2009b, MARM 2009b, Murgui *et al.* 2009, Ródenas & Guillamón 2005, Sala 2007, SEE 2003a y 2003b.

Como comparación la Tabla 3-3 la intensidad energética de un conjunto de empresas miembros de la Global Water Research Coalition CGWRC (2008).

TABLA 3-3. *Intensidad energética en diversos países y empresas (kWh/m³)*

	EE.UU.	HOL.	SING.	SUEZ	ALEM.	RU.	AUST.
Abastecimiento							
Energía Total	0,43	0,47	0,45	0,57	1,01		0,1-0,5
Tratamiento			0,05	0,47	0,10		0,1-0,3
Distribución			0,40	0,10	0,91		
Aguas residuales							
Energía Total			0,56	0,52	0,67		0,4-0,9
Tratamiento	0,45	0,36	0,42	0,43		0,64	0,39
Recogida y Transporte			0,14	0,09			0,1-0,36

Fuente: GWRC (2008).

Los datos de ambas tablas permiten una comparación directa y sugieren rangos de intensidad energética relativamente homogéneos para muchos países y empresas.

Abastecimiento y transporte de agua

La intensidad energética de la etapa de abastecimiento y transporte de agua en España está determinada por varios parámetros, como la fuente del agua bombeada, el volumen de agua transportado, o la distancia y la topografía de la zona.

En España se aprobó en el 2001 el Plan Hidrológico Nacional 2000. Su proyecto emblemático tenía como objetivo la construcción del trasvase del Ebro. Por Real Decreto en el 2004, el proyecto se quedó sin efecto. El transvase del Ebro debía suministrar unos 1.050 Mm^3 (un 6% de los recursos de la cuenca) a lo largo de los 900 km hasta las cuencas internas de Cataluña y las del Júcar, Segura y Almería (Ródenas y Guillamón 2005). El consumo energético por bombeos habría alcanzado unos 2.559 GWh, restando los aprovechamientos hidroeléctricos estimados a 457 GWh, el consumo energético unitario neto sería de $2,10 \text{ kWh/m}^3$ (Guillamón 2007, Ródenas & Guillamón 2005). Otros autores mencionan un consumo de $3,70 \text{ kWh/m}^3$ (Corominas 2009).

En la cuenca hidrográfica del Segura, el balance hídrico arrojaba un déficit de unos $1.200 \text{ Mm}^3/\text{año}$. Se construyó en el 1979 un trasvase que permitió remediar al problema, aportando 540 Mm^3 desde el Tajo, unos 40 Mm^3 con desaladoras, y con una utilización intensiva de aguas subterráneas, que va más allá de un aprovechamiento sostenible (Ródenas y Guillamón 2005). La obra consta en una impulsión de origen y un canal de transporte de unos 300 km hasta

la cuenca del Segura. El transporte del agua utiliza parcialmente los cauces naturales, hay varios saltos de potencial aprovechamiento hidroeléctrico, pero el sistema requiere elevaciones parciales en algunos puntos, lo que, sumándolo todos los gastos energéticos, arroja un consumo energético del trasvase del Tajo-Segura situado entre 1 kWh/m^3 (Ródenas y Guillaumon 2005) y $1,21 \text{ kWh/m}^3$ (Melgarejo y Montaña 2009).

Tratamiento de agua

El coste energético que requiere el tratamiento de agua depende en primer lugar de las características del agua de partida, y en menor importancia de la calidad que se requiere a la salida de la planta de tratamiento, antes de distribuirla. Como veremos más adelante, el tratamiento del agua requerido puede tener un coste energético relativamente bajo, si se trata de un agua captada en una zona con poca contaminación ambiental; pero en otros casos, como por ejemplo la desalación de agua de mar —caso extremo—, el coste energético será mucho más elevado. Las condiciones de calidad a la salida de la planta van a depender del tipo de utilizador final, ya que el agua para la agricultura no debe tener el mismo nivel de calidad que el agua destinada al consumo humano en zonas urbanas.

Distribución de agua

Debido a las diferencias de altura de las zonas donde tiene que llegar el agua, el coste energético de la distribución de agua será más o menos elevado. Aunque en algunos casos, solo con la gravedad basta para suministrar el agua, en la mayoría de los casos, el bombeo es necesario.

Canalización y tratamiento de aguas residuales

Mientras la canalización de las aguas residuales no representa un coste energético muy elevado, su tratamiento, que varía según la contaminación del agua, tiene un coste considerablemente más elevado. Como en el caso del tratamiento del agua, lo que más influye el coste energético de la depuración de agua es en primer lugar el estado de contaminación del agua, y luego en menor importancia, el nivel de calidad requerido para su uso futuro.

Vertido de aguas residuales

El agua, cuando ha de ser vertida, o devuelta al medio ambiente, requiere un coste energético muy bajo, pues ha estado tratada en plantas de depuración, el único coste que queda es su canalización hacia la zona de vertido, que puede en algunos casos requerir una estación de bombeo.

Tratamiento y distribución de aguas recicladas

Según el uso que se quiera hacer de las aguas recicladas, el nivel de calidad requerido acarreará un coste energético más o menos elevado. En España, el agua reciclada se destina sobre todo para uso urbano (excepto para el consumo humano), agrícola, industrial, recreativo y ambiental.

Ciclo total

Considerando todas las etapas del ciclo integral de utilización de agua en España, nuestras estimaciones nos permiten dar una intensidad energética de $0,52 \text{ kWh/m}^3$. En California, se estima a $0,91 \text{ kWh/m}^3$ (CEC 2005) o $0,53 \text{ kWh/m}^3$ (teniendo en cuenta el ajuste mencionado más arri-

ba en el apartado 3.2 La energía empleada en el manejo del agua). En la ciudad de Valencia, se estimó en 1,24 kWh/m³ (Murgui *et al.* 2010).

3.4. Energía consumida en el uso final del agua

España utiliza al año un volumen de agua alrededor de 35.255 Mm³ de agua, un 57% se destina al sector de la agricultura, un 25% al sector de la energía, el resto (un 18%) se usa en el sector urbano e industrial (Corominas, 2009; INE, 2007a; Linares y Sáenz de Miera, 2009; MARM 2009c, 2008b y 2009b; Rio Carrillo y Frei, 2009). Tras su captación y transporte, el agua puede tener usos distintos, según el sector en que se utiliza.

3.4.1. Residencial, servicios e industrial

El volumen de agua que ha sido servido por la red pública de distribución de agua en los sectores residencial, comercial, municipal e industrial alcanza un total de 3.780 Mm³ (INE 2007a), lo que requiere un consumo energético de 655 GWh, solo para transportar el agua hasta los puntos de consumo. El sector industrial realiza captaciones propias además de consumir agua directamente desde la red de abastecimiento público, el volumen de las captaciones alcanza 1.555 Mm³ (INE 1999) y ha supuesto un consumo energético de 300 GWh.

La diferencia entre el volumen de agua suministrada a la red de abastecimiento público y el volumen de agua registrada y distribuida resulta en el volumen de agua no registrada —que pueden ser pérdidas reales o pérdidas aparentes (pérdidas por errores de medición y fraudes u otros consumos).

La Tabla 3-4 presenta los resultados en volúmenes de agua suministrados por la red pública de distribución de agua, así como las captaciones propias realizadas por el sector industrial.

TABLA 3-4. *Uso final de electricidad asociado a consumidores urbanos*

<i>Sector</i>	<i>Electricidad consumida (GWh)</i>
Residencial	441
Comercial	148
Municipal	17
Industrial	349
Agua de la red	49
Agua de captación	299
Sub Total	954
Agua no registrada	206
Total	1.160

Fuente: elaboración propia con INE 2007a, SEE 2003a e IDAE 2007a.

El sector residencial presenta un consumo anual de agua de aproximadamente 2.545 Mm³ (INE 2007a), es decir un 7% del consumo nacional y el 38% del consumo de toda la electricidad necesaria a la distribución de agua. El sector comercial presenta un consumo de agua alrededor de 850 Mm³ anual (2,4% del consumo nacional) y el 13% del consumo de toda la energía necesaria a la distribución de agua.

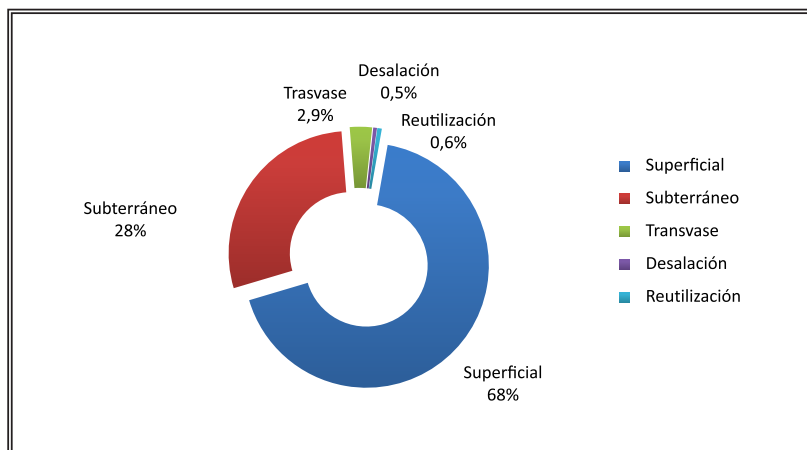
En el sector industrial se incluye las industrias manufactureras de todo tipo y las de extracción de materia prima. El conjunto del sector presenta un consumo total de agua de 1.840 Mm³ (INE 1999), es decir un 5,2% del consumo nacional anual y un gasto de electricidad total de 350 GWh. Del volumen total de agua, solo 285 Mm³ provienen de la red de distribución, el resto resulta de captaciones propias, a razón de 1.550 Mm³, lo que supone un gasto de electricidad en bombeo de 300 GWh (el 26% del consumo de toda la energía necesaria a la distribución de agua).

3.4.2. Agricultura

El sector de la agricultura es el sector más consumidor en cantidad de agua, con una demanda bruta para España anunciada de 23.298 Mm³ (MARM 2008b). El volumen anual de agua consumida, tras haber restado los retornos a las fuentes naturales, es de 20.432 Mm³ (MARM 2008b). Un 68% del volumen del agua que se utiliza en el regadío es agua superficial y 28% son captaciones de agua subterránea, los 4% restantes se dividen entre agua de trasvases (un 3%), reutilización de agua (un 0,5%) y agua de desalación (un 0,5%), como se ilustra el Gráfico 3-1. Las necesidades de electricidad para el manejo del agua en el sector de la agricultura representan el 23% de las necesidades del ciclo integral.

Según nuestras estimaciones, el consumo de energía está alrededor de unos 6.670 GWh, presentándose en la Tabla 3-5 el desglose del consumo eléctrico para el regadío en el sector

GRÁFICO 3-1. *Proporción entre fuentes de agua utilizada en el riego agrario*



Fuente: Elaboración propia con datos de Corominas 2009 y MARM 2008b.

de la agricultura en el año 2008. El procedimiento —que tiene como origen el trabajo más que notable y pionero de Corominas (2009)— que se ha seguido para llegar a esa cifra entraña el planteamiento de varios supuestos.

1. Gracias a la Encuesta sobre rendimientos y superficies de cultivos (MARM 2009c) se ha podido desglosar el suministro de agua para regadíos según la tecnología de riego empleada. Y de la misma manera, se ha cuantificado la superficie regada para cada una de las tecnologías, así como el uso medio de agua a la hectárea.
2. En el conjunto del regadío español, se ha supuesto que la única fuente de energía es la electricidad. Se trata de una simplificación, con su error asociado estimado entre un 5 y un 10% (Joan Corominas, comunicación personal, 9 de marzo de 2009).
3. En un segundo paso, se ha estimado la intensidad energética media representativa para el conjunto de los regadíos españoles, para cada una de las tecnologías de riego. Se han estimado alturas de elevación medias y presiones estándares en aspersores o goteos. Estos resultados se han mostrado en la Tabla 2-5, página 48, y a pesar de ser teóricos, constituyen una aproximación razonable para el ámbito nacional.

En esa tabla, se recoge como energía gastada por los métodos de riego por aspersión y goteo, 0,24 y 0,18 kWh/m³, lo que equivale —en el caso de una bomba ideal, con un rendimiento unitario— a una elevación de 88 y 66 m, respectivamente. En el caso de aplicar un rendimiento de las bombas de 0,60, esos valores se reducirían a aproximadamente 50 y 40 m. Es usual proyectar estas alturas en los hidrantes o bocas de rie-

go en los proyectos de sistemas de distribución de agua. Los 20 o 30 m que sobran hasta los 30 m o 10 m que necesitan los aspersores o goteros, respectivamente, se emplean en las pérdidas de carga en las tuberías de la finca, además de salvar algún desnivel dentro de la finca, y en los sistemas de filtrado y otros elementos de la acometida del sistema (véase el apartado 6.2 Consideraciones técnico-económicas sobre el uso de energía en el regadío para más detalles).

Como contraste de estas estimaciones, los resultados hechos públicos por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio en la Estadística de la industria eléctrica del año 2007 (MITYC 2007), señalan un consumo eléctrico neto para el regadío (alta y baja tensión confundida) de 2.670 GWh, muy cerca de los 2.470 GWh obtenidos con nuestras estimaciones.

TABLA 3-5. *Consumo de electricidad en el sector de la agricultura para utilización y consumo de agua en el año 2008*

<i>Categoría</i>	<i>Consumo de energía (GWh)</i>
Abastecimiento de agua para regadíos	
Suministro por trasvases a Comunidades de Regantes	717
Bombeo de aguas subterráneas	2.251
Bombeo de aguas superficiales	826
Agua procedente de la desalación de agua	331
Agua procedente de la reutilización de agua	76
Regadío en parcela	
Regadío por gravedad	0
Regadío por aspersión	1.135
Regadío por goteo	1.334
Energía eléctrica gastada total	
Total abastecimiento	4.201
Total regadío en parcela	2.469
Total	6.670

Fuente: elaboración propia a partir de Corominas (2009).

Los valores recogidos en la Tabla 3-5 son susceptibles de variación de acuerdo con el año meteorológico estudiado. Además, se ha de tener en cuenta una variación temporal que se puede atribuir a la modernización del regadío: el regadío por gravedad sin uso de energía adicional en la parcela tiende a ser reemplazado por tecnologías de regadío a presión (aspersión automotriz o localizado). La evolución del regadío entre el año 2002 hasta el año 2009 se observa en la Tabla 3-6, donde mostramos esta evolución, tanto en superficie como en porcentaje.

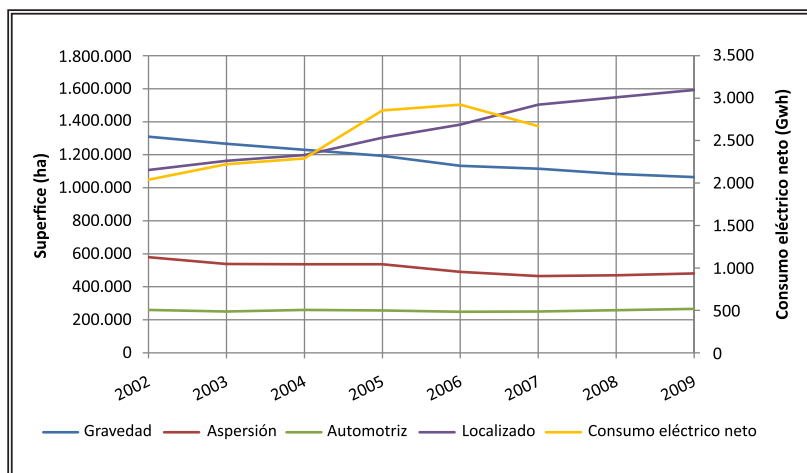
TABLA 3-6. *Evolución del regadío español en superficie según la tecnología de riego empleada*

<i>Tipos de regadío</i>	<i>2009/2002 (%)</i>	<i>2009/2002 (ha)</i>
Gravedad	-18,7%	-244.731
Aspersión	-17,2%	-99.701
Automotriz	2,6%	6.681
Localizado	43,9%	485.317
Otros Sist y Sin info	-82,5%	-93.747
Total	3,3%	109.285

Fuente: elaboración propia con MARM 2009c.

La energía eléctrica neta consumida en el regadío también ha variado a lo largo de ese periodo, y cuando comparamos el incremento del consumo eléctrico neto con el cambio de tecnología en el regadío, tal y como se muestra en el Gráfico 3-2, vemos que existe una correlación entre el uso cada vez mayor del regadío localizado por causas específicas (que tiene el consumo energético unitario más elevado: 0,24 kWh/m³), con el consumo eléctrico neto total del regadío español.

La variación del consumo de energía tiene también razones de orden técnico. En el conjunto del regadío se emplean diversas fuentes de agua y varias técnicas de riego que tie-

GRÁFICO 3-2. *Evolución conjunta del regadío español con el consumo eléctrico neto*

Fuente: elaboración propia con MARM 2009c y MITYC 2007.

nen una influencia sobre el consumo de energía. Se pueden identificar cinco fuentes de agua posibles: subterránea, superficial, de trasvase, de desalación y de reutilización; y para técnicas de riego, se distinguen el riego por gravedad, por aspersión o locomotriz, y por goteo o localizado. En la Tabla 3-7, se muestra el consumo de energía por hectárea según la fuente de agua y según el tipo de regadío que se practica en la parcela.

Es evidente que el regadío con aguas desaladas, desalobradas o suministradas por trasvase, aunque tenga un coste energético muy elevado, no representa en absoluto al sector del regadío. Tal como se ha podido ver en el Gráfico 3-1, esas dos fuentes de agua representan menos del 4%. Es algo que se ha de notar sin embargo porque cada vez más se habla de fuentes alternativas de agua para la agricultura: el caso más discutido en su época y hoy aún ha sido el trasvase del Ebro del PHN 2000 frente a la desalación

TABLA 3-7. *Consumo energético unitario en el regadío según la fuente de agua y el tipo de regadío realizado*

	<i>Gravedad</i>	<i>Aspersión</i>	<i>Localizado</i>
Uso medio de agua	m³/ha		
	7.500	6.500	5.000
Consumo energético unitario	kWh/m³		
Agua Subterránea	0,15	0,49	0,68
Agua Superficial	0,02	0,29	0,28
Trasvase	1,20	1,44	1,38
Desalación	3,70	3,94	3,88
Reutilización	0,25	0,49	0,43

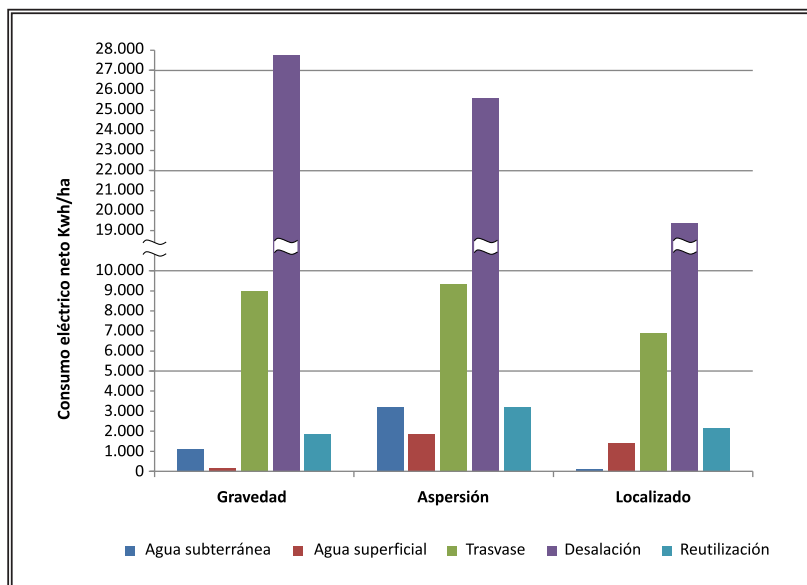
Fuente: elaboración propia a partir de Corominas (2009).

del Programa A.G.U.A. (Estevan, 2008; Ródenas y Guilla-món, 2005; Guilla-món 2007), debido entre otras al aumento de la superficie regada en España o la necesidad de movi-lizar fuentes no convencionales para afrontar períodos de sequía. Las únicas fuentes alternativas hoy en día son las citadas; pero el coste energético que requieren debe ser con-siderado antes de prever una ampliación a gran escala de esas fuentes de agua.

En la revisión del Plan Nacional de Regadío-Horizonte 2008, se prevé un aumento de la demanda de agua de 1.233 Mm³ para los nuevos regadíos, lo que va a aumentar la de-manda de agua (es decir el suministro bruto de agua) para el sector de la agricultura hasta unos 22.844 Mm³, conside-rando ahorros de agua de 2.613 Mm³.

En el Gráfico 3-3, podemos observar el consumo ener-gético a la hectárea en el riego según la técnica de riego y la fuente de agua. Esa estimación se ha realizado en tér-minos absolutos, es decir, teniendo en cuenta el gasto energético para el suministro de agua y para el riego en parcela así como el volumen de agua requerido según la técnica de riego.

GRÁFICO 3-3. *Consumo energético a la hectárea por tipo de riego y fuente de agua*



Fuente: elaboración propia a partir de Corominas (2009).

3.4.3. *Energía*

El análisis del agua empleada en la producción de energía se aborda en el apartado 7. *Generación de electricidad y consumo de agua*. El volumen de agua utilizada (el agua que después de haber sido servida, retorna al medioambiente) es muy variable según el tipo de central de generación, e incluso entre centrales del mismo tipo; razón por la cual en la literatura se dan rangos de consumo de agua por unidad de electricidad producida. Nuestras estimaciones se presentan en la Tabla 3-8, el valor estimado alcanza unos 8.760 Mm³, es decir el 25% del volumen total de agua utilizado en España; y eso, cuando se tiene en cuenta el volumen de agua necesario para el funcionamiento de las turbinas de

los grupos de potencia, salvo el volumen de agua utilizado en centrales hidroeléctricas (si se tuviera en cuenta, el volumen total alcanzaría unos 34.405 Mm³). El volumen de agua consumida (el agua que se evapora durante su utilización) solo alcanza unos 370 Mm³ y 1.630 Mm³ cuando se tiene en cuenta el volumen de agua consumida en centrales hidroeléctricas (los datos de consumo de agua en plantas hidroeléctricas ha sido revisado por estimaciones propias, véase apartado 6.3 Evaporación de agua en embalses para más información).

TABLA 3-8. *Volumen de agua utilizada y consumida en el sector de la energía*

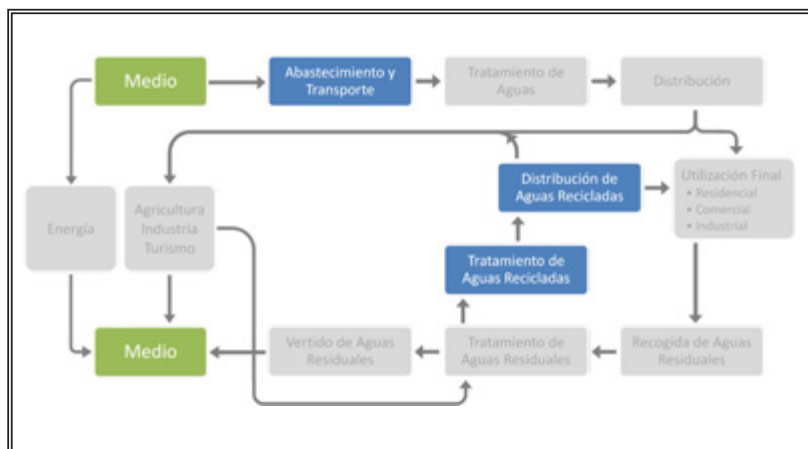
	<i>Agua utilizada Mm³</i>	<i>Agua consumida Mm³</i>	<i>Volumen total de agua Mm³</i>
Hidroeléctrica	24.390	1.260	25.650
Otras tecnologías	8.390	370	8.760
Total	32.780	1.630	34.410

Fuente: elaboración propia con datos de Río Carrillo y Frei, 2009; Linares y Sáenz de Miera, 2009.

La intensidad energética del bombeo para alimentar las necesidades de las centrales de generación se sitúa dentro del rango 0.09-0,30 kWh/m³ (se ha calculado el promedio de los consumos energéticos del bombeo de agua superficial y de agua subterránea realizado en el sector agrario).

4. ABASTECIMIENTO Y TRANSPORTE DEL AGUA

En ese apartado, se revisan las fuentes de agua empleadas en garantizar el suministro de agua necesario. Se identifican, como representa la Ilustración 4-1, las etapas del ciclo donde interviene necesariamente el transporte o tratamiento de un volumen de agua.

ILUSTRACIÓN 4-1. *Ciclo de utilización del agua en España*

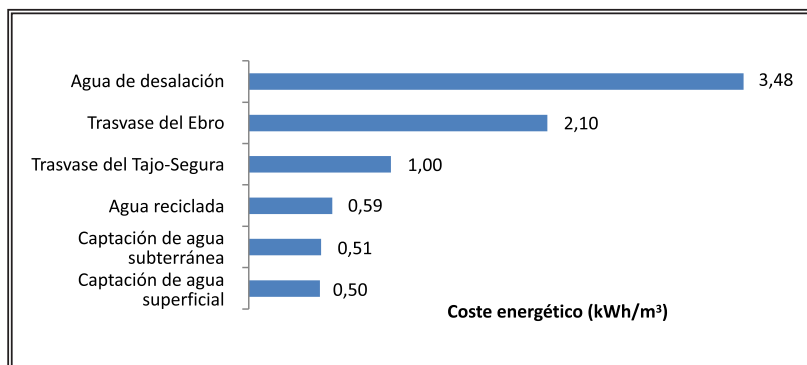
Fuente: elaboración propia.

4.1. Fuentes primarias de agua en España

Las fuentes de agua en España de las que se suministran los caudales servidos a través de las redes de distribución urbanas o periurbanas (4.300 Mm³ según INE 2007a y MARM 2009b) son de origen superficial, con un 55% del agua disponible potabilizada, y subterráneas, con un 29%. La desalación constituye un 16% del agua disponible para potabilización.

4.1.1. Intensidad energética de las fuentes primarias

En el Gráfico 4-1 se detalla la intensidad energética de cada tipo de aprovechamiento de agua en España. La intensidad energética mencionada tiene en cuenta solo la energía de la operación de que se trata, por lo que no está incluida la energía del ciclo de vida completo de la operación.

GRÁFICO 4-1. *Intensidad energética de las fuentes primarias de agua*

Fuente: elaboración propia con datos de Ayuntamiento Madrid 2010, CEC 2005, Bernat *et al.* 2009, Corominas 2009, Cramwinckel 2009, Eltawil 2008, Emasesa 2005, Guillamón 2007, GWI DesalData/IDA 2009, Murgui *et al.* 2009, Ródenas & Guillamón 2005, Sala 2007, SEE 2003a, SEE 2003b.

En el Gráfico 4-1, vemos que es el agua desalada obtenida a partir de agua de mar la que más energía necesita. Pero a la vez se aprecia que el trasvase del Ebro —que solo incluye el transporte de agua— ocuparía el segundo lugar en consumo de energía. La intensidad energética da cada fuente primaria de agua es el fruto de numerosas fuentes de datos. La intensidad del agua de desalación contiene datos tanto de agua de mar como de agua salobre y está calculada para lugares diversos como la Costa Brava, Cataluña, España en su conjunto, California o Egipto. La intensidad del agua reciclada surge de datos de España y de California, de empresas públicas de distribución y tratamiento de aguas y de estimaciones globales provenientes de literatura especializada. La intensidad del agua subterránea obedece a datos de España y de la Costa Brava y tiene en cuenta acuíferos locales y lejanos con diferentes alturas de bombeo. La intensidad del agua superficial se origina de datos de Es-

paña y de la Costa Brava y tiene en cuenta un transporte a corta o larga distancia. A continuación, se analiza cada una de las fuentes primarias de agua en España para el abastecimiento.

4.1.2. Aguas superficiales

Las aguas superficiales abastecen un 62% del agua consumida o utilizada en España. Las aguas superficiales son principalmente aprovechadas gracias a embalses que son numerosos en el territorio (más de 1.300). Esta cantidad suele justificarse por el hecho de que ha sido la manera de poder incrementar el aprovechamiento de aguas superficiales de un 9%, con el régimen natural, hasta un 38% hasta un 38% (Martínez-Cortina 2009). La capacidad de almacenamiento de agua superficial alcanzara unos 53.000 Mm³, pero solo una pequeña parte de este volumen de almacenamiento se emplea para abastecer las redes de distribución.

4.1.3. Aguas subterráneas

Las aguas subterráneas abastecen un 34% del agua consumida o utilizada en España. Es difícil estimar exactamente la capacidad de almacenamiento de los acuíferos pero se estima entre 150.000 Mm³ y 300.000 Mm³, mucho más importante que el disponible para de aguas superficiales (Martínez-Cortina 2009). Los recursos renovables de agua subterránea han sido estimados a 30.000 Mm³ al año (Martínez-Cortina 2009).

En un país como España donde las sequías son frecuentes, hay que notar que el almacenamiento de agua en muchos acuíferos suele ser más importante que la recarga, lo que permite —en caso de insuficiencia de aguas superficiales— poder contar con ese recurso de aguas subterráneas.

4.1.4. Desalación

El agua desalada abastece un 2% del agua consumida o utilizada en España. El empleo de la técnica de desalación en España está en alza: su capacidad de tratamiento anual en el año 2008 era de 1.830 Mm³ y su objetivo es alcanzar los 2.475 Mm³ tratados al año para los próximos 8 años (GWI DesalData/IDA 2009a). En la Tabla 4-1, se muestra la situación actual y futura de la capacidad de desalación en España, considerando las plantas que no están en funcionamiento todavía pero que están en construcción o bien están planificadas. Se pondrá en marcha a finales de 2009 en Barcelona la planta de desalación para la producción de agua potable más grande de Europa (Sant Joan Despí,

TABLA 4-1. *Capacidad de desalación en España, situación actual y planeada*

Tipo de agua	Plantas en funcionamiento		Plantas contratadas		Plantas planificadas	
	Volumen de salida m ³ /día	Número de plantas	Volumen de salida m ³ /día	Número de plantas	Volumen de salida m ³ /día	Número plantas
Aguas salobres	2.955.286	202	48.700	3	229.000	6
Salmueras	43.600	5	—	—	—	—
Dulces	21.800	7	—	—	—	—
De río	189.352	16	206.064	1	—	—
Marinas	2.163.751	189	864.818	18	620.300	14
Residuales	188.886	34	—	—	—	—
Total	5.562.675	453	1.119.582	22	849.300	20
Tipos de fuentes de agua: Agua pura o de grifo: TDS < 500 ppm Agua de río o agua salina de baja concentración: TDS 500ppm - < 3.000 ppm Agua salobre o interior: TDS 3.000 ppm - < 20.000 ppm Agua marina: TDS 20.000 ppm - 50.000 ppm Salmuera o agua marina concentrada: TDS > 50.000 ppm Agua residual: se refiere a cualquier agua que se considera residual, y varía entre aguas residuales municipales hasta una gran variedad de aguas de escorrentía de efluentes industriales y agrícolas. TDS (Total Dissolved Solids): Sólidos Disueltos Totales						

Fuente: elaboración propia con GWI DesalData/IDA 2009c.

206.000 m³/día) y Torrevieja tendrá la planta de desalación para la producción de agua para irrigación (Torrevieja Alicante/Murcia, 220.000m³/día) (GWI Desaldata/IDA 2009b).

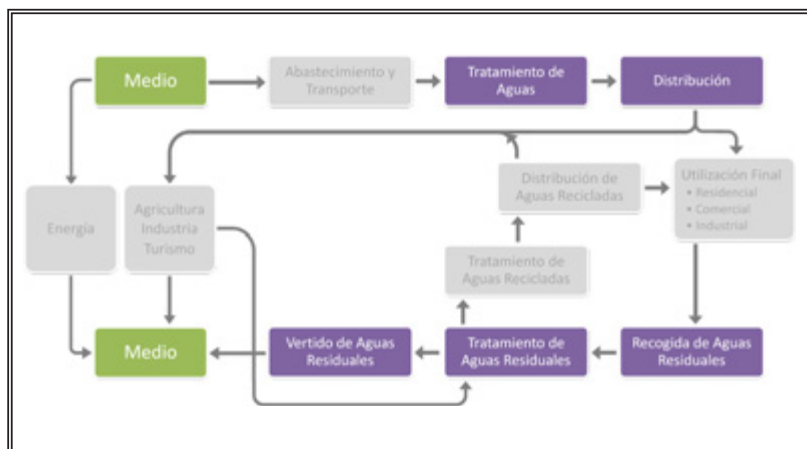
En España, la capacidad de tratamiento de agua alcanza un volumen anual de 1.830 Mm³, del cual un 53% proviene de plantas de desalación de aguas salobres interiores (con una capacidad anual de 971 Mm³), seguido de las plantas de aguas marinas de superficie o de profundidad, que representan el 39% de la capacidad de tratamiento total (con una capacidad anual de 711 Mm³).

4.1.5. Aguas recicladas

Tras su distribución, el agua es recogida, tratada, y una pequeña parte, 500 Mm³ (lo que equivale a un 11% del agua recogida) es reutilizada. Las aguas recicladas abastecen 1% del agua consumida o utilizada en España. Para que el agua reciclada pueda ser servida para usos urbanos, recreativos o ambientales (excepto para el consumo humano), es necesario incorporar en las centrales de depuración de agua una estación de tratamiento terciario, que no está presente en todas las estaciones de depuración de aguas residuales. Esto explica que el volumen total reciclado todavía no sea muy importante.

5. TRATAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DE AGUA Y AGUAS RESIDUALES

En ese apartado, se cubre el tratamiento del agua para su potabilización, después de su captación, así como el tratamiento de las aguas residuales, tras su recogida mediante la red de alcantarillado hasta la etapa de vertido de aguas residuales.

ILUSTRACIÓN 5-1. *Ciclo de utilización del agua en España*

Fuente: elaboración propia.

Antes de llegar al consumidor, un volumen de 4.525 Mm^3 (INE 2007a) de agua sufre un proceso de potabilización. Después de su utilización, del volumen total de agua que ha sido distribuida mediante la red de distribución pública, 5.200 Mm^3 de agua se recogen cada año para ser o no tratada en estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas (E.D.A.R.) o en otros tipos de plantas de tratamiento. Del volumen de agua recogido, 4.600 Mm^3 (un 88%) se tratan y del agua tratada, solo un 11% o 500 Mm^3 se redistribuye como agua reciclada, siendo el resto devuelto a las fuentes.

5.1. Tratamiento del agua

5.1.1. Potabilización de agua para uso doméstico

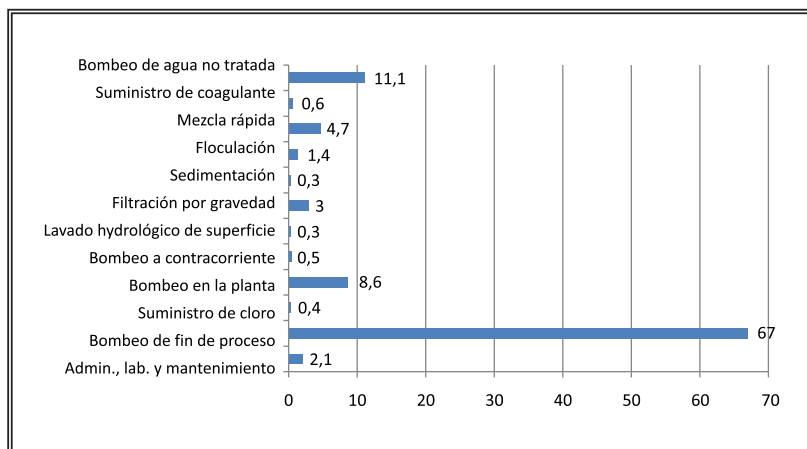
Antes de ser servida al consumidor final, el agua es sometida a un proceso de potabilización para cumplir con las normas de calidad bioquímica exigidas. Un volumen de

4.500 Mm³ de agua pasa anualmente por un proceso de potabilización, lo que supone un consumo de energía que puede variar entre 0,03 y 0,69 kWh/m³ (SEE 2003a, Emasesa 2005, CEC 2005), y se adopta una cifra de 0,13 kWh/m³ como valor medio que mejor representa el tratamiento de las aguas residuales en España. El rango de valores es muy amplio porque el gasto energético en plantas de tratamiento de agua está determinado por la calidad de la fuente primaria de agua. Murgui *et al.* 2009 dan valores para la ciudad de Valencia entre 0,15 kWh/m³ y 0,31 kWh/m³.

Muchos parámetros intervienen en la determinación del gasto energético de una planta de tratamiento de agua. El EPRI (*Electric Power Research Institute*) en EE.UU. estima que una planta de tratamiento de aguas superficiales con una capacidad de 40.000 m³/día tiene un gasto eléctrico de 0,37 kWh/m³; en el caso de que se utilice aguas subterráneas, el gasto eléctrico es mayor de un 30%, es decir unos 0,48 kWh/m³; la media nacional de EE.UU. se sitúa entre 0,18 y 0,48 kWh/m³; pero se ha de notar que el 80% o más del gasto eléctrico es utilizado para el transporte del agua (WEF 2009). En el Gráfico 5-1, presentamos los resultados de un análisis de una planta típica de tratamiento de aguas superficiales donde aparece la importancia relativa de las unidades de proceso en el gasto energético total de la planta. La sucesión de las etapas mencionadas sigue el proceso tecnológico real.

Como se ve en el Gráfico 5-1, las etapas que mayor consumo energético tienen son las en que interviene el bombeo.

El bombeo del agua no tratada o bruta depende mayoritariamente de la fuente de agua (las aguas subterráneas requieren mayor gasto energético que las superficiales) y de la elevación piezométrica entre la fuente y la planta.

GRÁFICO 5-1. *Porcentaje del consumo energético total de la planta*

Fuente: elaboración propia con datos de EPRI 1994 (citado por WEF 2009).

La etapa que más energía requiere es el bombeo de fin de proceso. Cuando el agua ya está tratada, se bombea fuera de la planta a depósitos subterráneos de almacenamiento, dentro de la red de distribución de agua. De nuevo, dependiendo de la topografía de la zona y de la ubicación de la planta, puede haber variaciones en el gasto energético de esta etapa, pero queda, no obstante, como la etapa la más consumidora de energía.

5.1.2. *Desalación*

El proceso de desalación tiene como objetivo convertir aguas con alto contenido en sales en un recurso hídrico perfectamente aprovechable para el consumo humano o usos técnicos como el riego o procesos industriales.

Existe una gran variedad en las tecnologías utilizadas para efectuar la desalación, las técnicas de osmosis inversa

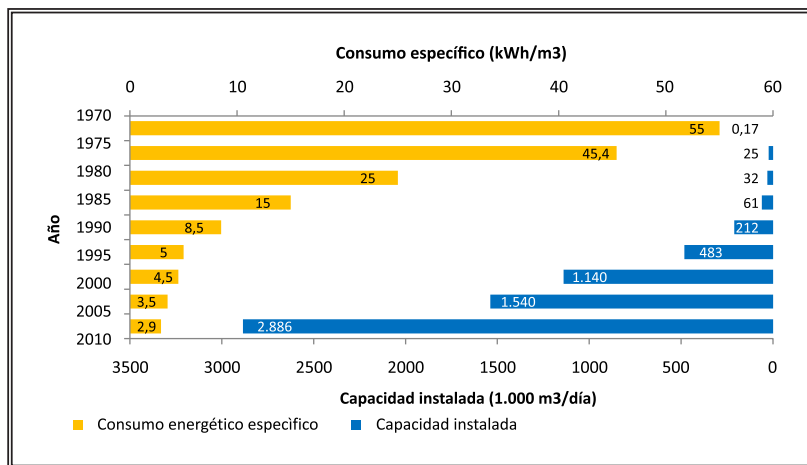
(RO) y Multi-stage flash (MSF) son las dos técnicas que hoy en día más se utilizan. La elección de una u otra de esas tecnologías se debe hacer teniendo en cuenta por un lado parámetros locales (coste de la energía, tipo de fuente de energía disponible) y por otro lado, parámetros del agua que se debe tratar (contenido en sales, calidad del agua requerida) (Bernat *et al.* 2009 y Fritzmann *et al.* 2007).

La primera ventaja de la desalación es que aumenta el volumen del abastecimiento de agua potable utilizando agua de calidad baja. Pero el desafío más significativo de la desalación es que se trata de una fuente de agua energéticamente muy intensiva, y el uso más elevado de la desalación va a coincidir con periodos estivales cuando la producción hidrológica será la más baja (CEC 2005).

Las plantas de desalación de agua tienen un consumo energético por metro cúbico más elevado que otras fuentes de abastecimiento de agua (básicamente, aguas subterráneas y superficiales). Aunque la tendencia a la disminución de su intensidad energética es evidente, se sabe sin embargo que esta disminución está acotada por el propio coste energético intrínseco a la separación de las sales disueltas y del agua pura. En el Gráfico 5-2, se ve como ha bajado la intensidad energética de la desalación de agua a lo largo del tiempo y —según las estimaciones de los autores— que en el año 2010, alcanzaría unos $2,9 \text{ kWh/m}^3$ (Torres Corral 2005).

Aunque esta fuente data del año 2005, sugiere una bajada del coste energético de desalación muy notable desde hace 40 años, en los principios de la historia de la desalación en España (la primera planta se instaló en el año 1965 en Lanzarote). Hoy en día, hay plantas que tienen un consumo energético aún menos elevado que $2,9 \text{ kWh/m}^3$ (la planta El Atabal cerca de Málaga utiliza agua salobre y tiene una intensidad energética de unos $0,72 \text{ kWh/m}^3$).

GRÁFICO 5-2. *Evolución de la intensidad energética de la desalación de agua frente a la evolución de la capacidad instalada en España*



Fuente: elaboración propia con datos de Torres Corral 2005.

Eso nos indica que el consumo energético por metro cúbico de agua desalada depende del origen del agua que se utiliza en la planta. Las plantas que utilizan aguas salobres interiores ($3.000 < \text{TDS} < 20.000$ ppm), tienen un consumo energético sensiblemente menos elevado ($0,72 - 2,58$ kWh/m³) (GWI DesalData/IDA 2009c, CEC 2005, Eltawil 2008) que plantas que utilizan agua salada del mar de superficie o de profundidad ($20.000 < \text{TDS} < 50.000$ ppm), que tienen el consumo energético lo más elevado ($1,25 - 4,85$ kWh/m³) (GWI DesalData/IDA 2009c, CEC 2005, Sala 2007, Bernat *et al.* 2009, Eltawil 2008).

**Box 01 DEIONIZACIÓN CAPACITIVA (CDI),
UNA NUEVA FORMA DE DESALAR EL AGUA**

La deionización capacitiva (Anderson *et al.* 2010) es una tecnología no madura todavía pero que debería permitir recuperar la energía liberada por el movimiento de los iones durante el proceso de desalación. Tiene la doble ventaja que podría ayudar a acercarse del consumo mínimo de energía que dicta la termodinámica.

Las tecnologías empleadas en la desalación de agua se dividen en dos grupos. Las que utilizan sistemas de separación por membrana: ósmosis inversa (RO) o electrodiálisis (ED); y las que utilizan la separación térmica: destilación multi-etapas flash (MSF), destilación multi-efecto (MED) o compresión mecánica de vapor (MVC). Sin embargo, y la MSF son las tecnologías más difundidas en el mundo (90% de los casos, Anderson *et al.* 2010) para desalar agua de mar.

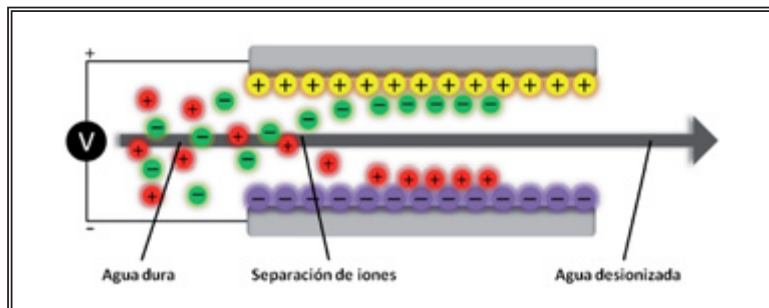
El reto mayor de la desalación de agua es su componente energética actual: 3.26 - 4.85 kWh/m³ para la RO (GWI DesalData/IDA 2009c) y 4 kWh/m³ para la MSF (Anderson *et al.* 2010). El mínimo termodinámico indica que el trabajo mínimo necesario está situado alrededor de 1,1 kWh/m³ para agua de mar (35.000 ppm) y 0,12 kWh/m³ para un agua salobre (4.000 ppm), dependiendo de la posible recuperación de energía (Anderson *et al.* 2010).

La tecnología más cercana de la deionización capacitiva es la electrodiálisis para la desalación de agua salobre. El proceso de desalación consiste en el movimiento de iones en un campo de potencial a lo largo de membranas poliméricas sucesivas de intercambio aniónico y catiónico. La limitación de este sistema es la relación directa entre la salinidad del agua y el consumo energético. Por lo cual, la electrodiálisis se utiliza más eficientemente cuando la salinidad del agua es inferior a 6.000 ppm (Anderson *et al.* 2010). También, a salinidad baja se requiere mayor superficie de membranas; y una salinidad inferior a 400 ppm da problemas de conductividad.

La deionización capacitiva sigue el mismo proceso químico que la electrodiálisis sin que intervengan membranas; es por lo tanto un proceso de baja presión a menor coste. La deionización capacitiva es un proceso

electroquímico de absorción de iones en una doble capa formada a los electrodos gracias a una diferencia de potencial. Por analogía, el proceso de deionización funciona como un condensador de capacidad (Figura 5-1). En ésta figura se muestra el proceso de separación de iones cargados y materiales por dos electrodos cargados.

FIGURA 5-1. *Esquema de la deionización capacitiva*



Fuente: elaboración propia a partir de Anderson et al. 2010.

El sistema está entonces regido por la siguiente ecuación:

$$C_{eq} = \epsilon_r \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$$

Donde C es la capacidad (en faradios); A es la superficie de cada lámina conductora (en m^2); ϵ_r es la permisividad estática relativa o constante dieléctrica del material entre las láminas conductoras; ϵ_0 es la permisividad del espacio libre ($8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m); y d es la distancia entre las dos láminas conductoras (en m).

Desde el punto de vista energético, la energía acumulada resultante del proceso de deionización del agua se calcula por:

$$E_{acumulada} = \frac{1}{2} CV^2$$

Donde E es la energía (en julios); C es la capacidad (en faradios); y V la diferencia de potencial (en Voltios).

La energía necesaria para llevar a cabo el proceso es la diferencia entre la energía necesaria durante la carga del condensador de capacidad (fase de deionización) y la energía recuperada durante la descarga del condensador de capacidad. La ventaja de esta nueva tecnología es poder recuperar la energía liberada del proceso de deionización del agua. Si se utilizara un súper condensador de capacidad (Miller & Burke 2008), se calcula una eficiencia que puede llegar hasta el 96%. Una planta piloto ha demostrado un consumo de energía de $0,6 \text{ kWh/m}^3$ (Welgemoed & Schutte 2005).

Para sacar provecho del almacenamiento de la energía en el condensador de capacidad después de la deionización, es necesario dejarlo descargarse. El sistema que propone Anderson *et al.* es la combinación de dos unidades en paralelo, de tal manera que cuando una se descarga, la otra pueda utilizar la energía liberada para el proceso de tratamiento de agua.

Para disolver 38 kg de sales en 1 m^3 de agua (contenido medio de sales en el agua del mar), se desprende una cantidad de calor de unos 670,8 kcal, lo que equivale a unos $0,78 \text{ kWh}$. Si el proceso fuese reversible, podríamos gastar la misma energía para realizar el proceso inverso. No obstante, parece evidente que el proceso no lo es, lo que implica considerar un factor multiplicativo (consideremos un factor 3 por ejemplo), tendríamos en consecuencia un consumo energético específico de al menos $2,37 \text{ kWh/m}^3$ para el proceso de osmosis inversa. Luego habría que considerar todos los procesos técnicos necesarios dentro de la propia planta de desalación (bombeo, tratamiento, lavado de las instalaciones, pérdidas de carga...), llegaríamos a un consumo energético situado entre 2,7 y $2,9 \text{ kWh/m}^3$. Valores experimentales entre $1,6$ y 2 kWh/m^3 ya se han conseguido (Fritzmann *et al.* 2007, Estevan & García-Sánchez 2007). Sin embargo, si se descubre otro proceso tecnológico más eficaz, tal como se experimentó en la transición de la desalación por destilación y a la ósmosis in-

versa, puede que conozcamos un nuevo descenso del consumo energético de la desalación de agua, pero siempre se estará por encima de mínimo teórico que nos dicta la termodinámica (caso de un proceso reversible) de 0,78 kWh/m³ (Martín & Sánchez 2005).

De acuerdo con las eficiencias reales, la energía que se ha necesitado al año para tratar el volumen de agua desalada en el año 2008 de 694 Mm³ (MARM 2009, datos del CEDEX) ha sido de 2.276 GWh. Las proyecciones de producción de agua desalada para el año 2009 del CEDEX son de 1.241 Mm³, el consumo energético asociado sería de 4.070 GWh (sin embargo, no hemos incluido estas proyecciones para nuestro balance final).

En España, se vivió un fuerte debate entre los defensores de los trasvases con los defensores de la desalación desde el año 2000. Con el Programa A.G.U.A., aprobado por el Gobierno de 2004, se sustituyó el proyecto de trasvase del Ebro que proponía el Plan Hidrológico Nacional (PHN) de 2000. Aunque en ese momento no hubo un real debate científico relativo a la elección de la mejor opción (es más, bajo el pretexto de una “nueva cultura del agua”, se descartó cualquier nueva grande construcción hidráulica y se apoyó el Programa A.G.U.A., sin que fuera sometido oficialmente a evaluación ambiental estratégica), podemos aportar unas aclaraciones respecto a las ventajas y desventajas fundamentales de una y otra opción. Aunque resulta difícil establecer un esquema comparativo exhaustivo de ambas tecnologías, damos en la Tabla 5-1 una aproximación relevante de la situación tal como era cuando se descartó la opción del trasvase del Ebro.

TABLA 5-1. *Comparación Trasvase - Desalación*

<i>Aspecto considerado</i>	<i>Trasvase</i>	<i>Desalación</i>
Vida útil	+ 50 años	15 años
Funcionamiento	sencillo y robusto	complejo
Tecnología	contrastada	experimental
altimetría	alta cota (500 msnm)	nivel del mar
Energía consumida	2 kWh/m ³ (Ebro) 1 kWh/m ³ (Tajo-Segura)	5 kWh/m ³ + bombeos
Estructura del precio	Inversión obra financiable	Gastos de explotación
Coste	0,10 - 0,30 €/m ³	0,60 €/m ³ + bombeos
Calidad del agua	aceptable	desequilibrada
Impacto ambiental	aceptable	gran impacto
Garantía	dependencia climática	materia prima inagotable
Beneficio ambiental	recuperación hídrica	ninguno

Fuente: Ródenas Cañada & Guillamón Álvarez 2005.

5.2. Distribución del agua

Una vez que el agua ha sido tratada para cumplir con los criterios de calidad requeridos, tiene que ser servida a los consumidores. La distribución del agua en principio no tiene un gasto energético muy elevado, ya que se trata de llevar el agua una vez tratada desde su lugar de almacenamiento (que suele estar cerca de la planta de tratamiento), hasta los puntos de utilización o consumo de agua. Existen amplias variaciones, sin embargo, en España debido a la gran variación de alturas de elevaciones piezométricas.

Las investigaciones realizadas en varias partes de la península nos han llevado a estimar el gasto energético del transporte del agua al rango de 0,064 kWh/m³ hasta 0,32 kWh/m³ (SEE 2003a, Emasesa 2005, CEC 2005), y se ha decidido elegir el valor de 0,29 kWh/m³ como valor medio. El rango es bastante amplio pues existe una gran variación según la elevación del agua necesaria para su distribución. En el caso de la distribución de agua en Sevilla por la Empresa Municipal de Abastecimiento y Saneamiento de Aguas de

Sevilla S.A. (Emasesa), se refiere un consumo energético para distribución situado en un rango de 0,064 hasta 0,127 kWh/m³.

5.3. Tratamiento de las aguas residuales

El tratamiento del agua consiste en alterar sus características bioquímicas de tal manera que tras completar el proceso puedan bien ser reutilizadas, o bien ser devueltas al medioambiente en condiciones adecuadas.

Ha habido en España esfuerzos continuos de protección de recursos, y de control de vertidos,... con el fin de promover la conservación, la protección y la mejora de la calidad del recurso natural que constituyen las aguas (Tratado de la Unión Europea, Art. 130-R). Para cumplir con la Directiva 91/271/CEE sobre tratamiento de aguas residuales urbanas, se llevó a cabo en España el Plan Nacional de Saneamiento y Depuración 1995-2005 (en adelante PNSD). El objetivo de esa Directiva era adecuar los sistemas de depuración de todos los núcleos urbanos de más de 2.000 habitantes equivalentes. El PNSD permitió situar un 77% de los núcleos en conformidad con la Directiva (que alcanza el 91% si se contabiliza infraestructuras que están en construcción). Con el fin de seguir en el desarrollo de las infraestructuras de saneamiento y depuración, el PNSD 2007-2015 aporta medidas a los objetivos no alcanzados en el plan anterior, al igual que a las nuevas necesidades planteadas en la Directiva Marco del Agua y por el Programa AGUA (MARM 2007a).

5.3.1. La recogida de las aguas residuales

Las aguas residuales se transportan mediante dos modalidades distintas:

Red de alcantarillado unitaria: sistema de canalización de las aguas residuales dimensionada para absorber la totalidad de las aguas residuales.

Red de alcantarillado separativa: sistema de canalización de las aguas residuales constituido por dos redes independientes, la primera de las redes está dedicada a evacuar caudales de agua conocidos que provienen del agua distribuida por la red de distribución pública; la segunda está dedicada a evacuar caudales de agua de lluvia, que son difíciles de estimar.

5.3.2. Aguas tratadas en estación de depuración

El volumen de agua tratado alcanza unos 4.500 Mm³ (INE 2007a) y supone un consumo de energía entre 0,49 y 0,72 kWh/m³ (SEE 2003a, Emasesa 2005, Cramwinckel 2009, CEC 2005), y se adopta un valor medio de 0,66 kWh/m³.

Unos de los objetivos del PNSD 2007-2015 fue incorporar en la mayor medida posible la reutilización de agua depuradas. Existe actualmente en España unas 2.500 estaciones de depuración de aguas residuales (EDAR), que tratan más de 3.375 Mm³ anuales (MARM 2007a).

El volumen restante (1.125 Mm³), si el volumen de 4.500 Mm³ es correcto, debería representar el agua tratada en estaciones de reciclaje de aguas residuales (ERAR) y estaciones privadas.

Según la última encuesta procesada por la Asociación Española de Abastecimiento de Agua y Saneamiento en el año 2002, el porcentaje de la población de derecho que cuenta con tratamiento de las aguas residuales es de orden del 60% (AEAS 2002).

Los tratamientos que permiten alcanzar los estándares de calidad exigidos se orientan a mejorar parámetros microbiológicos, parámetros físico-químicos, y parámetros específicos para usos concretos. Comprenden el tratamiento primario (consistente en eliminar materiales sólidos y flotantes) y el secundario (que persigue eliminar la materia orgánica, nutrientes y sólidos inorgánicos disueltos que están bajo forma coloidal y/o en suspensión), ambos realizados en las estaciones de tratamiento de aguas residuales. Un tratamiento terciario puede tener lugar en la misma planta de tratamiento, y consiste en devolver un agua con calidad para poder estar reutilizada (no apta para el consumo humano), y el proceso consta en procesos de filtración, adsorción, traslación, aireación...

Según (AEAS 2002), un 5% del volumen de agua tratado solo recibe un tratamiento primario, el 86% de este volumen recibe además un tratamiento secundario y el 9% restante recibe un tratamiento terciario además del primario y del secundario.

En la Tabla 5-2, damos una estimación del consumo energético de las etapas de pre tratamiento y tratamiento primario en una planta de tratamiento de aguas residuales tipo de capacidad diaria de unos 190 Ml/día (2.200 l/s) con recuperación de energía (por combustión de biogás).

Los datos ofrecidos en la Tabla 5-2 son aproximados, ya que como ya hemos indicado, cada planta de tratamiento es única, el agua de entrada tendrá características siempre diferentes. El Sistema de Saneamiento Integral de Madrid está compuesto de siete plantas de tratamiento de aguas residuales que tienen un caudal medio de 213.000 m³/día y un consumo eléctrico unitario neto incluido en el rango 0,19-0,36 kWh/m³ (Ayuntamiento Madrid 2010). Emasesa menciona para Sevilla un consumo eléctrico unitario neto de

TABLA 5-2. Consumo eléctrico de una planta de tratamiento de aguas residuales tipo (190 MI/día)

Etapa	Lecho bacteriano		Lados activos		Tratamiento terciario		Tratamiento terciario + Nitrificación	
	Consumo eléctrico kWh/día		Consumo eléctrico kWh/día		Consumo eléctrico kWh/día		Consumo eléctrico kWh/día	
Tratamiento primario								
Bombeo de aguas residuales	6.030		6.030		6.030		6.030	
Cribado	6		6		6		6	
Desarenación aireada	600		600		600		600	
Clarificación primaria	776		776		776		776	
lecho bacteriano (con bombeo de recirculación)	11.551		no		no		no	
Tratamiento secundario								
Aeración (aire difuso)	no		26.600		26.600		26.600	
Bombeo de retorno de lodos	no		1.627		1.627		1.952	
Clarificación secundaria	776		776		776		776	
Espesamiento por gravedad	75		75		75		75	
Flotación de aire disuelto	6.257		6.257		7.008		7.008	
Digestión aerobia	n.d.		n.d.		n.d.		n.d.	
Digestión anaerobia	5.000		6.500		6.500		7.800	
Prensa de lodos	1.164		1.164		1.385		1.385	
Cloración	133		133		133		133	
Tratamiento terciario								
Aditivos químicos	no		no		2.187		2.187	
Bombeo material orgánico filtrante (filter feeder pumping)	no		no		3.440		3.440	
Filtración	no		no		1.679		1.679	
Nitrificación biológica	no		no		no		16.936	

TABLA 5-2. Consumo eléctrico de una planta de tratamiento de aguas residuales tipo (190 MI/día)
 (Continuación)

Etapa	Lecho bacteriano	Lados activos	Tratamiento terciario	Tratamiento terciario + Nitrificación
	Consumo eléctrico kWh/día	Consumo eléctrico kWh/día	Consumo eléctrico kWh/día	Consumo eléctrico kWh/día
Gastos internos				
Alumbrado y Edificios	2,000	2,000	2,000	2,000
Total	34.368	52.544	60.822	79.383
Consumo eléctrico total (kWh/m ³)	0,18	0,28	0,32	0,42
Recuperación de energía	0,07	0,09	0,09	0,09
Consumo eléctrico neto unitario (kWh/m ³)	0,11	0,18	0,23	0,33

Fuente: elaboración propia con datos de WEF 2009.

0,46 kWh/m³ para el 2004 y 0,51 kWh/m³ para el 2005. Murgui *et al.* 2009 mencionan para Valencia valores entre 0,10 kWh/m³ y 0,54 kWh/m³ y para el tratamiento terciario, valores de 0,20 kWh/m³.

5.3.3. Aguas destinadas a ser recicladas

En España, se producen 501 Mm³ (INE 2007a) de agua reciclada al año. El uso principal de aguas recicladas es el sector de la agricultura para el 83% de los usos, seguido del riego de los jardines (AEAS 2002).

El Real Decreto 1620/2007 dicta en España los niveles de calidad de agua reciclada según el sector en que se pueden utilizar aguas recicladas. Tras su tratamiento, las aguas recicladas pueden utilizarse para usos urbanos (no para el consumo humano), agrícolas, industriales, recreativos y ambientales. Según el tipo de uso, el agua reciclada deberá cumplir con normas de calidad específicas.

Para el uso de agua reciclada, es preciso realizar un tratamiento terciario (Bernat *et al.* 2009). El tratamiento terciario con el fin de llevar a cabo una regeneración del agua eficiente puede ser de tres tipos distintos: tratamiento convencional, tratamiento avanzado y tratamiento por membrana. El convencional es el más usual como tratamiento de aguas procedentes del tratamiento secundario.

5.3.4. Aguas aptas para ser vertidas en las fuentes

El vertido puede ser de origen industrial, urbano o ganadero y agrario. El vertido industrial recoge aguas de las empresas químicas u otras que se tienen que deshacer de aguas altamente contaminadas (por ejemplo en metales pe-

sados). Las industrias suelen tener su propio sistema de tratamiento de aguas residuales, indispensable antes de que las aguas sean vertidas al colector urbano, debido a su alto nivel de contaminación.

El vertido urbano recoge —mediante el sistema de alcantarillado— las aguas residuales generadas en el ámbito urbano, es decir, que contienen materias fecales, así como todos los materiales que las aguas de lluvia pueden arrastrar (hidrocarburos, plomo, ácidos, ...). En España, en el año 2007, se recogieron 5.200 Mm³ de agua mediante el sistema de alcantarillado. De ese volumen, se trató un 88% en centrales de tratamiento de aguas residuales (INE 2007a), descontando el volumen de agua reutilizado (501 Mm³ según INE 2007a), el volumen de agua vertido sería unos 4.069 Mm³ al año. El consumo energético de esa última etapa del ciclo integral de utilización de agua es mínimo, ya que en muchos casos, el agua se vierte por gravedad, se sitúa en el rango 0-0,11 kWh/m³ (CEC 2005).

El vertido ganadero y agrario recoge aguas contaminadas por pesticidas, fertilizantes y restos orgánicos. El 65% de los 60.000 vertidos directos que hay en España son responsabilidad de la ganadería. Esos vertidos se hacen de manera directa, es decir sin pasar por la red de alcantarillado urbano, por lo cual, son más difíciles de controlar y depurar (Hispagua 2006).

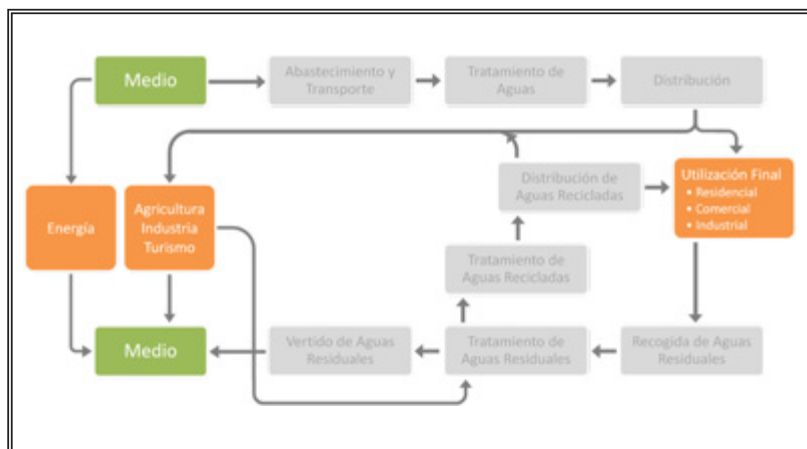
5.4. Un enfoque tri-etápico para lograr mejoras de eficiencia (GWRC, 2008)

El enfoque de GWRC (2008) para reducir el consumo de energía del sector del agua y saneamiento se compone de tres etapas:

- Etapa 1: Implementación de tecnologías disponibles —“recolectando los frutos más accesibles”. Se trata en este caso de aplicar sistemas y tecnologías que ya tienen un desarrollo comercial y de escala, por lo que su desarrollo práctico y su coste no deben ser obstáculos. Es imprescindible identificarlas en cada sistema de agua, mediante auditorías y estudios de benchmarking.
- Etapa 2. Reducir el consumo de energía en un 20%, mediante la optimización y la innovación. En esta etapa se incluyen las innovaciones que destacan por su aplicabilidad y coste obtenidas o identificadas en proyectos de I+D+i. Conllevan en cierta forma una componente de innovación, pero siempre sobre una base de resultados ya probados mediante proyectos piloto y de demostración.
- Etapa 3. Reducciones de energía del 80%, mediante “cambios de paradigma”. Se trata de pensar en nuevos sistemas (de vacío, separación en las fuentes de los vertidos), aprovechamiento de deshechos (fósforo y nitrógeno), biocombustibles, uso de nanotecnología basado en membranas. Se podrían aprovechar eventos emblemáticos como unos Juegos Olímpicos para desarrollar, implementar y mostrar la aplicación de nuevos conceptos.

6. EFICIENCIA DEL USO FINAL DEL AGUA

En este capítulo, se proporciona información sobre las posibles mejoras del uso final del agua en los sectores representados en la Ilustración 6-1. Los apartados siguientes contienen información relevante sobre el manejo del agua, y siempre que sea posible, se proponen soluciones viables.

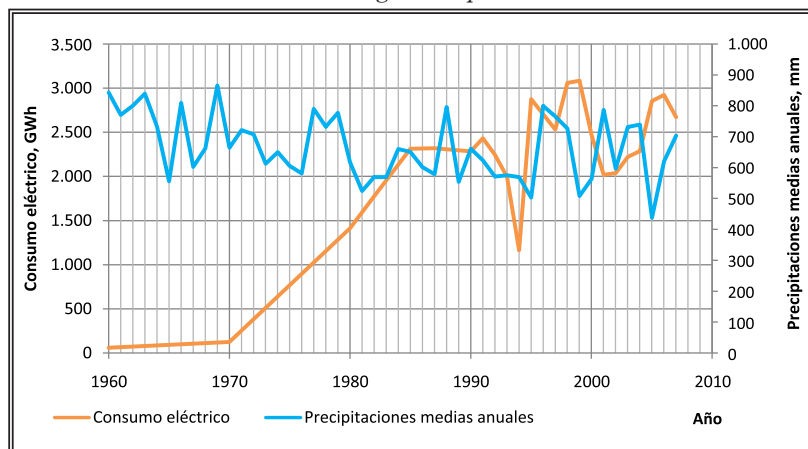
ILUSTRACIÓN 6-1. *Ciclo de utilización del agua en España*

Fuente: elaboración propia.

6.1. Eficiencia del uso del agua y de la energía en el regadío

La agricultura ha cambiado significativamente en los últimos años, pero ha sido en los últimos 40 años cuándo el nexo agua-energía se ha alterado dramáticamente. Tal como se aprecia en el Gráfico 6-1: Evolución del consumo eléctrico neto en el regadío español, la tendencia general del consumo de electricidad en el regadío ha sido creciente desde los años 60 hasta el presente. Las desviaciones en torno a la tendencia creciente pueden explicarse con las variaciones de precipitaciones en España. Disponemos de los datos de precipitaciones medias anuales entre los años 1941 y 2009 (MARM 2010). Nos permiten destacar una relación inversa entre el gasto eléctrico en el regadío y el volumen de agua verde (agua de lluvia). Es decir que en periodos de menor disponibilidad en recurso agua, el gasto eléctrico es mayor, ya que el uso de agua de agua azul es mayor (agua suministrada por sistemas de regadío), y probablemente

GRÁFICO 6-1. *Evolución del consumo eléctrico neto en el regadío español*



Fuente: elaboración propia con datos de MITYC 1960 hasta 2007, MARM 2010.

debido a un uso mayor de las aguas subterráneas, que tienen un gasto energético unitario más elevado que las aguas superficiales ($0,15\text{-}0,50 \text{ kWh/m}^3$ frente a $0,02\text{-}0,15 \text{ kWh/m}^3$, respectivamente). La sequía que tuvo lugar entre el año 1990 y 1995 (aunque no se ha analizado con el detalle espacio-temporal que exigiría un estudio riguroso, los datos meteorológicos en esos años) parece confirmar esta aserción.

Como se prevé un aumento significativo de la demanda de energía y de agua para los años futuros (Linares *et al.* 2009), es lógico pensar que el sector del regadío también tiene que llevar a cabo actuaciones en el sistema de uso de agua para mejorar su eficiencia energética. Objetivo que se establece como prioritario en la Estrategia Nacional para la Modernización Sostenible de los Regadíos, Horizonte 2015.

Hoy en día, en el debate sobre ahorros posibles tanto en agua como en energía en el sector del regadío, se puede destacar dos posiciones algo enfrentadas:

- **La modernización de los regadíos.** Desde su entrada en la Unión Europea en 1986, España ha visto cómo su agricultura ha ido evolucionando en la línea de la intensificación. En el pasado se tenía una visión diferente de la agricultura, pues el factor limitante era el agua y la tierra: la expansión del regadío y su posterior modernización pretendieron mejorar la eficiencia productiva en términos de valor cosecha por unidad de tierra y de agua. La modernización del regadío se justificó para lograr tanto objetivos de producción como de mejoras en la utilización de los recursos (agua y energía). Hoy en día, el objetivo de la productividad ha sido ya alcanzado pero con la creciente demanda de energía, el objetivo principal ahora es el ahorro de energía que como veremos a continuación es indisoluble de la mejora del uso del agua. La modernización de los regadíos en España, centrada en reducir el uso del agua, ha conllevado un aumento del consumo eléctrico. Entre 1950-2007, la superficie de regadíos se ha multiplicado por 2,5 y los consumos energéticos por 19. Durante el periodo 2002-2009, 45.000 ha/año de riego por gravedad han sido sustituidas por riego localizado (67.000 ha/año).
- **Las tarifas eléctricas.** En el año 1997 comenzó el proceso de liberalización del sector de la electricidad. Para los agricultores, esto les permitió poder acudir al mercado libre para contratar una u otra empresa comercializadora. En julio del 2008 desapareció la tarifa R de riegos agrícolas regulada por el Ministerio de Industria, lo que obligó a las comunidades de regantes o sus entidades colectivas de riego a acudir al mercado libre y negociar el contrato más interesante para sus necesidades con una empresa comercializadora. Para aquéllas, se produjo un incremento notable de los precios de la energía, aunque el objetivo anunciado con la liberalización del mercado de la electricidad era una disminución de los precios de la electricidad.

The figure consists of two line graphs side-by-side, both sharing the same x-axis representing time from 1985 to 1999. The left graph plots the monthly price of electricity (€/kWh mes) on the left y-axis (0 to 400) and the IPC on the right y-axis (0 to 14). The right graph plots the medium-term price of electricity (€/kWh medio) on the left y-axis (0.0 to 9.0) and the IPC on the right y-axis (0 to 14). Both graphs show a significant increase in electricity prices starting around 1997, while the IPC remains relatively stable.

Left Graph: Precio de Potencia €/kWh mes and IPC

Año	Precio de Potencia €/kWh mes	IPC
ene-85	25	6.5
ene-87	25	6.5
ene-89	200	6.5
ene-91	220	6.5
ene-93	180	6.5
ene-95	180	6.5
ene-97	100	6.5
ene-99	100	6.5
ene-01	150	6.5
ene-03	150	6.5
ene-05	150	6.5
ene-07	150	6.5
ene-09	150	6.5
ene-11	150	6.5
ene-13	150	6.5
ene-15	150	6.5
ene-17	150	6.5
ene-19	150	6.5
ene-21	150	6.5
ene-23	150	6.5
ene-25	150	6.5
ene-27	150	6.5
ene-29	150	6.5
ene-31	150	6.5
ene-33	150	6.5
ene-35	150	6.5
ene-37	150	6.5
ene-39	150	6.5
ene-41	150	6.5
ene-43	150	6.5
ene-45	150	6.5
ene-47	150	6.5
ene-49	150	6.5
ene-51	150	6.5
ene-53	150	6.5
ene-55	150	6.5
ene-57	150	6.5
ene-59	150	6.5
ene-61	150	6.5
ene-63	150	6.5
ene-65	150	6.5
ene-67	150	6.5
ene-69	150	6.5
ene-71	150	6.5
ene-73	150	6.5
ene-75	150	6.5
ene-77	150	6.5
ene-79	150	6.5
ene-81	150	6.5
ene-83	150	6.5
ene-85	150	6.5
ene-87	150	6.5
ene-89	150	6.5
ene-91	150	6.5
ene-93	150	6.5
ene-95	150	6.5
ene-97	150	6.5
ene-99	150	6.5
ene-01	150	6.5
ene-03	150	6.5
ene-05	150	6.5
ene-07	150	6.5
ene-09	150	6.5
ene-11	150	6.5
ene-13	150	6.5
ene-15	150	6.5
ene-17	150	6.5
ene-19	150	6.5
ene-21	150	6.5
ene-23	150	6.5
ene-25	150	6.5
ene-27	150	6.5
ene-29	150	6.5
ene-31	150	6.5
ene-33	150	6.5
ene-35	150	6.5
ene-37	150	6.5
ene-39	150	6.5
ene-41	150	6.5
ene-43	150	6.5
ene-45	150	6.5
ene-47	150	6.5
ene-49	150	6.5
ene-51	150	6.5
ene-53	150	6.5
ene-55	150	6.5
ene-57	150	6.5
ene-59	150	6.5
ene-61	150	6.5
ene-63	150	6.5
ene-65	150	6.5
ene-67	150	6.5
ene-69	150	6.5
ene-71	150	6.5
ene-73	150	6.5
ene-75	150	6.5
ene-77	150	6.5
ene-79	150	6.5
ene-81	150	6.5
ene-83	150	6.5
ene-85	150	6.5
ene-87	150	6.5
ene-89	150	6.5
ene-91	150	6.5
ene-93	150	6.5
ene-95	150	6.5
ene-97	150	6.5
ene-99	150	6.5
ene-01	150	6.5
ene-03	150	6.5
ene-05	150	6.5
ene-07	150	6.5
ene-09	150	6.5
ene-11	150	6.5
ene-13	150	6.5
ene-15	150	6.5
ene-17	150	6.5
ene-19	150	6.5
ene-21	150	6.5
ene-23	150	6.5
ene-25	150	6.5
ene-27	150	6.5
ene-29	150	6.5
ene-31	150	6.5
ene-33	150	6.5
ene-35	150	6.5

El precio de la electricidad para comunidades de regantes consta de 2 términos: el término de potencia (regulado por el Ministerio de Industria, y publicado en el BOE semestralmente) y el término de energía (se negocia en el mercado libre y tiene una vigencia de 6 meses aproximadamente). Mientras el término de potencia es un gasto fijo, el término de energía se factura en función del consumo y tiene un mayor peso en el importe de la factura (un 85%). En el Gráfico 6-2, se puede observar el alza de los precios, tanto de potencia como de energía. El término de potencia es claramente el que ha sufrido el crecimiento más elevado: desde julio de 2008 y hasta enero de 2010, el término de potencia se ha incrementado un 468% (Ederra & Murugarren 2010).

Por la facturación de todos y cada uno de los excesos registrados en cada cuarto de hora, se ha de contratar ahora el total de la potencia instalada (aunque antes se solía contratar solo el 75%). A inicios de 2010, el precio medio del término de potencia se facturará 369 c€/kW mensualmente; y el término de energía 7,4 c€/kWh. A los precios de potencia y de energía, se les agregará el Impuesto Eléctrico (4,86% x 1,0511) así como el I.V.A. (16%).

Ederra & Murugarren 2010 ofrecen como ejemplo representativo de la situación en España el Regadío de “El Raso y Las Suertes de Funes”¹. Este regadío destaca por ser susceptible a la fluctuación de los precios de la energía por tener una altura de bombeo de 196 m. El regadío se extiende sobre 802 ha, con una variada y encadenada producción de cultivos hortícolas, destinados a la agroindustria. Sus consumos anuales se sitúan alrededor de 4.000 a 5.000 m³/ha. La potencia contratada de 1.750 kW no cambió entre el año 2005 y el año 2009. La energía consumida aumentó un 2% respecto al 2005. Con el cambio de las tarifas eléctricas mencionadas más arriba, el término de potencia aumentó un 378% y el de energía de un 66%. La factura eléctrica total se incrementó en un 82% entre el 2005 y el año 2009.

En la comunidad de Aragón, los precios han crecido un 50% en términos de potencia contratada, y un 200% en términos de consumo (Sirasa 2010). Indirectamente, esas consecuencias negativas pueden llegar a incentivar la modernización del regadío hacia un uso más sostenible de los recursos.

Los dos organismos que incentivan las medidas de ahorros de agua son el Plan Nacional de Regadío —Horizonte 2008 del Ministerio del Medio Ambiente, Rural y Marino, recientemente renovado por la Estrategia Nacional para la Modernización Sostenible de los Regadíos, Horizonte 2015, y por otra parte, el E4— Plan de Acción 2008-2012 del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. De ambos documentos, podemos destacar las medidas siguientes:

¹ más información, <http://www.riegosdenavarra.com/publica/publicaciones.htm>

PNR-H2008	Estrategia Nac. Modern. Sost. de los Regadíos, Horizonte 2015	E4-Plan de acción 2008-2012
<p>Se prevé un ahorro final de agua en el regadío de unos 2.600 Mm³, considerando las siguientes medidas:</p> <p>Para regadíos sobredotados:</p> <ul style="list-style-type: none"> • un reajuste del agua suministrada en cabecera de área, que suele ser excesivo. • una mejora a nivel de parcela del sistema de riego con el fin de disminuir las pérdidas en conducciones. • una mejora a nivel del cultivo con el fin de ajustar de manera adecuada las necesidades hídricas del cultivo para disminuir las pérdidas de agua en la parcela. <p>Para regadíos infradotados:</p> <ul style="list-style-type: none"> • recursos adicionales necesarios en cabecera de área. • consolidación de los sistemas de regadío a nivel de cabecera de área para limitar las pérdidas. • una mejora a nivel de parcela del sistema de riego con el fin de disminuir las pérdidas en conducciones. • una mejora a nivel del cultivo con el fin de ajustar de manera adecuada las necesidades hídricas del cultivo para disminuir las pérdidas de agua en la parcela. 	<p>Toda modernización de regadíos deberá contar con las redes de suministro eléctrico necesarias para poder realizar el proceso de modernización, así como con la maquinaria, utillaje e infraestructura eléctrica necesaria para poder realizar la misma.</p> <p>Para ello se redactarán los Proyectos complementarios necesarios, que se incorporarán como anejos al proyecto de modernización, formando a todos los efectos parte íntegra del mismo.</p> <p>Para garantizar la mayor eficiencia energética, el proyecto de modernización contemplará el uso de instalaciones y elementos electromecánicos que optimicen los consumos de energía eléctrica, incorporando las más modernas tecnologías y equipamientos del sector.</p> <p>Igualmente se promoverá el uso de energías alternativas y de autoconsumo siempre que sea posible.</p>	<p>Se prevé un aumento de un 17% de la energía consumida en el sector de la agricultura y pesca (del cual los regadíos representan el 22%), por lo cual, se proponen las siguientes medidas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • M3: una normativa de impulso para la migración de los sistemas de riego por aspersión a sistemas de riego localizado (con aumento de la ayuda pública). • M5: auditorías y planes de actuación de mejoras energéticas en comunidades de regantes (con el fin de establecer las líneas de ayudas que apoyen la sustitución de equipos y sistemas). <p>Resultados esperados:</p> <p>Para el conjunto de las medidas M3 y M5, se espera un ahorro energético de 884 GWh en el año 2012 (es decir el 13% del consumo energético que supuso el sector del regadío en el año 2007).</p> <p>Medida adicional:</p> <p>Implementar sistemas de información y telegestión de agua y energía en el regadío. Con el fin de trabajar en:</p> <ul style="list-style-type: none"> • la reducción del consumo de agua • mejorar de la gestión de los acuíferos • mejorar de la eficiencia energética en parcela • el establecimiento de consumos energéticos de referencia • mejorar la formación de los regantes en técnicas de eficiencia energéticas

6.2. Consideraciones técnico-económicas sobre el uso de energía en el regadío

Desde la antigüedad hasta mediados del siglo XX, el hombre desvía el transcurso natural del agua para su aprovechamiento. La construcción de una pequeña represa requiere de un consumo energético muy pequeño por cada metro cúbico que le permite aprovechar a lo largo de su vida útil. Las fértiles vegas son regadas por gravedad desde el propio cauce natural sin consumir energía externa. Del agua usada, una parte, la transpirada por el cultivo, cumple su misión y vuelve a la atmósfera para empezar de nuevo su ciclo, la otra parte, es devuelta a los cauces directamente o tras un recorrido por el subsuelo. En la última mitad del siglo pasado, las bombas hidráulicas con sistemas de distribución a presión permiten llevar el agua a cualquier lugar. La superficie con infraestructura de riego, 1,5 Mha, de 1950 se había multiplicado por 2,5 a finales del siglo, 3,7 Mha (Corominas 2009). En algunos casos, se distingue entre superficie con infraestructura de riego y superficie realmente regada, siendo ésta última algo menor, 3,4 Mha.

En el nuevo siglo, la escasez de agua alcanzó a otros sectores, llevando a las administraciones a no autorizar nuevas concesiones y, como consecuencia, se frena la expansión del regadío. Como consecuencia, la superficie de regadío está prácticamente estancada o en ligero retroceso. Al ser el regadío el usuario cuantitativamente más importante, surge la necesidad de mejorar la eficiencia de sus aplicaciones. En 2006, el Ministerio de Agricultura y el de Medio Ambiente acometen un “Plan de Choque de Modernización de Regadíos”, BOE 11/03/2006, consistente en la realización de un conjunto de actuaciones, con una inversión de 2.344 M€ que afecta a una superficie regada de 0,87 Mha, repartida por todo el territorio español (véase Tabla 3-6 página 64), con objeto de ahorrar un volumen de agua de 1.162 Mm³/año.

Durante todo este proceso ha perdido peso una agricultura social y económicamente ineficiente, de subsistencia, a favor de una agricultura más profesionalizada e industrial. Pero, también se han provocado importantes cambios en los equilibrios de nuestros ecosistemas y un aumento espectacular del consumo energético, como hemos indicado anteriormente. En la fase de expansión, siempre con importantes ayudas de la administración, los nuevos regadíos a presión, consumen energía y requieren de inversiones, pero la garantía y el incremento de producción compensan los gastos. El consumo energético se dispara pero sus costes han sido previstos y, en general, no suponen un freno a una cierta ambición de modernidad. El consumo de agua, que inicialmente no es un problema, va aumentando progresivamente hasta que se observa, en su fase final, que se ha producido una importante afección ambiental y que no es sostenible su crecimiento. En la última fase, la presión sobre el recurso agua crea una cierta obsesión por su ahorro. Se usan o están en mente fáciles descalificaciones, con frecuencia injustas, para el tradicional método de riego por gravedad, que desemboca en una importante reducción de su superficie, pasando el riego localizado a ser el de mayor extensión, circunstancia que hasta entonces únicamente se producía en Israel.

En el Plan Nacional de Regadíos de 2001 la superficie con riego por gravedad se decía que representaba un 60% del total y la del riego por goteo no llegaba al 20%. En 2005, ambas superficies se habían igualado y, en los últimos datos de 2010, la superficie con riego por goteo, 1,6 Mha, el 45%, supera claramente a la de riego por gravedad, 1,1 Mha, el 30%. En Estados Unidos el método mayoritario es el de aspersión y el de gravedad representa un 40%, pero este porcentaje sube al 57% en el Estado de California (USDA 2008). En Australia el riego por gravedad ocupa el 50% (ABS 2008).

Los nuevos sistemas de riego a presión son adecuados para una agricultura más competitiva e industrializada a la que deberían incorporarse los agricultores. El ahorro de agua, en caso de producirse como se explicará más adelante, es menor que el previsto y, de forma contrapuesta, requiere un importante consumo energético. Pero, en los riegos a presión, el coste energético, ahora todavía incierto con las nuevas tarifas, siempre ha sido un importante lastre para las explotaciones que se caracterizan por tener un escaso beneficio por hectárea. En las nuevas modernizaciones, el principio de recuperación de costes que exige la Directiva Marco del Agua, a pesar de las fuertes subvenciones de la PAC, hace inevitable asimismo el endeudamiento de los regantes. A la nueva factura eléctrica por el consumo energético de las aplicaciones, hay que añadir la amortización de las inversiones, razón por la cual muchas explotaciones encuentran dificultades para acometer los nuevos costes.

A la hora de tomar decisiones, como ocurre en todas las valoraciones, se olvidan o no se consideran algunos aspectos en su justa medida, ciertas externalidades. Aquí, nos referiremos fundamentalmente a las relacionadas con el uso eficiente del agua y de la energía. En su tratamiento, no se pretende ser exhaustivo sino contribuir a establecer orientaciones que permitan responder a preguntas como ¿qué incremento de energía o de inversión estaría justificado para ahorrar una unidad de agua? Se realizarán análisis simplificados buscando una validez lo más amplia posible. Un análisis detallado requeriría de una información específica también detallada en la que se tendrían que diferenciar muchos casos, lo que no parece adecuado por el momento. Aquí, se abordarán fundamentalmente relaciones de sustitución entre dos variables en estudio, eficiencia en el uso del agua y energía, en unos casos, eficiencia en el uso del agua y coste de inversión, en otros. Aunque la condición de referencia puede cambiarse con cierta facilidad, los resultados cuanti-

ficados usan como referencia la desalación de agua del mar, si bien actualmente por su coste se considera inaccesible para la mayor parte del regadío español. Dado que la realidad es más compleja que el análisis realizado, estos análisis van dirigidos a detectar la posible viabilidad de las alternativas propuestas lo que podría desencadenar la elaboración de un estudio más preciso. También, recordar que dado que la mayor parte de los datos usados, se refieren a valores medios, habrá también muchas situaciones individuales que no estarán representadas adecuadamente.

En CEC (2005), se apunta que los usos relacionados con el agua consumen un 19% de la electricidad del estado, un 30% de su gas natural y 12 millones de toneladas de gasoil cada año. Además, según el citado informe, esta demanda seguirá aumentando, hasta el 2016, un 1,4% cada año. En él también se afirma: *“El hallazgo principal de este trabajo es que una parte importante de la solución es una mayor coordinación entre los sectores del agua y la energía”*. Esta conclusión del informe, debe servir para recordar que aspectos conocidos y dominados por profesionales de un sector son desconocidos y pasan desapercibidos por los de otros sectores. Como consecuencia, es necesaria una mayor coordinación de actividades de profesionales de características distintas, con objeto de que no se implementen soluciones inadecuadas, que podían haber sido así identificadas antes de acometerlas.

En la actualidad la necesidad de aplicar la Directiva Marco del Agua y dar continuidad al esfuerzo realizado en actuaciones como la del Plan de Choque, han llevado al ministerio a establecer una Estrategia Nacional para la Modernización Sostenible de los Regadíos Horizonte 2015 (MARM 2009a). En ella, además de pretender seguir mejorando la eficiencia hídrica y la gestión del agua, contempla el objetivo de fomento del empleo en zonas rurales y reconoce la necesidad de al-

canzar la máxima eficiencia energética de las instalaciones proyectadas para garantizar su sostenibilidad.

6.2.1. Bases conceptuales

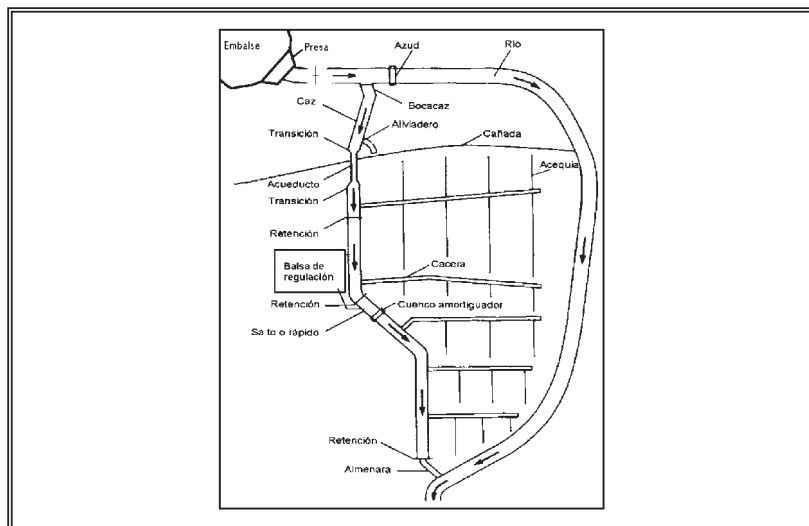
Se hacen a continuación algunas reflexiones que se consideran necesarias para enfocar el tema e interpretar adecuadamente los resultados.

6.2.1.1. Ahorro, eficiencia y consumo

Para caracterizar el aprovechamiento del agua de una zona regada, un único índice puede resultar insuficiente o inadecuado. Generalmente se usa la eficiencia, definido como la fracción del agua usada que es útil, entendiendo como tal la que es traspirada por el cultivo y, en su caso, la fracción de lavado necesaria para mantener la fertilidad del suelo. Si bien, es frecuente encontrar índices de eficiencia con algunas variaciones al anterior. De esta forma, el volumen útil suele sustituirse por las necesidades del cultivo y, en general, sin considerar las lluvias. La razón de la citada insuficiencia radica en que el concepto de pérdida, agua no útil, es discutible y puede ser engañoso debido a que esa agua, aunque no sea de momento útil, está ahí y puede llegar a serlo.

Así, en el sistema tradicional de riego por superficie, ver Figura 6-1, la relación entre las necesidades hídricas de los cultivos y el volumen derivado para satisfacerlas es seguramente muy bajo, lo que sugeriría que se están aprovechando mal los recursos hídricos y, como consecuencia, que pueden obtenerse importantes ahorros con la modernización. Sin embargo, tras un análisis más detallado la conclusión podría ser la contraria. Entre las componentes de las

FIGURA 6-1. *Esquema típico de sistema de distribución para riegos por superficie*



Fuente: Juana y Losada 2000.

pérdidas, una gran parte será agua derivada y no usada que por el propio cauce vuelve al río aguas abajo de la zona regable. En el caso de que el caudal retornado no sea necesario en el tramo de río entre derivación y retorno, hay razones para defender que esas pérdidas no sean totalmente consideradas. El programa de desembalses de la presa, algo más complejo y quizás un poco menos eficaz, puede tenerlas en cuenta. No hay duda de que otro regadío, aguas abajo, podría usar esa agua y que otro embalse podría acumularla.

Del agua derivada y usada, otro porcentaje también importante que debe ser del orden del 20% pero que con frecuencia está entre el 40 y 50%, se pierde por filtración profunda en los canteros de cada regante. Esta agua del subsuelo, en la misma zona regable o algo aguas abajo de ella, también está en conexión con el río al que alimentará de forma lenta.

El sistema tradicional mencionado suele también caracterizarse por ser exigente en mano de obra. Bien por una dotación muy ajustada y/o bien por falta de disponibilidad de mano de obra, es frecuente que la superficie simultánea con cultivos regados en periodo punta sea sensiblemente menor a la total. Es decir, el regante tiene un porcentaje de superficie ocupada por cultivos típicos de secano ocupando el regadío que, aunque se riegan, requieren menos volumen total de agua y, lo que es más importante, en los momentos en los que hay menor demanda. De transformarse a riegos a presión, la relación entre agua consumida y usada se incrementa y las necesidades de mano de obra se reducen. Para amortizar los costes de las instalaciones y pagar la factura eléctrica, los agricultores reducen la superficie de los cultivos de secano por otros más productivos pero con mayores necesidades de agua. Por esta razón, se aumenta el consumo de agua de la zona y, de mantener una dotación, al perder menos agua se reducirán los recursos aguas abajo, en zonas regables seguramente más productivas. En la mayor parte de los casos, sería necesaria una reasignación de dotaciones para asegurar que el agua que antes iba aguas abajo se derive a otros usos, pero es difícil de justificar un descenso de unas dotaciones existentes, en general, bastante ajustadas.

Incluso en las zonas próximas a la costa, puede ser útil que haya pérdidas por filtración profunda. El flujo al mar de los acuíferos costeros es cuantitativamente pequeño pero su reducción puede aumentar considerablemente la intrusión marina y reducir las posibilidades de explotación de los mismos. La diferencia de densidades, del agua dulce y salada, determina que, de forma aproximada, por cada metro que desciende el nivel piezométrico se reduce cuarenta veces la profundidad de la interfase agua dulce-agua salada. Permitir un incremento de las pérdidas al mar, aumenta los niveles piezométricos y, con ello, la capacidad de los acuí-

feros, además de facilitar su explotación. Una parte importante del agua pérdida por filtración profunda puede de nuevo ser bombeada del acuífero para ser usada de nuevo en la misma zona.

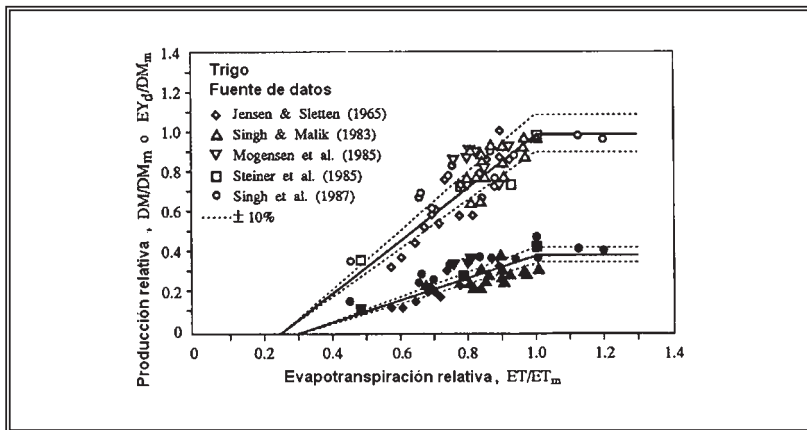
El agua consumida, transpirada por el cultivo, o evaporada directamente, tampoco desaparece, aumenta el contenido de humedad del aire haciéndolo menos denso y con mayor tendencia a la elevación. Se favorece así la creación de una situación de inestabilidad atmosférica que produce de nuevo la precipitación del agua. Una parte del agua que precipita es agua que ha transpirado la vegetación natural o los propios cultivos. Así, se ha observado y simulado con modelos que las reforestaciones y el regadío incrementan la precipitación y, en sentido contrario, que las deforestaciones la reducen (Gates y Ließ 2001; Bonan 2002). Por término medio, el tiempo de permanencia o de renovación del agua en la atmósfera es relativamente pequeño, 8.2 días (Chow *et al.* 1988). En el mismo sentido, a la hora de valorar los recursos naturales, como se hace en el propio Libro Blanco del Agua, (MMA 2000), suelen valorarse como la precipitación menos la evapotranspiración. Tomándolo en sentido estricto, la reducción de la evapotranspiración no aumentaría los recursos naturales, pues además de disminuir la precipitación, la deforestación podría tener efectos negativos sobre la conservación del suelo y, como consecuencia, aumentar la escorrentía que haría que el agua precipitada, si no es embalsada, volviera rápidamente al mar y fuese más difícilmente de aprovechar que cuando se infiltra y vuelve lentamente manteniendo los caudales de los ríos más uniformes en el tiempo.

Se concluye que la valoración de cualquier medida de ahorro debe ir acompañada de una valoración de los cambios en los retornos que va a originar. Los riegos ineficientes de las zonas altas de la cuenca deben ser considerados como

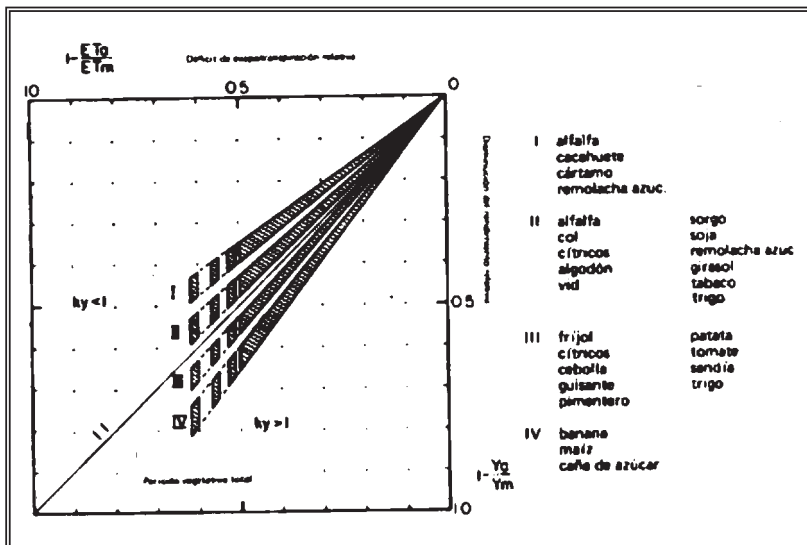
lluvias para las zonas bajas. Por otra parte, es también conveniente avanzar en el seguimiento del agua transpirada para valorar globalmente las repercusiones de que se produzcan o no estos consumos del regadío y criticar con más información el alto uso consuntivo que se le achaca. Investigaciones en esta dirección parecen perfectamente viables dentro del Programa Marco Europeo de Investigación y dentro de las convocatorias nacionales.

Finalmente, hay que recordar que si se aplica menos agua de la que puede consumir el cultivo, la eficiencia aumenta considerablemente aunque su producción se resienta y que, por el contrario, si se aplica más, la eficiencia disminuye. El adecuado seguimiento de las necesidades de los cultivos es asimismo fundamental para tomar estas decisiones y no debe olvidarse. La asignación de dotaciones ajustadas, en general, es y seguirá siendo una medida eficaz para conseguir altas eficiencias y aprovechar racionalmente el agua. Con dotaciones ajustadas, el regante que no es eficiente se ve obligado a mejorar y a seleccionar los momentos en que los riegos son más necesarios, a dejar superficie sin riego o disponer de cultivos con menos exigencias hídricas en los momentos de mayor escasez. Si se aplica menos agua de la que requiere el cultivo, la eficiencia del agua aumenta aunque el cultivo no se desarrolle conforme a su potencial (Howell 1990; Doorenbos y Kassam 1980), Gráfico 6-3 y Gráfico 6-4.

El riego deficitario es una práctica cultural específica de cada cultivo debido a que así son también los momentos en los que los volúmenes de agua disponible a aplicar producen mayores beneficios. En especial, en cultivos leñosos riegos a destiempo pueden resultar desfavorables por producir un desarrollo vegetativo no deseado o simplemente porque implicarían unas características de la producción distintas a la calidad buscada, como en ocasiones ocurre con los cultivos de vid y olivo.

GRÁFICO 6-3. *Relación entre evapotranspiración y producción*

Fuente: Howell (1990).

GRÁFICO 6-4. *Relación generalizada entre la reducción del rendimiento ($1-Y_a/Y_m$) y la evapotranspiración relativa ($1-ET_a/ET_m$)*

Fuente: Doorenbos y Kassam (1980).

6.2.1.2. Agua, energía y coste

Cada unidad de masa de agua, en función de sus características y localización, tiene un potencial o capacidad de desarrollar un trabajo. Es decir, tiene una energía que, bajo ciertas condiciones, se puede reducir o aumentar a voluntad, si bien con sus correspondientes rendimientos. El agua se mueve espontáneamente en la dirección en la que decrece su potencial y en su recorrido pierde la energía correspondiente al salto entre los niveles inicial y final. Parte de esa energía puede ser aprovechada, bien directamente o después de su transformación, una central hidroeléctrica es un buen ejemplo. Asimismo, el agua puede recibir parte de la energía que absorbe una bomba hidráulica accionada con un motor. En este caso, el punto inicial tiene menor energía que el final.

La mayor parte del agua del planeta tiene un alto contenido en sales. Las sales reducen la energía del agua, la planta en contacto con agua salada, en vez de absorberla, la cede y se deshidrata. El agua, una vez desalada, se convierte en un recurso útil. En definitiva, es posible un intercambio agua-energía y, por tanto, establecer equivalencias de paso.

Entre las unidades para referir la energía unitaria del agua, destacaremos el metro, m , energía por unidad de peso, y también el *bar* y el kWh/m^3 , ambas de energía por unidad de volumen². De esta forma, un agua media del mar, con una concentración de 35 g/L de ClNa a 20° C, según la relación de van't Hoff, tiene un potencial osmótico de $-29 \text{ bar} \cong 0,81 \text{ kWh/m}^3 \cong -300 \text{ m}$, que se correspondería con el límite técnico del consumo energético para desalarla. Si los rendimientos fuesen similares, desalar un m^3 del mar, absorbería la misma

² Considerando la densidad de referencia del agua y la aceleración de la gravedad considerada como estándar la equivalencia entre dichas unidades es: $1 \text{ bar} \circ 0.02778 \text{ kWh/m}^3 \circ 10.2 \text{ m}$, o bien: $1 \text{ kWh/m}^3 \circ 36 \text{ bar} \circ 367 \text{ m}$.

energía que bombearla desde 300 m de profundidad. O, si en el mar se instalase una tubería que alcance esa profundidad y colocásemos tramos de membrana como parte de la tubería, se obtendría agua dulce en el interior y habría que elevarla aproximadamente desde esa cota. En la expresión referida la presión osmótica es proporcional a la concentración salina, lo que nos facilita la comparación energética entre aguas salobres de distintas calidades. Así, con la mitad de concentración, 17,5 g/l de ClNa, requeriría la mitad de energía, $0,40 \text{ kWh/m}^3 \cong -150 \text{ m}$. Un agua para riego de calidad media, con una concentración salina $2 \text{ dS/m} \cong 1.200 \text{ ppm}$, tendría un potencial de -10 m , aproximadamente.

Bajo este planteamiento, el binomio agua-energía resulta en algunos casos insatisfactorio y es necesario incluir otras variables como inversión de las infraestructuras y/o mano de obra. Estamos muy familiarizados con el coste de la energía y también con el coste del agua, por tanto, es posible hablar indistintamente de los tres conceptos, es decir, se pueden establecer relaciones de intercambio, con sus unidades: kWh/m^3 , €/m^3 y €/kWh . El problema es que cuando aparecen los costes, las condiciones específicas se multiplican y resulta más complejo el análisis. Una muestra de ello es simplemente las posibilidades y detalles de las tarifas eléctricas, Real Decreto 871/2007, de 29 de junio.

El factor de paso de agua a energía, a partir de un agua del mar con unas condiciones de referencia como las apuntadas y sin considerar rendimientos, es único, $0,81 \text{ kWh/m}^3 \cong 300 \text{ m}$. La incertidumbre por no haber incluido el rendimiento, aunque mayor que la que nos gustaría, es relativamente pequeña por comparación con la que obtenemos al incluir costes. No obstante, la introducción de costes, equivale a introducir más variables y, por tanto, a representar mejor la situación real, la cuestión es si la incertidumbre hace inservible el análisis, salvo en su caso, para el restringido ámbito en que

fue determinado con precisión. A este respecto, es orientadora la Tabla 6-1, en la que se han recogido unos datos de costes de desalación de agua del mar de Torres Corral (2004). Los datos no difieren mucho de otros, como los recogidos en CEC (2005), que establece un rango entre 2,58-4,36 kWh/m³. Estos valores supondrían rendimientos en los procesos entre 31-19%, respectivamente.

En ella, puede observarse cómo han ido mejorando los rendimientos con el paso de los años. A los consumos apuntados de 5,3; 4,1; 3,6 y 2,9 kWh/m³, le corresponden unos rendimientos η_d del 15; 20; 22,5 y 28%, respectivamente.

TABLA 6-1. *Costes de desalación de agua del mar*

1. BASES DE CÁLCULO	Unidades	1995	2002	2004	2010
Coste de Inversión	€/m ³ /día)	890	610	600	590
Periodo de amortización	años	15	15	15	15
Interés	%	10	4	4	4
Consumo específico	kW h/m ³	5,3	4,1	3,6	2,9
Precio energía	€/kW h	0,077	0,048	0,048	0,048
Tipo de toma	Abierta	Abierta	Abierta	Abierta	Abierta
2. COSTE AGUA DESALADA					
Energía eléctrica	€/m ³	0,408	0,196	0,172	0,139
Personal		0,036	0,036	0,030	0,025
Productos químicos		0,030	0,028	0,028	0,030
Mantenimiento y otros		0,024	0,024	0,024	0,024
Reposición de membrana		0,018	0,018	0,016	0,014
TOTAL EXPLOTACIÓN		0,516	0,302	0,270	0,232
AMORTIZACIÓN	€/m ³	0,337	0,170	0,168	0,165
COSTE TOTAL	€/m ³	0,853	0,472	0,438	0,397

Fuente: Torres Corral 2004.

Consumos sensiblemente inferiores han resultado en estudios analíticos e incluso en pruebas de laboratorio. Así, ya en el año 2000, Wenson apuntó que con intercambiadores de presión, era posible obtener valores inferiores a 2,40 kWh/m³. Este valor, con relación al límite técnico, significa un rendimiento del 33% y se considerará próximo a los rendimientos actuales. No obstante, valores experimentales entre 1,6 y 2 kWh/m³, al parecer, ya se han conseguido, (Fritzmán et al. 2006, Estevan & García-Sánchez 2007), lo que supondría rendimientos próximos al 50%. De usar, como es frecuente, bombas hidráulicas para aportar la presión parece que los rendimientos de estas últimas pueden ser limitantes en el rendimiento máximo del proceso. Afortunadamente, en este sentido, valores incluso superiores al 80% pueden llegar a obtenerse. Como consecuencia, todo indica que todavía hay margen para la mejora. En lo que se refiere a costes, aunque se tomará de referencia el valor de 0,40 €/m³ de la Tabla 6-1, según Medina (2004), éste es función y se reduce considerablemente con el tamaño de la planta y su régimen de explotación.

Para considerar la eficiencia energética del regadío es necesario considerar que pueden conseguirse rendimientos de bombeo η_b entre 75 y 80% o incluso superiores. No obstante, según Hoffman *et al.* (2007), en las estaciones de elevación destinadas al riego, por sus características específicas, cabe considerar como aceptable un valor del 65% y los valores medios observados, con frecuencia, están entre 45 y 55%. Se aprovecha para indicar que un aspecto fundamental, para ahorrar agua y, en este caso, energía, es el mantenimiento y supervisión de las instalaciones para que funcionen según fueron proyectadas. En este sentido, cabe calificar de acertadas las iniciativas como la de la obligatoriedad de llevar a cabo auditorías energéticas a las Comunidades de Regantes que opten a ayudas autonómicas y estatales (IDAE 2008), o que puedan implantarse tarifas progresivas

que sancionen los excesos de consumos e incentiven el uso racional del agua y de la energía. En el citado informe referido a California, (CEC 2005), también se recoge que una adecuada revisión y gestión de las instalaciones de bombeo puede reducir entre 5 y 15 puntos porcentuales su consumo energético.

Como conclusión, aunque el agua sea un recurso especial, la valoración económica de cada m³ en función de su ubicación y calidad, es posible. Aún con sus dificultades, los resultados ayudarían en la toma de decisiones tanto de acometer o no modernizaciones, como de seleccionar métodos para la gestión de los recursos hídricos. Para ello, los costes de la desalación, de la regeneración de aguas residuales o, en definitiva, cualquiera que permita transformar un agua improductiva en productiva, se convierten en valores de referencia necesarios y, en la medida que puedan precisarse mejor, las valoraciones serán de mayor utilidad. No obstante, para la mejora de los resultados, tanto en el recurso agua como en el de energía, seguramente la medida más eficaz es un adecuado mantenimiento de las instalaciones y la realización de evaluaciones que corroboren que las aplicaciones siguen siendo apropiadas, como se proyectaron. Como se verá más adelante los resultados que se obtienen en la práctica están por debajo de los potenciales. En este sentido también hay que valorar positivamente, dentro del Programa de Vigilancia Ambiental, las evaluaciones de zonas regables que lleva a cabo la Subdirección de Desarrollo Rural del MARM. Algunas de las evaluaciones realizadas están publicadas en Internet³.

³ <http://www.mapa.es/es/desarrollo/pags/observatorio/observatorio.htm>

6.2.2. *Eficiencia del uso del agua y necesidades de energía según métodos de riego*

6.2.2.1. Valores potenciales

Cada método de riego tiene unas características específicas que condicionan una capacidad a la hora de hacer aplicaciones eficientes. No obstante, como se ha comentado, el rendimiento se concreta en cada aplicación al obtener la relación entre el volumen que ha cumplido su fin y el que se ha aportado para ello. Aunque el sistema distribuya el agua con uniformidad y, como consecuencia, potencialmente permita realizar aplicaciones eficientes, estas pueden ser ineficientes si, por ejemplo, se aplica más agua de la necesaria. Por el contrario, se puede aumentar su eficiencia si el agua se aplica de forma deficitaria.

La circunstancia más determinante del riego por superficie es que su resultado depende de las características y de la homogeneidad del suelo. Un suelo heterogéneo o mal explanado, en general, imposibilita un riego uniforme y, como consecuencia, eficiente. En suelos de vega, relativamente homogéneos, es posible obtener riegos eficientes. A la hora de concretar el proyecto del sistema, se requiere una exigente preparación de la superficie, tecnología láser, y para que además las unidades de riego o canteros tengan una dimensión suficiente, competitiva, además de requerir el uso de caudales importantes, puede ser preferible que el suelo y el cultivo admitan láminas de riego importantes. Otra característica a destacar y que es necesario considerar es la incertidumbre de parámetros como los de la infiltración. El proyecto debe hacerse para garantizar que, con unas previsiones desfavorables de suelo-cultivo, se pueda obtener un rendimiento razonable, entre el 70 y el 80%, en función, en cada caso de su coste de obtención (Juana & Losada 1994). De esta manera, si el sistema se explota según lo previsto, el regante podrá realizar riegos eficientes. El manejo de este método para conseguir los resultados potenciales

es más complejo que el de los riegos a presión. Por otra parte, suele haber un mayor desconocimiento de las cantidades aportadas en cuyo caso el resultado depende en gran medida de la pericia y dotes de observación del regante. Aunque poco extendida en España, la automatización de este método de riego es posible, tanto con sistemas de distribución por acequias como y, sobre todo, por tuberías a baja presión, (Humpherys 1987; Duke *et al.* 1990). Dado que los riegos por goteo y aspersión, suelen estar muy automatizados, realmente la comparación de estos métodos se debería hacer con riegos por superficie también automatizados.

Al examinar las actuaciones específicas de las SEIASAS, se observa que las obras de modernización de redes de acequias se han centrado fundamentalmente en aumentar la capacidad de conducción y revestirlas para eliminar las pérdidas por filtración profunda. Sin embargo, no se han mejorado sustancialmente los elementos de regulación y de control de caudales que permiten un mejor uso y más fácil del agua en el cantero, lugar donde se producen las pérdidas de agua más importantes y donde se requiere la mayor mano de obra.

En el riego por aspersión una ventaja determinante frente al riego por superficie es que el resultado no depende necesariamente de las características y homogeneidad del suelo. En este caso, el agua debe infiltrarse dónde cae, aspecto que es completamente necesario en el caso de superficies no niveladas. El nuevo método permite el riego eficiente en suelos de ladera, ondulados, poco profundos y heterogéneos. Como contrapartida, para producir una lluvia homogénea es necesario pulverizar el agua, lo que requiere un consumo energético importante y, además, favorece la evaporación y arrastre de las gotas por el viento. En riego por aspersión de cultivos extensivos, marcos grandes, se trabaja en el proyecto con rendimientos en torno al 80%, este valor puede aumentarse, al 85 o incluso al 90%, para cultivos intensivos y con máquinas

regadoras. Conseguir en campo ese resultado puede requerir un plan especial para reducir las controvertidas pérdidas por evaporación, pues de considerar que toda la evaporación directa del chorro son pérdidas, cosa que no suele hacerse, los resultados anteriores podrían ser inalcanzables en una evaluación diurna en el periodo punta. La energía necesaria depende de las separaciones que se disponga a los aspersores pero, por término medio, los 20 o 30 m, antes de boquilla, se convierten con frecuencia, en los mejores casos, en 40 o 50 m, en la acometida del regante. La altura a la que eleve el sistema de bombeo del sistema de distribución hasta las bocas de los regantes puede ser muy variable, tanto por el rendimiento de las bombas, que todavía no ha sido considerado, como por el hecho de que la altura de elevación está marcada por unas cuantas bocas, que tienen unas condiciones desfavorables, en el sentido de que están a mayores cotas y/o más alejadas, lo que lleva asociado mayores pérdidas de energía por rozamiento. Aunque, aquí no puede darse un número, puede calificarse de caso favorable si no se sobrepasan los 100 m.

El riego por goteo presenta la ventaja, sobre el riego por superficie de que no depende necesariamente de las características y homogeneidad del suelo y, frente al riego por aspersión, que no necesita pulverizar el agua con lo que, por una parte, requiere menos consumo energético y, por otra, la aplicación localizada reduce la evaporación y no está afectada por el viento. En la variante del riego por goteo sub-superficial, la no influencia del suelo puede desaparecer si este es poco permeable (Gil *et al.* 2008). Otra característica no menos importante del riego por goteo es que la aplicación localizada y los sistemas fijos, con pocas necesidades de mano de obra, permiten realizar aplicaciones frecuentes, de gran interés para la intensificación de la producción y con muy poca interferencia con el resto de labores. Por el contrario, el pequeño gasto de los emisores unido a presiones intermedias (para que las diferencias de cotas y las pérdidas de carga no afecten desfa-

vorablemente a la uniformidad) obliga a orificios de pequeño diámetro con gran riesgo de obturación, aspecto que es necesario evitar para obtener riegos eficientes. En el proyecto, cabe pensar en resultados del 90% o incluso del 95%, en función de la intensidad de la producción. Pero para su obtención, además de realizar aplicaciones acordes con las necesidades del cultivo, hay que cuidar con esmero la obturación y el estado del material de las instalaciones, pues son frecuentes, tuberías de polietileno con dobleces, conexiones de ramales o goteros con fugas y escurrimiento del agua de los goteros por la tubería, o incluso por el suelo, en zonas no niveladas. En lo que se refiere a necesidades energéticas, los frecuentes 10 m, que se consideran como presión nominal de trabajo, en el mejor de los casos, se convierten en 25 o 30 m en la acometida del regante. La altura a la que eleve el sistema de distribución, por lo ya comentado, es también variable, si este abarca mucha superficie también con frecuencia supera los 100 m. Las menores necesidades en las unidades pueden ser contrarrestadas por unas mayores necesidades en los filtros y por el hecho de que, en ocasiones, las características de las explotaciones bien intensivas o bien de cultivos leñosos, como el olivo o la vid, se establecen en terrenos ondulados con desniveles importantes. Si el regante tiene su propio bombeo desde balsa los valores son sensiblemente inferiores, si es desde pozo depende de los niveles piezométricos, también muy variables.

Sin duda, aparte de la visión personal comentada, en lo que se refiere a la eficiencia de los métodos de riego, son también de interés otros valores de referencia que se proponen para los distintos métodos. En este sentido, por su difusión y prestigio, recogemos en la Tabla 6-2 a los valores de referencia aportados por la American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE), Hoffman *et al.* (2007), y en la Tabla 6-2 b, por la American Society of Agronomy (ASA), Crop Science Society of America (CSSA) y la Soil Science Society of America (SSSA), Stewart y Nielsen (1990).

TABLA 6-2a. *Resultados potenciales según métodos de riego*

Nota: el parámetro Ra, o rendimiento en el uso del agua, representa la relación entre el agua que realmente es útil para los objetivos marcados por el riego (necesidades del cultivo y, algunas veces, lavado) y el agua que se aporta, es una necesidad, ya que está debido a la falta de uniformidad en la parcela de riego. Es decir que a mayor valor de Ra, mejor será la adecuación entre el cultivo y su sistema de riego.

<i>Método</i>	<i>Ra (%)</i>
Riego por superficie	
A manta	70-85
Por surcos	65-75
Riego por aspersión	
Móviles o portátiles	65-75
Tubería sobre ruedas (Side roll)	65-75
Cañón móvil	60-70
Pivote	75-90
Ramal frontal autopulsado	75-90
LEPA	80-95
Sistemas fijos	70-80
Riego localizado	80-90

Fuente: extraídos de Hoffman et al. 2007.

TABLA 6-2b. *Uniformidad de riego alcanzable y rendimiento de aplicación potencial (asume riego adecuado como se definió previamente).*

<i>Sistema</i>	<i>Uniformidad DU (%)</i>	<i>Rendimiento Ra_p (%)</i>
Aspersión		
Móviles (manual)	70-80	65-80
Movimiento continuo (autopulsado)	80-90†	75-85
Fijos	90-95	85-90
Goteo/Localizado	80-90	75-90
Superficie		
Surcos	80-90‡	60-90§
A manta con pendiente	70-85‡	65-80§
A manga por inundación (sin pendiente)	90-95‡	75-90
† Los valores más altos para sistemas que usan boquillas pulverizadoras en bajantes o que usan aspersores de impacto.		
‡ Los valores de uniformidad no incluyen la no uniformidad del agua infiltrada debida a la variedad del suelo.		
§ Los valores más altos para sistemas con recuperación de escorrentías de modulación.		

Fuente: Jensen (1980), Burt (1987, comunicación personal) y Hanson (1987).

Stewart y Nielsen D R. 1990.

6.2.3. Valores observados

Se cuenta con algunos estudios sobre la eficiencia del uso del agua de los distintos métodos de riego. Entre ellos, por su carácter ilustrativo, se recogen los resultados de uno de ellos en España, y otro en California, Tabla 6-3 y Tabla 6-4. Los altos coeficientes de variación del primero así como los resultados e importante desviación típica σ del segundo, deberían servir para eliminar la automática relación que algunos hacen entre sistema y rendimiento. Así, aunque resulte obvio, se vuelve a recordar que, en el riego por goteo, si la obturación de goteros es importante, se tienen fugas o, simplemente, si se aporta más cantidad de la necesaria (situaciones más frecuentes de lo que sería de desear), el rendimiento de las aplicaciones puede ser inferior al que se obtenía, antes de la transformación, con el riego tradicional. Los valores son puntuales y no debe dárseles un carácter general, sin bien por su extensión o por el número de evaluaciones cabe darles una representatividad. No obstante, también es necesario apuntar que, en ocasiones, los datos de las valuaciones, sobre todo las de riego por superficie y, en menor medida, las de aspersión, no son del todo fáciles de interpretar, sobre todo en lo que se refiere al grado en que representan a los riegos reales, por lo que cabe esperar que tengan un cierto grado de incertidumbre.

TABLA 6-3. *Relación entre el volumen necesario para evapotranspiración V_{Et} y el volumen enviado para su satisfacción V_{su}*

Método	$R = \frac{V_{Et}}{V_{su}}$	Coefficiente de variación
Superficie	0,54	0,42
Presión	0,80	0,27
Estudio realizado en 38 zonas regables españolas, totalizando 0,64 Mha.		

Fuente: Krinner *et al.* 1994.

TABLA 6-4. *Resultados de evaluaciones de la eficiencia del riego en California*

<i>Método</i>	<i>Evaluaciones</i>	<i>Ra</i>	<i>σ (desviación típica)</i>
Aspersión	164	0,69	0,13
Máquinas de riego	57	0,81	0,11
Aspersión bajo copa de árboles	28	0,81	0,18
Goteo	458	0,76	0,18
Surcos	157	0,66	0,14
Tablares	72	0,80	0,14

Fuente: Hanson *et al.* 1995.

Los valores apuntados en el apartado anterior como razonables, y que pueden conseguirse, deberían no diferir demasiado de los valores medios que arrojan las evaluaciones de grandes zonas significativas, de lo contrario, bien no serían verdaderamente razonables o bien habría que mejorar las aplicaciones de los riegos existentes. Pero a pesar de ello, conviene mantenerlos como conceptos diferentes que no deben ser confundidos. Una discusión, en este sentido, se originó con motivo de un informe sobre el futuro del agua en el Estado de Colorado (University of Denver 2007). En él se recogían unos valores de referencia aportados por la Universidad de Kansas, Tabla 6-5, y otros obtenidos con los datos disponibles por el Departamento de Recursos Naturales del Colorado, Tabla 6-6, el resultado parecía contradictorio.

En este sentido, parece necesario evaluar el uso del agua de las explotaciones e intentar que los rendimientos obtenidos se mantengan próximos a los proyectados o a los mejores que puedan conseguirse. Con excesiva frecuencia, las evaluaciones en campo aportan resultados que están por debajo de los valores potenciales y, en muchas ocasiones, se debe a un inadecuado mantenimiento y/o a un inapropiado manejo.

TABLA 6-5. *Rango del rendimiento de aplicación para varios sistemas de riego*

<i>Método</i>	<i>Rango de rendimiento* (%)</i>
Riego por superficie	
A manta por inundación	60-95
A manta por escurrimiento (pendiente)	60-90
Surcos	50-90
Por pulsaciones (surge)	60-90
Riego por aspersión	
Móvil (manual)	65-80
Cañones móviles	60-70
Pivote central o Ramal autopulsado	70-95
Sistemas fijos	70-85
Riego localizado	
Emisores localizados	75-95
Cintas o tuberías emisoras	70-95
* Los rendimientos pueden ser más bajos debidos a un mal diseño o manejo. Estos valores pretenden comparar métodos generales y no deberían ser usados para casos específicos.	

Fuente: Rogers *et al.* 1997.

En lo que se refiere al consumo energético del regadío en España es, sin duda, de interés el trabajo de Corominas (Corominas 2009). Para interpretar los datos que aporta, es preciso considerar las características específicas que se presentan en España. Así, en lo que se refiere al origen del agua usada por goteo hay una mayor proporción de agua con origen subterráneo, el 39,3%, en la desalación y en los trasvases. Esto explica que el riego por goteo necesite una energía total unitaria, $0,53 \text{ kWh/m}^3 \equiv 195 \text{ m}$, mayor que el riego por aspersión, $0,35 \text{ kWh/m}^3 \equiv 128 \text{ m}$, y, lógicamente, muy superior al riego por superficie, $0,07 \text{ kWh/m}^3 \equiv 26 \text{ m}$. Dado que son valores medios, habrá valores todavía más elevados que los que ya cabe calificar de muy altos.

En el trabajo mencionado de Corominas, se recoge también la evolución del uso de agua y del consumo de energía ligado

TABLA 6-6. *Estimación de rendimientos y costes por método de riego en el Estado de Colorado*

<i>Método de riego</i>	<i>Rango de rendimiento (%)</i>	<i>Coste medio de inversión (\$)</i>	<i>Coste medio anual de mantenimiento (\$)</i>
Inundación	30-50	—	—
Surcos	40-60	37	30
Tuberías con compuertillas (riego por superficie)	~60	178	51
Pivote central	~85	433	64
Pivote central con brazo para esquinas	~85	568	80

Fuente: SWMI 2004.

al mismo, que ya hemos mencionado en la Tabla 2-4. Con los datos originales, se han obtenido e incorporado las relaciones agua consumida/agua usada, volumen usado por unidad de superficie y consumo de energía por unidad de volumen.

Según dichos datos, en el volumen unitario usado habría una tendencia decreciente desde los 9.000 hasta los 6.500 o incluso los 6.154 m³/ha en el año 2008, mientras que la relación entre agua consumida y usada habría aumentando desde 0,60 hasta 0,83. Como consecuencia, los retornos unitarios del regadío habrían ido disminuyendo en correspondencia. No obstante, quizás el dato más destacable es que cada m³ de agua usado es elevado por término medio a 88 m de altura, a pesar de que el mayor volumen de agua todavía se aplica por gravedad.

Los resultados parecen diferir algo con los que se obtienen a partir de la Encuesta sobre el Uso del Agua en el Sector Agrario del INE. Según la misma, en 2007 se usaron en las explotaciones agrarias 16.211 Mm³. Este valor, aunque no se contabilicen aquí las pérdidas por conducción, parece que debería superar al del consumo. Por otra parte, ya se ha indicado que aunque la superficie con infraestructura alcance los 3,7 Mha, las que realmente se riegan, según la Encuesta de Su-

perficies y Rendimientos de Cultivos del MARM, son 3,4 Mha. De aceptar los datos de ambas encuestas, el uso unitario en las explotaciones estaría por debajo de los 5.000 m³/ha. De considerar como necesidades medias las 4.100 que se estimaban en el Plan Nacional de Regadíos de 2001, se estaría también en relaciones consumo/uso por encima de 0,80, relativamente difíciles de aumentar en la práctica sin un riego deficitario. Parece que estos valores se han podido alcanzar gracias al incremento de la superficie de olivo y vid (cultivos con menos necesidades y en los que no suelen completarse las necesidades potenciales) y a la falta de disponibilidad de agua.

El ahorro energético en la parte denominada en “Baja” que incluye la explotación del regante y el sistema de distribución hasta sus bocas puede ser importante. Aunque vigilar que las instalaciones funcionen con los parámetros lógicos proyectados sea lo más efectivo, también es necesario pensar en la mejora de los proyectos. Así, y en primer lugar, en las propias unidades hay que cuidar los puntos singulares y conexiones. Con tuberías de pequeño diámetro y de material plástico, es frecuente que en las conexiones se reduzcan sustancialmente los diámetros interiores lo que hace que aumente la velocidad en una relación cuadrática. Además, dado que, para abaratar costes, la geometría suele ser poco aerodinámica, se producen unas pérdidas de carga importantes, en general, no esperadas ni contempladas, en su justo valor, en el proyecto. El proyectista, sin embargo, consciente de que, en ocasiones, las pérdidas de carga finalmente resultan mayores que las que estimó, las incrementa artificialmente o sobredimensiona la altura de elevación de la bomba o la energía a disponer en la toma. Sin embargo, son perfectamente previsibles y estimables a partir de la geometría proyectada o a proyectar (Juana *et al.* 2002).

La presión de trabajo de los goteros es un tema que puede seleccionarse de forma más científica. Una presión media

de referencia, 10 m, se adopta en gran medida por costumbre. Para obtener un resultado deseado, una uniformidad o rendimiento potencial, puede buscarse el óptimo desde un punto de vista económico, de la misma forma, puede estimarse el incremento de coste que significaría mejorar esa uniformidad (Juana *et al.* 2008). Algo parecido puede decirse del proyecto de unidades que todavía suelen hacerse en función únicamente de los goteros extremos, en vez de usar todo el conjunto (Juana *et al.* 2004 y 2005). Circunstancia esta última que, por otra parte, condiciona una menor precisión a la hora de seleccionar adecuadamente la presión en cabeza de la unidad y los propios rendimientos del riego esperables.

Los elementos de regulación y control equipados en la misma boca del regante, normalmente una llave hidráulica con piloto limitador de caudal y regulador de presión, son elementos en los que la pérdida de energía es importante. En general, el control de las condiciones de servicio se obtiene regulando la pérdida de energía en el elemento, lo que condiciona que la pérdida en estos elementos sea importante incluso, en las mejores condiciones, cuando no necesitan regular. Por ello es necesario mejorar su diseño, su selección y puesta a punto, (Sánchez 2006). En los sistemas de distribución a la demanda, el dimensionamiento y el establecimiento de la curva de consigna de la estación de bombeo debe hacerse considerando la probabilidad de falta de presión en las bocas, superando los caudales ficticios de proyecto de Clement que no reflejan adecuadamente las necesidades de la red, (Juana *et al.* 2008 y 2009; Aliod *et al.* 2009).

El sistema de distribución admite posibilidades muy diversas por lo que es aconsejable que reciba, y es previsible que lo haga, grandes esfuerzos de investigación. La repercusión del coste de energía en ocasiones justifica bombear en horas valle a una balsa localizada en un punto alto, para

distribuir desde ésta, por gravedad, durante todo el día. En este caso, se proyectan además bombas que trabajan siempre con un caudal alto y apropiado, consiguiéndose altos rendimientos, aunque, por el contrario, es necesario elevar a una altura mayor que en el bombeo directo. En estas últimas, la estación de bombeo debe ser capaz de elevar el agua de riego necesaria en periodo punta. En general, fuera de éste, las necesidades serán sensiblemente menores. A este respecto, es necesario un mayor fraccionamiento de las necesidades que se realiza con grupos en paralelo menos eficientes. Además es frecuente disponer de una bomba de un convertidor de frecuencia con objeto de variar la velocidad de giro al impulsor para adaptarse mejor a la demanda. Su efectividad va disminuyendo a medida que aumenta el número de bombas y sus propios rendimientos son con frecuencia ignorados. No obstante, facilitan también la automatización y suavizan los arranques de las bombas, por los que cada vez son más frecuentes lo que ha permitido a su vez una reducción de su precio. En este último, a veces conviene valorar la división en varias redes en función de las necesidades energéticas o establecer turnos para ellas. En general, la necesidad de aportar a toda la zona regable la energía necesaria para regar en las bocas más desfavorables, situadas en las cotas más altas, hace que la eficiencia energética sea muy baja. Cuestiones como restringir la demanda o recuperar la energía en las bocas menos exigentes, son y serán aspectos de gran interés. El elevado grado de automatización y la disposición de las condiciones de funcionamiento de la red en tiempo real permiten grandes y variadas posibilidades. Tampoco cabe descartar que cambien los procedimientos de diseño de los sistemas de distribución y que el sistema de bombeo centralizado que aporta el agua con la presión necesaria, a la boca o bocas más desfavorables, se descentralice llegando incluso, en algunos puntos, hasta que el regante tenga que hacer su propio re-bombeo para dar la presión que necesite. El encarecimiento de la energía

cambiará las características de los proyectos hacia soluciones con menores requerimientos energéticos.

En lo que se refiere al conjunto red de distribución y estación de bombeo al constituir infraestructuras de importancia económica y tener unos consumos energéticos también muy importantes, en estos momentos, están y seguirán recibiendo una atención especial, por lo que cabe prever importantes avances. No obstante, su tratamiento conjunto con las instalaciones de los regantes y la búsqueda de soluciones negociadas con los mismos, seguramente permita las soluciones más eficientes (Sánchez *et al.* 2009).

Como se ha comentado, sin duda tendrá efectos positivos el Plan de Acción 2008-2012 del Instituto para la Diversificación de la Energía (IDAE 2008) y las auditorías energéticas a las Comunidades de Regantes que en él se contemplan.

6.2.4. Coste que justifica un ahorro de agua

Antes de estudiar si compensa ahorrar un agua que se necesita para otra demanda incrementando la energía, es necesario volver a recordar que el concepto ahorro es complejo y que, al menos, debe ser matizado y completado, pues los beneficios de los retornos deben ser siempre considerados aunque, de forma paradójica y contradictoria, en este apartado no se contemplen. Por otra parte, que el ahorro de agua también pueda ser abordado por métodos que no supongan incremento de energía.

La posible conversión entre agua y energía comentada en la desalación será usada, en un primer análisis, para determinar cuando el cambio consistente en ahorrar agua a costa de incrementar la energía es interesante de cuando no lo es. Para ello, para la desalación, se supondrá la energía unitaria

$H_d = 300$ m, ya comentada, junto con un rendimiento η_d . Asimismo, para simplificar, se supondrá que los dos métodos alternativos, son indistintos para el cultivo y que únicamente se diferencia en el uso del agua (el segundo usa menos que el primero porque tiene mayor rendimiento, $R_{a2} > R_{a1}$), y en el uso de energía H (el segundo consume más que el primero, $H_2 > H_1$). Bajo estas hipótesis, por cada unidad volumétrica de agua que se aporte en el primer método, por cada m^3 aplicado, por la definición de rendimiento (volumen útil / volumen aportado), realmente lo que el cultivo necesita es su volumen útil, R_{a1} . Como consecuencia, para satisfacer las mismas necesidades, el segundo método deberá aportar R_{a1}/R_{a2} y, como consecuencia, el ahorro de agua al pasar del primer método al segundo sería $1 - R_{a1}/R_{a2}$. El consumo energético para desalar el ahorro, $(1 - R_{a1}/R_{a2}) \cdot H_d / \eta_d$, sumado al que se consumía H_1 debe compararse con el consumo energético del nuevo método, $R_{a1}/R_{a2} \cdot H_2$. Por tanto, el punto de igualdad, en el que el cambio es neutro, cumplirá:

$$H_2 \cdot \frac{R_{a1}}{R_{a2}} = H_1 + \frac{H_d}{\eta_d} \cdot \left(1 - \frac{R_{a1}}{R_{a2}}\right) \Leftrightarrow \frac{R_{a2} - R_{a1}}{R_{a1}} = \frac{H_2 - H_1}{\frac{H_d}{\eta_d} + H_1} \cong \frac{H_2 - H_1}{\frac{H_d}{\eta_d}} \quad (1)$$

La expresión (1) permite valorar el incremento del rendimiento que aconsejaría el cambio. De considerar, de forma aproximada, $H_d / \eta_d = 1.000$ m (usando un rendimiento $\eta_d = 0,30$), el incremento de energía $H_2 - H_1$ en unidades de $10 \text{ m} \equiv \text{kgf/cm}^2 \equiv \text{bar}$, coincide con el incremento relativo porcentual en el rendimiento que debe representar el nuevo método para que compense. Es decir si $H_2 - H_1 = 100 \text{ m} \equiv 10 \text{ kgf/cm}^2$, compensa si el rendimiento se incrementa en un 10%. Por comparación con la exigente desalación de agua del mar, obsérvese que los sistemas de distribución de riego a presión, que requieran alturas de elevación razonables, son relativamente eficientes con respecto a los ahorros marcados por sus posibles eficiencias. Así, un rendimiento entre 0,70 y 0,80, del riego por superficie, debe pasar a valores

entre 0,77 y 0,88, si se necesita una elevación de 100 m, en el riego a presión, lo que es factible. En el mismo sentido, hay que recordar que, en una gran parte de los riegos por superficie españoles, los resultados son peores que los apuntados y, como consecuencia, el cambio podría estar más justificado.

Ahora bien, la necesaria valoración de los retornos o el posible uso de aguas salobres moverían el equilibrio apuntado. Así, si el agua salobre tiene la mitad de concentración que la de referencia o, en definitiva, si el valor de $(H_2 - H_1)/(H_d/\eta_d)$ aumenta al doble, a 0,20, el nuevo intervalo de igualación 0,84 - 0,96, haría menos interesante el cambio. Otros resultados pueden verse en la Tabla 6-7. Es el momento de recordar que de existir otras fuentes de incremento de los recursos hídricos como la reutilización o los trasvases, que requieran un menor consumo energético, véase Tabla 3-7, en general, interesará recurrir a ellas. En este sentido, recordar que actualmente, se encuentra en proceso de aprobación el Plan Nacional de Reutilización de Aguas Regeneradas entre cuyas premisas considera que las mejoras tecnológicas tanto en la depuración como en los posible tratamientos específicos a realizar, como la aplicación de radiación ultravioleta al agua previa a su impulsión a la red, está permitiendo mejorar la calidad físico-química y sanitaria de esta agua, de forma que, en muchas zonas regables, supera a la del agua superficial o subterránea (MARM 2009a).

Un planteamiento similar puede hacerse con los costes, de esta forma pueden englobarse más conceptos. Así, si se hace una inversión para ahorrar agua, puede analizarse si hubiese resultado más económico obtenerla de otro destino. Una expresión similar a la (1) puede servir. Como coste unitaria de referencia puede usarse el valor unitario de la desalación, $C_d = 0,40 \text{ €/m}^3$, de la Tabla 6-1. Referencias más concretas como la de Batanero Ortiz 2004, referida a la

TABLA 6-7. *Rendimiento final R_{a2} de igualación en función del incremento energético y el rendimiento inicial R_{a1}*

Nota: la entrada con los valores de H2-H1 supone un valor de $H_d/H_{\text{red}} = 1.000$

H_2-H_1 (m)	50	100	150	200	300
$(H_2-H_1)/(H_d/\eta_d)$	0,05	0,10	0,15	0,20	0,30
R_{a1}	R_{a2}				
0,50	0,53	0,55	0,58	0,6	0,65
0,60	0,63	0,66	0,69	0,72	0,78
0,65	0,68	0,72	0,75	0,78	0,85
0,70	0,74	0,77	0,81	0,84	0,91
0,75	0,79	0,83	0,86	0,9	0,98
0,80	0,84	0,88	0,92	0,96	

Fuente: elaboración propia.

planta de Carboneras de Almería, aportan también a resultados similares a los allí contemplados, consumos energéticos de 3,15 kWh/m³ y costes unitario de agua entre 0,42 y 0,45 €/m³.

De usar C_d como un valor referido a la unidad de volumen, también deben ser así expresados C_1 y C_2 . En general, las inversiones de riego suelen darse por unidad de superficie CS y para transformarlas a la unidad de volumen son necesarios más valores de referencia. Los años n de vida útil, como el interés i a considerar son inciertos, por lo que también lo será la tasa de amortización a . Otro dato de referencia, las necesidades de agua de la unidad de superficie dependen de cada cultivo, del clima y del rendimiento de las aplicaciones. Un estudio, equivalente al anterior, sustituyendo el consumo energético por unidad de volumen H por el coste de inversión por unidad de volumen C , produce las siguientes expresiones:

$$\frac{R_{a2}-R_{a1}}{R_{a1}} = \frac{C_2-C_1}{C_d+C_1} \cong \frac{C_2-C_1}{C_d} \quad \text{donde: } C_{(\text{€/m}^3)} = \frac{CS_{(\text{€/ha})} \cdot a_{(\text{año}^{-1})} \cdot R_a}{ET_{(\text{m}^3/\text{ha/año})}} \quad (2)$$

TABLA 6-8. Rendimiento final R_{a2} de igualación en función del incremento de coste y el rendimiento inicial R_{a1}

Nota: la entrada con los valores de $CS R_a$ supone un valor $a/ET = 3.10^{-5}$

$CS R_a$ (€/ha)	1.330	2.660	3.991	5.321	6.651	9.976	13.302
$(C_2-C_1)/C_d$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,75	1
R_{a1}	R_{a2}						
0,40	0,44	0,48	0,52	0,56	0,6	0,7	0,8
0,50	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,88	1
0,60	0,66	0,72	0,78	0,84	0,9		
0,65	0,72	0,78	0,85	0,91			
0,70	0,77	0,84	0,91	0,98			
0,75	0,83	0,9					
0,80	0,84	0,96					

Fuente: elaboración propia.

Considerando un interés $i = 0,04$ y una vida útil $n = 10$ años, recomendada para el riego por goteo en Hoffman *et al.* 2007, resulta una tasa de amortización $\alpha = 0,12$. Y, de considerar unas necesidades netas de $ET = 4.100 \text{ m}^3/\text{ha}$, valor medio para España, Plan Nacional de Regadíos, MAPYA (2001), se obtiene un factor: $C_{(\text{€/m}^3)} / CS_{(\text{€/ha})} = R_a * 3.10^{-5} (\text{ha/m}^3)$. Considerando estos datos, para una inversión $CS = 1.333/R_a \text{ €/ha}$ resulta un coste unitario $C = 0,04 \text{ €/m}^3$ que representa 0,10 de C_d y que, según lo visto, requeriría un incremento de un 10% en el rendimiento para que interesase abordarlo. Otros resultados pueden verse en la Tabla 6-8. Como ejemplo, para orientar su uso, si el rendimiento inicial es $R_{a1} = 0,65$, $C_2/C_d = 0,50$ y $C_1/C_d = 0,10$, se entraría con $(C_2-C_1)/C_d = 0,40$ y el rendimiento que compensaría el cambio de sistema sería $R_{a2} = 0,91$.

En lo que se refiere únicamente a los costes de inversión por hectárea de las instalaciones de riego por goteo en el sureste español murciano, una referencia es el trabajo de Cabezas *et al.* 2009. En él, se distingue entre cultivos leñosos, en función de su densidad de plantación, y cultivos hor-

tícolas, en función de la superficie de la finca. Los valores presentados, referidos únicamente a la inversión de las instalaciones en finca, se encuentran todos entre 2.100 y 4.400 €/ha. En el mismo trabajo se estiman también los costes totales de distribución y uso agrícola en €/m³. Los valores medios de un veintena de comunidades, ligadas a otros tantos acuíferos, oscilan entre los 0,14 y 0,32 €/m³, con un valor medio global de 0,27 €/m³. Los valores anteriores frente a los 0,40 €/m³ de la desalación representan porcentajes importantes, entre 35-80% con 68% de media, lo que implica que probablemente el coste de inversión no aconsejaría cambios de método para ahorrar agua salvo que el rendimiento de partida sea muy bajo. No obstante, otras ventajas del riego por goteo frente al riego por superficie podrían aconsejarlos en una agricultura competitiva. Cabe asimismo pensar que de no cambiar de sistema, durante ese tiempo se requeriría de una inversión o, al menos, de unos gastos de conservación y mantenimiento C_1 . Así, junto a los costes de amortización, uno de los costes importantes a añadir serían los de nivelación, cada 2 o 3 años. De suponer, de forma aproximada (Hoffman *et al.* 2007), 125 €/año y un consumo de $4.100/R_a \cong 6.250$ m³/ha, para $R_a \cong 0,65$, resultaría un coste unitario $C_1 = 0,02$ €/m³, que representa una reducción de 5 centésimas, $C_1/C_a = 0,05$, relativamente bajo, con los valores anteriores.

En un artículo reciente de la Comisión de Modernización de los Riegos del Alto Aragón, publicado en su boletín nº 27 de enero de 2010, se recogen también que la modernizaciones están suponiendo unas inversiones medias totales de 10.000 €/ha, de los cuales 6.000 €/ha corresponderían a la red general y 4.000 €/ha a la adecuación de la parcela e instalación de riego. Para justificar estos valores se necesitan mejoras importantes. No obstante, aunque también hay que pensar que no se puede desalar agua en todas las localizaciones, es necesario considerar que las relaciones de susti-

tución están realizadas sobre ella, aún cuando se considera que ese coste energético o monetario únicamente los puede pagar la agricultura más intensiva. Como consecuencia, los incrementos en las eficiencias a exigir, exclusivamente por los conceptos, apuntados deberían ser mayores si las alternativas para aumentar los recursos son menos gravosas.

6.2.5. *Síntesis*

Por un lado, La valoración de cualquier medida de ahorro debe ir acompañada de una valoración de los cambios en los retornos que va a originar, pues de lo contrario se omite del análisis cualquier impacto en la hidrología de la cuenca.

La eficiencia del uso del agua depende tanto del sistema como de cada una de las aplicaciones y, por tanto, puede aumentarse simplemente reduciendo el agua aportada. En explotaciones con una agricultura de subsistencia puede ser más viable esta solución, aunque no se obtengan las producciones potenciales, que una basada en el endeudamiento y el incremento de los costes de producción. Sin cambiar de método, el ahorro de agua lleva implícito un ahorro energético. Ahora bien, bajo determinadas circunstancias agua y energía son intercambiables y, por tanto, pueden establecerse relaciones de sustitución para estudiar la conveniencia de medidas que signifiquen un aumento de una y una reducción de la otra. Algo similar puede hacerse con los costes de inversión. La energía o el coste para la desalación de agua del mar pueden servir de referencia, si bien, en muchas ocasiones, es posible incrementar el recurso por otras vías más económicas.

Cada método de riego tiene unas potencialidades y debilidades, pero todos son proyectados para poder obtener unas eficiencias razonables de uso de agua. El mantenimiento de

las instalaciones y la evaluación de los riegos, para calibrar su funcionamiento y detectar posibles fallos y mejoras, es imprescindible y cabe esperar que produzca mejoras significativas en el uso del agua y de la energía. Los sistemas de distribución también parecen muy susceptibles de mejora energética.

Las necesidades energéticas de la desalación son importantes y frente a ellas los métodos de riego a presión, con consumos energéticos razonables, pueden ser competitivos para ahorrar agua, frente al riego tradicional por superficie, en el caso de que se ahorre el volumen de agua correspondiente a la diferencia de eficiencias potenciales propias de los métodos. No obstante, no cabe esperar que dichas transformaciones traigan consigo el ahorro esperado y, por el contrario, cabe esperar que aumenten el consumo y reduzcan los retornos.

Una medida que ahorre agua a costa de incrementar la energía, de forma aproximada y por comparación con la desalación, por cada 100 m o 0,27 kWh/m³ de incremento de energía, debe mejorarse un 10% la eficiencia de riego, pues de lo contrario no sería rentable. Siguiendo con la comparación con el coste de la desalación, los costes de inversión que requieren los métodos de riego a presión, salvo que los rendimientos del método tradicional sean muy bajos, presentan una competitividad que parece cuestionable para ahorrar agua. De forma aproximada, por cada incremento de inversión de 1.500 o 2.000 €/ha se debe mejorar un 10% la eficiencia de riego.

Seguramente, la fuerte demanda por el agua junto con una inadecuada valoración de posibles ahorros haya motivado que se hayan realizado modernizaciones que han resultado onerosas para la administración y para los propios agricultores. La reconversión mejorará las condiciones de

trabajo de los agricultores y su endeudamiento seguramente les forzará a entrar en una agricultura más industrial, si finalmente se consigue, seguramente habrá merecido la pena. La modernización ha dinamizado también sectores como el de los fabricantes de materiales de riego y de las empresas constructoras, ha dinamizado a profesionales e investigadores, en definitiva, ha colocado al país en una buena posición en un tema con futuro.

6.3. Evaporación de agua en embalses hidroeléctricos y otros embalses y balsas

La evaporación de agua en la superficie libre de un volumen líquido (en nuestro caso, el agua en un embalse), tiene lugar cuando la presión parcial de vapor en el gas es inferior a la presión de vapor saturante. Absorbiendo el calor latente correspondiente, una parte de las moléculas pasan de la fase líquida a la fase gaseosa. Es el fenómeno de evaporación, en gran parte condicionado por la temperatura superficial del volumen libre que determina el nivel energético de partida para que exista el necesario salto energético con el correspondiente al vapor de agua en el aire.

En un estudio de estimación de la evaporación en embalses de riego (Molina Martínez 2006), se muestra que un aumento de la profundidad del embalse provoca un desfase temporal entre la radiación solar y la temperatura superficial (lo que significa que el aumento de profundidad aumenta la inercia térmica del embalse), la temperatura máxima alcanzable es menor y la superficie del embalse apenas tiene incidencia en el valor de la temperatura.

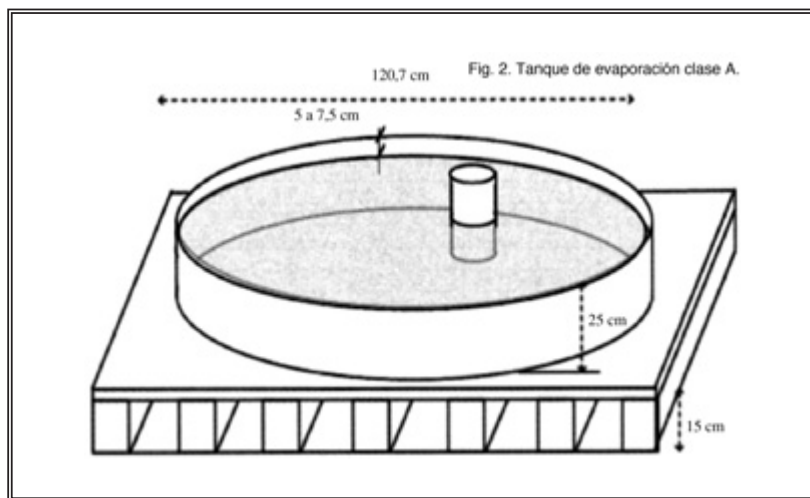
Nuestro objetivo es calcular las consecuencias de la evaporación de agua de la superficie libre de todos los tipos de embalse de España (ya sean hidroeléctricos, de regulación

o sean balsas para riego), en términos de volumen de agua devuelta a la atmósfera por evaporación. Teniendo al volumen evaporado, validaremos o no la necesidad de tomar medidas, que pueden ser por ejemplo cubiertas fijas para sombreado de balsas de regadío (García Gironés 2007).

Existen estudios a nivel nacional sobre la evaporación en España (Villalba Granda 1927, González Quijano 1942, MMA 2000), que fueron una sucesión de modificaciones de los trabajos anteriores. Un caso a escala local ha sido el estudio realizado por López Moreno 2008. El autor calculó mediante la fórmula de Penman-Monteith —para algunos embalses de los Pirineos— el volumen de agua perdido por evaporación.

En Témez Peláez (2007), se calcula la evaporación del agua libre a la superficie de algunos embalses de España mediante medidas realizadas en tanques de clase A (véase Figura 6-2) y adjuntándole al resultado un coeficiente, ya

FIGURA 6-2. *Esquema de un tanque de clase A*



Fuente: Témez Peláez 2007.

que se ha de corregir el inconveniente del material de los tanques de clase A utilizados para proceder a esas medidas.

Solo unos 44 embalses han podido estar estudiados, ya que no siempre se ha podido validar los datos necesarios para su cálculo. Utilizando esa información y teniendo a la superficie del embalse a NMN (Nivel Máximo Normal), podemos calcular cual sería el volumen evaporado al año por los embalses estudiados. Y haciendo una regresión lineal, podemos determinar una evaporación unitaria según la superficie o la capacidad del embalse. Las regresiones lineales se presentan en el Gráfico 6-5.

Vemos en el Gráfico 6-5 que los resultados se ajustan con bastante precisión (el R^2 siendo de 0,98 y 0,90 en el caso de la evaporación según, respectivamente, la superficie y la capacidad) sobre una línea de tendencia. La evaporación unitaria según la superficie o la capacidad del embalse se da en la Tabla 6-9.

En Gleick 1994, el estudio de 700 embalses y balsas reguladoras en 17 estados del Oeste de EU que suman 14.000 km² aproximadamente, estima las pérdidas por evaporación a 14 km³ en volumen o 1,1 m en profundidad.

Con los datos del Ministerio de Medioambiente, tenemos acceso a la información relativa a la capacidad del embalse en España según el uso que se le hace, se muestra en la

TABLA 6-9. *Volumen unitario de agua evaporado en embalse según la superficie o la capacidad del embalse*

Volumen de agua evaporado	
Superficie del embalse	10.200 m ³ por hectárea de lámina de agua
Capacidad del embalse	47.200 m ³ por Mm ³ de capacidad del embalse

Fuente: elaboración propia.

TABLA 6-10. *Estimación del volumen evaporado en los embalses en España*

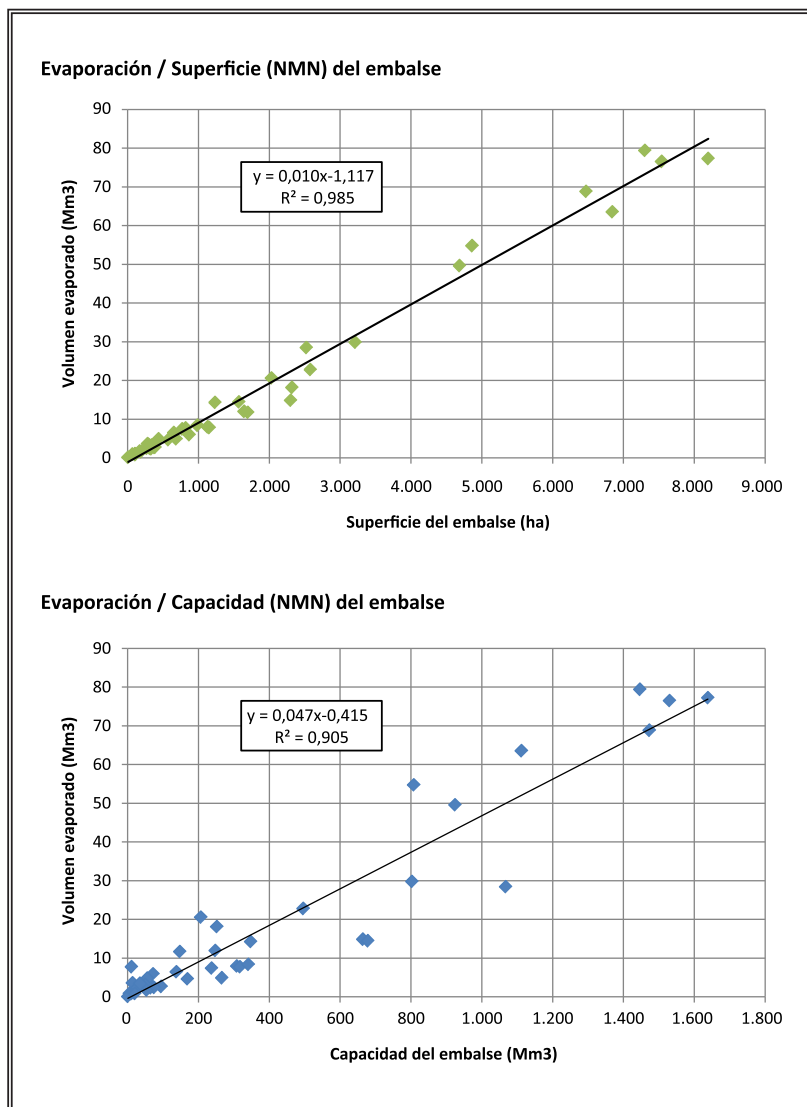
<i>Utilización del embalse</i>	<i>Capacidad del embalse* (Mm³)</i>	<i>Volumen evaporado (Mm³)</i>
Abastecimiento	23.261	1.098
Acuicultura	1	0
Adecuación Ambiental	0	0
Defensa Frente a Avenidas	1.173	55
Derivación	30	1
Ganadero	1	0
Hidroeléctrico	26.630	1.257
Industrial	85	4
Minería	0	0
No, Labio Fijo	0	0
Pesca	1	0
Recreo	3	0
Regulación	2.188	103
Riego	2.107	99
Total	55.480	2.620
* Medida sobre los 10 años anteriores.		

Fuente: elaboración propia con datos del MMARM (capacidad del embalse).

Tabla 6-10. Con los resultados obtenidos a la tabla anterior, podemos estimar en un año, el volumen evaporado total en los embalses de España.

En el año 2007, la producción de plantas hidroeléctricas fue de 30.807 GWh (EuroStat 2007a), estimamos las pérdidas de agua por unidad de electricidad producida en plantas hidroeléctricas a 40.814 m³/GWh. En Río & Carrillo 2009, el volumen de agua evaporado es estimado entre 10.000 m³/GWh y 70.000 m³/GWh. Estos cálculos deben ser tomados con mucha cautela, por cuanto cada embalse tiene una configuración específica e incluso algunos están aumentando su potencia mediante centrales reversibles. Este es el

GRÁFICO 6-5. *Evaporación de agua (volumen) en embalses según su superficie NMN (arriba) y su capacidad NMN (abajo)*



Fuente: elaboración propia con datos de Témez Peláez 2007 y del MARM (embalses hidroeléctricos).

caso de la Muela de Cortes en el Júcar, en el que mediante una central reversible se logrará aumentar la potencia de 630 MW a 1480 MW (Cabrera, 2010).

En Gleick 1994, una serie de 100 plantas hidroeléctricas en California llevaron un estudio a estimar las pérdidas por evaporación entre 40 m³/GWh y 200.000 m³/GWh; la media dada es de 5.400 m³/GWh. El estudio adelanta que eso es varias veces más que el volumen de agua consumido en plantas nucleares o utilizando energías fósiles. El volumen total de agua perdida por evaporación en Estados Unidos sería —según ese mismo estudio— la mitad del volumen mencionado, ya que el ratio de evaporación es más alto en la parte Oeste de EE.UU.

BOX 02 CUBIERTAS FIJAS PARA SOMBREO

La evaporación anual en embalses y balsas de regulación en España alcanza un volumen del orden de 2.620 Mm³ (véase el apartado 6.3 Evaporación de agua en embalses). Esta es la razón por la cual se ha empezado a pensar en técnicas para mitigar las pérdidas. Una solución para reducir la evaporación en balsas podría ser la construcción de cubiertas fijas para sombreo.

García Gironés (2007) proponen una técnica para balsas de regulación para regadío —ya utilizada en el suroeste de España— que consta en una estructura de cables metálicos (de tipo reticular), anclados alrededor de la balsa; dicha estructura soporta la cobertura permeable de rafia de polietileno negro. Esta tecnología permitiría conseguir una reducción de la evaporación de un 80%. Gallego Elvira *et al.* 2009 han efectuado un análisis sobre el caso concreto de la implantación de una cobertura suspendida en un embalse de riego con el fin de evaluar su impacto sobre las variables que condicionan la evaporación así como la calidad de las aguas almacenadas.

Martínez Alvarez *et al.* (2006) llevaron a cabo un estudio experimental con el fin de evaluar cual sería el material más interesante para la construcción de un dispositivo de sombreado. La solución aportada debe limitar a la vez los efectos aerodinámicos y de radiación solar, ambos responsables de la evaporación de la lámina de agua libre a la superficie de las balsas de regulación o de regadío. El factor de reducción de evaporación, consecuente con el sistema colocado, se puede calcular con la ecuación siguiente:

$$f_R = \frac{1 - E_S}{E_{OP}}$$

donde f_R es el factor reductor de evaporación

E_S es el ratio de evaporación diario para una balsa que estaría tapada [mm.día⁻¹]

E_{OP} es el ratio de evaporación diario para una balsa abierta [mm.día⁻¹]

Los parámetros tenidos en cuenta el factor de reducción de evaporación f_R son:

- Radiación transmitida, reflectada y absorbida
- Reducción de la velocidad del viento
- Influencia en el coeficiente de transferencia de masa
- Influencia en el gradiente de potencial
- Influencia en la temperatura de la masa de agua
- Evaporación y condensación en la balsa
- Efecto de la cubierta sobre los componentes del balance energético a la superficie de la balsa

Los resultados anunciados por Gallego Elvira *et al.* 2009 son muy positivos: una drástica reducción de la radiación solar sobre el cuerpo de agua de un 99% así como de la velocidad de viento sobre la lámina de agua de un 90%.

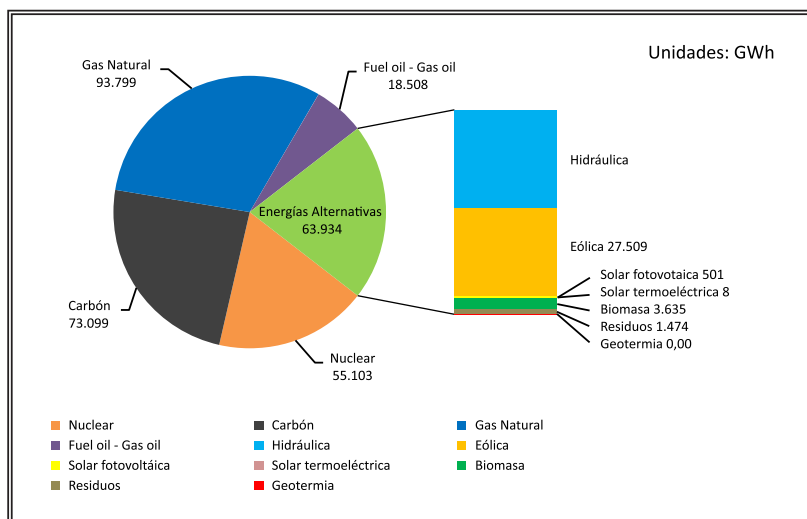
7. GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD Y CONSUMO DE AGUA

7.1. Situación del sector de generación de electricidad

El sector eléctrico está siendo objeto de atención creciente en los estudios de estimación de consumo de agua (Cabrera *et al.* 2008, MARM 2007b, EPRI 2002, Gleick 1994, King *et al.* 2008, Pate *et al.* 2007, Rio Carrillo & Frei 2009, UCS 2009). La cuestión es saber si la disponibilidad de agua para los sectores doméstico, comercial, agrario y de la industria será compatible con una demanda creciente en energía.

El sector de la energía está en constante evolución desde el comienzo del uso comercial de las energías alternativas o renovables. En este sentido, es necesario preguntarse si

GRÁFICO 7-1. *Producción bruta de electricidad en España para el año 2007*



Fuente: EuroStat 2007a.

el consumo de agua por kilovatio generado puede reducirse a medida que el mix energético evoluciona para reducir sus emisiones de GEI.

El Gráfico 7-1 muestra la producción bruta de electricidad según el tipo de tecnología para el año 2007 que alcanzó un total anual de 291.054 GWh.

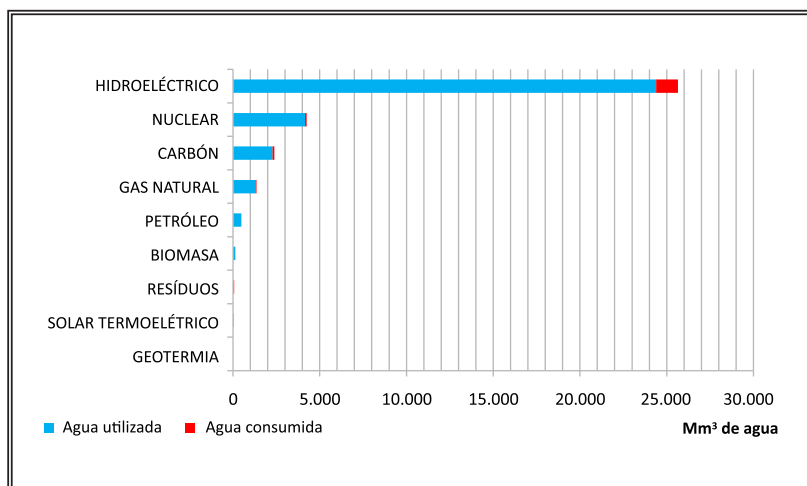
Salta a la vista que son las centrales con gas las que tienen la producción bruta más elevada, con un 30,6%, directamente seguidas por las de carbón, 23,8% y el nuclear, 18,0%. Las energías renovables representan en su conjunto un 21,5%.

7.2. Consumo de agua en centrales de generación de electricidad

El sector de la producción de electricidad está directamente o indirectamente ligado a la utilización de agua. Es importante diferenciar la utilización de agua en centrales de generación de electricidad con su consumo directo. En el primer caso, el agua, después de haber sido utilizada en la central, es devuelta al medioambiente, sin que cambie su estado sanitario. En el caso del consumo de agua en centrales de generación, el agua, después de haber sido utilizada, no puede ser devuelta al medio ambiente bien porque ha sido contaminada durante el proceso en que ha servido o bien porque ha desaparecido en el proceso en que ha servido, por eso es “consumida” (normalmente, evaporada). El Gráfico 7-2 muestra la cantidad estimada de agua empleada en la producción de electricidad según el tipo de tecnología productora.

Los valores de volumen de agua utilizado y agua consumida provienen principalmente de los autores Río Carrillo & Frei

GRÁFICO 7-2. *Agua utilizada y consumida en la generación de electricidad en España en el año 2007*

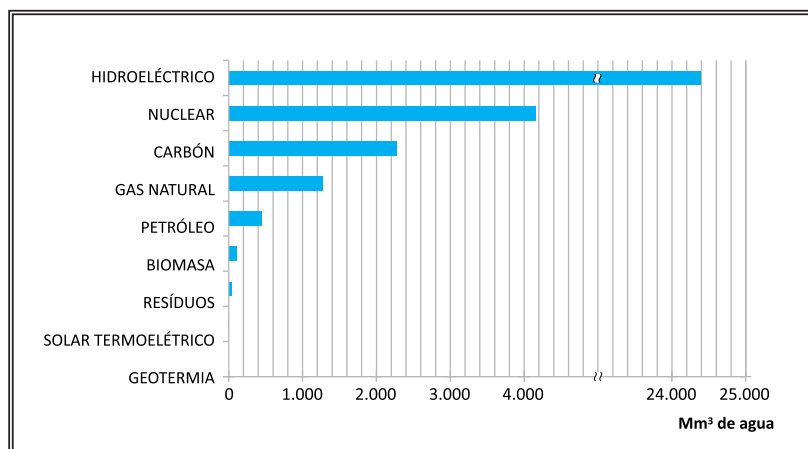


Fuente: elaboración propia con Rio Carrillo & Frei 2009 y Linares & Sáenz de Miera 2009.

(2009), quienes han estudiado en detalle la relación entre la energía y el agua para el caso de España. Para ampliar la fuente de datos, podemos decir que los datos presentados en las tablas que a continuación corroboran los valores de otros autores y/u otros países (EPRI 2002, CATF & WRA 2003, Linares & Sáenz de Miera 2009, Pate *et al.* 2007, King *et al.* 2008). Sin embargo, en algunos casos se ha calculado el consumo de agua por kWh producido, caso del volumen de agua consumido en la producción en centrales hidroeléctricas.

Conviene recordar que para la producción hidroeléctrica, el valor obtenido es muy elevado con respecto a las demás tecnologías. Sin embargo el agua movilizada solo circula en turbinas, siendo nula la contaminación de esa agua. La cantidad de agua consumida en la producción hidroeléctrica es en cambio mucho más importante que para las demás tecnologías. La razón es debida a la evaporación del agua en

GRÁFICO 7-3. *Agua utilizada en la generación de electricidad en España en el año 2007*



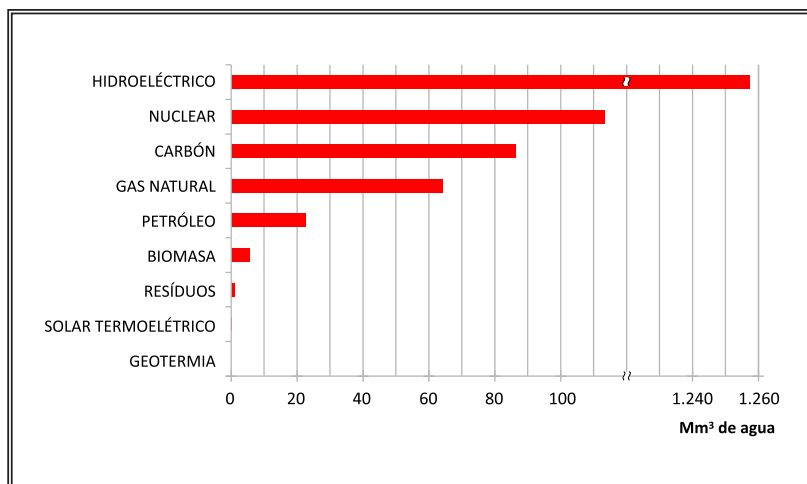
Fuente: elaboración propia con Rio Carrillo & Frei 2009 y Linares & Sáenz de Miera 2009.

los embalses que alimentan las centrales. Como más adelante, se ha calculado el volumen de agua evaporada en los embalses de producción de electricidad hidroeléctrica. El volumen unitario de evaporación tiene un promedio de 40.000 m³/GWh y el volumen evaporado en el año de producción 2007 está alrededor de 1.250 Mm³. Para más información respecto a la evaporación en balsas y embalses, véase el apartado 6.3 Evaporación de agua en embalses.

Los Gráfico 7-3 y Gráfico 7-4 muestran respectivamente la parte usada y consumida estimada del agua en la producción de electricidad, de mayor a menor cantidad según el tipo de central de producción. De nuevo, se representa aparte el agua empleada en la generación hidroeléctrica para poder comparar las demás tecnologías productoras.

En la Tabla 7-1, se recogen las cantidades estimadas de agua utilizada (A.Uti.) y consumida (A.Con.) por unidad de

GRÁFICO 7-4. *Agua consumida en la generación de electricidad en España en el año 2007*



Fuente: elaboración propia con Rio Carrillo & Frei 2009 y Linares & Sáenz de Miera 2009.

electricidad producida para todas las tecnologías generadoras de electricidad en España. Para cada una de ellas, se han mencionado tres valores de uso del agua: valor reducido, valor estimado y valor elevado. En efecto, según la tecnología empleada y las condiciones climáticas, puede haber una variación de consumo de agua entre plantas de producción de electricidad, si bien Rio Carrillo y Frei (2009) no se explican las razones de estos tres valores. El valor medio es, sin embargo, el más representativo para un estudio cuyo enfoque es España.

En la Tabla 7-2, se estiman las cantidades de agua utilizada en el año 2007 que fueron necesarias para la producción bruta de electricidad (datos de EuroStat 2007a, véase Gráfico 7-1).

TABLA 7-1. *Utilización y consumo de agua por unidad de electricidad producida según el tipo de central de producción en España*

Nota: A. Uti. por Agua Utilizada, A. Con. por Agua Consumida

<i>Tecnología Productora</i>	<i>Tipo de uso</i>	<i>Valor inferior m³/GWh</i>	<i>Valor estimado m³/GWh</i>	<i>Valor elevado m³/GWh</i>
Carbón	A.Uti.	1.134	31.047	189.000
	A.Con.	756	1.552	1.815
Petróleo	A.Uti.	0	24.322	189.000
	A.Con.	0	1.216	1.814
Gas Natural	A.Uti.	0	13.675	189.000
	A.Con.	0	684	1.814
Nuclear	A.Uti.	1.890	75.362	226.800
	A.Con.	1.512	1.569	2.722
Hidroeléctrico	A.Uti.	715.000	791.676	3.145.000
	A.Con.	10.000	40.814	70.000
Biomasa	A.Uti.	1.134	31.047	189.000
	A.Con.	1.134	1.552	1.814
Residuos	A.Uti.	1.134	31.047	189.000
	A.Con.	756	800	1.814
Solar Termoelectrico	A.Uti.	2.775	3.090	3.404
	A.Con.	2.775	3.090	3.404
Geotérmica	A.Uti.	7.400	7.400	7.400
	A.Con.	5.180	5.180	5.180

Fuente: estimación propia con Rio Carrillo & Frei 2009 y Linares & Sáenz de Miera 2009.

7.3. Previsiones a largo plazo del impacto de las plantas termosolares

En la actualidad, se habla del posible impacto negativo sobre los recursos hídricos de las plantas termosolares que se están construyendo en España. Hoy en día solo 10 plantas están operativas (Protermo Solar 2010). Querríamos destacar lo que va a representar, en términos de volumen agua utilizada para la producción de electricidad, la construcción de las 16 plantas en fase de construcción avanzada y lo que

TABLA 7-2. *Cantidades de agua utilizada y consumida para la producción de electricidad en España en el año 2007 según el tipo de central de producción*

Nota: A. Uti. por Agua Utilizada, A. Con. por Agua Consumida

<i>Tecnología Productora</i>	<i>Tipo de uso</i>	<i>Valor inferior Mm³</i>	<i>Valor estimado Mm³</i>	<i>Valor elevado Mm³</i>
Carbón	A.Uti.	83	2.207	13.816
	A.Con.	55	113	133
Petróleo	A.Uti.	0	450	3.498
	A.Con.	0	22,5	33,6
Gas Natural	A.Uti.	0	1.283	17.728
	A.Con.	0	64	170
Nuclear	A.Uti.	104	4.153	12.497
	A.Con.	83	86	150
Hidroeléctrico	A.Uti.	22.027	24.389	96.888
	A.Con.	308	1.257	2.156
Biomasa	A.Uti.	4,1	113	687
	A.Con.	4,1	5,6	6,6
Residuos	A.Uti.	1,7	46	279
	A.Con.	1,1	1,2	2,7
Solar Termoelectrico	A.Uti.	0,02	0,02	0,03
	A.Con.	0,02	0,02	0,03
Geotérmica	A.Uti.	0	0	0
	A.Con.	0	0	0

Fuente: elaboración propia con Rio Carrillo & Frei 2009 y Linares & Sáenz de Miera 2009.

representaría la construcción de las 34 plantas pre-asignadas. Para evaluar el volumen de agua involucrado en la producción de electricidad, nos basaremos en los datos de la Tabla 7-1 y de la Tabla 7-2, suponiendo un rendimiento de las pantas situado en un rango de 2,1 a 2,6 GWh/MW instalado (MITYC 2005). Los resultados figuran en la Tabla 7-3.

TABLA 7-3. *Previsiones de utilización/consumo de agua en plantas termosolares en España*

	Número de plantas	Potencia	Producción bruta total GWh		Agua utilizada o consumida Mm ³	
	N.º	MW	mínimum	máximum	mínimum	máximum
Plantas Operativas	10	382	798	993	2,47	3,07
Planta en Construcción Avanzada	16	668	1.394	1.734	4,31	5,36
Sub total	26	1.050	2.192	2.727	6,77	8,42
Plantas Preasignadas	34	1.372	2.864	3.562	8,85	11,00
Total	60	2.422	5.056	6.289	15,62	19,43

Fuente: elaboración propia con datos de Protermo Solar 2010, MITYC 2005, Rio Carrilo & Frei 2009, Linares & Sáenz de Miera 2009.

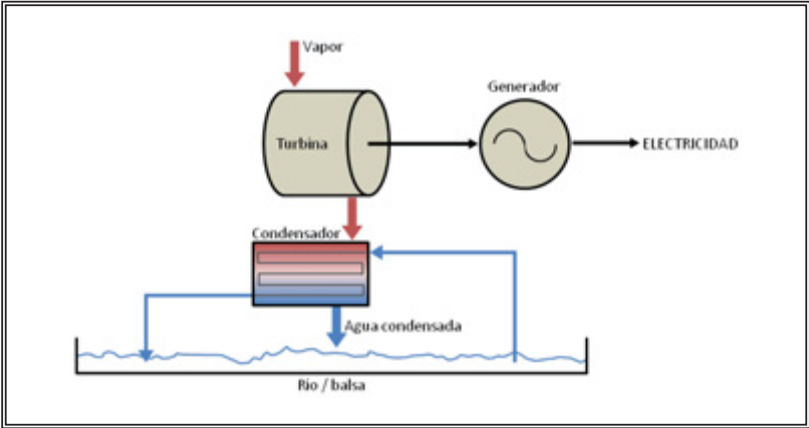
Vemos con los resultados de la Tabla 7-3 que el volumen de agua que supondría la puesta en funcionamiento de todas las plantas termosolares en fase de construcción avanzada o pre-asignadas alcanzaría 17,5 Mm³ anuales, solo el 0,2% del volumen total de agua involucrado en el sector de la energía.

7.4. Sistemas de refrigeración

En el sector de la energía, y más específicamente en centrales de generación de electricidad, son varias las tecnologías disponibles para la refrigeración de las centrales. En la Ilustración 7-1, se muestra el sistema más empleado, el sistema en circuito abierto, que consta de un sistema donde el agua se bombea desde un río o una balsa para enfriar el vapor que ha servido para la generación de electricidad mediante una turbina. Después de haber recorrido el condensador, el agua es devuelta a su fuente.

El agua casi no tiene contacto con el aire —lo que tiene como consecuencia un consumo de agua casi nulo por eva-

ILUSTRACIÓN 7-1. *Sistema de enfriamiento “circuito abierto” (“open-loop” u “once-through”) en centrales de producción de electricidad*



Fuente: elaboración propia con Torcellini *et al.* 2003 y Electric Power Research Institute (2002).

poración (aunque existe una diferencia de temperatura entre el agua captada y el agua vertida, lo que aumenta el ratio de evaporación del agua del río o de la balsa).

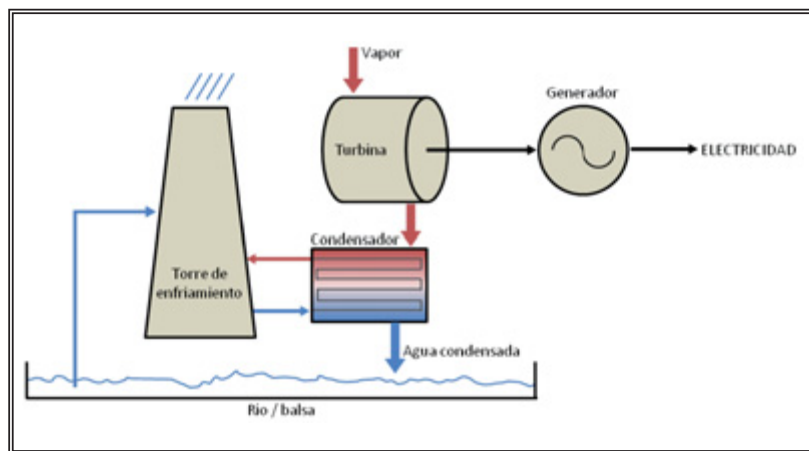
En la Tabla 7-4, se ofrece una evaluación del volumen de agua utilizado en varios tipos de central productora de electricidad según el sistema de enfriamiento en circuito abierto.

TABLA 7-4. *Volumen de agua utilizado involucrado en el sistema de enfriamiento en circuito abierto*

Tecnología	Circuito abierto ("once-through") m^3/kWh	Perdidas por evaporación en río o balsa m^3/kWh
Energía fósil	75-190	1
Nuclear	95-225	1,5
Ciclo combinado	250-75	0,4

Fuente: elaboración propia con Electric Power Research Institute (2002).

ILUSTRACIÓN 7-2. Sistema de enfriamiento “circuito cerrado” (“close-loop” o “cooling towers” o “evaporation ponds”) en centrales de producción de electricidad



Fuente: elaboración propia con Torcellini *et al.* 2003 y Electric Power Research Institute (2002).

El sistema representado en la Ilustración 7-1 de un circuito abierto, aunque el volumen de agua consumida sea bajo, necesita un volumen de agua utilizada considerablemente más importante que el sistema en circuito cerrado que mostramos a la Ilustración 7-2, ya que el tiempo de contacto entre flujos en el condensador es más corto.

El sistema de enfriamiento que presentamos a la Ilustración 7-2 consta de un sistema donde una parte del agua que ha sido calentada durante el enfriamiento en el condensador del vapor habiendo servido para la producción de electricidad mediante la turbina se evapora en la torre de enfriamiento. La parte de agua que se evapora ha de ser reintegrada en el sistema, razón por la cual es captada desde una fuente superficial o una balsa y llevada a la torre de enfriamiento.

En la Tabla 7-5 y la Tabla 7-6, se ofrece una evaluación del volumen de agua utilizado en varios tipos de central ge-

TABLA 7-5. *Volumen de agua utilizado en el sistema de enfriamiento en circuito cerrado con torre de enfriamiento*

<i>Tecnología</i>	<i>Circuito cerrado ("close-loop") m³/kWh</i>	<i>Reutilización m³/kWh</i>	<i>Pérdidas por evaporación en torre de enfriamiento m³/kWh</i>
Energía fósil	1,9-2,3	0,15-0,4	1,8
Nuclear	3-4,2	0,2-0,75	2,7
Ciclo combinado	0,9	0,2	0,7

Fuente: elaboración propia con Electric Power Research Institute (2002).

TABLA 7-6. *Volumen de agua utilizado en el sistema de refrigeración en circuito cerrado con balsa de enfriamiento*

<i>Tecnología</i>	<i>Circuito cerrado ("close-loop") m³/kWh</i>	<i>Reutilización m³/kWh</i>	<i>Pérdidas por evaporación en balsa de enfriamiento m³/kWh</i>
Energía fósil	1,1-2,3	0,1-0,4	1-1,9
Nuclear	1,9-4,2	0,2-0,75	1,7-3,4

Fuente: elaboración propia con Electric Power Research Institute (2002).

neradora de electricidad según el sistema de refrigeración en circuito cerrado utilizando una torre de enfriamiento o una balsa de enfriamiento.

Otra tecnología de refrigeración —la más eficiente en cuanto al consumo de agua ya que no utiliza agua para enfriar el condensador— es más costosa que los demás sistemas de enfriamiento descritos anteriormente y consta en una cámara de enfriamiento del condensador mediante un flujo de aire a baja temperatura (EPRI 2002).

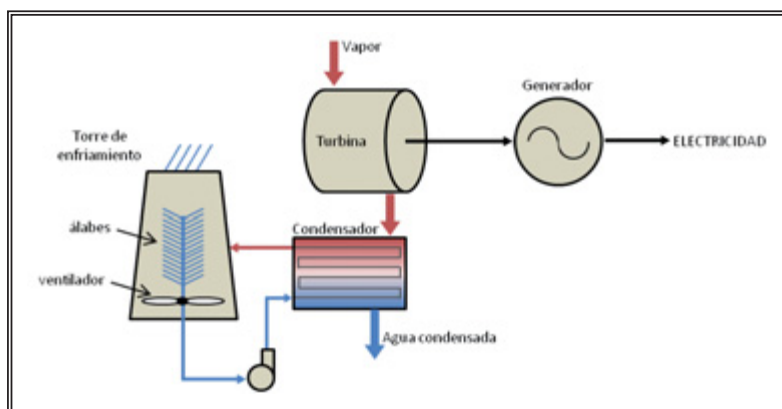
Cabe destacar el volumen de agua utilizada en las centrales nucleares españolas. Excepto por la central Trillo NPP que fue construida con una tecnología alemana (Rio Carrillo & Frei 2009), las demás centrales son de tecnología estadounidense. Sin embargo, existen varios tipos de sistema de re-

frigeración que tienen un grado de utilización de agua muy variable. En España se utilizaron dos sistemas diferentes, uno con torres de tiro natural o forzado, el otro en circuito abierto con abastecimiento de agua desde una fuente continua. Cinco centrales nucleares funcionan en España con torres de tiro y cuatro en circuito abierto.

Box 03 EL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN EN SECO (DRY COOLING)

El sistema de enfriamiento en seco consta simplemente en un sistema de enfriamiento que no utiliza agua, ya que el intercambio de calor que tiene lugar en el condensador se hace gracias a una circulación de aire frío que pasa en sentido contrario. Tal como se muestra a la Ilustración 7-3, el aire de enfriamiento calentado por el vapor utilizado en la turbina, pasa a la torre de enfriamiento donde gracias a múltiples aletas dispuestas sobre las tuberías y/o un ventilador, el aire se enfría de nuevo y está reinyectado en el condensador.

ILUSTRACIÓN 7-3. Sistema de enfriamiento en seco (dry cooling)



Fuente: elaboración propia con Torcellini *et al.* 2003 y Electric Power Research Institute 2002).

Este sistema de enfriamiento presenta la ventaja —por no utilizar agua— de que puede instalarse en cualquier emplazamiento. Sin embargo, durante los días de altas temperaturas, el rendimiento de la planta se ve limitado por factores como el viento, que puede limitar el enfriamiento del fluido coloportador (Wolf *et al.* 2009).

Las limitaciones todavía presentes en la utilización de esa tecnología es su coste de construcción respecto al del sistema de enfriamiento húmedo, así como el rendimiento más bajo en los días calurosos. Una posibilidad que se estudia es la combinación de ambas tecnologías (seca y húmeda), según la cual el enfriamiento húmedo serviría solo para mantener el rendimiento de la planta a su nivel normal.

8. IMPACTO DE LOS BIOCARBURANTES EN LA UTILIZACIÓN DE AGUA

8.1. Perspectiva general

La razón por la cual los biocombustibles tienen hoy en día el éxito que se les atribuye es debida, por un lado, a la seguridad energética, y por otro lado, a su hipotético papel en la reducción de las emisiones de gases a efecto invernadero.

En efecto, al petróleo se le atribuye gran volatilidad de sus cotizaciones y el riesgo del agotamiento en el largo plazo. Esto plantea la necesidad de pensar en otras fuentes de energía o carburantes, cuyo principal consumidor es el sector del transporte con un 39% del consumo energético español (IDAE 2007b).

La Unión Europea (UE) ha situado a los biocarburantes como un reto estratégico para los próximos años. La directiva 2003/30/CE, relativa al fomento del uso de biocarburantes u otros combustibles renovables en el transporte anunciaba, como valores de referencia, un 5,75% calculado

sobre la base del contenido energético, de toda la gasolina y todo el gasóleo comercializados en sus mercados con fines de transporte a más tardar el 31 de diciembre de 2010. Las decisiones del Consejo Europeo de marzo de 2007 (Plan de Acción en Energía) proponen una estrategia de lucha contra el cambio climático que pone los biocarburantes como segundo pilar, estableciendo el objetivo vinculante para el conjunto de la UE de que un mínimo de un 10% del conjunto de los combustibles de transporte (gasóleo y gasolina) consumidos en la UE en el 2020 sean biocarburantes.

8.1.1. Terminología de los biocombustibles

Tras haber planteado el panorama que se les está dando a los biocarburantes en Europa, es importante definir exactamente primero qué abarcan los términos de “biocombustibles” y “biocarburantes” y qué entendemos por ello; y segundo, a cuales de las partes de este desglose va a tratar nuestro análisis. En la directiva 2003/30/CE de la Comisión Europea relativa al fomento del uso de biocarburantes u otros combustibles renovables en el transporte, se entiende por «biocarburante»: el combustible líquido o gaseoso para transporte producido a partir de la biomasa; «otros combustibles renovables»: combustibles renovables, distintos de los biocarburantes, que procedan de fuentes de energía renovables, tal como las define la Directiva 2001/77/CE (2), y se utilicen en el transporte.

Nuestro análisis tratará exclusivamente de los carburantes obtenidos mediante materia prima de origen orgánica; en adelante, se utilizará el término “biocarburante” para referirse a ellos. El término de biocombustible no tiene real significado, ya que podríamos decir que se refiere tanto a biocarburante, como a combustible de origen orgánico y utilizado en la producción de electricidad (como en la biomasa).

Es preciso también distinguir lo que abarca el término de “biocarburante”. Sin entrar en los detalles —para más información, referirse a la directiva 2003/30/CE— el término de biocarburante se refiere a los productos tales como bioetanol, biodiesel, biogás, biometanol, biodimetiléter, bioETBE (etil ter-butil éter), bioMTBE (metil ter-butil éter), biocarburantes sintéticos, biohidrógeno, o aceite vegetal puro.

8.1.2. Breve estado del arte de los biocarburantes

Los biocarburantes son en conjunto productos en constante evolución, razón por la cual también se puede clasificar los tipos de biocarburantes en generaciones.

Hoy en día, el sector está en la fase de producción comercial de biocarburante de primera generación. Ya se han hecho correr ríos de tinta para intentar justificar su uso a gran escala con el fin de enfrentar los impactos medioambientales que tienen los carburantes fósiles y como alternativa cuando se agoten las reservas de petróleo. Sin embargo —y nuestro estudio lo demuestra para el caso particular de España— los biocarburantes de primera generación no son una tecnología sostenible que se puede utilizar a gran escala en todos los países de la Unión Europea.

En un futuro cercano —es decir que ya se está estudiando intensivamente— los biocarburantes que se suministrarán comercialmente posiblemente en 2015 (Berndes 2010) pero probablemente no antes del 2020 (Fernández 2007), serán de segunda generación. Se empleará básicamente biomasa lignocelulósica, de tipo herbáceo (paja) o leñoso (astillas), para la elaboración de biocarburantes; y que se denominan BtL (Biomass to Liquid). Existen al día de hoy básicamente dos estrategias de elaboración para biocarburantes de segunda generación: la primera estrategia utiliza para la pro-

ducción de etanol la fermentación de la biomasa una vez hidrolizada; mientras que la segunda se realiza por vía termoquímica, mediante la cual se puede obtener el aceite de pirólisis, los biohidrocarburos obtenidos por pirólisis y posterior reformado de la biomasa (proceso KDV), las gasolinas y gasóleos obtenidos por vía de síntesis de Fisher Tropsch, y los alcoholes obtenidos por vía termoquímica, entre otros (Fernández 2007).

8.1.3. *Situación actual y futura, preguntas acerca de la sostenibilidad de los biocarburantes en Europa*

Si hoy en día se investiga de manera intensiva sobre los biocarburantes de segunda generación es debido a que los de primera generación no satisfacen plenamente los requisitos de sostenibilidad que se esperaba de ellos. Debido a ello, desde la directiva 2003/30/CE de la Comisión Europea, que por cierto dio un paso importante en la promoción de la producción de biocarburantes —no en toda Europa, pues Reino Unido, Alemania y Francia son al día de hoy los tres países principales productores de biocarburante (European Biomass Association 2010)— las preocupaciones han ido creciendo en la comunidad científica, hasta desembocar en la comunicación de la Comisión al Consejo Europeo y al Parlamento Europeo, titulada: “Una política energética para Europa” (5282/07[COM(2007)1-final]), texto en el cual se puede leer, literalmente, que “*las políticas energéticas actualmente vigentes en la UE no son sostenibles*”. Y que llevó a la Comisión a proponer “*establecer un objetivo mínimo vinculante para los biocombustibles del 10% del combustible para vehículos en 2020, así como garantizar que los biocombustibles utilizados sean sostenibles, dentro y fuera de la UE*”. La comunicación concluye en la necesidad de apoyar las prioridades de esa iniciativa, dentro de las cuales apa-

rece la de *“desarrollar los biocombustibles, en particular los de segunda generación, para que se conviertan en alternativas a los hidrocarburos plenamente competitivos”*.

El objetivo fundamental de la Unión Europea tiene dos vertientes: reducir el coste de la energía no contaminante y situar Europa en la “vanguardia del sector de las tecnologías que permiten reducir las emisiones de carbono”. Eso significa a largo plazo completar las siguientes etapas:

- Para 2020, dar un fuerte desarrollo de los biocarburantes de segunda generación para alcanzar el objetivo de introducción de un 20% de energías renovables en el sector energético.
- Para 2030, adaptar cada vez más el sector de transportes para el uso de biocarburantes de segunda generación.
- Para 2050, haber concluido la transformación del sector a un sistema de producción de baja emisión de carbono.

8.1.4. Problemas de los biocarburantes de primera generación

¿Por qué, entonces, seguir hablando de los biocarburantes de primera generación? La cuestión del impacto medioambiental positivo que tendrían —sea el ratio energético o sea en la disminución de la producción de gases a efecto invernadero— está cuestionada hoy en día cuando se pregunta por los efectos positivos que cabe esperar de la expansión del uso de biocarburantes. Se manifiestan inquietudes agronómicas, respecto a la superficie de tierra necesaria, a las importaciones de materias primas que podrían resultar necesarias con fin de compensar la producción de biocarburantes o la transformación del sector agrario que va a re-

sultar imprescindible si la U.E. sigue el camino que ya ha tomado.

Una de las dudas acerca de las ventajas de los biocarburantes se refiere a si la biomasa necesaria para alcanzar el consumo mundial de carburantes puede realmente obtenerse de especies cultivadas; dicho de otra forma ¿los biocarburantes son capaces de reemplazar completamente el petróleo? Hill *et al.* (2006) anuncian que en Estados Unidos, dedicar la totalidad del cultivo del maíz y de la soja del año 2005 a la producción de etanol y biodiesel habría alcanzado un 12% y 6,0% de la demanda en gasolina y diesel respectivamente. Teniendo en cuenta la energía necesaria para su producción, ese cambio aportaría una ganancia energética neta equivalente a un 2,4% y un 2,9% para gasolina y diesel, respectivamente. En Europa, el consumo en el año 2007 de gasolina y diesel sin considerar su consumo para el tráfico aéreo, alcanzó unos 189,6 Mtep y 106,07 Mtep respectivamente, 295 Mtep en total (European Biomass Association 2009). Del mismo modo, España alcanzó un consumo 26,18 Mtep y 7,01 Mtep respectivamente, 33,19 Mtep en total.

Determinar el balance energético de la producción de los biocarburantes constituye uno de los argumentos para justificar el impacto positivo tanto de producción como del consumo de biocarburantes desde un punto de vista medioambiental. La crítica que se suele hacer sobre los carburantes fósiles es que el ratio energético es negativo cuando se evalúan —en el ciclo de producción de esos carburantes— los inputs incorporados en su fase de obtención, frente al contenido energético de esos mismos carburantes.

“Los biocarburantes juegan con una gran ventaja, ya que al estar elaborados a partir de materia vegetal, el CO₂ emitido durante su combustión corresponde al que fue anteriormente absorbido durante el crecimiento de las plantas que

forman su materia prima, con lo que se cierra un ciclo neutro” (IDAE 2007b). Algunos autores contrastaron la veracidad de esta afirmación, ya que muchas prácticas, ya sean agrícolas o industriales, dan resultados que no garantizan la existencia de un ciclo neutro. En España, el CIEMAT (Lechón *et al.* 2005) ha llevado a cabo un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de los biocarburantes (bioetanol y biodiesel) en el cual se indica muy claramente que si se desea obtener un efecto apreciables en el uso de energía primaria y en las emisiones de CO₂ (como lo pretende la U.E. en su Plan de Acción en Energía) mediante el uso de bioetanol o biodiesel, resulta imprescindible realizar mezclas con carburantes fósiles de más del 80% (85% en el caso del etanol y casi 100% para el biodiesel) para lograr disminuciones de emisiones de GEI (un 70% de disminución de emisiones de GEI y un 36% de reducción de energía fósil).

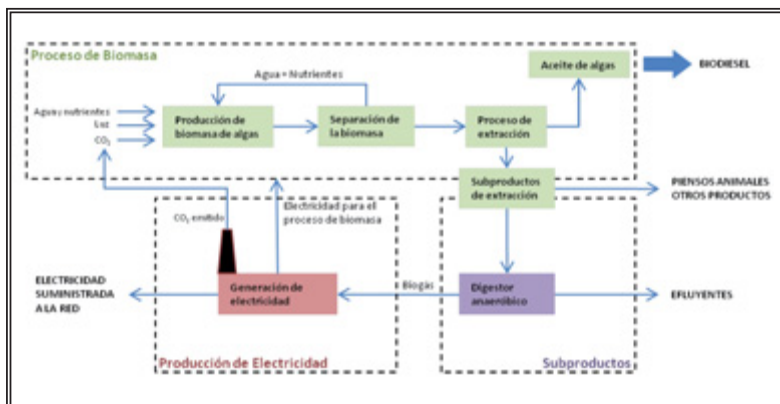
BOX 04 MICROALGAS PARA BIOCABURANTES DE SEGUNDA GENERACIÓN

La producción de biocarburantes con microalgas vuelve a tomar importancia en el debate de hoy, pues sería “el único biocarburante que tendría el potencial de reemplazar el carburante para transporte derivado del petróleo sin afectar el suministro de alimento y otros productos cultivados” (Chisti 2008).

Se confía en las microalgas por el rendimiento extremadamente alto que tienen tanto en el contenido de aceite (de 20 a 50% del contenido de biomasa seca (Haag 2007) frente a los 5% (Chisti 2008) que suelen alcanzar los cultivos), como en el volumen de biodiesel que se puede producir por hectárea (hasta 90-100 m³/ha (Haag 2007, Chisti 2008) frente a unos 6 m³/ha por ejemplo en el caso de la caña de azúcar en Brasil).

El proceso tecnológico de producción de biodiesel con microalgas se describe en la Ilustración 8-1.

ILUSTRACIÓN 8-1. *Proceso tecnológico de producción de biodiesel a partir de microalgas*



Fuente: elaboración propia con Chisti 2008.

El proceso consiste en obtener primero biomasa de microalgas, donde se encuentra el aceite bruto; proceder a una extracción mediante hexano para conseguir el aceite que luego servirá para producir el biodiesel; la materia prima de los subproductos de extracción (rica en aceite) se puede enviar a un biodigestor o utilizar para piensos animales; el biogás emitido puede servir de combustible en una central de cogeneración de electricidad, donde una parte de la electricidad producida servirá para el suministro propio de las instalaciones y la otra parte puede verterse en la red, el CO_2 emitido durante el proceso está recuperado para alimentar los depósitos de crecimiento de biomasa de algas.

Hoy en día, la producción de biodiesel a partir de microalgas no es una tecnología madura, por lo cual el proceso de producción tiene un coste todavía demasiado alto como para desarrollarla a escala comercial. La técnica de cultivo de las microalgas necesita de mayor esfuerzo en investigación así como las microalgas, ya que se podría mejorar las cepas mediante investigación en ingeniería genética para regular su crecimiento, mejorar su eficiencia fotosintética y su rendimiento en biomasa, adaptar su sensibilidad a sus necesidades de luz, de CO_2 y de O_2 , así como su sensibilidad a la temperatura.

Para apreciar las consecuencias positivas que podrían tener la puesta en marcha a gran escala de la producción de biocarburantes mediante cultivos de microalgas, procedamos a calcular cuál sería la superficie necesaria dedicada a la producción de biocarburantes para alcanzar el objetivo de la Comisión Europea “20 20 by 2020”. El consumo de carburante para el transporte en España en el año 2020 se estima a 47,50 Mtep, de los cuales un 10% tendría que estar producido por biocarburantes. La biomasa resultante del cultivo de microalgas tiene un contenido en aceite de un 30% y pueden alcanzar un rendimiento en biodiesel alrededor de 90 m³/ha. La superficie necesaria para el cultivo de microalgas sería entonces de unos 80.000 ha. La superficie necesaria para cultivos de cereales y oleaginosas destinada a la producción de biocarburantes de primera generación, alcanzaría unos 2 Mha en secano o 1 Mha en regadío, respectivamente el 8% y el 4% de la superficie agraria española.

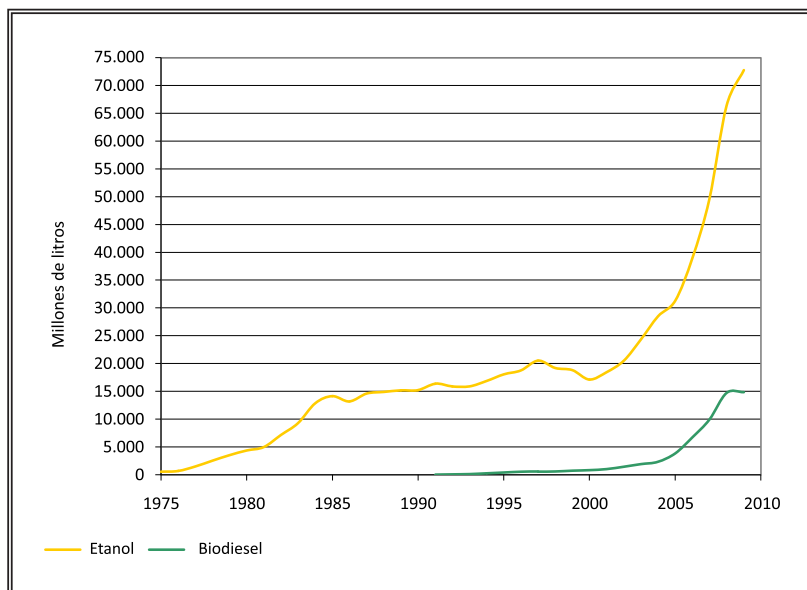
Del mismo modo, Chisti (2008) realiza la misma estimación para Estados Unidos: se necesitarían unos 0,53 Mm³ anuales de biodiesel, lo que requeriría unos 111 Mha (teniendo en cuenta el uso de aceite de palma con un rendimiento en aceite de aproximadamente 5.950 l/ha y un rendimiento en biodiesel de 80% del de aceite), es decir el 61% de la superficie agraria cultivada; frente a unos 5,4 Mha con biodiesel de microalgas. De igual modo, al utilizar bioetanol de caña de azúcar (7.500 l/ha pero el bioetanol solo tiene el 64% del contenido energético del biodiesel).

¿Por qué entonces no desarrollar con más ambición este nuevo biocarburante que ya podemos decir que pertenece a la tercera generación de biocarburantes. Por una cuestión de coste de producción y de rentabilidad, que son en efecto todavía muy altos. Chisti (2008) estima que si el precio del barril de petróleo fuera 100 \$ y el contenido en aceite de la biomasa de microalgas de un 55%, el biodiesel procediendo de biomasa de microalgas se podría producir a un coste de 340 \$/t para que la operación fuera rentable; hoy en día, el coste de producción está alrededor de 3.000 \$/t.

8.2. Consecuencias de la expansión de los biocarburantes

La expansión del uso de los biocarburantes se hace cada vez más presente en los debates sobre la energía centrados en los carburantes. Los dos principales biocarburantes que

GRÁFICO 8-1. *Situación mundial de la producción de etanol y de biodiesel desde 1975 hasta hoy (para el año 2009, datos estimados)*



Fuente: Compilado por el Earth Policy Institute con datos para el periodo 1975-1998 de F.O. Licht, *World Ethanol and Biofuels Report*, vol. 6, no. 4 (23 October 2007), p. 63; para el periodo 1999-2009 from F.O. Licht, *World Ethanol and Biofuels Report*, vol. 7, no. 18 (26 May 2009), p. 365.

se producen, el bioetanol y el biodiesel, han seguido hasta hoy una tendencia creciente y casi exponencial en los últimos 25 años. Como se puede apreciar en el Gráfico 8-1, desde el año 2002, la producción de etanol se multiplicó por 3,5 y la de biodiesel por 10.

Se trata de un sector en expansión continua desde los últimos 8 años. Los cuatro países grandes productores de etanol son EE.UU (34.970 MI), Brasil (24.500 MI), la Unión Europea (2.260-2.815 MI) y China (2.030 MI) (datos para el año 2008, F.O. Licht, *EurObserv'ER 2009*, IAEE 2010). Excepto Brasil, donde un 50% (EIA 2009) del mercado de carburantes para el transporte está constituido por el etanol;

para los demás, el ratio de utilización de biocarburantes respecto al petróleo es mínimo: Europa (un 2,6%, EurObserv'ER 2009), Estados Unidos (un 2%, USDEOS) y China (menos del 1%, BMELV 2006). En cuanto a la producción de biodiesel, los tres países grandes productores son la Unión Europea (8.550 Ml, donde Alemania y Francia producen entre ellos el 60% de la producción total europea), Estados Unidos (2.690 Ml) y Brasil (1.540 Ml) (datos del 2008, EurObserv'ER 2009, Earth Policy Institute 2009, FAPRI 2010).

Tras esta expansión no despreciable, es comprensible que la U.E. no quiera quedarse atrás, razón por la cual adoptó el Plan de Acción en Energía (decisión del Consejo Europeo de marzo de 2007). Lógicamente, científicos y organismos expresaron sus dudas en cuanto al posible cumplimiento de los objetivos del plan mencionado. Tió Saralegui (2008) señala que en abril 2008 el Comité Científico de la Agencia Europea de Medio Ambiente recomendó la suspensión del objetivo del Plan de Acción en Energía de alcanzar un 10% de introducción de biocarburantes en el conjunto de los carburantes necesarios en el transporte. Del mismo modo, la Agencia de Medio Ambiente holandesa puso en evidencia frente al Parlamento Europeo en marzo de 2008 la contradicción evidente que existe entre los objetivos de introducción de biocarburantes y los de preservación de la biodiversidad y protección de la naturaleza.

8.2.1. Necesidades de agua de los biocarburantes

Para llegar a ser usados como carburantes, los biocarburantes consumen agua en dos etapas principales de su ciclo de producción: la fase de producción de la biomasa necesaria, y la fase de producción del carburante a partir de la biomasa. Ambas etapas tienen un consumo de agua no des-

preciable que merece una evaluación profunda, pues ya se ha visto la importancia del papel que pueden llegar a desempeñar los biocarburantes en los próximos 20 años.

8.2.1.1. Consumo de agua en la fase de producción de biomasa

Dar una respuesta única es una tarea que carecería de sentido, pues primero los resultados dependen de la zona climática donde se cultiva la biomasa considerada, y segundo, incluso en un ámbito regional, la variación del consumo de agua es muy alta, debido a cuestiones tecnológicas, edáficas y climáticas.

Varios autores dan una metodología para calcular la huella hídrica de cultivos. Se trata de una estimación en dos pasos: primero el cálculo del agua virtual de los cultivos estudiados, y luego el de la huella hídrica hablando propiamente. El último estudio realizado en España respecto al cálculo de la huella hídrica de la elaboración de biocarburantes —Galan-del-Catillo 2009— retoma la metodología que podemos estudiar más a fondo con autores tales como Hoekstra, Chapagain, Hung o Aldaya.

El agua virtual (AV) —definida como el volumen de agua requerida para la producción de un producto o servicio— en el caso de un cultivo, tiene dos componentes: el agua verde AV_v (agua de lluvia) y el agua azul AV_a (agua suministrada por el agricultor). El AV puede expresarse como:

$$AV = AV_v + AV_a$$

En general, y más en España, cada cultivo tiene una parte en seco, otra en regadío. Por lo que el agua verde (AV_v)

debe a su vez expresarse según el tipo de agricultura (secano o regadío) que la utiliza:

$$AV_v = AV_{vs} + AV_{vr}$$

Para tener las dos componentes del AV (volumen de agua requerida para la producción de una tonelada del cultivo estudiado), procederemos de la siguiente manera:

$$\begin{cases} AV_{vs} = \frac{AV_v}{R_s} \\ AV_{vr} = \frac{AV_v}{R_r} \end{cases}$$

Donde: AV_{vs} es el contenido en agua virtual verde de la materia prima [m^3/t]

AV_v es el volumen de agua verde que se puede aprovechar [m^3/ha]

R_s es el rendimiento del cultivo [t/ha]

El volumen total de agua requerido sería lo siguiente:

$$AV = \frac{(AV_v \cdot S_s) + ((AV_v + AV_a) \cdot S_r)}{P}$$

Donde: AV es el volumen de agua total [m^3/t]

S_s es la superficie cultivada en secano [ha]

S_r es la superficie cultivada en regadío [ha]

P es la producción de la cosecha [t]

Luego llegamos al cálculo de la huella hídrica (HH), que nos permitirá —mediante el agua virtual contenida en la materia prima y el volumen de agua que se utiliza en el proceso industrial de producción— estimar el volumen total de agua requerido para la elaboración del biocarburante. Se procede de la siguiente manera:

$$HH = (AV \cdot R_b + AP) \cdot V_b$$

Donde: AV es el volumen de agua total [m^3/t]

R_b es el rendimiento en biocarburante [t/m^3]

AP es el volumen de agua de proceso utilizada en el proceso industrial [l/l]

V_b es el volumen de biocarburante elaborado [m^3]

Con una serie de datos del 1997 hasta el 2006 y desglosada por provincia de España, podemos determinar las necesidades medias en volumen de agua verde y azul para cultivos susceptibles de servir para la elaboración de biocarburantes. Los resultados de esta estimación figuran en la Tabla 8-1.

TABLA 8-1. *Volumen de agua verde y azul necesario para la producción de los cultivos destinados a biocarburantes*

Nota: los resultados presentados dan el Percentil 25, el promedio y el Percentil 75.

	Consumo de agua verde (m^3/ha)	Consumo de agua azul (m^3/ha)	Consumo de agua total (m^3/ha)
ETANOL			
TRIGO	608 – 1.050 – 1.307	2.272 – 3.160 – 3.993	3.597 – 4.210 – 4.860
MAÍZ	307 – 749 – 1.027	4.976 – 6.090 – 7.363	5.887 – 6.840 – 7.743
CEBADA	527 – 942 – 1.181	2.091 – 2.819 – 3.599	3.216 – 3.762 – 4.326
BIODIESEL			
COLZA	766 – 1.074 – 1.384	2.071 – 2.652 – 3.133	3.191 – 3.726 – 4.248
SOJA	367 – 642 – 883	3.047 – 3.494 – 4.026	3.709 – 4.135 – 4.591
GIRASOL	329 – 618 – 840	4.295 – 5.063 – 5.907	5.091 – 5.681 – 6.299

Fuente: elaboración propia con datos del Anuario MARM 2008 y Garrido *et al.* 2010.

8.2.1.2. Consumo de agua en la fase industrial de producción de biocarburantes

Una planta de producción de etanol tiene un consumo de agua diferente de una planta de producción de biodiesel según se emplee una de las dos tecnologías diferentes que han evolucionado mucho desde su principio. NRC (2008) estima a $7 \text{ l}_{\text{agua}}/\text{l}_{\text{biocarburante}}$ el volumen de agua consumida a principio de esa industria, y ahora se sitúa en torno a 4 l/l (Pate *et al.* 2007 y Phillips *et al.* 2007, citados por NRC 2008). Una planta típica con una producción de 200.000 m³ de etanol al año consumirá alrededor de 800.000 m³ de agua. Pate *et al.* (2007) cuantifican el volumen de agua utilizado y consumido en el proceso de elaboración.

Una planta de producción de biodiesel tiene un consumo de agua relativamente bajo. Pate *et al.* 2007, citado por NRC 2008 sugieren el valor de 1 l/l para el volumen de agua consumido por cada litro de biodiesel producido y el volumen total del agua (agua consumida y agua utilizada) podría alcanzar los 3 l/l. Futuras mejoras posibles permitirían reducir la utilización del agua en esas plantas de producción por debajo de 3 l/l.

A continuación, damos en la Tabla 8-2, el volumen de agua utilizada y consumida —en litros— necesaria por litro de etanol o biodiesel elaborado en la fase industrial del proceso.

TABLA 8-2. *Volumen de agua necesario en la fase industrial de elaboración de biocarburantes*

	Agua utilizada l/l	Agua consumida l/l
ETANOL	≈ 2-6	≈ 4
BIODIESEL	≈ 0,3-3	≈ 1

Fuente: elaboración propia con Pate *et al.* (2007).

8.2.2. *Necesidades de tierras agrícolas*

Al objeto de lograr uso de biocarburantes en mezcla a un nivel suficientemente alto como para que su efecto medioambiental positivo sea apreciable, el volumen de biocarburante requerido necesitará a su vez una superficie agrícola que puede llegar a competir con el abastecimiento alimentario.

En el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) que ha realizado el CIEMAT, se ha considerado que la producción de biocarburantes debía obtenerse a partir de materia prima nacional, para evitar el coste medioambiental del transporte. Sin embargo, Tió Salaregui (2008) pone en evidencia que aunque hiciéramos mezclas del 5% para el etanol (lo que solo daría lugar a disminuciones de GEI del 3% y de energía primaria del 0,28%), la superficie de tierra necesaria ascendería en España los 1,3 millones de hectáreas, lo que representa el 19% del total nacional destinado al cultivo de cereales. Por lo tanto, mezclas con más del 80%, interesantes desde el punto de vista medioambiental, necesitarán una superficie cultivable que no existe en España.

8.2.3. *Estudio de impacto de los biocarburantes de primera generación*

8.2.3.1. Supuestos de la estimación

Para conseguir una estimación la más representativa del volumen de agua necesario para la producción de biomasa destinada a la elaboración de biocarburante de primera generación, vamos a hacer los siguientes supuestos:

- 1. Cultivos:** suponemos que tres cultivos (trigo, maíz y cebada) constituyen la biomasa destinada a la producción de etanol. Y para la producción de biodiesel,

los tres cultivos serán la colza, la soja y el girasol. La proporción supuesta entre cultivos será de un tercio para cada uno en el caso del etanol y en el caso del biodiesel, del 10% para la colza, 0,1% para la soja y del 90% para el girasol. Las proporciones respectivas escogidas —aunque pueden parecer arbitrarias— reflejan en realidad la disponibilidad real actual de cada uno de los cultivos potencialmente utilizable para la producción de biocarburante. Con datos de producción del año 2007, hemos decidido proporcionar la utilización de los cultivos para biocarburante de tal manera que alcance la parte la más pequeña de su producción actual.

2. **Producción:** la producción española de biocarburantes a partir de materia prima española es del 30% para etanol y del 48% para el biodiesel (de Gregorio, Margarita, APPA, comunicación personal, 23 de noviembre de 2009). El restante se produce con materia prima importada.
3. **Rendimiento en biocarburante:** el rendimiento en etanol o biodiesel (respecto a la materia prima necesaria) se muestra en la Tabla 8-3, para cada uno de los cultivos que vamos a analizar.
4. **Rendimiento en producción:** para el cálculo futuro de la superficie necesaria para el cultivo de la biomasa necesaria, hemos utilizado los rendimientos en toneladas por hectárea que figuran en la Tabla 8-4.
5. **Volumen de agua:** la cantidad de agua (tanto el agua verde que proviene de las precipitaciones como el agua azul proporcionada mediante los sistemas de regadío) necesaria para el cultivo de la biomasa necesaria se ha dado más arriba en la Tabla 8-1.

TABLA 8-3. *Rendimiento en volumen y producción de biocarburante*

	<i>Rendimiento</i> ($t_{\text{materia prima}}/m^3_{\text{biocarburante}}$)	<i>Producción</i> ($m^3_{\text{biocarburante}}/ha$)
	ETANOL	
TRIGO	2,90	1,10
MAÍZ	2,70	2,16
CEBADA	3,10	0,99
	BIODIÉSEL	
COLZA	0,86	1,54
SOJA	5,46	0,32
GIRASOL	0,88	1,52

Fuente: IDAE 2007b para todos los cultivos menos la soja (Gibbs *et al.* 2008)).

TABLA 8-4. *Rendimiento en toneladas por hectárea de los cultivos destinados a biocarburantes*

	<i>Rendimiento en secano</i> (t/ha)	<i>Producción en regadío</i> (t/ha)
	ETANOL	
TRIGO	2,32	4,07
MAÍZ	3,37	8,38
CEBADA	2,24	3,91
	BIODIÉSEL	
COLZA	0,96	1,75
SOJA	1,16	2,34
GIRASOL	0,83	1,86

Fuente: elaboración propia con datos del Anuario MARM 2008 y Garrido *et al.* 2010.

8.2.3.2. Consumo de agua en el año 2008

España tuvo en el año 2007 un consumo final energético para el transporte de 41,3 Mtep, incluyendo todos los productos petrolíferos en conjunto (EuroStat 2007b). La producción de biocarburantes siguió la proporción 58% de eta-

TABLA 8-5. *Estimaciones para el año 2007 de las necesidades en materia prima, superficie agraria y volumen de agua para la producción de la materia prima necesaria para la elaboración de los biocarburantes*

Nota: la técnica de riego se refiere a dos casos separados: en secano o en regadío. En el caso de Secano, se ha supuesto que no se aporta agua de riego aunque exista déficit hídrico.

	Proporción del cultivo (%)	Materia prima necesaria (t)	Superficie en secano (ha)	Superficie en regadío (ha)	Agua Verde (Mm³)	Agua Azul (Mm³)	Agua consumida en fase industrial (Mm³)
ETANOL							
TRIGO	33%	135.553	58.433	33.294	61	105	0,19
MAÍZ	33%	126.204	37.405	15.057	28	92	0,19
CEBADA	33%	144.901	64.628	37.081	61	105	0,19
BIODIÉSEL							
COLZA	10%	9.375	9.782	5.364	11	14	0,01
SOJA	0,1%	598	517	255	0	1	0,0001
GRASOL	90%	86.506	103.652	46.628	64	236	0,10

Fuente: elaboración propia con Anuario MARM 2008, Garrido *et al.* 2010, EuroStat 2007b, IDAE 2007 y Gibbs *et al.* 2008.

nol y el 42% de biodiesel, o en cantidades, 239.000 tep de etanol y de 178.000 tep de biodiesel (European Biomass Association 2009).

En la Tabla 8-5, realizamos estimaciones por cultivo de la materia prima que se ha de producir (en toneladas), de la superficie de tierra —en seco o en regadío— requerida (en hectáreas), y del volumen de agua verde y azul que hace falta para llevar a cabo la producción de la materia prima necesaria para la fabricación de biocarburantes.

TABLA 8-6. Resultados recapitulativos de la producción de biocarburantes en España en el año 2008

Nota: la técnica de riego se refiere a dos casos separados: en seco o en regadío, no hemos supuesto que podría haber una aportación de agua azul solo en el caso de un déficit hídrico.

Volumen de agua azul total: 23.360 Mm³ (Corominas 2009)

Superficie cultivada en seco total: 13,71 Mha (Anuario MARM 2007)

Superficie cultivada en regadío total: 3,69 Mha (Anuario MARM 2007)

VOLUMEN TOTAL DE AGUA				
	Agua Verde (Mm³)	Respecto a Agua Verde Total	Agua Azul (Mm³)	Respecto a Agua Azul Total
p25	194	2,37%	545	2,68%
promedio	226	2,76%	553	2,72%
p75	226	2,76%	567	2,79%
NECESIDADES DE AGUA				
	Agua Verde necesaria (l/l)		Agua Azul necesaria (l/l)	
p25	1.514		4.412	
promedio	1.756		4.445	
p75	1.765		4.535	
SUPERFICIE TOTAL NECESARIA				
	Superficie en secano (ha)	Respecto a Secano total	Superficie en regadío (ha)	Respecto a Regadío total
p25	431.984	3,15%	168.040	4,55%
promedio	274.417	2,00%	137.680	3,73%
p75	211.710	1,54%	116.638	3,16%

Fuente: elaboración propia.

Para tener una visión del conjunto de la situación en el año 2008 de la producción de biocarburantes en España, presentamos los resultados agregados en la Tabla 8-6.

8.2.3.3. Consumo de agua en el año 2020

Para España, podemos analizar el objetivo “20 20 by 2020” de la Comisión Europea establecido en el documento “Europe’s climate change opportunity” sobre cambio climático para realizar estimaciones del volumen de agua que se necesitaría para la producción de materia prima necesaria para la producción de biocarburantes. Este objetivo supone la introducción en el año 2020 de un 10% de biocarburantes en el conjunto de los carburantes utilizados para el transporte (gasóleo y gasolina) en Europa.

Alcanzar el objetivo “20 20 by 2020” de la Comisión Europea supone que España alcance en el año 2020 a una producción de biocarburante de 4,75 Mtep al año, si consideramos un aumento del orden del 15% en el consumo de carburantes para el transporte en el año 2020. Siguiendo la misma proporción entre tipos de biocarburante que la que tuvo España en el año 2007 y el mismo ratio de producción nacional de materia prima y de importación, se recogen en la Tabla 8-7 las estimaciones por cultivo de la materia prima que se ha de producir (en toneladas), de la superficie de tierra —en secano o en regadío— requerida (en hectáreas), y del volumen de agua verde y azul, siguiendo el mismo criterio que el de la Tabla 8-5.

Se ha de mencionar, sin embargo, que hemos tratado el caso hipotético en el que se requiere la mayor cantidad de biocarburantes. Varias medidas de otro tipo se pueden tomar para alcanzar los objetivos del paquete de propuestas de la Comisión Europea, en ellas está la de los coches eléctricos. El ministerio de industrias, turismo y comercio publicó el 04 de

TABLA 8-7. *Estimaciones para el año 2020 de las necesidades en materia prima, superficie agraria y volumen de agua para la producción de la materia prima necesaria para la elaboración de los biocarburantes*

Nota: la técnica de riego se refiere a dos casos separados: en secano o en regadío, no hemos supuesto que podría haber una aportación de agua azul solo en el caso de un déficit hídrico.

	Proporción del cultivo (%)	Materia prima necesaria (t)	Superficie en secano (ha)	Superficie en regadío (ha)	Agua Verde (Mm ³)	Agua Azul (Mm ³)	Agua consumida en fase industrial (Mm ³)
ETANOL							
TRIGO	33%	1.502.777	647.804	369.106	680	1.166	2,07
MAÍZ	33%	1.399.137	414.678	166.929	311	1.017	2,07
CEBADA	33%	1.606.417	716.485	411.095	675	1.159	2,07
BIODIÉSEL							
COLZA	10%	109.720	114.483	62.773	123	166	0,13
SOJA	0,1%	6.995	6.054	2.987	4	10	0,0013
GIRASOL	90%	1.012.415	1.213.086	545.708	750	2.763	1,15

Fuente: elaboración propia con Anuario MARM 2008, Garrido *et al.* 2010, EuroStat 2007b, IDAE 2007 y Gibbs *et al.* 2008.

TABLA 8-8. *Resultados recapitulativos de la producción de biocarburantes en España en el año 2020*

Nota: la técnica de riego se refiere a dos casos separados: en secano o en regadío, no hemos supuesto que podría haber una aportación de agua azul solo en el caso de un déficit hídrico.

Volumen de agua azul total: 23.360 Mm³ (Corominas 2009)

Superficie cultivada en secano total: 13,71 Mha (Anuario MARM 2007)

Superficie cultivada en regadío total: 3,69 Mha (Anuario MARM 2007)

VOLUMEN TOTAL DE AGUA				
	<i>Agua Verde (Mm³)</i>	<i>Respecto a Agua Verde Total</i>	<i>Agua Azul (Mm³)</i>	<i>Respecto a Agua Azul Total</i>
p25	2.189	26,73%	6.200	30,45%
promedio	2.543	31,06%	6.282	30,85%
p75	2.548	31,12%	6.432	31,59%
NECESIDADES DE AGUA				
	<i>Agua Verde necesaria (l/l)</i>		<i>Agua Azul necesaria (l/l)</i>	
p25	1.512		4.401	
promedio	1.753		4.433	
p75	1.763		4.521	
SUPERFICIE TOTAL NECESARIA				
	<i>Superficie en secano (ha)</i>	<i>Respecto a secano total</i>	<i>Superficie en regadío (ha)</i>	<i>Respecto a regadío total</i>
p25	4.899.829	35,75%	1.903.163	51,58%
promedio	3.112.590	22,71%	1.558.598	42,25%
p75	2.401.530	17,52%	1.320.241	35,78%

Fuente: elaboración propia.

abril de 2010 la *Estrategia Integral para el Impulso del Vehículo Eléctrico con el horizonte 2014* (MITYC 2010). El escenario de penetración de vehículos eléctricos presentado para el año 2014 propone el reemplazamiento del 1% del parque automóvil del año 2008. En ese caso, podemos confiar en que la demanda para biocarburante será menor que la esperada.

Para tener una visión del conjunto de la situación en el año 2020 de la producción de biocarburantes en España, presentamos los resultados agregados en la Tabla 8-8.

8.2.4. Comparación con algunos países

Para obtener una respuesta comparable entre regiones del mundo, se debe computar de manera separada el agua de lluvia (o agua verde - independiente del uso humano del suelo - del agua aportada por el agricultor (o agua azul). Para España, hemos estimado las necesidades de agua — en el caso de que la biomasa se cultive en secano o en regadío— en términos de litros de agua por litro de biocarburo producido, presentamos los resultados en la Tabla 8-9 (los resultados incluyen el agua de proceso).

Chiu (2009) ha procedido de esta manera, considerando solo el agua de irrigación y el agua de proceso utilizado en el ciclo de producción de los biocarburos; y llega a la conclusión de que en Estados Unidos durante el año 2007, la producción de etanol a partir del cultivo del maíz hasta tener el carburante líquido, se consumieron entre 5 a 2.138 litros de agua

TABLA 8-9. *Necesidades de agua para la elaboración completa de biocarburos de primera generación según el cultivo y según la técnica de riego*

Nota: la técnica de riego se refiere a dos casos separados: en secano o en regadío, no hemos supuesto que podría haber una aportación de agua azul solo en el caso de un déficit hídrico.

	Agua Verde necesaria (l/l)			Agua Azul necesaria (l/l)		
ETANOL						
	<i>p25</i>	<i>promedio</i>	<i>p75</i>	<i>p25</i>	<i>promedio</i>	<i>p75</i>
Trigo	1.208	1.313	1.261	1.966	2.251	2.452
Maíz	441	600	623	2.032	1.962	1.949
Cebada	1.089	1.303	1.264	2.015	2.237	2.430
BIODIÉSEL						
	<i>p25</i>	<i>promedio</i>	<i>p75</i>	<i>p25</i>	<i>promedio</i>	<i>p75</i>
Colza	1.083	960	988	1.365	1.301	1.279
Soja	2.510	3.035	3.217	8.326	8.151	8.249
Girasol	545	652	683	2.519	2.401	2.362

Fuente: elaboración propia con Anuario MARM 2008, Garrido *et al.* 2010, EuroStat 2007b, IDAE 2007 y Gibbs *et al.* 2008.

por litro de etanol producido; y da como promedio ponderado, el valor de 142 l/l (litros de agua por litro de etanol).

En Toscana, Dalla Marta *et al.* (2010) han evaluado el balance energético de la producción de etanol para biocarburantes a partir de maíz y girasol. Han hecho estimaciones de las necesidades de agua para el año 2020 en el caso de que se cumpla el paquete de propuestas "20 20 by 2020" de la Comisión Europea. El estudio se basa en las siguientes características de la producción de etanol:

TABLA 8-10. *Características de la producción de etanol para biocarburante en Toscana*

	<i>Maíz</i>	<i>Girasol</i>
Sistema de riego	automotriz: 2.580 m ³ /ha móvil: 3.118 m ³ /ha	no
Producción media	8,00 t/ha	1,20 t/ha
Fertilización	N: 180 kg/ha P: 46 kg/ha	N: 100 kg/ha P: 46 kg/ha
Producción de etanol	[2,03 ; 2,72] t/ha	[0,31 ; 0,60] t/ha
Balance energético	automotriz: [-5,84 ; -0,63] móvil: [-3,04 ; 2,17]	[-8,01 ; -1,88]

Fuente: Dalla Marta *et al.* 2010.

Las estimaciones de producción necesaria de biocarburantes para transporte en Toscana para cumplir el paquete de propuestas "20 20 by 2020" de la Comisión Europea alcanzan 0,108 Mtep (Dalla Marta *et al.* 2010). La materia prima utilizada sería el maíz (50%-62%) y el girasol (4%-9%).

En Toscana, el agua consumida en el sector de la agricultura alcanza un volumen de 150 Mm³ anuales. Para cubrir una demanda de 0,180 Mtoe de etanol destinado a carburante para transporte en el año 2020, se prevé que un volumen de agua de 160 Mm³ (será necesario para una producción de 12.800 toneladas de etanol.

9. ASPECTOS JURÍDICOS DEL NEXO AGUA-ENERGÍA

Como en todo asunto complejo, el Derecho ofrece desarrollos teóricos y prácticos que tratan de ofrecer vías para encauzar los problemas y propiciar una respuesta más eficaz para la sociedad. Las XV Jornadas de Derecho de Aguas organizadas por el Prof. Embid Irujo en la Universidad de Zaragoza en febrero de 2010 han abordado el nexo agua y energía. A riesgo de ser muy sintéticos, las disquisiciones jurídicas tratadas se pueden enumerar en los siguientes puntos:

- El orden de prioridad de usos establecido en los documentos de planificación de las cuencas y, de manera supletoria, en la Ley de Aguas
- La fijación de los caudales ecológicos y las afecciones al régimen de utilización de las centrales hidroeléctricas.
- El proceso de asignación de subvenciones y permisos para los generadores de energías renovables.
- La regulación del mercado eléctrico y las afecciones a los usuarios agrarios.

En los siguientes párrafos, sintetizamos el estado de la cuestión sobre cada uno de estos puntos.

9.1. El orden de prioridad de usos

Embid Irujo (2010) sitúa el origen del orden de prioridad de usos del agua en nuestro ordenamiento jurídico en la necesidad de gobernar la escasez de agua y en el objetivo de poner en práctica un orden de valores, que es a su vez una forma de potenciar ciertas políticas en detrimento de otras. Sirve también el propósito de reducir el espacio de la arbi-

trariedad, y fomentar el uso racional del agua. Los usos industriales para la producción de energía eléctrica se sitúan en el tercer nivel, por debajo de los usos urbanos y los del regadío y los usos agrarios. En los usos con fines de generación de energía, la Instrucción de Planificación Hidrológica (BOE 2008) enumera todas las modalidades de generación de energías renovables hoy conocidas. El examen de las prioridades actuales del mundo incluye entre ellas la disminución de GEI, un objetivo que es asumido por los gobiernos en la U.E. Con arreglo a ellas, la generación de energías renovables tiene potencial para situarse a un nivel parecido al de la producción agraria, al menos desde una óptica global e integrada. Surge, así, un conflicto de prioridades e intereses sociales estratégicos de extraordinaria complejidad al menos por dos razones. Primero porque no todos los usos agrarios del agua son prioritarios para las necesidades básicas de las personas; y segundo porque, como es bien conocido y se ha demostrado en este estudio, los usos agrarios requieren cada vez más energía para ser eficientes y productivos.

Embid Irujo (2010) formula la conjetura de que la posición de tercer nivel en el orden de prioridades constituye un freno importante para la explotación de las energías renovables. Ante ello, es fácil concluir que la vía de los intercambios de recursos mediante contratos de cesión de concesiones (mercado de aguas), debido a su carácter de excepcionalidad y por las previsiones de la regulación del mercado sobre intercambios entre usos consuntivos y no consuntivos, sumado a que solo los titulares de derechos pueden ser parte de un contrato, no presentan potencial alguno. Garrido (1999, 2000) anticipó algunos de estos obstáculos, tras la entrada en vigor de la reforma de 1999. El Prof. Embid Irujo también descarta la vía de las expropiaciones y ve harto difícil modificar lo que se haya previsto en los Planes Hidrológicos de Cuenca, sin dar entrada di-

recta a las administraciones autonómicas en las cuencas de su competencia. El tema de la soberanía alimentaria planea también sobre las decisiones de modificar los planes, especialmente en un supuesto en el que los regantes menos competitivos optasen por transferir sus derechos a usuarios energéticos.

Surgen, con respecto a este punto, dos consideraciones. La primera es que objetivos prioritarios del país, poder alimentarse de nutrientes saludables y de energía entran en fricción. Nadie sabe, ni puede arrogarse la capacidad de adivinar, cómo de difícil será aumentar la producción de cereales o adquirirlos de los mercados internacionales dentro de 10, 15 ó 20 años; como tampoco está al alcance de nadie saber qué huella hídrica tendrán las fuentes de energía más eficientes y sostenibles. Si el planificador queda a expensas de tener que manejar escenarios, el legislador, al cual se le exige precisión y claridad, queda totalmente desprovisto de elementos y fundamentos para regular el reparto del agua. Cabe entonces concluir, en segunda consideración, que es esencial que la gestión del agua se realice conjuntando objetivos de largo plazo, establecidos en la planificación, con medidas y criterios que sean de aplicación en el corto y medio plazo, al objeto de proporcionar más flexibilidad y adecuación al entorno económico y tecnológico de cada momento.

9.2. La fijación de caudales ecológicos

Nadie duda de que asegurar más abundantes, seguros y frecuentes caudales ecológicos supone una reducción de los grados de libertad de los operadores de las centrales hidroeléctricas. Aún más, los riesgos de hipoxia y eutrofización impiden en ocasiones un uso óptimo de los caudales (Garrido *et al.* 2010, informan de ellos en su estudio sobre las cuencas ibéricas compartidas). Nuevamente, nos encontramos con la

dificultad de armonizar usos en conflicto, para la cual la técnica jurídica, siempre tan necesaria de precisión, choca con la ciencia ecológica y los postulados de la gestión adaptativa. Por fortuna, como señala Embid Irujo, el Reglamento de Planificación Hidrológica (2007) establece que la fijación de caudales ambientales se desarrollará a través de un proceso de concertación, que es concretado en la IPH incluso en las fases con que se implantarán y se hará su seguimiento. La gestión concertada y adaptativa ha reemplazado el enfoque apriorístico, que exigía delimitar de un modo simplista los caudales mínimos y permitía repartir los sobrantes.

Sobre si se deben o no pagar indemnizaciones, Embid Irujo concluye que sólo habría justificación para ello en el caso de que existan daños económicos en los usuarios con derechos concedidos con anterioridad. Si el ejercicio de una concesión se ve afectado negativamente como consecuencia de la puesta en práctica de un plan hidrológico, se da un supuesto favorable al pago de indemnizaciones. No obstante, todo parece indicar que el progreso que se ha hecho en los últimos años para reforzar los caudales ambientales ha tenido impactos de pequeña cuantía o que se pueden circunscribir al ámbito de lo razonable sobre los usuarios.

9.3. La regulación del mercado eléctrico y las afecciones a los usuarios agrarios

La reciente experiencia con las políticas de apoyo a las energías renovables es poco menos que traumática, y ha tenido repercusión internacional (New York Times 2010). Como explica Jiménez-Blanco (2010), la descoordinación entre la Administración General del Estado y las Administraciones Autonómicas ha dado lugar a fuertes estímulos a la inscripción de instalaciones, que es competencia de las segundas, y su puesta en funcionamiento ha provocado un

fuerte descalabro económico, pero no solo, en el sistema eléctrico nacional. La solución hubo de llegar tarde mediante la técnica de la pre-inscripción, pues la burbuja ha explotado dando al traste con empresas productoras de paneles fotovoltaicos y deteniéndose súbitamente un proceso que había crecido descontroladamente. El semanario *The Economist* recientemente señalaba que en 2009 se establecieron en España dos quintos de todos los paneles fotovoltaicos instalados en todo el mundo (*The Economist*, 2010). Las primas a las renovables tienen estimado un coste para 2010 que alimenta el déficit de tarifa en unos 6.000 millones de euros al año. Siendo el caso que, en ocasiones, no hay suficiente capacidad para almacenar toda la energía renovable generada, lo que resulta de un desfase entre oferta y demanda, insuficiente capacidad de transporte en líneas de alto voltaje, y poca integración con Portugal, Francia y Marruecos.

Además la preinscripción exigiría entre otras la obtención de un informe favorable de aprovechamiento de aguas otorgado formalmente, cuando la instalación requiriese su uso para el normal funcionamiento. Además, como analizamos a continuación, el sector del riego ha emprendido una campaña de presión y demanda al ejecutivo para relajar algunos de los elementos del marco de regulación que más efectos han tenido sobre la economía de las zonas regables y de los regantes.

Por otro lado, el marco de regulación de las energías renovables está siendo cuestionado por los especialistas, pero ha creado importantes expectativas en el sector. De los 6.215 millones de euros otorgados en primas a las renovables, 2.688 se asignan al grupo de “solar” que genera solo el 2% de la energía eléctrica producida. Al tiempo, el descenso de la demanda en 2009 y 2010 ha provocado que las centrales de gas estén funcionando al 70% de capacidad, lo que hace difícil recuperar el coste de la inversión.

El incremento de tarifas eléctricas de acceso que se ha impuesto por parte del Gobierno a partir del 1 de enero del 2010. Desde las organizaciones agrarias se estima que los regantes han sufrido aumentos de un 8% en un año y se inició el proceso de liberalización del sector eléctrico se ha producido un incremento de las facturas eléctricas que oscila entre el 35 y el 70%. La “tarifa de acceso” es el componente de la tarifa integral que sigue regulado por el Gobierno, que se revisa de forma anual, y que tiene en cuenta el importe del transporte, la distribución, el mantenimiento y otras partidas reguladas. Valoraciones realizadas por representantes de riegos de Aragón hacen equivaler las subidas de las tarifas a reducciones del margen equivalentes que se sitúan en el 5% melocotón y el 36% en alfalfa (Sirasa 2010)

El 1 de enero aumentaron las penalizaciones en concepto de “energía reactiva”. Las organizaciones agrarias consideran que esta subida de tarifa “pone en peligro incluso la sostenibilidad de nuestra agricultura, y puede suponer una reducción muy severa de cultivos de regadío, poniendo en serio riesgo el futuro de determinadas zonas productivas, y por lo tanto una parte importante de la agricultura española.” (comunicado de COAG, 2010).

Antes del 1 de julio de 2008, la mayoría de las comunidades de regantes contrataba las tarifas (R.0 de baja tensión, o R.1, R.2 ó R.3 de alta tensión). Desde el 1 de julio 2009 todos los consumidores están obligados a contratar los servicios en el mercado y pagar el precio que resulte de los contratos ofrecidos, sin que el poder de compra de una demanda bastante atomizada pueda ser una herramienta de negociación.

La solución del coste de la elevación del coste de la energía para el regadío, al margen de las mejoras de eficiencia y manejo que se puedan lograr en cada caso como resultado de los estudios de auditoría, puede ser la generación de una

parte o todas sus necesidades energéticas, empleando fuentes renovables. Para que resulte rentable la opción de las renovables auto-generadas, hace falta gestionar adecuadamente la conexión con el mercado eléctrico puesto que en él se volcarán los sobrantes y de él se demandarán las necesidades. Nuevamente, el marco regulador resulta esencial para asegurar que las decisiones de las comunidades de regantes y usuarios son óptimas.

10. CONCLUSIONES

Nuestro estudio ha mostrado varias caras de las relaciones entre el agua y la energía para España. En razón a la extensión prefijada al acometerlo, no se ha profundizado en cada una de ellas, más bien se ha pretendido dar una perspectiva global de su importancia, actualizar otros estudios previos y aportar estimaciones propias en sectores como la producción de energía y de biocarburantes. Sobre la base del estudio de las fuentes publicadas y otras directamente obtenidas de usuarios y técnicos, se ha tratado de ofrecer una visión global del caso de España.

Las consecuencias de la gestión de las relaciones entre el agua y la energía no solo afectan a cada usuario final, sino que también afectan a la planificación hidrológica, a la gestión del agua en sus aspectos prácticos y aplicados, a sectores enteros como el del regadío, de la industria manufacturera o de extracción, y por supuesto, al sector de la energía. Esto motiva que el nexo agua-energía se formule siempre en tono de problema complejo y cobre especial relevancia la necesidad de gestionar y usar los recursos hídricos con mayor eficiencia energética.

En este estudio se ha abordado la problemática desde los tres enfoques más representativos: consumo energético del

ciclo integral de utilización del agua, con especial atención en el regadío y a los tratamientos más usuales en el ciclo urbano, el sector de la energía como consumidor de agua y los biocarburantes de primera generación como gran consumidor de agua para el cultivo de la biomasa.

Durante la investigación, nos hemos topado con la constante dificultad de llevar a cabo una estimación de nivel nacional a partir de datos puntuales, lo que ha requerido prudencia y clarificación de las fuentes de datos. La información proporcionada en este estudio se basa en fuentes oficiales (Ministerios, Asociaciones de representantes, Unión Europea, Organismos de Cuenca,...), pero también en estudios académicos, publicados y no publicados siempre cuando eran fuentes de confianza.

El ciclo integral de utilización de agua, es decir, el que engloba desde el abastecimiento hasta su consumo por el usuario final, supone según nuestras estimaciones, un gasto energético medio del 7,0% de la demanda energética de España en el año 2007. Esta es una cifra notoriamente inferior a la obtenida para el caso de California (donde se alcanza un 19% de la demanda energética total, pero que considera el uso de energía necesario para el calentamiento del agua en los hogares, lo que no hemos tenido en cuenta en el presente estudio).

El sector de la energía representa alrededor del 25% del volumen total de agua utilizado al año (en esa estimación no está incluido el volumen de agua utilizado por centrales hidroeléctricas), no obstante, el 96% de este volumen es de uso no consuntivo (que retorna al medio tras su uso). La producción de biocarburantes de primera generación para el transporte no representó más de unos 390 Mm³ (1,8% del volumen total de agua utilizado al año) para cultivar la biomasa necesaria, extendiéndose sobre una superficie de

206.000 ha, pero nuestras estimaciones muestran que para el año 2020, en el caso de que fueran biocarburantes de primera generación que se empleen para alcanzar el objetivo 20 20 by 2020 de la Comisión Europea, el volumen de agua para cultivar la biomasa necesaria podría llegar a unos 4.400 Mm³ medios (el 30% del volumen de agua actualmente utilizado en el sector de la agricultura), y llegar a una superficie de 2,3 Mha. Todo ello alimenta serias dudas sobre el carácter sostenible de esta alternativa para España, y permite afirmar que la vía de los biocarburantes de primera generación es claramente obsoleta.

Se ha de subrayar la dificultad de trabajar sobre el nexo agua-energía, cuando la problemática no ha sido tratada como nexo todavía. Usualmente, el enfoque de los estudios consultados es parcial: bien se analiza la energía consumida en los usos del agua o, al contrario el agua en el sector de la energía. Solo desde estudios más integradores, como el que se deriva del concepto de “exergía” es posible hacer evaluaciones más completas. Debido al aumento creciente del interés por parte de la comunidad científica, tenemos la esperanza de que las agencias responsables de compilar estadísticas presenten datos e información que informe de manera más detallada y fiable sobre el nexo agua-energía.

Subsiste, sin embargo, una duda sobre la exactitud de nuestras estimaciones. Por ello los resultados originales de este estudio se presentan siempre en forma de rango. Esto supone también, por otra parte, que quedan por hacer muchas verificaciones con el fin de llegar estimaciones más exactas.

En el caso del regadío, sector que ha sufrido las consecuencias de la aplicación del Decreto-Ley Real Decreto 661/2007, del 25 de mayo, destacan dos conclusiones de calado. En primer lugar, que el gasto de energía por metro cúbico empleado

para el riego ha aumentado significativamente en los últimos años. Ello es debido al cambio tecnológico tanto en el ámbito de las parcelas y explotaciones de regadío, como en las zonas regables que han sido modernizadas y en los regadíos que dependen de aguas subterráneas (y requieren mayores bombeos o pre-tratamientos del agua). La energía es en el presente un coste relevante en cualquier regadío, no solo en el de aguas subterráneas. En segundo lugar, se ha comprobado que el ahorro de agua en el riego comporta casi inevitablemente aumentos en el consumo de energía. Por ello, es preciso analizar cada caso particular, teniendo en cuenta las condiciones de escasez, las ganancias de eficiencia y aumentos de productividad, antes de recomendar un cambio técnico en el riego que comporte un aumento del gasto en energía.

Las múltiples caras del nexo agua-energía, y la complejidad que entraña adoptar una visión integrada y sostenible, se extienden al marco regulador de los dos sectores. En cuanto a la legislación de agua, los especialistas plantean la obsolescencia de algunos postulados, como la prioridad de usos (con origen en la propia Ley de Aguas o en la planificación hidrológica) o la imposibilidad de que un nuevo usuario, sin derecho de aguas, adquiera caudales mediante contratos de cesión de concesiones. Bien es cierto que la planificación, al menos en su instrucción (Instrucción de Planificación Hidrológica), plantea enfoques más flexibles e integrados, pero es deseable que los usos del agua se puedan asignar de acuerdo a una lógica más integrada, no desperdiciando las pocas oportunidades que surjan en el corto plazo para avanzar hacia una economía más sostenible. En todo caso, la necesidad de coordinar más y mejor las políticas del agua y la energía es ineludible, en muchos casos, integrando también políticas sectoriales como la agrícola o urbana.

En todas las etapas del ciclo del agua, ya sea en las fases de uso directo o en las dedicadas al tratamiento, depuración

o reutilización, es necesario realizar auditorías energéticas. Es bien conocido que las instalaciones se proyectan con criterios de optimización, se ejecutan con criterios de coste y sentido práctico, y se operan con parámetros y coeficientes técnicos muy alejados de concebidos por el proyectista. Es frecuente que se descuide el mantenimiento de las instalaciones, acrecentando las discrepancias entre el funcionamiento óptimo y el real. El encarecimiento del coste de la energía erosiona la rentabilidad económica de los titulares de las instalaciones, pero no es inmediato conocer los puntos críticos en los que se debe actuar. De ahí que estudios de benchmarking y el diseño de plantas piloto sean herramientas fundamentales para reducir el consumo de energía.

En el caso de los usos urbanos, al contrario de los regadíos, el ahorro de agua entre los consumidores finales disminuye el coste de energía, porque el agua ha de ser impulsada y servida a presión (McMahon et al. 2006). Se ha estimado en California que la estrategia más eficiente de reducir el consumo de energía en los hogares resulta de ahorrar agua. Cabrera et al. (2008) contemplan una reducción de 3 kWh de consumo energético por cada metro cúbico no servido a un consumidor urbano.

Es ilustrativo del grado de inmadurez que el nexo agua-energía revela constatar en el reciente informe sobre la Sostenibilidad en España que: (a) en el capítulo de energía de 16 páginas no aparezca ninguna mención a las palabras “agua” o “hídrico/a”, y solo se mencione hidroelectricidad en tres ocasiones; (b) en el de agua de 17 páginas no se mencione la palabra “energía” y (c) que todas las menciones a la energía del capítulo de agricultura se refieran a los combustibles fósiles o procedentes de biomasa y no al uso de energía eléctrica.

Tres son las conclusiones principales de este trabajo. En primer lugar, el sector de la energía debe considerarse como

un usuario del agua prioritario, en pie de igualdad con los usuarios agrarios, pues no hay ninguna razón de orientación general de la economía que supedita la producción agrícola sobre la de kilowatios generados sin el empleo de combustibles fósiles. Como quiera que los documentos de planificación hidrológica difícilmente pueden predecir qué fuentes de energía renovable serán más eficientes en el futuro, es preciso eliminar restricciones en la asignación del agua que carecen de justificación ambiental, social o económica. El sector de la energía debe por su parte mejorar su eficiencia en el uso del agua, eliminando o reduciendo al mínimo el gasto neto en los procesos de refrigeración. El cálculo de la huella hídrica de cada producto o servicio generado en la economía, medida tanto en unidades físicas como monetarias debe ayudar en la toma de decisiones.

En segundo lugar, el sector de la energía precisa una regulación menos propicia a prácticas oportunistas, en este caso de particulares o emprendedores pero también de las Comunidades Autónomas, que encarecen el coste general de la energía, generan demandas de agua artificiales y exigen cambios continuos en el marco de regulación. El marco regulador de las energías renovables debe mejorar y fortalecerse.

Y en tercer y último lugar, el elevado gasto de energía del sector del agua aconseja que se aumenten las inversiones en I+D+i para mejorar la eficiencia de los procesos de tratamiento y utilización del agua. Por un lado, cuanto más completo sea el tratamiento que se desee dar a las aguas residuales, mayor será el gasto energético, de ahí que la aplicación de la Directiva Marco del Agua acarree necesariamente aumentos del uso de energía. Pero por otro, y con especial importancia en el uso agrícola, los aumentos de eficiencia en el uso que acarreen incrementos en el uso de energía deben analizarse en profundidad, pues no en todos los casos están justificados.

En síntesis, en una economía globalizada los sectores productivos usuarios de energía y de agua deben ser estimulados para producir de acuerdo con la mejor tecnología disponible, respondiendo a los precios de los bienes y servicios, a los precios de los factores e internalizando los costes ambientales. Cualquier distorsión de los mercados que favorezca sectores menos productivos o eficientes eco-ambientalmente acarrea el doble coste de la propia distorsión y su consiguiente pérdida de eficiencia económica, así como el mayor impacto ambiental por unidad de renta generada.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abengoa Solar 2010, *Status and Role of Concentrating Solar Power in Rural America*, USDA Outlook Conference, 19 de febrero de 2010, www.usda.gov/oce/forum/2010_Speeches/Presentations/MorseF.pdf

ABS. 2008. *Water Use on Australian Farms, 2006-07*, Australian Bureau of Statistics, [http://www.ausstats.abs.gov.au/Ausstats/subscriber.nsf/0/45FE454AA294AB64CA2574B100160AA1/\\$File/46180_2006-07.pdf](http://www.ausstats.abs.gov.au/Ausstats/subscriber.nsf/0/45FE454AA294AB64CA2574B100160AA1/$File/46180_2006-07.pdf).

Aliod R, García S Paño J. 2009, *Herramientas para el análisis hidráulico y energético de redes de distribución de agua, con aplicaciones al diseño y gestión óptima de regadíos*, Jornadas de Ingeniería del Agua. Madrid.

Anderson M. A., Cudero A. L., Palma J., *Capacitive deionization as an electrochemical means of saving energy and delivering clean water. Comparison to present desalination practices: Will it compete?*, in *Electrochimica Acta* No. 55, pg. 3845-3856, 2010.

Anuario del Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino (MARM) 2008, Anuario de estadística 2008, <http://www.mapa.es/es/estadistica/pags/anuario/introduccion.htm>.

Asociación de Productores de Energías Renovables 2009, *Comentarios de APPA-Biocarburantes al artículo científico "Water footprint of bioenergy"*, 24 de junio de 2009.

Asociación Española de Abastecimiento de Agua y Saneamiento (AEAS) 2002, *Suministro de agua potable y saneamiento en España (2002) VIII Encuesta nacional de abastecimiento de saneamiento y depuración*, 2002.

Ayuntamiento Madrid 2010, departamento de depuración, datos del Sistema de Saneamiento Integral de Madrid 2002-2009.

Batanero Ortiz J. M. 2004, *Planta desaladora de agua de mar de Carbo-neras y planta desaladora de El Atabal*, in *Desalación' 04*, Jornadas Nacionales de Desalación, Madrid 17 y 18 de noviembre de 2004.

Bates, B. C., Z. W. Kundzewicz, S. Wu and J. P. Palutikof (Eds.). (2008). *Climate Change and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.

Bernat X., Gibert O. Campos C. 2009, *General trends on costs for desali-nation of sea water*, in *Programme and Papers, 4th Marcelino Botín Foun-dation Water Workshop*, Santander, septiembre de 2009.

Berndes G., Hansson J., Egeskog A., Johnsson F. 2010, *Strategies for 2nd generation biofuels in EU-Co-firing to stimulate feedstock supply develop-ment and process integration to improve energy efficiency and economic competitiveness*, in *Biomass and Bioenergy* No.34, pg. 227-236, 2010.

BMELV, German Ministry for Food, Agriculture, and Consumer Protection 2006, *Liquid Biofuels for Transportation, Chinese Potential and Implica-tions for Sustainable Agriculture and Energy in the 21st Century*, Assess-ment Study, Beijing, P. R. China, febrero de 2006.

BOE 11/03/2006, *Real Decreto 287/2006, de 10 de marzo, por el que se re-gulan 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*.

BOE ORDEN ARM/2656/2008, de 10 de septiembre, por la que se aprueba la instrucción de planificación hidrológica.

BOE REAL DECRETO 907/2007, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Planificación Hidrológica.

Bonan G. 2002, *Ecological Climatology, Concepts and applications*, Cambridge University Press. CB2 2RU, UK.

Cabezas F., Senent M., Martínez D., García-Aróstegui J. L. 2009, *El coste de riego con aguas subterráneas en la cuenca del Segura*, Ponencia D-4. XXVII Congreso Nacional de Riegos, AERYD. Murcia.

Cabrera E., Cobacho R., Espert V. & García-Serra J. 2008, *Agua y Energía: una relación que conviene comprender*, Instituto Tecnológico del Agua (Universidad Politécnica de Valencia, España), Congreso Latinoamericano de la IAHR, Cartagena de Indias, septiembre de 2008.

Cabrera, E., Pardo, M. A., Cabrera, E. Jr., & Corbacho, R. 2008. Agua y energía en España. Un reto complejo y fascinante. Mimeo.

Cabrera, E. 2010. Comunicación personal.

California Energy Commission (CEC) 2005, *California's Water-Energy Relationship*, Final Staff Report, CEC700-2005-011-SF, State of California, noviembre de 2005.

Chisti Y. 2008, *Biodiesel from microalgae beats bioethanol*, in *Trends in Biotechnology*, Vol.26, No.3, pg. 126-131, 2008.

Chiu Y. W., Walseth B., Suh S. 2009, *Water embodied in bioethanol in the United States*, in *Environment Science & Technology*, vol. 43,no. 8, 2009.

Chow V. T., D. R. Maidment y L. W. Mays. 1988, *Applied Hydrology*, McGraw-Hill. New York, (Traducción castellano: 1994: *Hidrología Aplicada*, McGraw-Hill. Bogotá).

Clean Air Task Force (CATF) and Western Resource Advocates (WRA) 2003, *The last straw: Water use by power plants in the arid West*, The energy Foundation and The Hewlett Foundation, abril de 2003.

Comisión de Modernización de los Riegos del Alto Aragón (COAG) 2010, *Modernización de regadíos, situación actual*, Boletín nº 27, pg. 4-9, Riegos del Alto Aragón, Huesca, España.

Córcoles J. I., Ortega J. F., Moreno M. A., Tarjuelo J. M., de Juan J. A. 2009, *Evaluación del regadío en Ctailla - La Mancha mediante técnicas de Banchmarking*, in *Riegos y Drenaje XXI* No. 169, noviembre - diciembre 2009, pg. 30-35.

Corominas Massip, J. 2009, *Agua y energía en el riego, en la época de la sostenibilidad*, Comunicaciones de los invitados especiales, Jornadas de Ingeniería del Agua, Madrid, 27 y 28 de octubre de 2009.

Couchoud Gregori M. 2003 (Directora general del Instituto Meteorológico Nacional), *Régimen de precipitación en España*, Badajoz, octubre de 2003, <http://catedraia.unex.es/actividades/inundaciones/regimenpre.pps> (consulta el 26 de abril de 2010).

Cramwinckel J. 2009, *Water and energy nexus - the role of technology*, in *Programme and Papers, 4th Marcelino Botín Foundation Water Workshop*, Santander, septiembre de 2009.

Dalla Marta A., Mancini M., Ferrise R., Bindi M., Orlandini S. 2010, *Energy crops for biofuel production: Analysis of the potential in Tuscany*, in *Biomass And Bioenergy* No. 34, pg. 1041-1052, 2010

Días de Oliveira M. E., Vaughan B. E., Rykiel Jr. E. J. 2005, *Ethanol as Fuel: Energy, Carbon Dioxide Balances, and Ecological Footprint*, in *BioScience*, Vol. No. 7, pg. 593-602, julio de 2005.

Doorembos J. y Kassam A. H. 1980, *Efecto del agua sobre el rendimiento de los cultivos*, in Series FAO: *Riego y Drenaje* No. 33, Roma.

Duke H. R., Stetson L. E., Ciancaglini N.C. 1990, *Irrigation system controls*, in G J Hoffman *et al.* (eds), *Management of Farm Irrigation Systems*, ASAE, St Joseph: 265-312.

Earth Policy Institute, Lester R. Brown, 2009, *Plan B 4.0: Mobilizing to Save Civilization*, New York, W.W. Norton & Company, 2009. Datos disponibles online: http://www.earth-policy.org/index.php?/data_center/C23/.

Ederra I. & Murugarren N. 2010, *La nueva tarifa eléctrica, la nueva escala de los precios del agua de riego*, Servicio de Asesoramiento al Regante, 02 de marzo de 2010.

Electric Power Research Institute (EPRI) 2002, *Water & Sustainability (Volume 3): U.S. Water Consumption for Power Production — The Next Half Century*, Technical Report, marzo de 2002.

Eltawil M. A., Zhengming Z., Yuan L. 2008, *Renewable energy powered desalination systems: Technologies and economics-state of the art*, Twelfth International Water Technology Conference, IWTC12 2008, Alexandria, Egypt, 2008.

Embid Irujo A. 2010, *El agua y la energía en el ordenamiento jurídico. Reflexiones generales (con atención singular a la regulación del orden de utilización y al caudal ecológico)*, ponencia XV Jornadas de Derecho de Aguas (Agua y Energía), Zaragoza, febrero de 2010.

Empresa Municipal de Abastecimiento y Saneamiento de Aguas de Sevilla, S.A. (Emasesa) 2005, *Sostenibilidad y gestión 2005*, Empresa Municipal de Abastecimiento y Saneamiento de Aguas de Sevilla S.A., 2005.

Energy Information Administration (EIA) 2009, Country Analysis Briefs: Brazil - Oil, <http://www.eia.doe.gov/emeu/cabs/Brazil/Oil.html> (16 de abril de 2010).

Energy Information Administration (EIA), USDE 2006, *Annual Energy Outlook with Projections to 2030*, Washington, February 2006.

Estevan Estevan A. 2008, *Herencias y problemas de la política hidráulica española*, Bakeaz, Bilbao, 2008.

Estevan Estevan A. y García Sánchez-Colomer M. 2007, *El consumo de energía en la desalación de agua de mar por ósmosis inversa: situación actual y perspectivas*, in *Ingeniería Civil* No. 148, pg. 113-121.

EurObserv'ER 2009, Biofuels Barometer, in *le journal des énergies renouvelables* No. 192, julio de 2009.

European Biomass Association (AEBIOM) 2009, European Biomass Statistics 2009, A statistical report on the contribution of biomass to the energy system in the EU 27, AEBIOM-European Biomass Association, Bruselas, 2009.

European Environment Agency (EEA) 2006, *How much bioenergy can Europe produce without harming the environment?* EEA Report, No 7, ISSN 1725-9177, 2006.

EuroStat 2007a, *Energy Statistics - Supply, transformation, consumption—Electricity— Annual data*, Base de datos EuroStat, septiembre de 2009.

EuroStat 2007b, *Energy Statistics - Supply, transformation, consumption—Oil— Annual data*, Base de datos EuroStat, diciembre de 2009.

F.O. Licht 2008, *F. O. Licht's World ethanol and biofuels report 2008*.

Federación Nacional de Comunidades de Regantes de España (FENACORE) 2009, *Las manifestaciones del campo y del regadío. Reivindicaciones y expectativas*, in *Boletín Inter Cuencas* No. 22, pg. 1-3, diciembre de 2009.

Feeley T.J., Skone T. J., Stiegel G. J. Jr., McNemar A., Nemeth M., Schimmoller B., Murphy J.T., Manfredo L. 2007, *Water: A critical resource in the thermoelectric power industry*, in *Energy*, No. 33, pg. 1-11, 2008.

Fernández J., *Presente y futuro de los biocarburantes en la UE*, in *Vida Rural*, Dossier Agroenergética, No.25, 1 de junio de 2007.

Food and Agricultural Policy Research Institute (FAPRI) 2010, *World Agricultural Briefing Book - World Biofuels*, Iowa State University, Ames, and the University of Missouri, Columbia.

Formas (ed) 2008, *Water for Food*, Sweedish Research Council (Formas), Stockholm.

Fritzmann C., Löwenberg L., Wintgens T., Melin T. 2007, *State-of-the-art of reverse osmosis desalination*, in *Desalination* 216, 1-76, 2007, doi: 10.1016/j.desal.2006.12.009.

Fundación Ideas para el Progreso 2009, *Un Nuevo modelo energético para España*, Madrid, 20 de mayo de 2009.

Galan-del-Castillo E. & Velazquez E. 2009, *From water to energy: The virtual water content and water footprint of biofuel consumption in Spain*, in *Energy Policy* 38, pg. 1345-1352, doi:10.1016/j.enpol.2009.11.015, diciembre de 2010.

Gallego Elvira B, Martínez Alvarez V, Maestre Valero J. F, Martín Górriz B., *Aplicación de coberturas de sombreo en embalses de regulación de riego*, Ponencia C-06 del Congreso Nacional de Riegos, Murcia, junio del 2009.

García Gironés M., Martínez Álvarez V., 2007, *Metodología para el análisis del retorno de la inversión en cubiertas fijas para sombreo de balsas de regadío. Aplicación a un caso práctico*, in *Ingeniería Civil* 148, pg. 162-168, 2007.

Garnaut R., Howes S., Jotzo F, Sheekan P. 2009, *The Implication of rapid Development for Emissions and Climate-change Mitigation*, in *The Economics and Politics of Climate Change*, Dieter Helm and Cameron Hepburn, Oxford University Press, pg. 81-106, 2009.

Garrido A. 1999, *El mercado del agua. Una visión desde la perspectiva económica*, Revista Mensual Gestión Ambiental 1(7), pg. 31-41, 1999.

Garrido A. 2000, *La reforma de la Ley de Aguas: Análisis*, in *Iuris: Actualidad y práctica del derecho* 3, pg. 44-51, mayo de 2000.

Garrido A., Llamas M. R., Varela-Ortega C., Novo P., Rodríguez-Casado R., M. Aldaya Maite 2010, *Water Footprint and Virtual Water Trade in Spain, Policy Implications*, Springer, 2010.

Gates L. D., Ließ S. 2001, *Impacts of deforestation and afforestation in the Mediterranean region as simulated by the MPI atmospheric GCM*, in *Global and Planetary Change* Vol. 30, issue 3-4, pg. 309-328, 2001.

Gerbens-Leenes P. W., Hoekstra A. Y. & van der Meer Th. 2008, *Water footprint of bio-energy and other primary energy carriers*, in *Value of water*, Research Report Series No. 29, marzo de 2008.

Gerbens-Leenes P. W., Hoekstra A. Y. & van der Meer Th. 2009, *The water footprint of energy from biomass: A quantitative assessment and consequences of an increasing share of bio-energy in energy supply*, in *Ecological Economics*, pg. 1052-1060, (doi: 10.1016/j.ecolecon.2008.07.013), agosto de 2008.

Gibbs H. K., Johnston M., Foley J.A., Holloway T., Monfreda C., Ramanakutty N., Zaks D. (2008), *Carbon payback times for crop-based biofuel expansion in the tropics: the effects of changing yield and technology* (más material suplementario), in *Environmental Research Letter* 3, 2008.

Gil M., L. Rodríguez-Sinobas, L. Juana, R. Sánchez & A. Losada. 2008, *Emitter discharge variability of subsurface drip irrigation in uniform soils. Effect on water application uniformity*, in Springer, *Irrigation Science* No. 26, pg. 451-458.

Gleick P.H. 1994, *Water and Energy*, in *Annual Review of Energy and the Environment*, No. 19, pg.267-299, 1994.

Gleick P. H., Haasz D., Henges-Jeck C., Srinivasan V., Wolff G., Kao Cushing K., Mann A. 2003, *Waste Not, Want Not: The Potential for Urban Water Conservation in California*, Pacific Institute for Studies in Development, Environment, and Security, California, noviembre de 2003.

Global Water Intelligence DesalData, International Desalination Association (GWI DesalData/IDA 2009a), *Country profile: Spain, contracted capacity forecast, octubre de 2009*.

Global Water Intelligence DesalData, International Desalination Association (GWI DesalData/IDA 2009b), *Country profile: Spain, contracted and planned plants*, octubre de 2009.

Global Water Intelligence DesalData, International Desalination Association, (GWI Desaldata/IDA 2009c) *Projects/Plants: Filter plant selection*, octubre de 2009.

GWRC. 2008. Water and Energy Report of the GWRC Research Strategy Workshop. Global Water Research Coalition. Londres. http://www.iwahq.org/Mainwebsite/Resources/Document/GWRC_Water_and_Energy_workshop_report.pdf

González Quijano P.M. 1942, *Medida y cálculo de la evaporación*, in *Revista de Obras Públicas*, Año 90, tomo I (2721): pg. 32-37.

Guillamón Álvarez J. 2007, *Trasvase y desalación, las cifras y las cuentas*, in *Boletín No. 3 - V Congreso Nacional de Ingeniería Civil*, Sevilla, 26, 27 y 28 de noviembre de 2007.

Haag A. L. 2007, *Algae bloom again*, in *Nature*, Vol. 447, pg. 520-521, 31 de marzo de 2007.

Hanson B. R. 1995, *Practical potential irrigation efficiencies*, Proceedings of the Aug. 14-18, First International conference on Water Resources Engineering, San Antonio, TX 1995

Hightower M. & Pierce S. A. 2008, *The energy challenge*, in *Nature*, vol. 452, 20 de marzo de 2008, pg. 285-286.

Hill J., Nelson E., Tilman D., Polasky S., Tiffany D. 2006, *Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels*,

in *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol.103, No. 30, pg. 11206-11210, Julio de 2006.

Hispagua 2006, *Monografía especial: Vertidos de aguas continentales en España*, octubre de 2006. <http://hispagua.cedex.es/documentacion/especiales/contaminacion/vertidos.htm#b>

Hoffman, G. L, Howell T. A, Solomon K. H (Eds.). 1990, *Management of Farm Irrigation Systems*, American Society of Agricultural Engineers (ASAE). St. Joseph, MI 49085-9659 USA.

Hoffman, G. L, Evans R. G, Jensen M. E, Martin D. L, Elliott R. L (Eds.). 2007, *Design and Operation of Farm Irrigation Systems*, 2ª Ed. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). St. Joseph, MI 49085-9659 USA.

Howell T. A. 1990, *Relationships Between Crop Productin and Transpiration, Evapotranspiration and Irritation*, in Stewart B. A, Nielsen D. R. (Eds) 1990, *Irrigation of Agricultural Crops*, No. 30, series Agronomy, American Society of Agronomy (ASA), Crop Science Society of America (CSSA), Soil Science Society of America (SSSA), Madison, Wisconsin USA.

Humpherys AS (1987), *Automated Farm Surface Irrigation System* Word-Wile, ICID, New Delhi.

Hutson S. S., Barber N. L., Kenny J. F., Linsey K. S., Lumia D.S., Maupin M. A. 2004, *Estimated Use of Water in the United States in 2000*, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2004.

Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) 2005, *Renovables 2050, Un informe sobre el potencial de las energías renovables en la España peninsular*, Greenpeace, julio de 2005.

Instituto Nacional de Estadística (INE) 1999, *Encuesta sobre el uso del agua en el sector industrial, año 1999*.

Instituto Nacional de Estadística (INE) 2007a, *Encuesta sobre el suministro y saneamiento del agua, año 2007*.

Instituto Nacional de Estadística (INE) 2007b, *Encuesta sobre el uso del agua en el sector agrario, año 2007*.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) 2007a, *Plan de acción 2008-2012*, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, julio de 2007.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) 2007b, *Bio-carburantes en el transporte*, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, octubre de 2007.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) 2008, *Ahorro y Eficiencia Energética en la Agricultura*, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), Secretaría General de Energía del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Madrid. ISBN: 978-84-96680-28-9.

International Association for Energy Economics (IAEE) Second Quarter 2010, *Biofuels in China: Development Dynamics, Policy Imperatives, and Future Growth*, By Caleb O'Kray and Kang Wu, 2010.

International Energy Agency (IEA) 2004, *Biofuels for transport, an international perspective*, Paris, abril de 2004.

International Energy Agency (IEA) 2007, *World Energy Outlook*, Paris 2007.

Jimenez Blanco A. 2010, *Notas sobre el régimen jurídico de la energía termosolar*, ponencia XV Jornadas de Derecho de Aguas (Agua y Energía), Zaragoza, febrero de 2010.

Juana L., Laguna F., Sanchez R., Gil M., Castañón G. 2009, *Criterios para el proyecto y la gestión de una red ramificada de riego a la demanda*, Jornadas de Ingeniería del Agua. Madrid.

Juana L. & Losada A. 2000, *Obras e instalaciones hidráulicas en redes abiertas y a presión*, in *Hidráulica y Riegos*, E.T.S.I. Agrónomos de Madrid.

Juana L., Losada A., Rodríguez Sinobas L., Sánchez R. 2004, *Analytical relationships for designing rectangular drip irrigation units*, in *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 130(1), pg. 47-59.

Juana L., Rodríguez Sinobas L., Sánchez R., Losada A. 2005, *Analytical expressions for hydraulic calculation of trapezoidal drip irrigation units*, in *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 131(5), pg. 420-432.

Juana L., Rodríguez-Sinobas L., Losada A. 2002, *Determining minor head l in drip irrigation laterals. I: Methodology*, in *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 128 (6), pg. 376-384.

Juana L., Rodríguez-Sinobas L., Sánchez R. 2007, *Evaluation of drip irrigation: Selection of emitters and hydraulic characterization of trapezoidal units*, in *Agricultural Water Management* No.90, pg. 13-26.

Juana L., Sánchez R., Rodríguez-Sinobas L., Laguna F. 2008, *Probability of pressure deficit in on-demand branched networks and incorporation into design decisions*, in *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, USA. Vol. 135(2), pg. 186-199.

Juana, L. & Losada A. 1994, *Semejanza hidrodinámica en riegos por superficie*, in *Ingeniería del Agua* Vol. 1, No. 1, pg. 67-88.

Juana, L., Sánchez R., Rodríguez L., Castañón G. 2008, *Proyecto de unidades de riego por goteo: Presión óptima y coste de la uniformidad*, ponencia C-20. XXVI Congreso Nacional de Riegos, AERYD, Huesca.

Keeney D. & Muller M. 2006, *Water Use by Ethanol Plants - Potential Challenges*, Institute for Agriculture and Trade Policy, octubre de 2006.

King C. W., Holman A. S. & Webber M. E. 2008, *Thirst for energy*, in *Nature Geoscience*, vol. 1, pg. 283-286, mayo de 2008.

Koh L. P., Ghazoul J. 2008, *Biofuels, biodiversity, and people: Understanding the conflicts and finding opportunities*, in *Biological Conservation* No 141, pg. 2450-2460, 2008.

Krinner W., García A., Estrada F. 1994, *Method for Estimation Efficiency in Spanish Irrigation Systems*, in *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 120(5), pg. 979-986.

Lechón Y., Cabal H., Lago C., de la Rúa C., M.^a Sáez R., Fernández M. 2005, *Análisis de ciclo de vida de combustibles alternativos para el transporte, Fase 1. Análisis de Ciclo de Vida comparativo del etanol de cereales y de gasolina*, CIEMAT, Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Medio Ambiente, 2005.

Linares P. & Sáenz de Miera G. 2009, *Implications for water of the world energy scenarios*, working paper of the Instituto de Investigación Tecnológica (Universidad Pontificia Comillas), 15 de mayo 2009.

López Moreno J. I. 2008, *Estimación de pérdidas de agua por evaporación en embalses del Pirineo*, in *Cuadernos de Investigación Geográfica*, No. 34, Universidad de la Rioja, pg. 61-81, 2008.

Martín Morales F., Sánchez Sánchez J. M. 2005, *Mejora de la eficiencia energética de las plantas desaladoras: nuevos sistemas de recuperación de energía*, in *Ingeniería y Territorio* No. 72, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Barcelona, 2005.

Martínez A. 2009, *Exergy cost assessment of water resources: Physical Hydromonics*, tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, departamento de Ingeniería Mecánica.

Martínez A., Uche J. 2010, *Chemical exergy assessment of organic matter in a water flow*, in *Energy* No.35, pg. 77-84, 2010.

Martínez Alvarez V., Baille A., Molina Martínez J. M., González-Real M. M. 2006, *Efficiency of shading materials in reducing evaporation from free water surfaces*, in *Agricultural Water Management* 84, pg. 229-239, 2006.

Martínez-Cortina L. 2009, *Water Policy in Spain*, capítulo 2: *Physical and hydrological characteristics*, pg. 11-20, Países Bajos, 2009.

McMahon J. E., Whitehead C. D., Biermayer P., 2006 Saving water saves energy Lawrence Berkeley National Laboratory. Berkeley. California. USA.

Medina J. A. 2004, *20 years Evolution of Desalination Costs in Spain*, International Conference on Desalination Costing, Limassol.

Melgarejo Moreno J. & Montaña Sanz B. 2009, *La eficiencia energética en el trasvase Tajo - Segura*, in *Cuides, cuaderno Interdisciplinar de Desarrollo Sostenible* No. 3, Fundación CajaMar, octubre de 2009.

Miller J. R. & Burke A. F. 2008, *Electrochemical Capacitors: Challenges and Opportunities for Real-World Applications*, in *Interface*, The Electrochemical Society, verano de 2008.

Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación (MAPYA) 2001, *Plan Nacional de Regadíos*, MAPYA, Madrid.

Ministerio de Industrias, Turismo y Comercio (MITYC) 2005, *Plan de Energías Renovables en España 2005-2010*, agosto de 2005.

Ministerio de Industrias, Turismo y Comercio (MITYC) 2007, *Estadística de la industria eléctrica*, años 2002 hasta 2007.

Ministerio de Industrias, Turismo y Comercio (MITYC) 2010, *Estrategia integral para el impulso del vehículo eléctrico en España*, 04 de abril de 2010. <http://www.mityc.es/es-es/gabineteprensa/notasprensa/documents/estrategiaintegralveh%C3%ADculoelectrico060410.pdf>

Ministerio de Medio Ambiente (MMA) 2000, *Libro blanco del Agua en España*, Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas, Secretaría de Estado de Aguas y Costas.

Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino (MARM) 2007a, *Plan Nacional de Calidad de las Aguas: Saneamiento y Depuración 2007-2015*, Ministerio de Medio Ambiente, 2007.

Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino (MARM) 2007b, *El agua en la Economía Española: Situación y Perspectivas*, Informe integrado del análisis económico de los usos del agua, artículo 5 y anejos II y III de la Directiva Marco de Agua.

Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino (MARM) 2008a, *Agricultura y Biocarburantes*, in *Agrinfo-Enfoque*, No. E4, mayo de 2008.

Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino (MARM) 2008b, *Plan Nacional de Regadío-Horizonte 2008*, 2008.

Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino (MARM) 2009a, *Estrategia nacional para la modernización sostenible de los regadíos H2015, Documento de inicio para consulta sobre evaluación ambiental*, Dirección general del agua, Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino. Noviembre 2009.

Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino (MARM) 2009b, *Perfil Ambiental de España 2008, Informe basado en indicadores* (NIPO 770-09-185-7), Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino. Noviembre 2009.

Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino (MARM) 2009c, *Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos* (ESYRCE), 2009.

Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino (MARM) 2010, Datos de precipitación históricas en España de 1941 hasta 2009, <http://www99.mma.es:120/siagua/visualizacion/lda/recursos/climatologia/precipitacion.jsp>.

Molina Martínez. M., Martínez Álvarez V., Baille A., González-Real M.^a M. 2006, *Estimación de la evaporación en embalses de riego mediante un modelo de balance de energía*, in *Ingeniería del Agua*, vol. 13, n^o3, septiembre de 2006.

Moreira J. R., *Water Use and Impacts Due Ethanol Production in Brazil*, National Reference Center on Biomass, Institute of Electrotechnology and Energy-CENBIO/IEE, University of São Paulo, São Paulo, Brazil.

Murgui Mezquita M., Cabrera Marcet E., Pardo Picazo M. A., Cabrera Rochera E. 2009, *Estimación del consumo de energía ligado al uso del agua en la ciudad de Valencia*, Instituto Tecnológico del Agua (Universidad Politécnica de Valencia, España), ponencia de la Jornada Agua y Energía, Madrid 2009.

National Research Council (NRC) 2008, Committee on Water Implications of Biofuels Production in the United States, Water and Technology Board, Division on Earth and Life Studies, *Water Implications of Biofuels Production in the United States*, The National Academy Press, Washington, D.C., 2008. <http://www.nap.edu/catalog/12039.html>

New York Times 2010, *Solar Industry Learns Lessons in Spanish Sun*, 9 de marzo de 2010, <http://www.nytimes.com/2010/03/09/business/energy-environment/09solar.html>.

Observatorio de la Sostenibilidad de España (OSE) 2010, *Informe de Sostenibilidad en España-2009*, Mundi-prensa, Madrid.

Pacific Institute (2008). *The World's Water 2006-2007*, <http://www.worldwater.org/data.html>.

Pate R., Hightower M., Cameron C., Einfeld W. 2007, *Overview of Energy-Water interdependencies and the emerging energy demands on water resources*, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, marzo de 2007.

Plan Hidrológico Nacional 2000, *Análisis Económicos*, Madrid, septiembre de 2000.

Protermo Solar 2010, *Localización de las plantas termosolares en España*, <http://www.protermosolar.com/boletines/boletin24.html#mapa>

Real Decreto 1620/2007 de 7 de diciembre, *Por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas*. http://noticias.juridicas.com/base_datos/Admin/rd1620-2007.html

REFUEL 2008, Eyes on the track, Mind on the horizon. From inconvenient rapeseed to clean food: A European road map for biofuels, Energy research Centre of the Netherlands, coordinación: Marc Londo, marzo de 2008.

Reidy S. 2006, Paper Finds Water Availability Critical to Growth of Ethanol Industry, in Biofuels Journal, Grainnet, 07 de noviembre de 2006.

Ribal, J. Sanjuan, N. Clemente, G. Fenollosa, M. L. 2009, *Medición de la ecoeficiencia en procesos productivos en el sector agrario. Caso de estudio sobre producción de cítricos*, in *Economía Agraria y Recursos Naturales* (9) 2, pg. 125-148, 2009.

Rio Carrillo A. M. & Frei C. 2009, *Water: A key resource in energy production*, in *Energy Policy*, (doi:10.1016/j.enpol.2009.05.074), mayo de 2009.

Ródenas Cañada M. A. y Guillamón Álvarez 2005, Trasvases y desalación. Tiza y pizarra, in *Ingeniería y Territorio* No. 72, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Barcelona, 2005.

Rogers, D.H., Lamm F. R., Alam M., Trooien T. P., Clark G. A., Barnes P. L., Mankin K. 1997, *Efficiencies and Water Losses of Irrigation Systems*, MF-2243, Kansas State University, Research and Extension, mayo de 1997.

Sala L. 2007, Balances energéticos del ciclo del agua y experiencias de reutilización planificada en municipios de la Costa Brava, Consorcio de la Costa Brava, Seminario Internacional AGUA, ENERGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO, Valencia, 29-31 octubre 2007.

Sánchez R. 2006, *Caracterización de Llaves Hidráulicas Automáticas y Modelación de su Funcionamiento en Sistemas de Riego*, tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Madrid, oai:oa.upm.es/446.

Sánchez R., Juana L., Laguna F., Rodríguez L., Losada A. 2008, *Ahorro energético mediante telecontrol*, I Congreso Internacional de riego, AFRE, FENACORE, EXPO Zaragoza 2008.

Schiermeier, Q. 2010, *The real holes in climatic science*, in *Nature*. No. 463, pg. 284-287.

Secretaría de Estado de Energía (SEE) 2003a, Estrategia de ahorro y eficiencia energética en España 2004-2012 —Sector Servicios Públicos, Secretaría de Estado de Energía, Desarrollo Rural y de la Pequeña y Mediana Empresa, Ministerio de Economía, 5 de noviembre de 2003.

Secretaría de Estado de Energía (SEE) 2003b, Estrategia de ahorro y eficiencia energética en España 2004-2012 —Sector Agricultura y Pesca, Secretaría de Estado de Energía, Desarrollo Rural y de la Pequeña y Mediana Empresa, Ministerio de Economía, 5 de noviembre de 2003.

Shapouri H., Duffield J. A., Wang M. 2002, The energy balance of corn: an update, U. S. Department of Agriculture, Office of the Chief Economist, Office of Energy Policy and New Uses. Agricultural Economic, Report No. 814.

Sociedad de Infraestructuras Rurales Aragonesas, S. A. (Sirasa) 2010, *Coste energético y energías renovables: Soluciones y oportunidades para las comunidades de Regantes*, ponencia XV Jornadas de Derecho de Aguas (Agua y Energía), Zaragoza, febrero de 2010.

Stewart B A, Nielsen D. R. (Eds) 1990, *Irrigation of Agricultural Crops*, No. 30, series Agronomy, American Society of Agronom (ASA), Crop Science Society of America (CSSA), Soil Science Society of America (SSSA), Madison, Wisconsin USA.

SWSI 2004, *Colorado Water Conservation Board*, Statewide Water Supply Initiative, Department of Natural Resources, Colorado.

Témez Peláez J. R. 2007, *Consideración prácticas sobre la evaporación en embalses de la España peninsular*, in *Revista de Obras Públicas* No. 3.476, abril de 2007.

The Economist. 2010. Picking winners, saving losers Industrial policy is back in fashion. Have governments learned from past failures? Aug 5th 2010.

Tió Saralegui C. 2008, *El reto energético y su impacto sobre el sector agrario*, in *Colección Mediterráneo Económico: "El nuevo sistema agroalimentario en una crisis global"* No. 15, CAJAMAR Caja Rural, pg. 67, 2008.

Torcellini P., Long N., Judkoff R. 2003, *Consumptive Water Use for U.S. Power Production*, National Renewable Energy Laboratory, diciembre de 2003.

Torres Corral, M. 2004, *Avances técnicos en la desalación de agua*, in *Revista Ambiental*, Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino, 2004.

Torres Corral, M. 2005, Desalación y planificación hidrológica hoy, in *Ingeniería y Territorio* No. 72, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Barcelona, 2005.

U.S. Department of Agriculture (USDA) 2008, *Farm and Ranch Irrigation Survey*, Table 4: *Land Irrigated by Method of Water Distribution: 2008 and 2003*, Census Publications, USDA, 2007. http://www.agcensus.usda.gov/Publications/2007/Online_Highlights/Farm_and_Ranch_Irrigation_Survey/index.asp

U.S. Department of Energy (USDE) 2006, *Energy demands on water resources*, Report to Congress on the interdependency of energy and Water, diciembre de 2006.

U.S. Department of Energy Office of Science (USDEOS), Genomics Science Program, Systems Biology for Energy and Environment, *Biofuels for Transportation*, <http://genomicscience.energy.gov/biofuels/transportation.shtml#consumption>.

Uche J. & Martínez A. 2010, *El consumo energético en el ciclo del agua*, ponencia XV Jornadas de Derecho de Aguas (Agua y Energía), Zaragoza, febrero de 2010.

UNESA Asociación Española de la Industria Eléctrica 2007, *Prospectiva de generación eléctrica 2030*, UNESA, diciembre de 2007.

Union of Concerned Scientists (UCS) 2009, *Climate 2030, A national blueprint for a clean energy economy*, Appendix D. *Electricity Sector Assumptions*, Cambridge Massachusetts, mayo de 2009.

United Nations 2003, *World Water Development Report, Water for People, Water for Life (Executive Summary)*, Paris 2003.

University of Denver 2007, *Convened by the University of Denver to Discuss Colorado's Water Future*, Technical Report, University of Denver Water Futures Panel, Discussions and Comments, abril de 2007.

Valero A., Uche J., Valero A., Martínez A. 2009, *Physical Hydronomics: Application of the exergy analysis to the assessment of environmental costs of water bodies. The case of the inland basins of Catalonia*, in *Energy* No. 34, pg. 2101-2107, 2009.

Villalba Granda C. 1927, *Las pérdidas por evaporación en España*, in *Revista de Obras Públicas*, Año 75, tomo 1 (2488), pg. 409-413.

Water Environment Federation (WEF) 2009, *Energy Conservation in Water and Wastewater Facilities*, manual of practice No. 32, WEF Press, Virginia, 2009.

Welgemoed T. J. & Schutte C. F. 2005, *Capacitive Deionization Technology: An alternative desalination solution*, in *Desalination* 183, pg. 327-340, 2005.

Wensson W. 2000, *Un nuevo recuperador de energía rompe la barrera conceptual de la ósmosis inversa*, I Congreso AED y R, Murcia, 2000.

Wolfe J.R., Goldstein R.A., Maulbetsch J. S., McGowin C. R. 2009, *An Electric Power Industry Perspective on Water Use Efficiency*, in *Journal of Contemporary Water Research & Education*, edición The Energy-Water Nexus, No. 143, pg 30-34, Universities Council on Water Resources, diciembre de 2009.

