

J. Causapé

APROVECHAMIENTO DEL AGUA EN LOS REGADÍOS DE BARDENAS

Separata ITEA

INFORMACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA AGRARIA, VOL. **105** N.º 3 (202-221), 2009

Aprovechamiento del agua en los regadíos de Bardenas

J. Causapé

Instituto Geológico y Minero de España (IGME)

C/ Manuel Lasala nº 44. 9ºB. 50006 Zaragoza

Tf: 34 - 976 555 282, Fax: 34 - 976 55 33 58

E-mail: j.causape@igme.es; web site: www.jcausape.es

Resumen

La vigilancia agro-ambiental de una cuenca como la del Ebro (España) que posee cerca de 800.000 ha regadas, requiere abordar estudios de subcuencas hidrológicas de regadío a escala de grandes polígonos, de forma que con un número manejable de subcuencas se controle la mayor parte del área regada. Este trabajo pretende evaluar el uso del agua en las 59.200 ha de Bardenas que se incluyen dentro de la subcuenca del Arba (Zaragoza) como experiencia piloto previa a la implantación de una red de control de los regadíos del Ebro.

La metodología se basó en el desarrollo de balances hídricos (2004-2007) y el análisis de los índices de calidad del riego propuestos en la aplicación informática Evaluador Medioambiental de Regadíos (EMR 2.0).

Del estudio resultó que el 94% del agua disponible fue destinada a la evapotranspiración de los cultivos, si bien, el manejo del riego no fue el adecuado ocasionando un déficit hídrico del 8%. La eficiencia de riego media fue del 90% destacando que las menores eficiencias a nivel de comunidad de regantes se relacionaron con excesivas pérdidas en el drenaje del riego por inundación (fracciones de drenaje del riego máximas del 28%) y notables pérdidas por evaporación y arrastre en el riego por aspersión (15% del riego aplicado).

El índice de aprovechamiento de agua fue alto (84%) alcanzando un máximo del 95% en épocas de sequía. Así pues, el margen de mejora es escaso, pudiendo incrementarse el aprovechamiento de agua y reducir el estrés hídrico de los cultivos mediante: i) mejora de la eficiencia en parcela del riego por inundación, ii) mayor regulación de escorrentías de lluvia y retornos de riego que maximice su reutilización y iii) adecuación del riego por aspersión a horas de menor temperatura y viento que minimicen las pérdidas por evaporación y arrastre.

Palabras clave: Recursos hídricos, riego, eficiencia, drenaje, reutilización.

Summary

Water use in the Bardenas irrigation district

The agro-environmental control of a basin such as the Ebro basin (Spain), comprising 800,000 ha of irrigation land, requires studies of hydrological irrigation sub-basins at a large scale of irrigation districts, in such a way that with a reasonable number of sub-basins, most of the irrigated area is controlled. This paper evaluates the water usage in the 59,200 ha of the Bardenas irrigation district, which belongs to the Arba basin (Zaragoza), as a pilot experience previous to the development of a control grid in the Ebro Irrigation lands.

The methodology was based on the calculation of water balances (2004-2007) and the analysis of the irrigation quality indices proposed in the computational program Irrigation Land Environmental Evaluation Tool (In Spanish EMR 2.0).

The study showed that 94% of the available water was used by crop evapotranspiration, although irrigation management was not adequate, generating an 8% hydric deficit. The average irrigation effi-

ciency was 90%, reemphasizing the fact that the lower efficiencies at an Irrigation District level were related to higher drainage losses in surface irrigation (maximum irrigation drainage fractions of 28%) and to remarkable losses due to evaporation and wind drift of sprinkler irrigation (15% of irrigation supply).

The water use index was high (84%), reaching a maximum value of 95% during drought periods. Thus, the improvement margin is limited, and therefore irrigation efficiency can be increased as well as the crop hydric stress can be reduced by: i) improvement of plot irrigation efficiency, ii) better regulation of surface runoff from both precipitation and irrigation return flows, to maximize reuse, iii) adaptation of sprinkler irrigation to lower temperature and wind hours, minimizing the evaporation and wind drift losses.

Key words: Hydric resources, irrigation, efficiency, drainage, reuse.

Introducción

El volumen de agua necesario para generar alimentos condiciona que la agricultura se constituya como el principal uso de agua dulce a nivel mundial con un 69% de las extracciones y un 93% del consumo total. Gracias a ello, el 40% de la producción agrícola mundial se obtiene en el 20% de la superficie cultivada donde el regadío está presente (FAO, 2002).

Históricamente, la expansión de la agricultura de regadío ha contribuido a satisfacer las necesidades alimenticias de una creciente población mundial. No obstante, aunque 2007 fue un año record de producción, los precios del cereal se incrementaron un 60% como consecuencia del aumento del precio del petróleo, el impulso del biodiesel y sobre todo de un mayor consumo de países emergentes como India y China (Lorente, 2007; Bussière y Mehl, 2008; Henderson, 2008).

Lamentablemente, la agricultura de regadío no solo ha aportado beneficios sino que también origina importantes problemas ambientales derivados de la creciente demanda de agua regulada. Así por ejemplo, la derivación de caudales de los ríos Amu-Darya y Syr-Darya para suministro de agua al regadío está causando desde 1960 un continuo retroceso del Mar Aral (Aladin y

Plotnikov, 2003; Cai *et al.*, 2003). En algunas zonas las necesidades hídricas pueden ser tan altas que se desarrollan estrategias de gestión para emplear los retornos de riego como recurso adicional (Beltrán, 1999).

Mientras en el tercer mundo, con muertes por desnutrición, sigue siendo prioritario satisfacer las necesidades más básicas, en los países más desarrollados a la gestión del agua se le exige ir más lejos, ya que además de asegurar la adecuada satisfacción de las necesidades hídricas, debe preservar el buen estado ecológico de los ecosistemas acuáticos.

La cuenca del Ebro ha sido objeto de numerosos estudios con la intención de conocer el grado de aprovechamiento del agua en sus distintos regadíos. Una síntesis de sus resultados (Causapé *et al.*, 2006) muestra que el valor medio de eficiencia de riego para zonas regadas por inundación sobre suelos inadecuados para ello (alta capacidad de infiltración y baja capacidad de retención de agua) es de tan solo el 53%. Este valor se incrementa hasta el 79% si la zona regada por inundación presenta suelos adecuados para ello y hasta del 94% si se ha regado por aspersión. No obstante, se ha de señalar que estos estudios se han realizado a escala de parcela o de pequeña cuenca

hidrológica lo que no permitió cuantificar los efectos que posibles reutilizaciones del agua puedan tener sobre la eficiencia global de los grandes sistemas de riego.

Entre los trabajos realizados destacan aquellos basados en el seguimiento de cuencas hidrológicas de regadío donde la pérdida de agua y contaminantes en desagües agrícolas es asignada a la cuenca hidrológica del desagüe correspondiente, y por tanto, asociada a sus características climáticas, geológicas y agronómicas. Este tipo de estudios, a parte de obtener resultados del aprovechamiento del agua de riego, también aportan información de la carga de contaminantes exportada por el regadío en relación a sus características climáticas, geológicas y agronómicas. En este sentido, Causapé (2008) desarrolló la aplicación informática EMR con el fin de unificar la metodología y proponer índices que permitan evaluar el aprovechamiento del agua e impacto agroambiental de regadíos.

No obstante, las cuencas hidrológicas de regadío estudiadas hasta el momento han sido de pequeña extensión (entre 100 y 3.000 ha), lo que ha permitido estudios de detalle pero imposibilitado el seguimiento de grandes territorios.

La vigilancia agro-ambiental de una cuenca como la del Ebro que posee cerca de 800.000 ha regadas, requiere abordar estudios de subcuencas hidrológicas de regadío a escala de grandes polígonos de riego (≈ 50.000 ha), de forma que con un número manejable de subcuencas se controle la mayor parte del área regada.

El objetivo de este trabajo es estudiar el impacto agroambiental de un gran polígono de riego de la cuenca del Ebro, a través del seguimiento de la cuenca hidrológica que lo contiene. Para ello, en esta primera parte se pretende analizar el aprovechamiento del agua y evaluar la calidad del riego en las

59.200 ha regadas del polígono de Bardenas que se incluyen dentro la cuenca del Arba y que constituye la experiencia piloto para el establecimiento de una Red permanente de Control agroambiental de los Regadíos del Ebro (ReCoR-Ebro).

Descripción del área de estudio

La zona de estudio se localiza en la margen izquierda del valle medio del Ebro, concretamente se corresponde con el área regable del polígono de Bardenas incluida en la cuenca del río Arba (fig. 1). La zona presenta glaciares y aluviales cuaternarios, unidades acuíferas superficiales que se asientan sobre materiales terciarios impermeables, considerados como la principal fuente natural de las sales disueltas en el drenaje de la cuenca (Causapé *et al.*, 2004a).

Sobre los glaciares se desarrollan suelos con un alto contenido de elementos gruesos y buenas condiciones de drenaje clasificados como Calcixerollic Xerochrept (Soil Survey Staff, 1992). Sobre aluviales y valles terciarios se desarrollan suelos más profundos clasificados como Typic Xerofluvent (Soil Survey Staff, 1992).

El sistema de Bardenas fue puesto en riego a mitad del siglo XX abasteciéndose del embalse de Yesa a través del Canal de Bardenas, el cuál, suministra agua a más de 80.000 ha localizadas principalmente en la mitad sur de la cuenca del Arba. Los recursos hídricos del sistema de riegos de Bardenas también son aprovechados para el abastecimiento de poblaciones, principalmente Ejea de los Caballeros (16.000 habitantes), y para generar electricidad a través de minicentrales localizadas en las acequias principales.

El sistema se drena a través del río Arba, en el que desembocan sus afluentes Riguel, Arba de Luesia y Arba de Biel que se adentran en el

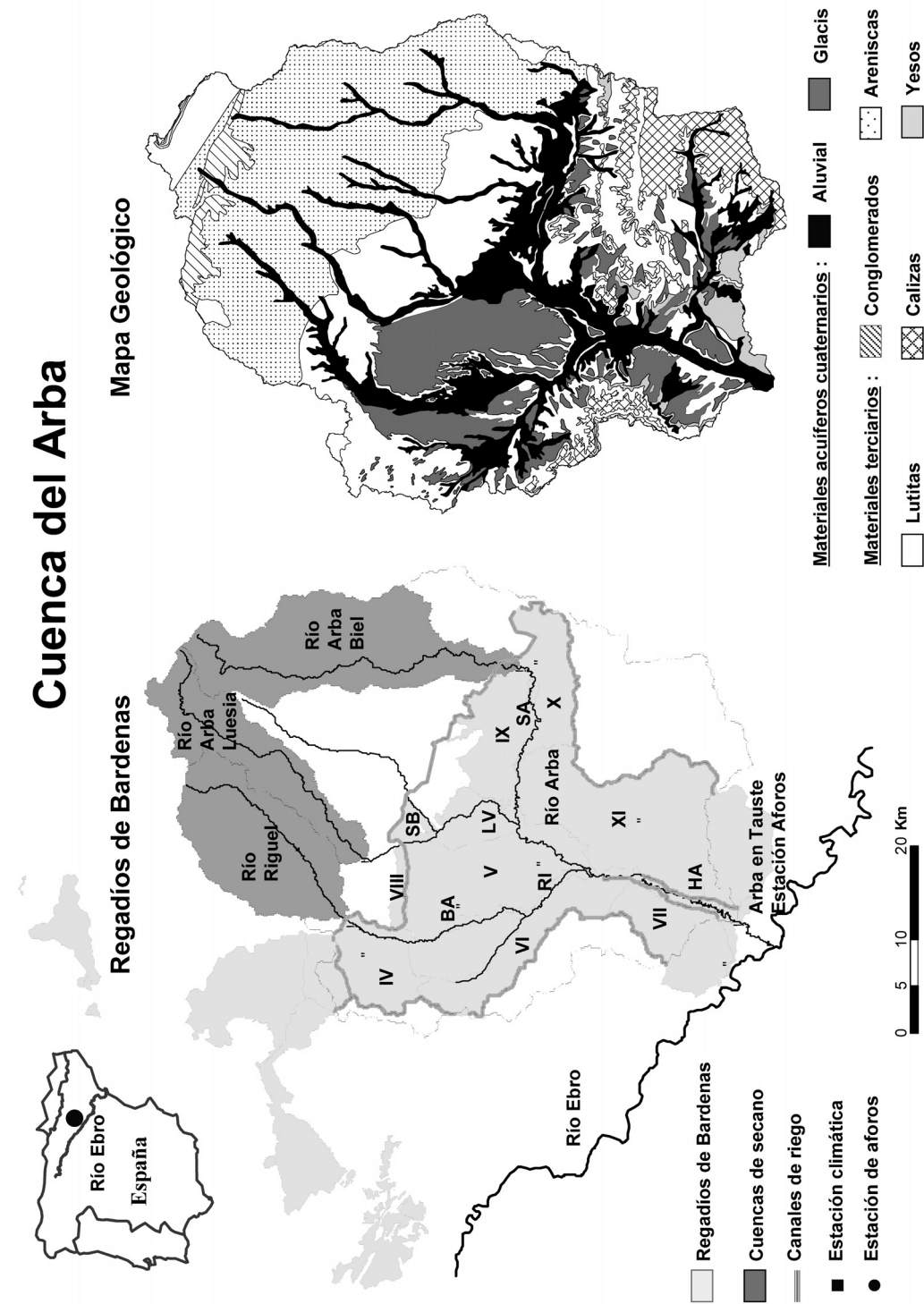


Figura 1. Regadíos de Bardenas incluidos en la cuenca del Arba y mapa geológico.
Figure 1. Bardenas Irrigation Districts, which belong to the Arba basin, and the geological map.

regadío a partir de su intersección con el Canal de Bardenas (fig. 1). La superficie en riego de la cuenca del Arba (27% de la cuenca) es gestionada por 14 de las 20 Comunidades de Regantes (CCRR) que componen el Sistema de Bardenas (CCRR: IV, V, VI, VII, VIII, IX, X, XI, El Bayo-BA, Huertas Altas de Tauste-HA, Las Vegas de Ejea-LV, Riguel-RI, San Bartolomé-SB, y Santía-SA). El 95% de la superficie gestionada por estas 14 CCRR (59.200 ha) drena al río Arba mientras que el restante 5% drena al río Aragón o directamente al Ebro.

Entre las CCRR implicadas en el estudio cabe diferenciar las creadas con la puesta en marcha del embalse de Yesa y el Canal de Bardenas (CR_{IV} a CR_{XI}), de aquellas tradicionales (BA, HA, LV, RI, SB y SA) que se siguen abasteciendo desde azudes en los ríos, pero que se integraron en el sistema de Bardenas pues en gran parte sus recursos hídricos son dependientes de los retornos de riego de las otras comunidades.

Según datos climáticos de la red de Servicio Integral de Asesoramiento al Regante (SIAR, 2008), la precipitación media anual de los cuatro años hidrológicos que abarca el estudio (2004-2007) fue de 430 mm con una elevada variabilidad interanual ($CV=35\%$), de tal forma, que el periodo de estudio comprendió un año hidrológico lluvioso (2004: 605 mm), un año seco (2005: 241 mm) y otros dos años (2006: 473 mm y 2007: 401 mm) mucho más cercanos a la media histórica de la zona (468 mm).

Si analizamos meses de distintos años la variabilidad fue todavía mayor, observándose que existen meses como el de septiembre con un elevado coeficiente de variación ($CV=98\%$). A pesar de ello, las lluvias tienen un marcado carácter estacional con máximos en primavera-otoño y mínimos en invierno-verano (fig. 2). Especialmente, la precipitación registrada en el norte fue un 20% superior al sur.

La evapotranspiración de referencia (ET_0 , Penman-Monteith) media anual de la zona durante los cuatro años de estudio fue de 1.254 mm ($CV=7\%$) registrándose valores máximos en verano y mínimos en invierno (fig. 2). La menor ET_0 (1.147 mm) se registró el año más lluvioso (2004) mientras que la mayor (1.336 mm) se registró el año más seco (2005) agravando la problemática generada por la sequía. Espacialmente, el sur del sistema presentó una ET_0 un 10% superior al norte.

El sistema de riego mayoritariamente implantado fue el riego por inundación principalmente a turnos (85% de la superficie evaluada), seguido de la aspersión (14%) y por último del goteo (1%). Los cultivos más extendidos fueron el cereal de invierno (31%), alfalfa (26%), maíz (13%), arroz (8%), y la hierba (7%) junto a cultivos minoritarios como el girasol (2%), guisante (1%), tomate (1%) y otros cultivos menos significativos en cuanto a su extensión (4%). Durante los últimos cuatro años una media del 8% del área de regadío se dejó como barbecho (tabla 1).

La distribución de cultivos en las cuatro campañas estudiadas varió afectada por la disponibilidad de agua de riego y por las nuevas condiciones de la Política Agraria Comunitaria (PAC). Así pues, la sequía ocasionó que la campaña de 2005 se caracterizase por tener restringidas dotaciones de riego, mientras que las campañas de 2006 y 2007 se caracterizaron por ser las primeras en las cuales se aplicaron subvenciones desacopladas de la PAC, de tal forma, que los agricultores ante la falta de agua de riego e "igualdad" de subvención percibida hayan preferido cultivos con menores necesidades de riego y costes de producción. Todo ello ha provocado que la superficie de cereal de invierno prácticamente se haya duplicado en los últimos cuatro años a costa principalmente de la alfalfa, maíz y arroz (tabla 1).

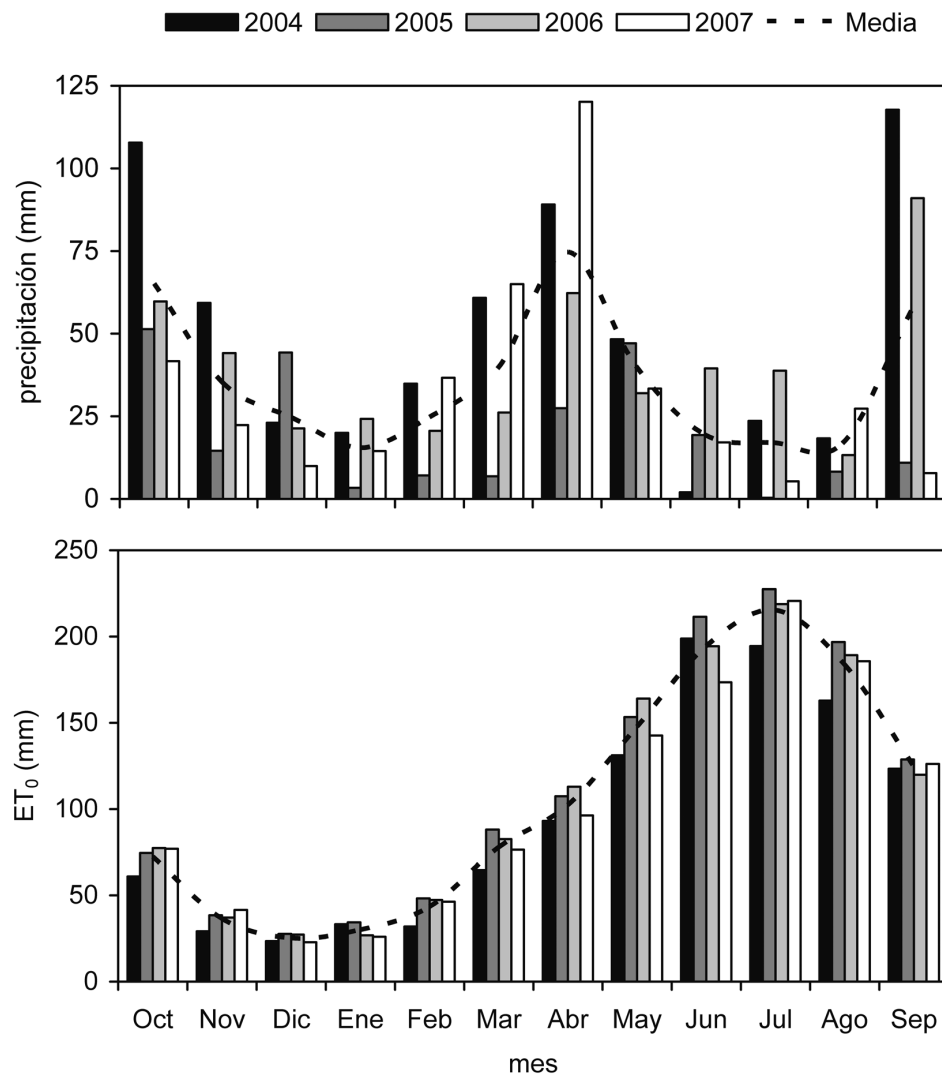


Figura 2. Precipitación y evapotranspiración de referencia (ET_0) mensual de la zona regable incluida en la cuenca del Arba durante los cuatro años de estudio (2004-2007) y media de todo el periodo de estudio.

Figure 2. Monthly values of precipitation and reference evapotranspiration in the Arba basin irrigated area, for the four study years (2004-2007) and the average for the entire study period.

Cabe destacar que aunque el descenso de la alfalfa y el maíz desde 2004 fue similar (un 7% de la superficie total), el descenso en ambos cultivos se produjo de forma distinta. Mientras la alfalfa (cultivo plurianual) disminuyó de forma continuada, la superficie de maíz se redujo a la mitad en tan sólo el año

2005 como consecuencia de la sequía, lo que también justificó el descenso de la superficie de arroz y el incremento del barbecho.

Si analizamos la distribución de cultivos por CCRR se identifican algunas diferencias (tabla 2). Las CCRR situadas al norte (IV, VIII y

Tabla 1. Distribución de cultivos en el área regable de Bardenas incluida en la cuenca del Arba durante los cuatro años de estudio (2004-2007) y su media

Table 1. Crop distribution in the Arba basin irrigated area, for the four study years (2004-2007) and average

Cultivo	2004	2005	2006 %	2007	Media
Cereal invierno	21	33	34	37	31
Alfalfa	29	27	24	22	26
Maíz	19	10	10	12	13
Arroz	11	8	7	7	8
Hierba	6	8	8	8	7
Girasol	3	2	2	1	2
Guisante	3	1	1	1	1
Tomate	1	0	1	0	1
Otros cultivos	3	3	4	4	4
Barbecho	5	8	10	9	8

SB) presentaron mayores proporciones de cereal de invierno (hasta el 59% en CR_{VIII}) y menores de maíz (hasta el 3% en CR_{VIII}). Este hecho está influenciado por sus condiciones climáticas ya que la menor temperatura de las CCRR del norte del sistema impide el correcto desarrollo del cultivo de maíz.

La alfalfa es un cultivo que se distribuye homogéneamente en casi todas CCRR (tabla 2), si bien, pequeñas CCRR gestionadas por agricultores dedicados a los forrajes pueden presentar elevadas proporciones de este cultivo (CR_{SA} : 58%; CR_{BA} : 57%)

Otro factor a tener en cuenta en la distribución espacial de cultivos son las características edáficas. Así pues, CCRR con un alto porcentaje de suelos salinos (VI y RI; Basso, 1994) presentaron los mayores porcentajes de arroz (CR_{VI} : 30%; CR_{RI} : 25%) ante la imposibilidad de sembrar otros cultivos en este tipo de suelos. Por último, destacar la proliferación de cultivos alternativos a los tradicionales en la CR_{XI} (Otros cultivos: 9%) que tiene mayoritariamente implantado sistemas de riego a presión (81% de su superficie). Este hecho indica las mayores posibilidades de los

modernos sistemas de riego y la necesidad de amortizar la inversión en el sistema de riego presurizado con cultivos más rentables.

Metodología

La metodología general del estudio se basa en la ejecución de balances de agua en el área regable incluida en la cuenca del Arba. El desarrollo de los balances de agua como el análisis de la información que se extrae de ellos se efectuó con la ayuda de la aplicación informática EMR (Evaluador Medioambiental de Regadíos) que se encuentra disponible en www.jcausape.es/investigacion/EMR.htm y cuya metodología describe Causapé (2008).

La escala de trabajo y disponibilidad de datos aconsejó que el territorio gestionado por las 14 CCRR incluidas en la cuenca del Arba constituyesen las 14 "zonas" del proyecto EMR para las cuales se introdujo y extrajo información territorial. Así pues, la realización de los balances hídricos requirió la medición o estimación de las principales entradas y salidas de agua en el sistema (área regable incluida

Tabla 2. Superficie media porcentual de cultivos y sistemas de riego (SR) en el área regable incluida en la cuenca del Arba por Comunidades de Regantes (IV, V, VI, VII, VIII, IX, X, XI, El Bayo-BA, Huertas Altas de Tauste-HA, Las Vegas de Ejea-LV, Riguel-RI, San Bartolomé-SB, y Santia-SA) durante los años 2004, 2005, 2006 y 2007

Table 2. Average percentual crop surface and average percentual irrigation system (SR) in the Arba basin irrigated area for Irrigation Districts (IV, V, VI, VII, VIII, IX, X, XI, El Bayo-BA, Huertas Altas de Tauste-HA, Las Vegas de Ejea-LV, Riguel-RI, San Bartolomé-SB, y Santia-SA) for the years 2004, 2005, 2006 and 2007

Cultivos %	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	BA	HA	LV	RI	SB	SA
Cereal invierno	49	27	18	38	59	31	39	29	10	34	27	8	59	12
Alfalfa	20	26	20	38	9	26	31	23	57	30	25	34	14	58
Maíz	4	18	6	11	3	10	12	19	4	13	13	14	12	9
Arroz	5	4	30	0	0	12	2	2	0	10	12	25	0	0
Hierba	5	10	14	5	0	3	4	2	22	5	10	8	1	12
Girasol	2	3	1	0	8	1	3	1	0	1	0	4	3	0
Guisante	2	1	1	0	8	2	1	2	5	0	0	0	1	0
Tomate	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	2	0	0
Otros cultivos	2	4	3	2	3	1	1	9	0	4	3	2	3	4
Barbecho	10	6	7	4	11	13	8	11	2	2	8	3	7	6
SR %														
Inundación	95	94	100	95	100	100	66	19	100	99	100	100	96	97
Aspersión	5	5	0	5	0	0	34	75	0	1	0	0	4	3
Goteo	0	1	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0
Total (ha)	6.171	15.500	6.322	3.416	1.334	4.288	4.600	8.194	384	1.390	5.600	802	771	428

en la cuenca del Arba) entre el momento inicial (1 de octubre de 2003) y final (30 de septiembre de 2007) del balance.

Como entradas se consideraron la precipitación (P), el riego (R), el agua destinada a generar electricidad y posteriormente vertida al Arba sin uso para riego (EL), el abastecimiento a pequeñas poblaciones (AP), el vertido desde la depuradora de Ejea (DP), las entradas a través de los ríos Riguel (RI; 19.561 ha), Arba de Luesia (AL; 14.448 ha) y Arba de Biel (AB; 26.210 ha) y por último, la estimación del drenaje del resto de áreas de secano de la cuenca (RS; 98.258 ha).

Como salidas se consideraron la evapotranspiración (ET), las pérdidas por evaporación y arrastre del riego por aspersión (PEA), el drenaje a través del Arba en Tauste (AT), las salidas por dos acequias laterales que puentean la estación del Arba en Tauste (AC) y el flujo subterráneo a través del aluvial del Arba (SB). El almacenamiento de agua en el sistema no fue considerado con lo que el balance de agua desarrollado quedó definido por la siguiente ecuación:

$$(P+R+EL+AP+DP+RI+AL+AB+RS) - (ET+PEA+AT+AC+SB) = \text{Error balance}; [\text{Ec. 1}]$$

P, al igual que el resto de variables climáticas necesarias en este estudio (ET_0 para la estimación de la ET; velocidad del viento a 2 metros sobre la superficie y la humedad relativa a 1,5 m sobre el suelo para la estimación de PEA), fueron obtenidas diariamente de seis estaciones agroclimáticas (SIAR, 2008) con presencia en la zona de estudio (Sádaba, Ejea de los Caballeros, Luna, Santa Engracia, El Bayo y Tauste; fig. 1).

R, EL y AP fueron facilitados mensualmente por Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE). Igualmente, el Servicio de Hidrología de CHE facilitó los caudales medios diarios de las estaciones de aforo de RI, AL y AB a su entrada en la zona regable. RS fue estimado a partir de los datos de precipitación y un

coeficiente de escorrentía de 0,087 obtenido en una pequeña cuenca hidrológica cercana a Ejea antes de su transformación en riego (Abrahão *et al.*, 2008). Y finalmente, DP fue facilitado mensualmente por el Instituto Aragonés del Agua (Gobierno de Aragón).

AT también fue facilitado diariamente por el Servicio de Hidrología de CHE mientras que SB fue estimado aplicando la ley de Darcy a partir de la información hidrogeológica recogida por el Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE, 1985) que cuantifica la permeabilidad del aluvial del Arba en 100 m/día, el gradiente hidráulico en 0.0033 m/m y el espesor saturado en 10 m que multiplicado por los 1.500 m de longitud transversal que tiene el acuífero hacen una sección saturada de 15.000 m². AC se estimó a partir de un caudal medio de 200 l/s (Guardería de Riegos de la Comunidad Huertas Altas de Tauste, comunicación personal).

La Evapotranspiración Real (ET_R) fue calculada diariamente y para cada CR mediante el Balance diario de Agua en el Suelo (BAS) que efectúa EMR. Para ello fue necesario aportar la superficie de cultivos en cada CR obtenida de las declaraciones que los agricultores hacen para recibir las ayudas de la PAC (Fuente: Gobierno de Aragón).

El periodo vegetativo y los valores medios mensuales de los coeficientes de cada cultivo (K_c) fueron obtenidos de Martínez-Cob (2004) para la comarcas agrarias de Ejea (CCRR: V, VI, VIII, IX, X, XI, BA, HA, LV, RI, SB, SA), Sádaba (CR: IV) y Tauste (CR: VII). Para los periodos y superficies sin cultivo se asignó un coeficiente del suelo desnudo siguiendo la metodología propuesta por Allen *et al.* (1998) para el cálculo del K_c inicial, que depende del tipo de suelo, régimen de precipitaciones y la ET_0 obtenidos de valores medios de las comarcas de Ejea, Sádaba y Tauste (Martínez-Cob, 2004). Para los cultivos minoritarios catalogados como "Otros cultivos" se asignó un valor constante de $K_c = 1$.

El valor de Capacidad de Retención de Agua Disponible en el suelo (CRAD) considerado para todo el sistema fue de 100 mm que se corresponde con un valor representativo de los suelos del valle medio del Ebro (Martínez-Cob, 2004). El desarrollo del BAS en cada CR partió de un volumen inicial de agua útil para las plantas en el suelo (AU) que por desconocerse se consideró la mitad de la CRAD.

Una vez comprobada la bondad del balance, se analizó la evolución espacio-temporal de los Índices propuestos en EMR (Causapé, 2008) para evaluar la calidad del riego por CCRR y el aprovechamiento del agua en el conjunto del sistema. Así pues, se calcularon:

Necesidades Hídricas netas:

$$NHn = (ET_c + AUf) - (AUi + P_{ef}) \quad [\text{Ec. 2}]$$

Índices de Calidad del riego:

Eficiencia en el Uso Consuntivo del Agua:

$$EUCA = \frac{ET_r + AUf}{AUi + P_{ef} + R} \cdot 100 \quad [\text{Ec. 3}]$$

Déficit Hídrico:

$$DH = \frac{ET_c - ET_r}{ET_c} \cdot 100 \quad [\text{Ec. 4}]$$

Fracción de Drenaje del riego:

$$FDR = \frac{D_r}{R} \cdot 100 \quad [\text{Ec. 5}]$$

Eficiencia de Riego:

$$ER = \left[1 - \left(\frac{D_r + PEA}{R} \right) \right] \cdot 100 \quad [\text{Ec. 6}]$$

Índice de Aprovechamiento de Agua:

$$IAA = \left[1 - \frac{D + PEA}{R + P} \right] \cdot 100 \quad [\text{Ec. 7}]$$

Donde AU_{i-f} es el agua útil inicial-final, ET_c la evapotranspiración potencial, ET_r la evapotranspiración real, D el drenaje obtenido del BAS, D_r el drenaje del riego, P la precipitación, P_{ef} la precipitación efectiva, R el riego, y PEA las pérdidas por evaporación y arrastre del riego por aspersión.

Los índices de calidad del riego de aquellas CCRR tradicionales no pudieron ser calculados pues no se abastecen exclusivamente de agua del canal de Bardenas y no está controlado el agua para el riego que derivan desde los azudes en los ríos.

Resultados

Balance Hídrico

R y P constituyeron el 80% de las entradas de agua al sistema evaluado. Entre ellos, P fue el componente principal de 2004, mientras que en los tres años siguientes lo fue R . Los volúmenes de agua introducidos con el riego estuvieron indirectamente relacionados con las lluvias, de tal forma, que los años más lluviosos embalsaron más agua en Yesa, repercutiendo en el agua disponible y utilizada para el riego (tabla 3).

Los flujos hídricos entrantes desde el área exterior al regadío evaluado (RI , AL , AB y RS) constituyeron un 11% de las entradas, repartidas entre ellos según la extensión que drena cada componente y la distribución de precipitaciones.

EL constituyó el 6% de las entradas que se concentraron en las primaveras de 2004 y 2007, cuando el embalse de Yesa se llenó y nuevas lluvias y/o el deshielo permitieron el desembalse de agua para generar electricidad a través de la red de acequias sin que hubiera necesidades de riego. Finalmente, AP y DP tan solo supusieron el 3% de las entradas mostrando la escasa entidad de

Tabla 3. Entradas (R-Riego, P-Precipitación, RI-Riguel, AL-Arba de Luesia, AB-Arba de Biel, RS-Resto Secano, EL-agua destinada a generar electricidad y posteriormente vertida al Arba sin uso para riego, AP-Abastecimiento a pequeñas poblaciones, y DP-Depuradora de Ejea), Salidas (ET-Evapotranspiración, AT-Arba en Tauste, PEA-Pérdidas por evaporación y arrastre del riego por aspersión, AC-Acequias laterales que puentean la estación del Arba en Tauste, SB-flujo subterráneo a través del aluvial del Arba) y error del balance de agua desarrollado en el área regable incluida en la cuenca del Arba para los cuatro años de estudio (2004-2007) y acumulados anualmente

Table 3. Inputs (R-Irrigation, P-Precipitation, RI-Riguel, AL-Arba de Luesia, AB-Arba de Biel, RS-Rainfed land, EL- Water used to generate electricity and then disposed into the Arba without being used for irrigation, AP-Water supply to small villages, DP- Sewage treatment plant of Ejea), Outputs (ET-Evapotranspiration, AT-Arba Tauste, PEA- Losses due to evaporation and wind drift, AC-Lateral channel in Arba Tauste, SB-Groundwater flow through the Arba aquifer) and water balance error in the Arba basin irrigated area for the four study years (2004-2007)

Balance	Anual				Acumulado			
Año	2004	2005	2006	2007	2004	04-05	04-06	04-07
E-Entradas mm/año								
R	531	497	614	520	531	514	547	541
P	605	241	473	401	605	423	439	430
RI	25	6	7	31	25	15	12	17
AL	48	3	9	31	48	26	20	23
AB	67	11	18	36	67	39	32	33
RS	87	35	68	58	87	61	64	62
EL	160	0	0	127	160	80	53	72
AP	33	41	27	6	33	37	34	27
DP	5	4	4	4	5	4	4	4
S-Salidas mm/año								
ET	805	766	844	826	805	785	805	810
AT	547	247	241	459	547	397	345	373
PEA	9	10	14	12	9	9	11	11
AC	11	11	11	11	11	11	11	11
SB	3	3	3	3	3	3	3	3
Error Balance ¹ (%)	13	-21	9	-8	13	0	3	0

¹ Error balance (%) = $200 \cdot [(E-S)/(E+S)]$

estos componentes frente al resto de entradas de agua al sistema.

En cuanto a las salidas, el 98% se debieron a ET y AT. Entre ellas, ET constituyó el 67% de las salidas por el 31% de AT. Anualmente, ET varió entre los 766 mm de 2005 y los 844 mm de 2006 condicionados principalmente por la climatología y distribución de cultivos.

De AT destacó que 2005 y 2006 presentaron prácticamente la mitad de caudal que 2004 y 2007, años con primaveras más lluviosas (fig. 2) en los que incluso se vertió agua de Yesa directamente al Arba sin ser utilizada para riego (tabla 3). Las salidas por PEA, AC y SB fueron mucho menos importantes (1% de las salidas).

La capacidad de regulación del sistema, principalmente en sus acuíferos, provocó un error excesivo en los balances anuales (entre -21 y 13%). Así pues, las elevadas lluvias de septiembre de 2004 y de 2006 no fueron completamente drenadas en su mismo año hidrológico lo que generó desbalances positivos (13% y 9%), en cambio, los años siguientes (2005 y 2007) presentaron desbalances negativos (-21% y -8%). La bondad del balance realizado queda patente cuando los resultados se expresan acumulados anualmente, de tal forma que conforme pasa el tiempo, el componente asociado al almacenamiento de agua en el sistema tiene un menor peso sobre el conjunto del balance. Desde la segunda anualidad, las entradas acumuladas casi coinciden con las salidas y al final de los años 2005, 2006 y 2007 los desbalances fueron prácticamente nulos (tabla 3).

Balance de agua en el suelo

El balance de agua en el suelo (BAS) desarrollado con EMR, hace un reparto del agua de lluvia y riego entre la evapotranspiración real, el drenaje (D_{BAS}) y almacenamiento de agua en el suelo. El hecho de realizar el BAS a nivel de CR podría sobreestimar la ET_R e infraesti-

mar el D_{BAS} debido a que el exceso de agua en un determinado punto de una CR es considerado para satisfacer las necesidades hídricas de otro punto de la misma CR que en ese momento esté en situación de estrés hídrico. En cierto modo, esta situación es la que ocurre en los regadíos de Bardenas ya que ante la escasez de agua de las últimas décadas, la reutilización del agua de drenaje para el riego es una práctica muy desarrollada.

El drenaje del suelo, a diferencia del estimado a partir de la salida de la cuenca hidrológica, no está influenciado por la capacidad reguladora del sistema, principalmente en sus acuíferos. Ello provocó que anualmente D_{BAS} no coincidiera con D ocasionando elevadas diferencias entre ambos parámetros (Tabla 4). No obstante, si se compara los drenajes anualmente acumulados resulta que las diferencias entre D y D_{BAS} disminuyen con el tiempo, y al final de los cuatro años de estudio D_{BAS} tan solo es 4 mm/año inferior a D (3%), mostrando la bondad tanto del balance de agua en el suelo como del conjunto del sistema.

El volumen mensual de entradas de agua al suelo se ajustó al de salidas con pequeñas diferencias ocasionadas por el incremento de agua en el suelo (fig. 3). Tanto las entra-

Tabla 4. Drenaje propio del sistema (D), drenaje estimado por el Balance de Agua en el Suelo (D_{BAS}) y error entre drenaje medido y estimado por BAS en el área regable incluida en la cuenca del Arba para los cuatro años de estudio (2004-2007) y acumulados anualmente

Table 4. Drainage associated to the system (D), estimated drainage for soil water balance (D_{BAS}), and error in the measured drainage and BAS estimation in the Arba basin irrigated area, for the four study years (2004-2007) and for the yearly accumulated

	Anual				Acumulado			
	2004	2005	2006	2007	2004	04-05	04-06	04-07
D (mm/año) ¹	135	160	122	180	135	148	139	149
D_{BAS} (mm/año)	290	40	136	114	290	165	155	145
Error Drenajes ² (%)	73	-119	11	-45	73	11	11	-3

¹ $D = (AT+AC+SB) - (RI+AL+AB+RS+EL+AP+DP)$

² Error Drenajes (%) = $200 \cdot [(D_{BAS}-D) / (D_{BAS}+D)]$.

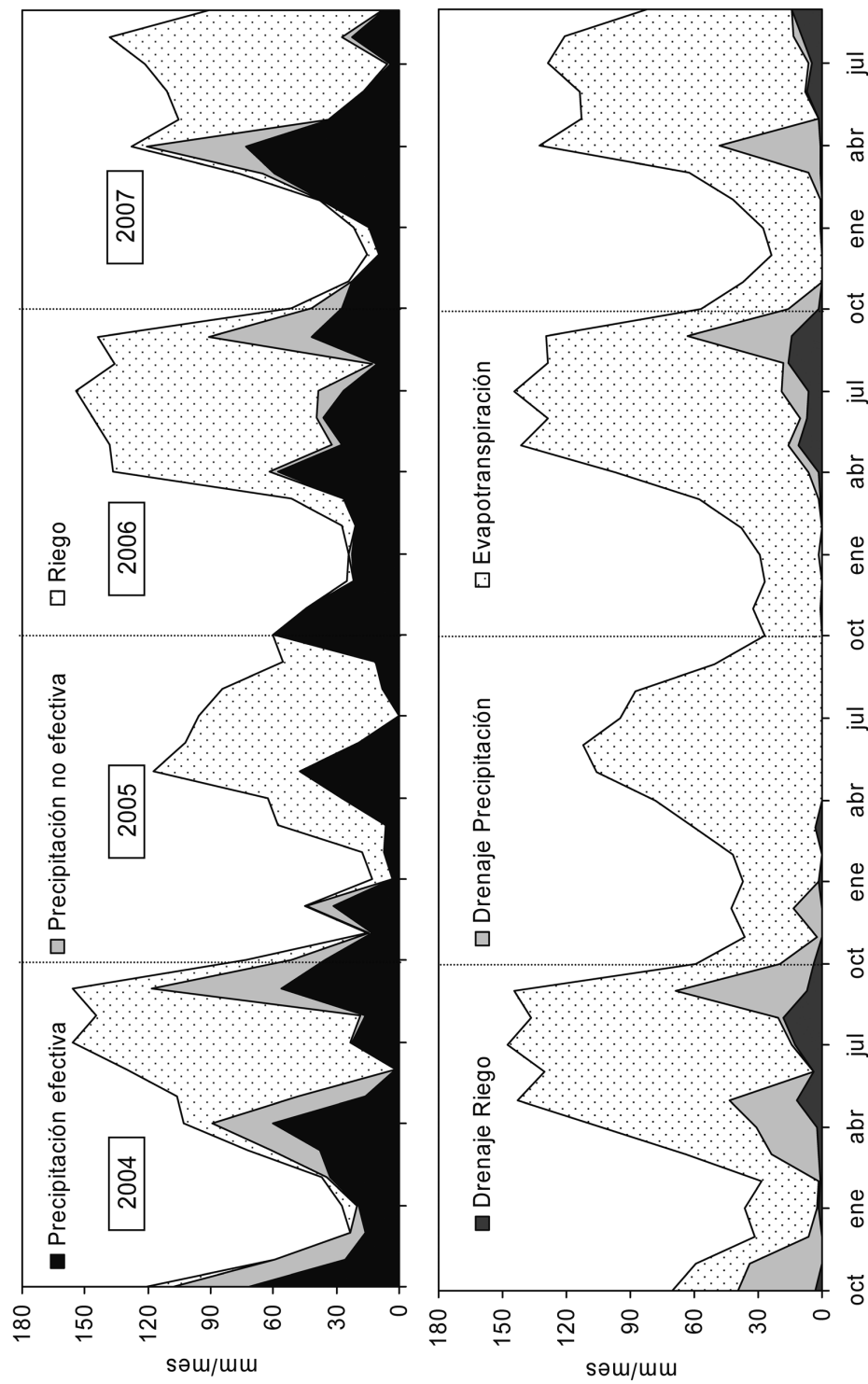


Figura 3. Evolución mensual de las entradas (riego, precipitación efectiva y no efectiva) y salidas (evapotranspiración y drenaje de la precipitación y riego) obtenida del balance de agua en el suelo durante los cuatro años de estudio (2004-2007).
Figure 3. Monthly evolution of inputs (irrigation, effective and non-effective precipitation) and outputs (evapotranspiration, precipitation drainage, and irrigation drainage) from soil water balances for the four study years (2004-2007).

das como las salidas se adaptaron al ciclo vegetativo de los cultivos de verano y por tanto al incremento de la evapotranspiración y de las necesidades de riego con máximos en verano y mínimos en invierno.

El porcentaje de precipitación efectiva durante todo el estudio fue del 76%, (similar al teórico 75% considerado en muchos trabajos de este tipo), si bien, a lo largo de los cuatro años de estudio osciló entre el 62% de 2004 y el 87% de 2005.

Destacaron cinco eventos de lluvia cuantitativamente importantes, tres de ellos en el año hidrológico 2004 (oct-03, abr-04, sep-04), uno en 2006 (sep) y otro en 2007 (abr). La intensidad de estos cinco eventos provocó que entre ellos generasen tres cuartas partes de la precipitación no efectiva de todo el periodo de estudio (fig. 3).

El efecto de las lluvias y del riego quedó reflejado en D_{BAS} . Así pues, los mayores volúmenes de D_{BAS} coincidieron con los cinco eventos de lluvia más importantes y con los periodos de riego (fig. 3), a excepción del periodo de riego de 2005 cuando las escasas precipitaciones fueron consideradas efectivas y la disminución del riego generó un D_{BAS} prácticamente nulo. Realmente lo que ocurrió es que el menor D_{BAS} generado en este periodo fue reutilizado para el riego manifestándose en la ausencia de agua en el río Arba tras su último azud.

Las intensas precipitaciones y volumen de riego aplicado en 2004 provocó que su D_{BAS} (290 mm) fuese más de siete veces superior al de 2005 (40 mm) y más del doble de 2006 (136 mm) y 2007 (114 mm). Según los criterios de EMR, el 29% del D_{BAS} fue generado por el riego, oscilando entre el 22% (2004 y 2005), y el 42% (2006).

Así pues, el riego juega un papel cuantitativamente importante en el volumen de drenaje generado en el sistema, máxime si tene-

mos en cuenta, que el drenaje atribuido a las lluvias también interviene indirectamente en el del riego por el aumento previo de la humedad del suelo.

Calidad del riego

La NHn media del sistema evaluado fue de 332 Hm³/año lo que corresponde a un 74% del volumen del embalse de Yesa para un porcentaje similar de área regada de Bardenas evaluada en este estudio.

Existen diferencias territoriales asociadas a los cultivos implantados (tabla 5), que en mayor o menor grado están condicionadas por las características climáticas, edafológicas y agronómicas. Así pues, las máximas NHn correspondieron a CR_{VI} (730 mm/año) donde sus suelos salinos favorecieron el cultivo mayoritario del arroz (30% de la superficie) como casi la única alternativa de cultivo. En cambio, las CCRR del norte (VIII, SB y IV), con clima más fresco y predominio del cereal de invierno (59, 59 y 49% de superficie respectivamente), presentaron las menores NHn (382, 386, y 427 mm/año respectivamente).

Temporalmente, el caluroso y seco año 2005 presentó las mayores NHn (657 mm), mientras que las menores se presentaron en el lluvioso y fresco año 2004 (487 mm), seguido muy de cerca por 2007 (495 mm) donde se hizo notar el paulatino cambio a cultivos de menores necesidades hídricas (principalmente alfalfa y maíz por cereal de invierno).

El conjunto del sistema presentó una EUCA del 94% indicando que un elevado porcentaje del agua disponible ($AU_i + P_{ef} + R$) fue destinado para la evapotranspiración de los cultivos. No en vano, cinco de las ocho CCRR evaluadas (IV, V, VI, IX, X) presentaron EUCA por encima del 90% y ninguna presentó una EUCA inferior al 70%.

Tabla 5. Necesidades Hídricas netas (NHn), Eficiencia en el Uso Consuntivo de Agua (EUCA), Déficit Hídrico (DH), Fracción de Drenaje del Riego (FD_R) y Eficiencia de Riego (ER) para las Comunidades de Regantes (CCRR), y para el conjunto del sistema evaluado en los cuatro años de estudio y para periodo completo (2004-2007)

Table 5. Net Hydric Needs (NHn), Consumptive Water Use Efficiency (EUCA), Water Deficit (DH), Irrigation Drainage Fraction (FD_R) and Irrigation Efficiency (ER) in the irrigation district (CCRR) as well as for the evaluated system, in the four study years and for the entire period (2004-2007)

CCRR	NHn mm/año	EUCA	DH	FD_R	ER
		%			
IV	427	95	2	4	95
V	646	90	4	9	90
VI	730	93	5	7	93
VII	615	71	0	28	71
VIII	382	84	5	16	84
IX	485	98	3	2	98
X	444	94	7	2	94
XI	523	86	12	2	86
BA	656	—	—	—	—
HA	488	—	—	—	—
LV	524	—	—	—	—
RI	574	—	—	—	—
SB	386	—	—	—	—
SA	587	—	—	—	—

Periodo	NHn mm/año	EUCA	DH	FD_R	ER
		%			
2004	487	93	3	12	86
2005	657	98	19	2	96
2006	601	93	6	9	88
2007	495	95	3	8	90
Total	560	94	8	8	90

A pesar de ello, el manejo del riego no fue el adecuado ya que el sistema presentó un 8% de DH indicando que no todas las necesidades hídricas de los cultivos fueron satisfechas. Sorprendentemente, el mayor DH se presentó en la CR_{XI} (DH = 12%) que es la CR con mayor porcentaje de riego presurizado (75% de su superficie).

Este elevado DH pudo estar justificado por la reducida dotación de riego que recibe esta CR que obliga a los agricultores a salvar sus cosechas de maíz (19% de la superficie)

con producciones de 14 t/ha, a costa de la pérdida de varios cortes de alfalfa (23% de superficie). Esto es debido a que parte del reparto de agua entre CCRR se hizo en función de consumos históricos, lo que perjudicó a las CCRR ahorradoras de agua o que incrementaron su superficie en riego. El DH del resto de CCRR fue inferior presentando valores entre el 0 y el 7% (tabla 5).

Anualmente, destacó como el DH de 2005 (19%), año con mayor ET_0 (1336 mm), ET_C (944 mm) y menor ET_R (766 mm) fue sensi-

blemente superior al DH del resto de los años (entre 3 y 6%) a causa de la sequía.

Tan sólo el 8% del agua aplicada con el riego salió del sistema a través del drenaje. Las menores FD_R (2%) se presentaron en las CCRR transformadas mayoritariamente en riego presurizado (CR_X y CR_{XI}). En cambio, la mayor FD_R (28%) se presentó en la CR_{VII} que registró la menor EUCA (71%). Anualmente, destacó la menor FD_R del seco año 2005 (2%) frente a la del resto de los años que osciló entre el 12% de 2004 y el 8% de 2007.

La ER global del sistema de Bardenas durante todo el periodo de estudio fue del 90%. Cinco de las ocho CCRR que pudieron ser evaluadas presentaron ER por encima del 90%. Las menores ER de la CR_{VII} (71%) y CR_{VIII} (84%) estuvieron relacionadas con

excesivas pérdidas en el drenaje del riego (FD_R de 28 y 16% respectivamente), mientras que la menor ER de la CR_{XI} (86%) estuvo relacionada con las PEA, cuantificadas en un 15% del riego aplicado por aspersión, que por otro lado, es un valor habitual de los regadíos del Ebro (Playán *et al.*, 2005).

Estacionalmente y salvo la excepción de 2006 con las mayores lluvias en verano (fig. 2), tanto la ER como el DH se incrementaron de primavera a verano para de nuevo disminuir en otoño (fig. 4). Este hecho ya fue observado en pequeñas cuencas de Bardenas por Causapé *et al.* (2004b) quienes lo justificaron en la excesiva duración de los turnos de riego por inundación que provocó el agotamiento en verano del agua útil en el suelo generando estrés hídrico y un

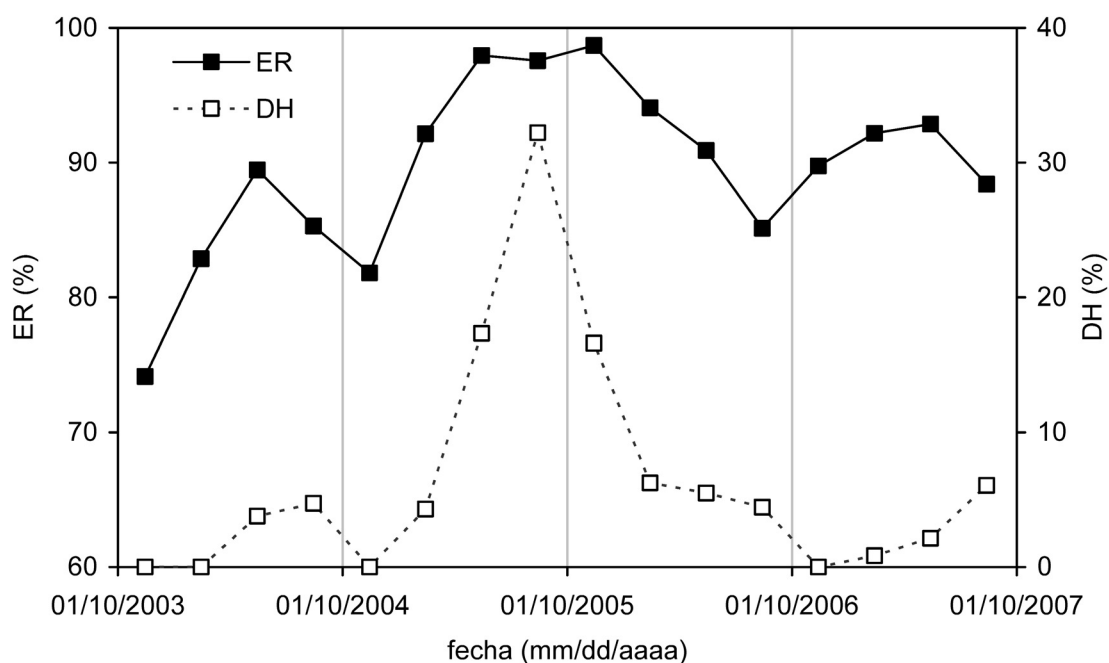


Figura 4. Evolución trimestral de la Eficiencia de Riego (ER) y Déficit Hídrico (DH) para el conjunto del sistema evaluado en los cuatro años de estudio (2004-2007).

Figure 4. Quarterly evolution of Irrigation Efficiency (ER) and Hydric Deficit (DH) for the evaluated system in the four study years (2004-2007).

mayor aprovechamiento del agua aplicada en cada riego.

Al efecto de mayor aprovechamiento del agua regando sobre suelo "seco" se une el efecto de un incremento en la reutilización de agua de drenaje en verano, conforme aumentan las necesidades hídricas de los cultivos y la red de acequias no tiene suficiente capacidad de abastecimiento.

Anualmente, la sequía de 2005 condicionó una mayor ER (96%) pero un elevado DH (19%) mientras que la tendencia de los dos últimos años climáticamente "más normales", aunque con menores ER, fue positiva incrementándose la ER (2006: 88% y 2007: 90%) y disminuyendo el DH (2006: 6%; y 2007: 3%).

Aprovechamiento de agua en Bardenas

El IAA también estuvo influenciado por la capacidad de regulación del sistema, de forma que periodos con riego y precipitaciones importantes todavía no drenadas presentaron valores máximos, mientras que periodos en los que se drenaron riego o lluvias anteriores, presentaron valores mínimos (fig. 5). No obstante, el estudio del IAA acumulados (medias móviles) permite analizar su evolución de manera que conforme pasa el tiempo, el retardo asociado al propio drenaje tiene menos importancia y podemos hacernos una idea más veraz del aprovechamiento del agua en el sistema evaluado.

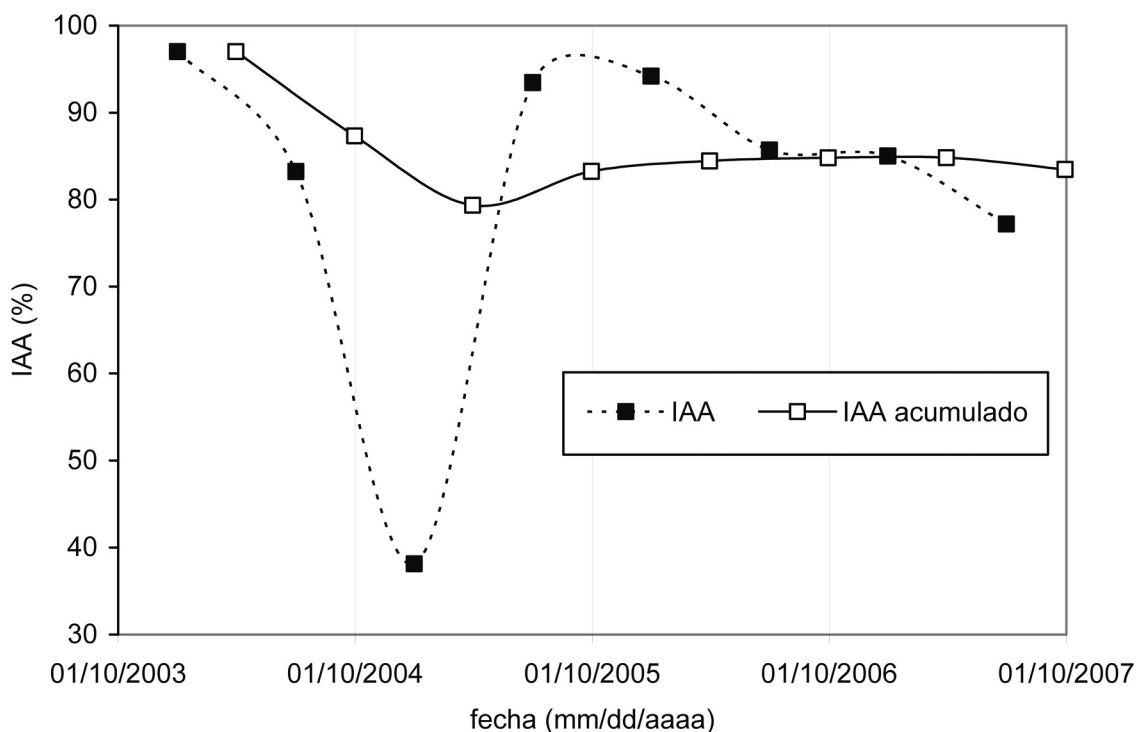


Figura 5. Evolución semestral del Índice de Aprovechamiento de Agua (IAA) para el conjunto del sistema evaluado en los cuatro años de estudio (2004-2007).

Figure 5. Six-monthly evolution of Water Use Index (IAA) for the evaluated system in the four study years (2004-2007).

Así pues, tras los tres primeros semestres en que el IAA semestral osciló entre el 97% y el 38%, el IAA acumulado del sistema de Bardenas se estabilizó en torno al 84% (fig. 5).

Este dato global del sistema de Bardenas contrasta con los datos de eficiencia de riego del orden del 50% obtenidos a escala de parcela (Lecina *et al.*, 2005) o pequeña cuenca hidrológica (Causapé *et al.*, 2004b) en riegos por inundación del área evaluada.

La explicación a este hecho radica en la intensa reutilización del agua que se realiza en Bardenas, elevando considerablemente el índice de aprovechamiento del agua del sistema frente a las moderadas-bajas eficiencias de riego que se obtienen en sus parcelas más habituales con suelos inadecuados para el riego por inundación (de baja CRAD y alta permeabilidad).

Así, el IAA para el total del sistema fue similar al registrado en modernos regadíos por aspersión de Monegros II, donde se cuantificó una eficiencia del 94% (Cavero *et al.*, 2003) a la que habría que descontar las PEA que en el valle del Ebro es normal que superen el 10% del agua aplicada.

Por tanto, en contra de lo que dicen algunos informes acerca de la innecesidad de recrecimiento del embalse de Yesa (Arrojo, 2004), un incremento de la eficiencia de riego en parcela no reducirá sensiblemente las necesidades de abastecimiento a Bardenas o incluso podría aumentarlas si la modernización del sistema conlleva la anulación del déficit hídrico, la implantación de dobles cosechas y/o el desarrollo de los cultivos más rentables y por tanto con mayores necesidades hídricas.

Conclusiones

El R y la P constituyeron el 80% de las entradas de agua al sistema mientras la ET y AT

constituyeron el 98% de las salidas. Desde la segunda anualidad, las entradas acumuladas de agua al sistema casi coincidieron con las salidas y al final de los años 2005, 2006 y 2007 los desbalances fueron prácticamente nulos mostrando la bondad del balance hídrico realizado.

Las entradas y salidas de agua al suelo se ajustaron al ciclo vegetativo de los cultivos de verano y por tanto con la evapotranspiración real y las necesidades hídricas máximas en verano y mínimas en invierno. Según los criterios impuestos en EMR, el 76% de la precipitación registrada en los cuatro años de estudio fue efectiva mientras que el riego generó el 29% del drenaje de agua.

La NHn media del sistema evaluado fue de 560 mm/año oscilando entre los menos de 400 mm/año en CCRR del norte del sistema y los más de 700 mm/año al sur del sistema en años de sequía. Un elevado porcentaje del agua disponible fue destinado para la evapotranspiración de los cultivos (EUCA= 94%), si bien, el manejo del riego no fue el adecuado (DH= 8%). Las menores ER de la CR_{VII} (71%) y CR_{VIII} (84%) estuvieron relacionadas con excesivas pérdidas en el drenaje del riego (FD_R de 28 y 16% respectivamente), mientras que la de CR_{XI} (86%) se debió a las elevadas PEA (15% del riego aplicado por aspersión).

El IAA del sistema fue alto (84%) alcanzando máximos en torno al 95% en épocas de sequía. Este valor fue muy superior, por efecto de la reutilización del agua, al 50% cuantificado en trabajos anteriores desarrollados a escala de parcela. Así pues, el margen de mejora es escaso pudiendo incrementarse el aprovechamiento de agua y reducir el estrés hídrico que sufren los cultivos mediante: i) un aumento de la eficiencia en parcela del riego por inundación, ii) una mayor regulación de escorrentías de lluvia y retornos de riego que incremente su reutili-

zación y iii) una adecuación del riego por aspersión a horas de menor temperatura y viento que minimicen las pérdidas por evaporación y arrastre.

Listado de abreviaturas

AB: Arba de Biel

AC: Agua saliente por las dos acequias que puentean la estación de aforos del AT.

AL: Arba de Luesia

AP: Abastecimiento pequeñas poblaciones

AT: Arba en Tauste

AU_{i-f}: Agua útil (inicial-final)

BAS: Balance de Agua en el Suelo.

CCRR: Comunidades de Regantes

CHE: Confederación Hidrográfica del Ebro

CV: Coeficiente de variación

CR_{nombre}: Comunidad de Regantes

CRAD: Capacidad de Retención de Agua Disponible para las plantas en el suelo

D: Drenaje asociado al regadío estudiado

D_{BAS}: Drenaje estimado por el Balance de Agua en el Suelo.

DH: Déficit Hídrico

DP: Depuradora de Ejea

D_R: Drenaje del riego

E: Entradas al balance de agua

EL: Agua destinada a generar electricidad sin uso para riego

EMR: Evaluador Medioambiental de Regadíos

ER: Eficiencia de Riego.

ET: Evapotranspiración

ET₀: Evapotranspiración de Referencia

ET_c: Evapotranspiración potencial

ET_R: Evapotranspiración real

EUCA: eficiencia en el Uso Consuntivo de Agua

FAO: Food and Agricultura Organization of the United Nations

FD_R: Fracción de Drenaje de riego

IAA: Índice de Aprovechamiento de Agua

ITGE: Instituto Tecnológico Geominero de España

Kc: Coeficiente de cultivo.

NHn: Necesidades Hídricas netas

P: Precipitación

P_{ef}: Precipitación efectiva

PAC: Política Agraria Comunitaria

PEA: Pérdidas por Evaporación y Arrastre del riego por aspersión

R: Riego

RI: Riguel

RS: Resto de secano (superficie no regable)

S: Salidas del balances de agua

SB: Flujo subterráneo saliente a través del aluvial del Arba en Tauste

SIAR: Servicio Integral de Asesoramiento al Regante

Agradecimientos

Agradecer a Confederación Hidrográfica del Ebro la financiación del estudio.

Referencias

Abrahão R, Clavería I, Causapé J, García I, 2008. La transformación en riego del sector XII de

- Bardenas II (Zaragoza). Impacto ambiental en su segundo año bajo riego. Actas del XXVI Congreso Nacional de Riegos de Huesca. 59-60.
- Aladin N, Plotnikov I, 2003. Antropogenic changes in the Aral Sea Ecosystem. Fifth International Conference on Environment Future, Zurich (Switzerland).
- Allen R, Pereira L, Raes D, Smith M, 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper nº 56. FAO. Roma (Italia). 300 pp.
- Arrojo P, 2004. Alternativa sostenible al recrecimiento de Yesa. Informe de la Fundación Nueva Cultura del Agua. 56 pp.
- Basso L, 1994. Los retornos salinos del polígono de riego Bardenas I y su contribución a la salinización de los ríos Arba y Riguel. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, Facultad de Filosofía y Letras. Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. 224 pp.
- Beltrán J, 1999. Irrigation with saline water: benefits and environmental impact. *Agricultural Water Management*. 40(2-3): 183-194.
- Bussière M, Mehl A, 2008. China's and India's roles in global trade and finance: twin titans for the new millennium? Occasional paper series. European Central Bank. 45 pp.
- Cai X, McKinney D, Rosegrant M, 2003. Sustainability analysis for irrigation water management in the Aral Sea region. *Agricultural Systems*. 76(3): 1043-1066.
- Causapé J, Auqué L, Gimeno M^a J, Mandado J, Quílez D, Aragüés R, 2004a. Irrigation effects on the salinity of the Arba and Riguel rivers (Spain): present diagnosis and expected evolution using geochemical models. *Environmental Geology*. 45 (5): 703-715.
- Causapé J, Quílez D, Aragüés R, 2004b. Assessment of irrigation and environmental quality at the hydrological basin level. I: Irrigation quality. *Agricultural Water Management*. 70: 195-209.
- Causapé J, Quílez D, Aragüés R, 2006. Irrigation efficiency and quality of irrigation return flows in the Ebro River Basin: An overview. *Environmental Monitoring and Assessment*. 117: 451-461.
- Causapé J, 2008. EMR 1.0: Herramienta al servicio de la vigilancia agroambiental del regadío. *Información Técnica Económica Agraria*. 104(3):369-380.
- Cavero J, Beltrán A, Aragüés R, 2003. Nitrate exported in the drainage water of two sprinkler irrigated watershed. *J. Environmental Quality* 32: 916-926.
- FAO, 2002. Agua y cultivos. Logrando el uso óptimo del agua en la agricultura. Depósito de documentos de la FAO. 22 pp.
- Henderson J, 2008. What is driving food prize inflation? Main street economist. Federal reserve bank of Kansas city. 5 pp.
- Instituto Tecnológico Geominero de España. 1985. Investigación de los recursos hidráulicos totales de la cuenca del Arba. Documento interno.
- Lecina S, Playán E, Isidoro D, Dechmi F, Causapé J, Faci J, 2005. Irrigation evaluation and simulation at the Irrigation District V in Bardenas (Spain). *Agricultural Water Management*. 73: 223-245.
- Lorente M, 2007. La inflación y los alimentos. El periódico. 20 de Noviembre de 2005. Página 5.
- Martinez-Cob A, 2004. Revisión de las necesidades hídricas netas de los cultivos de la cuenca del Ebro. 111 pp. Documento interno CHE.
- Playán E, Salvador R, Faci J, Zapata N, Martínez-Cob A, Sánchez I, 2005. Day and night wind drift and evaporation losses in sprinkler solid-sets and moving laterals. *Agricultural Water Management*. 76(3): 139-159.
- SIAR, 2008. Datos de la red agroclimática del Servicio Integral de Asesoramiento al Regante. Disponibles en <http://oficinaregante.aragon.es>
- Soil Survey Staff, 1992. Keys to soil taxonomy. Pocahontas Press, Inc. Balcksbourg (EE.UU.). 541 pp.
- (Aceptado para publicación el 9 de junio de 2009)