



LA EXPORTACIÓN DE SOLUTOS EN UN POLÍGONO DE REGADÍO DE BARDENAS (ZARAGOZA)

Solute outputs from an irrigation area in Bardenas (Zaragoza)

T. Lasanta⁽¹⁾, M. C. Pérez Rontomé⁽¹⁾, J. Machín⁽²⁾,
A. Navas⁽²⁾, W. Mosch⁽³⁾ y M. Maestro⁽¹⁾

(1) Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC). Apdo. 202, 50080 Zaragoza.

E-mail: fm@ipe.csic.es; FAX: 976 716 019

(2) Estación Experimental de Aula Dei (CSIC). Apdo. 202, 50080 Zaragoza

(3) Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CSIC). Apdo. 4195 Murcia

Resumen: Se estudia la exportación de materiales en una cuenca de regadío de ambiente semiárido en Bardenas (Zaragoza). Los resultados muestran un incremento de sólidos en el agua de salida de la cuenca respecto a la de entrada, correspondiendo mayoritariamente a sales disueltas y muy poco a material en suspensión. Durante el periodo de riego la concentración de sales es más baja que en los días sin riego, debido a una mayor dilución, si bien el transporte total es superior en la fase de riego en relación con un caudal de retorno mucho más elevado. Por otro lado, se observan diferencias en las fuentes de solutos en función de la diversidad de usos del suelo.

Palabras clave: pérdida de sedimentos, solutos, regadío, ambiente semiárido, Bardenas, Depresión del Ebro.

Abstract: In this work, we analyze the sediment output from an irrigation area located in a semi-arid environment in the Ebro Valley (Bardenas, Zaragoza). Our results show higher solute sediment and load in the waters exiting the irrigation area compared to the inputs waters. Changes in the suspended load are very small, and most of the increase corresponds to soluble salts. During the period of irrigation, solute concentration is lower than during the non-irrigation periods because of higher dilution. However, the total load output during the irrigation periods is greater because both the irrigation and the return flows are higher. Several solute sources have been identified related to different soil uses.

Key words: solute, sediments, irrigation, semi-arid environment, Bardenas, Ebro Depression.



Lasanta, T., Pérez Rontomé, M^a C., Machín, J., Navas, A., Mosch, W. y Maestro, M. (2001). La exportación de solutos en un polígono de regadío de Bardenas (Zaragoza). *Rev. C. & G.*, 15 (3-4), 51-66. © SEG. AEQUA. GEOFORMAEdiciones

1. Introducción

En ambientes áridos y semiáridos la implantación del regadío en extensiones más o menos amplias ha sido un objetivo permanente a lo largo de la Historia. Se le ha considerado un elemento esencial para el desarrollo socioeconómico y el equilibrio territorial, en función —respecto al secano— del menor riesgo de pérdida de cosechas, la mayor posibilidad de diversificar cultivos y adap-

tarse a la demanda del mercado, el incremento de la productividad y la ampliación del empleo directo e indirecto a partir de industrias de manipulación y transformación de productos agrícolas.

Sin embargo, la puesta en regadío de dichas áreas, con suelos salinos y/o sódicos, ha ido acompañada de efectos ambientales negativos (Machín *et al.*, 1995). El exceso de agua de riego asociado a las altas tasas de evaporación, típicas de este tipo de ambientes, hace que las sales del suelo ascien-

dan por un proceso de capilaridad y se depositan en superficie salinizando la capa superior del suelo, con consecuencias muy negativas para el desarrollo de los cultivos (Pérez Ybarra, 1994). Por otro lado, parte de las aguas empleadas en el regadío salen de nuevo como excedentes o aguas de retorno, con un elevado contenido en sales que contribuye al deterioro de la calidad de las aguas en la red fluvial (Porta y Boixadera, 1988).

Son varios los trabajos (Fairchild, 1983; Maianu, 1983; Yaron, 1981; Tanji, 1990) que han evidenciado que la salinización de los suelos ha sido la causa del abandono agrícola de amplias extensiones de tierras en algunos países: Irán, Siria, India, Sudáfrica, Australia, ... Incluso se ha señalado que la pérdida de calidad del agua y la salinización de sus campos fue el origen de la decadencia y posterior desaparición de algunas civilizaciones basadas en la cultura del regadío, como la Sumeria en Mesopotamia, la de los habitantes del valle Viru, actual Perú, o los indios Hohkam, actual Arizona (Aragüés y Cerdá, 1998).

La mayor parte del sector central de la Cuenca del Ebro se puede incluir dentro de las áreas semiáridas del mundo, al registrar precipitaciones medias inferiores a 400 mm año⁻¹, acompañadas de una elevada evapotranspiración durante la estación cálida (Martínez Cob *et al.*, 1998). Por otra parte, los terrenos yesíferos ocupan, según Riba y Macau (1962), alrededor de 1.200.000 ha en la Depresión del Ebro, cifra que se amplía hasta 1.800.000 ha (el 22 % de la superficie total de la cuenca) si incluimos las zonas donde el yeso forma parte del suelo (Navas, 1983). La combinación en la cuenca del Ebro de materiales yesíferos y salinos y clima semiárido hace que la salinidad de suelos y aguas sea un problema ambiental importante (Navas y Machín, 1995). Alberto *et al.*, (1986) cartografiaron más de 300.000 ha de suelos afectados por sales en dicha cuenca. El efecto de la erosión de suelos salinos en el incremento de la salinidad de la escorrentía ha sido ampliamente demostrado (Navas, 1989, 1990a). Por otro lado, Alberto *et al.*, (1986) calcularon que el río Ebro aporta cada año 6,7 millones de toneladas de sal al Mediterráneo. De las sales totales exportadas, un 43 % (3 millones de toneladas) procede de la disolución de yesos (Navas, 1991) y se calcula que la contribución de los regadíos (Machín y Navas, 2000) está en torno

al 8 %. Bellot y Golley (1989) obtuvieron valores de 10,7 t ha⁻¹ año⁻¹ de exportación de sales hacia el Gállego en un polígono de riego de La Violada (Zaragoza), cantidad muy superior a las tasas de erosión de 5 t ha⁻¹ año⁻¹ registradas en parcelas experimentales con lluvia simulada por Navas (1990b, 1993) y por Desir (2001) que obtiene entre 0,7 y 3,3 t ha⁻¹ año⁻¹ en secanos incultivados.

En el centro de la Depresión del Ebro, pues, la presencia de suelos de carácter salino es muy abundante, como consecuencia tanto de las litologías dominantes como de las condiciones climáticas semiáridas, que han limitado el drenaje de las sales y favorecido su presencia en los horizontes superiores del suelo. Una proporción considerable de estos suelos se ha puesto en regadío en la segunda mitad del siglo XX, con el fin de incrementar la productividad agrícola, aumentar la diversidad de cultivos y mejorar el nivel de renta de los agricultores. Sin embargo, el incremento de agua en los suelos aumenta la exportación de sales, empeorando la calidad del agua de retorno, con consecuencias sobre la fauna, la flora, otros suelos que la reutilizan e incluso sobre las poblaciones humanas.

El objetivo de este trabajo es estudiar, en primer lugar, la exportación de materiales, fundamentalmente en solución, en una cuenca de regadío, señalando cómo influye la gestión del riego en la variabilidad temporal de su concentración. En segundo lugar, se aporta información sobre las fuentes de solutos a partir de varios puntos de muestreo localizados estratégicamente en los colectores de riego que recorren la cuenca.

2. Área de estudio

El polígono estudiado tiene una superficie de 643 ha; se localiza próximo al núcleo de Ejea de los Caballeros (Zaragoza), con una orientación W-E, alcanza su altitud máxima en 385 m y la mínima en 280 m (Fig.1). En dicho polígono existen distintas unidades geomorfológicas (Lasanta *et al.*, 1999). Bordeándolo por el Norte y el Oeste aparece el sector de topografía más elevada, con la caliza de los páramos formando una plataforma horizontal, y laderas margo-arcillosas, sobre las que se ha desarrollado un relieve acarcavado. En el interior de la cuenca hay tres niveles de glaciares. El glaciar I es

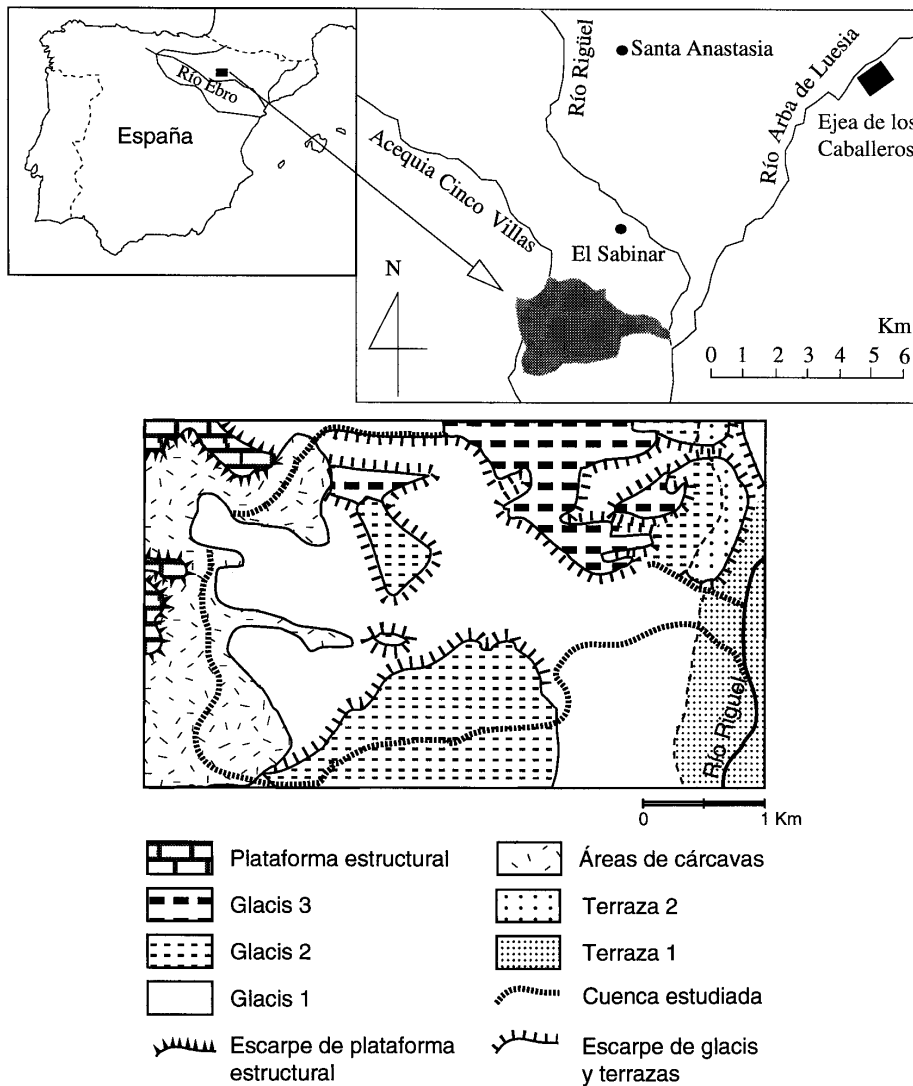


Figura 1. Esquema geomorfológico del área de estudio
 Figure 1. Geomorphic scheme of the study area

mucho más extenso y recorre la mayor parte de la cuenca, mientras que los glacis II y III ocupan pequeñas áreas muy localizadas en el sector central de la cuenca. En la desembocadura del colector principal en el río Rigüel aparece un nivel de terraza. Los suelos poseen texturas finas (predominio de las fracciones de limo y arcilla), altos valores de pH, y elevada salinidad, como posteriormente veremos.

El polígono piloto (colector 27) ha sido seleccionado porque se dispone de una amplia documentación de base (edafológica, litogeomorfológi-

ca, de localización de puntos de muestreo, etc.) procedente de la investigación realizada en la última década en el Departamento de Edafología de la Estación Experimental de Aula Dei. Este polígono forma parte del sistema de riego Bardenas I, en el que se han cuantificado tanto las sales exportadas por el sistema como los nutrientes, especialmente los nitratos como fuente de contaminación de las aguas superficiales (Machín *et al.*, 1996).

El clima es mediterráneo-continentizado. En la estación próxima de Santa Anastasia se registran

423,5 mm año⁻¹, con una temperatura media de 14°C. Martínez Cob *et al.* (1998) incluyen el polígono estudiado entre las isoyetas de 420 y 480 mm, mientras que la evapotranspiración potencial media alcanza valores entre 1070 y 1140 mm, de donde se deduce un destacado déficit de humedad.

El espacio sin cultivar ocupa 213 ha, que se concentran en el sector acarcavado (Fig. 1). Este está cubierto por vegetación típica de ambientes semiáridos (*Rhamnus lycioides*, *Brachypodium ramosum*, *Helianthemum pilosum*, *Thymus vulgaris*, *Salsola vermiculata* y *Lavandula latifolia*, como especies más representativas) o aparece sin cubrimiento vegetal; ocasionalmente en áreas más pendientes hay pinos de repoblación. Las 433 ha restantes se riegan desde 1959. Los cultivos forrajeros constituyen el uso agrícola dominante con 196 ha, seguido por el arroz (97 ha) y los cereales de invierno (61 ha). El girasol, maíz y las hortalizas completan el paisaje agrícola. Conviene señalar la presencia de 15 ha de campos abandonados como consecuencia de la salinización del suelo. La distribución espacial de los cultivos muestra la

localización del arroz en la parte baja de la cuenca (sector más bajo del glacis I), mientras que los cultivos forrajeros dominan en los sectores más altos, coincidiendo con los glacis II y III y con la parte más elevada del glacis I. El resto de los cultivos se distribuye por el sector central de la cuenca, alternando espacial y temporalmente con los alfalfares.

3. Metodología

Tras la elaboración del mapa geomorfológico mediante fotografía aérea y trabajo de campo se tomaron muestras de suelo en las tres unidades geomorfológicas que ocupan mayor superficie (glacis I y II, y área de cárcavas); en la terraza I y glacis III no se extrajeron muestras por su escasa superficie en la cuenca.

El mapa de usos del suelo (Fig. 2) se elaboró mediante trabajo de campo. Después se implementó en un Sistema de Información Geográfica (IDRISI) para cuantificar la extensión de cada uso. El ciclo de los cultivos, especialmente el número

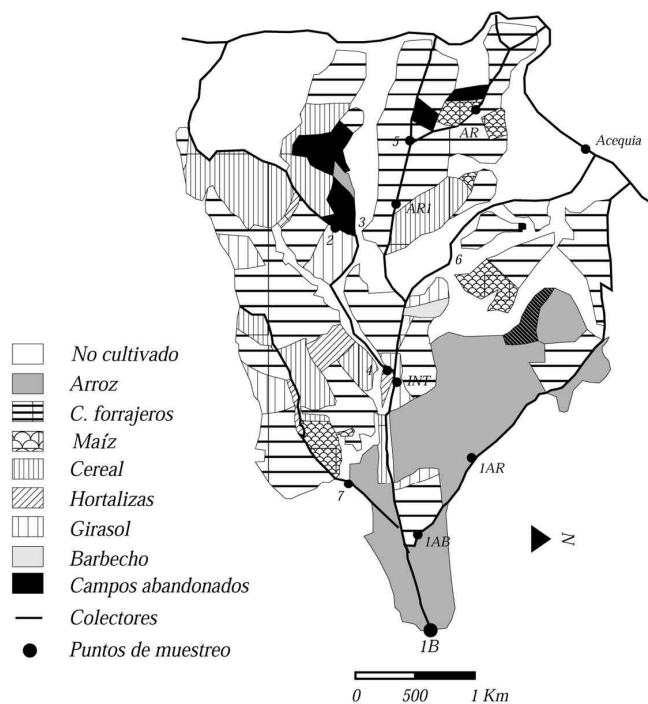


Figura 2. Usos del suelo y puntos de muestreo
 Figure 2. Soil uses and sampling points

de riegos y el tipo de fertilización, se conoció a partir de encuestas realizadas a los agricultores.

De la Estación Meteorológica próxima de Santa Anastasia (a 9 km del área de estudio) se tomó la precipitación. Los caudales de riego diario fueron facilitados por la oficina que la Confederación Hidrográfica del Ebro tiene en Sádaba (Zaragoza).

El periodo de muestreo duró 16 meses (de junio de 1999 a septiembre de 2000), incluyendo dos subperiodos de riego (mediados de abril a mediados de octubre) y uno con fases sin riego (mediados de octubre de 1999 a mediados de abril de 2000). El agua de riego se distribuye a partir de 7 acequias que surgen desde el Canal Cinco Villas. El periodo de riego continuo abarca desde mediados de abril hasta mediados de octubre. Durante dicho periodo el volumen de agua utilizada depende básicamente de las necesidades de los cultivos, por lo que se registran ligeros descensos en días de lluvia. En la figura 3 se observa la sucesión de periodos de riego y sin riego; entre el 15 de octubre y los ini-

cios de diciembre se utilizó muy poca agua de riego, coincidiendo con la baja necesidad de los cultivos y la existencia de lluvias moderadas pero relativamente continuas. Durante el mes de diciembre y principios de enero, por el contrario, se regaron algunos campos. El 9 de enero se inició un nuevo periodo seco hasta el 28 de enero. Considerando un año hidrológico (octubre de 1999 a septiembre de 2000) hubo riego 244 días y 121 días no se regó ningún campo; el periodo sin riego más amplio tuvo una duración de 20 días. Cada 13 días aproximadamente, hasta completar 37 días de muestreo, se tomaron muestras de agua en 14 puntos (Fig. 2). Uno de ellos se localiza en la acequia de entrada y otro en la confluencia del colector principal con el río Riguel, que recibe las aguas del polígono. En este punto también se midió el caudal, mediante el método denominado «velocidad-área» (Shaw, 1983), que consiste en medir la velocidad del agua en la vertical de un punto del que se conoce su profundidad y sección transversal del curso de agua. Los 12 puntos restantes se distribu-

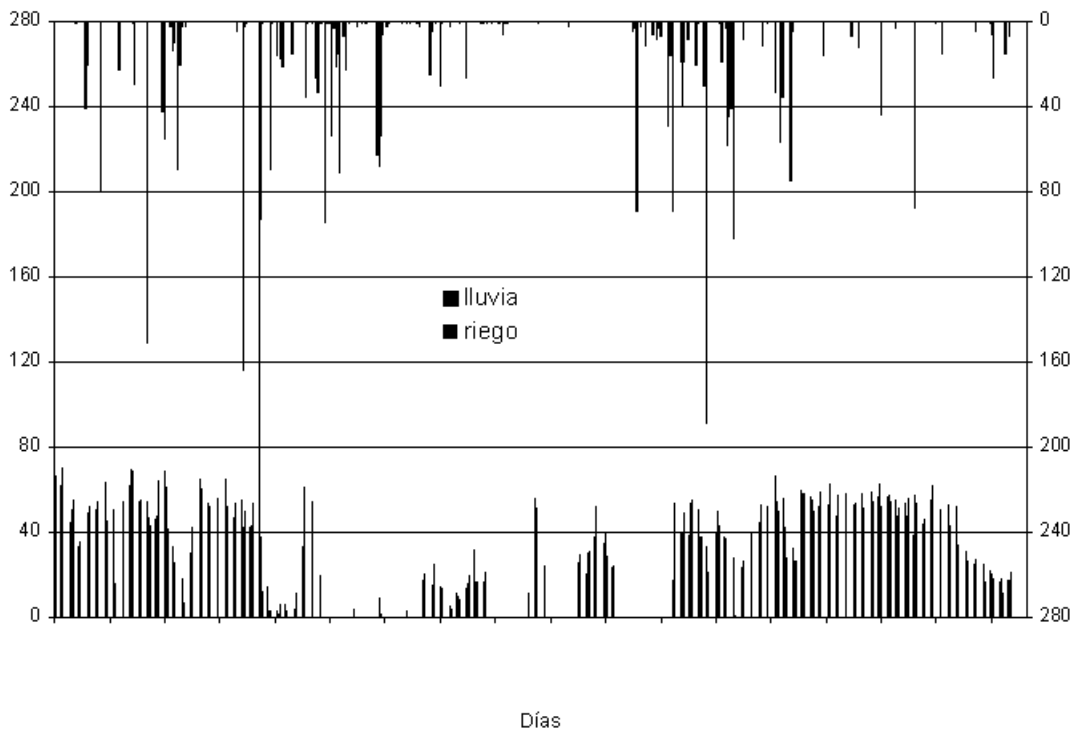


Figura 3. Entrada de agua en la cuenca por lluvia y riego
Figure 3. Water inputs from rainfall and irrigation in the catchement

yen de forma estratégica por los colectores con el fin de evaluar la aportación de materiales en función de los usos del suelo y de las características edáficas.

En el laboratorio del Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC, Zaragoza) se realizaron los análisis químicos de los principales iones de las muestras de agua, mediante fotometría de llama y complexometría los cationes y por espectroscopía UV-visible y valoraciones colorimétricas los aniones. Las muestras de suelos se analizaron en el departamento de Edafología de la Estación Experimental de Aula Dei (CSIC, Zaragoza). Se analizaron 22 muestras de suelo de los 30 cm superiores del perfil edáfico (Tabla 1); para su distribución espacial se tuvo en cuenta el uso del suelo y la unidad geomorfológica. En el área de cárcavas se tomaron 8 muestras, que en todos los casos coinciden con zonas sin cultivar.

4. Resultados

4.1 Características de los suelos

Todos los suelos incluidos en el área de cárcavas son salino-sódicos, con una conductividad eléctrica muy elevada, superando incluso en la mitad de las muestras el valor de 8 dSm^{-1} , considerado como el valor umbral a partir del cual se califican como suelos sódicos. La SAR da valores también muy altos, superando ampliamente el valor 15. Los elevados valores de pH en la mayoría de las muestras indican su alcalinidad. El alto contenido en sodio y la escasez de calcio (valores por debajo de 40 mg L^{-1}) en algunos suelos señalan que se trata de suelos fácilmente dispersables, capaces de aportar abundantes materiales a los colectores. El contenido moderado de sulfato pone de relieve que no son suelos saturados en yeso, si bien Basso

Tabla 1. Análisis de los suelos en el polígono estudiado
Table 1. Soil characteristics in the studied area

Uso del suelo	Unidad Geomorf.	CE	pH agua	CE Extr.sat.	CO_3^-	CO_3H	Cl	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Na^+	Mg^{2+}	Li^+	K^+	SAR
Erial	A.C.	9.56		102.11			0.325	1372.82	84.0	6.77	1400.0	16.70	-	0.24
		3.56		30.68			0.284	384.39	20.0	1.20	390.0	1.05	-	0.08
		9.50	8.22	90.53	0.269	0.572	980.00	15.0	179.64	961.3	312.50	1.78	1.83	61.2
		8.98	8.43	74.87	0.00	0.480	948.00	21.0	50.40	891.7	152.14	1.77	0.63	89.1
		2.55	9.15	27.97	0.374	0.492	252.99	17.0	1.05	276.2	16.82	1.74	0.13	92.4
		5.23	8.36	35.80	0.168	0.747	335.45	19.5	39.93	311.0	73.19	0.92	1.78	41.5
		8.05	8.57	39.84	0.272	0.301	374.20	23.5	20.30	398.0	54.28	1.78	0.38	64.4
		6.73	8.44	49.18	0.152	0.304	535.52	13.0	27.44	522.0	44.00	1.46	1.76	87.4
Arroz	GI	0.250												
Barbecho		0.223												
Alfalfa		0.205												
Arroz		0.677	8.17											
Arroz		0.343	8.56											
Arroz		0.711	8.93											
Girasol		0.331	8.38											
Alfalfa		0.814	8.43											
C. abandonado		3.53	8.78	30.23	0.360	0.788	273.50	17.0	5.89	271.7	53.04	1.74	0.57	49.9
Alfalfa	GII	0.710												
Alfalfa		0.282	8.35											
Girasol		0.268	8.33											
Maíz		0.257	8.35											
Alfalfa		0.366	8.14											

A.C.: Área de cárcavas, G.I.: Glacis I, G.II: Glacis II

(1994) señala, a partir de 30 catas en el área de estudio, la presencia creciente de los sulfatos en los niveles inferiores del suelo.

Los suelos cultivados presentan valores de CE mucho más bajos, siempre inferiores a $0,9 \text{ dSm}^{-1}$, si excluimos un campo abandonado ($3,53 \text{ dSm}^{-1}$) que se asemeja en la SAR y en la composición química a los suelos incultivados. El pH supera en todos los casos el valor 8, siendo en algunas muestras propio de un suelo fuertemente alcalino. Ni en CE ni en pH se establecen diferencias destacables en función del uso agrícola ni de la unidad geomorfológica. El relieve, por el contrario, parece influir más en la composición granulométrica, con dominio de limos y arcillas en el glacis I, y mayor presencia de arenas y pequeñas piedras en el glacis II y el área de cárcavas, donde dominan suelos franco-arenosos o franco-limosos (ver la información aportada por Basso, 1994, sobre el mismo polígono de riego).

4.2 Exportación de materiales en suspensión y solutos

Durante los 16 meses de muestreo se registraron 516,4 mm, con máximos en primavera y otoño. Las lluvias registradas estuvieron muy próximas a

la media anual estimada para el área de estudio (423,5 mm). Todas las precipitaciones caídas entran dentro de valores normales. El mes más lluvioso (septiembre de 1999) registró 103,8 mm y el más seco (febrero de 2000) sólo 0,6 mm. En la figura 3 se observa que las precipitaciones más cuantiosas tuvieron lugar en septiembre y octubre de 1999, con un máximo secundario en abril-mayo de 2000. El periodo más seco coincidió con la estación fría (desde noviembre de 1999 a febrero de 2000 se registraron sólo 69 mm), siendo también el verano de 2000 bastante seco: de junio a septiembre se recogieron 71,2 mm. La mayor parte de las lluvias diarias fueron inferiores a 15 mm, superando dicho valor tan solo 9 registros. La cifra más elevada (40,2 mm el 13 de septiembre de 1999) corresponde a un periodo de retorno de 1-2 años.

Los caudales de retorno experimentan oscilaciones relativamente acusadas entre sus valores extremos ($0,29$ y $0,054 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Como es lógico, se observa una relación entre entradas y salidas (Fig. 4), registrándose los flujos de escorrentía más elevados en los meses con mayor entrada de agua, mientras que en la estación fría, donde se unen precipitaciones escasas y pocos días de riego, los caudales de salida son mucho más moderados. Es

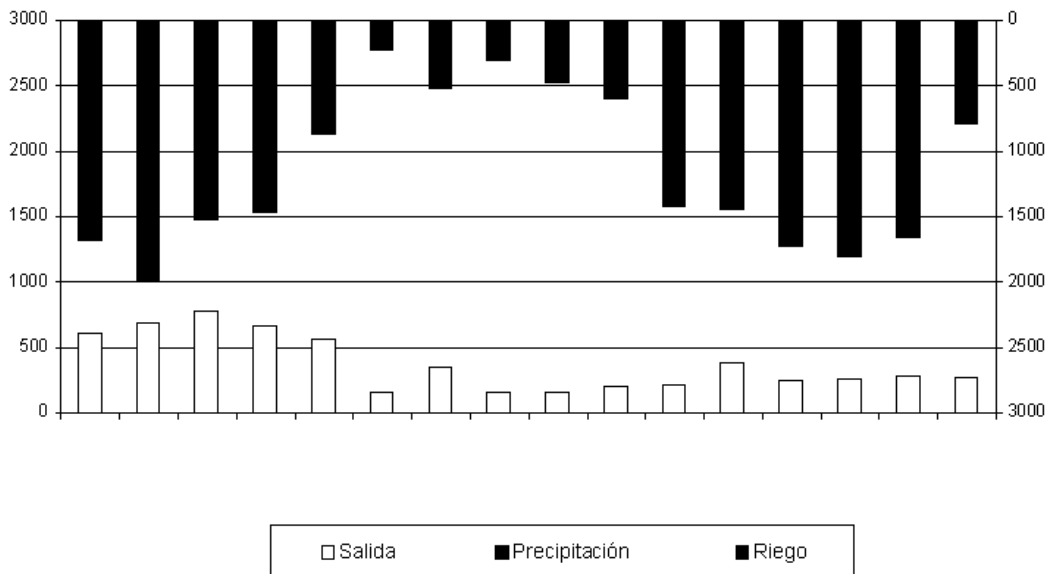


Figura 4. Balance hidrológico durante el periodo de estudio
 Figure 4. Hydrological balance along the studied period

importante destacar que a lo largo de todo el periodo estudiado se produce escorrentía, de forma que el colector general siempre lleva agua, incluso durante los periodos sin lluvia y sin riego. Ello se explica por la circulación subsuperficial del agua en los campos de cultivo (los de arroz, fundamentalmente), como consecuencia de la saturación que experimentan durante las fechas de riego. En el periodo de estudio, aproximadamente la tercera parte del agua que entró en la cuenca salió como escorrentía; de los 18,61 Hm³ de agua que entraron (3,35 por lluvia y 15,25 por riego) salieron 6,28 Hm³. Si consideramos un año hidrológico el coeficiente de escorrentía es del 26,5 % (entraron 13,40 Hm³ y salieron 3,55 Hm³). En cualquier caso, el sistema de medida del agua de salida impide realizar un balance hídrico, ya que no se controlan una parte importante de los flujos subsuperficiales y la totalidad de los subterráneos.

La tabla 2 incluye información sobre los valores medios de concentración de material en solución y suspensión del agua de lluvia, de la acequia y del punto de salida del colector principal (punto AB), diferenciando la época de riego del periodo total de estudio. El material en suspensión experimentó un crecimiento muy moderado (se multiplicó por 2,3 respecto al agua de la acequia), lo que llama la atención si tenemos en cuenta que una proporción elevada de los suelos son altamente dispersables. Por el contrario, el material en solución registró un incremento espectacular: en época de riego se multiplicó por 18,7 respecto al agua de lluvia y por 7,4 en relación al agua que entró de la acequia. El incremento aún es mayor si consideramos el periodo sin riego, lo que indica una mayor concentración durante los días sin riego que con

riego. En la figura 5 se observa que el valor promedio de conductividad en la época sin riego, expresado por la mediana y el rango intercuartílico, duplica al de la época con riego, demostrando la mayor concentración de solutos en los momentos sin riego, coincidiendo con los menores caudales.

La concentración de solutos experimenta un incremento importante en las aguas de escorrentía respecto a las de riego, siendo espectaculares los aumentos en cloruros, sodio, sulfato, calcio y magnesio. Son mucho más moderados los incrementos en potasio, nitratos, fosfatos y bicarbonatos (Tabla 2).

Una estimación (teniendo en cuenta la salida de agua controlada y la concentración) de la pérdida total de material sugiere la alta cantidad de materiales solubles exportada por las aguas de escorrentía (Fig. 6). En total se pierden alrededor de 15,2 t ha⁻¹ año⁻¹, de las que 15 t ha⁻¹ año⁻¹ corresponden a solutos y sólo 0,2 t ha⁻¹ año⁻¹ a sedimento en suspensión. Los iones que más se exportan son los cloruros (4,7 t ha⁻¹ año⁻¹), sulfatos (4,3 t ha⁻¹ año⁻¹), sodio (2,6 t ha⁻¹ año⁻¹), bicarbonatos (1,9 t ha⁻¹ año⁻¹) y calcio (1 t ha⁻¹ año⁻¹), mientras que el magnesio, potasio, fosfatos y nitratos se exportan en cantidades mucho más bajas. Durante los periodos de riego salen 8,8 t ha⁻¹ de materiales (el 57,9 % del total), mientras que el resto del año se exportan 6,4 t ha⁻¹. De la figura 6 se deduce también que Cl⁻, Na⁺ y SO₄²⁻ son los solutos que más contribuyen a incrementar las pérdidas, exportándose durante el corto periodo sin riego casi la misma cantidad que durante el riego. Así, de las 2,6 t ha⁻¹ año⁻¹ de Na⁺ exportado, 1,4 t ha⁻¹ tiene lugar durante los días de riego y 1,2 t ha⁻¹ los días sin riego. Respecto a los cloruros las proporciones son bastante similares: 2,6 t ha⁻¹

Tabla 2. Concentración media de sedimentos en suspensión y en solución.
Table 2. Average concentrations of suspended sediments and solutes

	Conduc	pH	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Suspensión	Solución (SDT)
	µS cm ⁻¹								mg L ⁻¹				
Lluvia	39,80	7,82	0,73	1,25	10,82	1,46	28,21	0,94	5,50	0,50	1,92	15,37	120,56
Acequia	302,93	8,00	1,35	8,53	49,49	5,15	175,66	1,58	18,60	2,64	15,65	18,23	304,87
AB riego	3071,60	8,02	3,50	437,30	167,28	70,39	372,43	14,33	729,40	15,22	626,37	41,78	2261,77
AB total	3542,65	8,03	3,73	511,60	179,61	86,83	387,12	16,45	860,05	15,26	807,46	41,47	2651,09

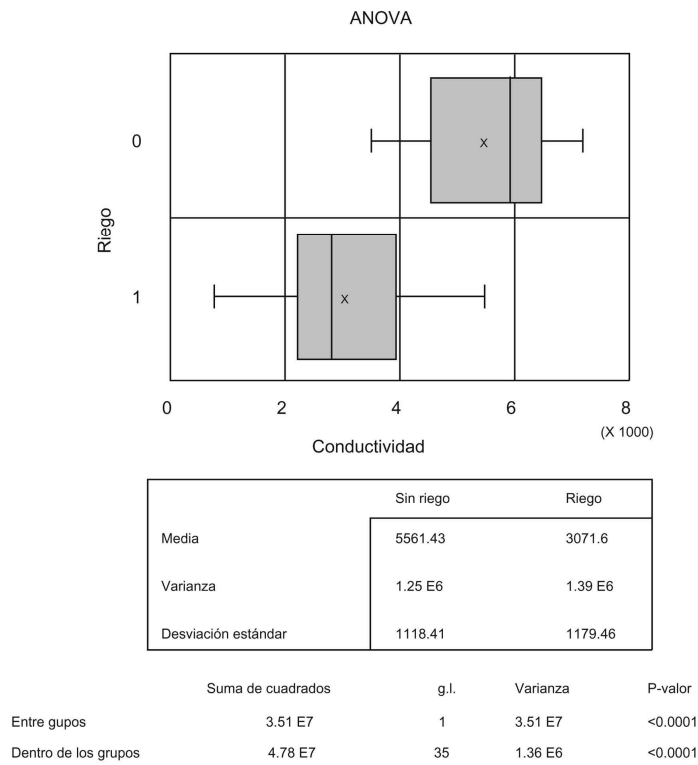


Figura 5. Aplicación de una ANOVA a la conductividad en días de riego y no riego
 Figure 5. ANOVA for water electrical conductivity in function of the irrigation and non irrigation periods

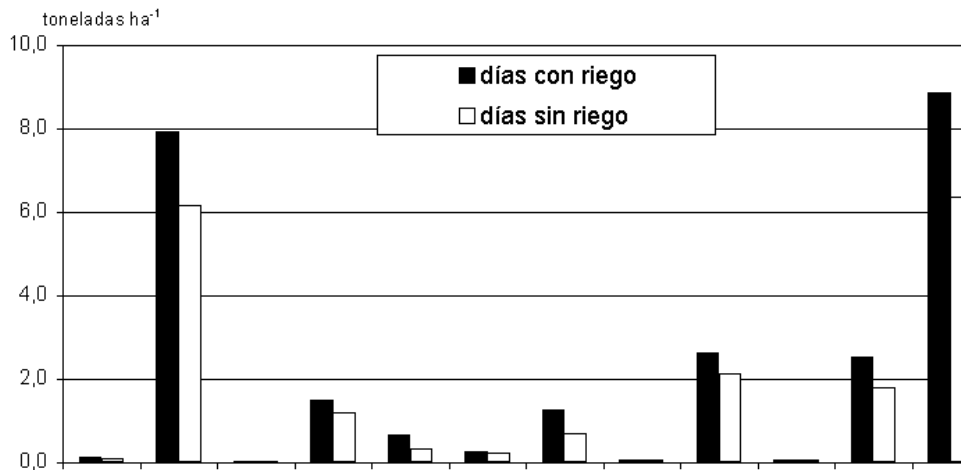


Figura 6. Pérdida de sedimentos en suspensión y de solutos en días de riego y no riego
 Figure 6. Suspended sediment loss in non irrigation and irrigation periods

durante el riego y $2,1 \text{ t ha}^{-1}$ los días sin riego. Los sulfatos y bicarbonatos, por el contrario, presentan una proporción ligeramente mayor durante el periodo de riego: los primeros pierden $2,5 \text{ t ha}^{-1}$ durante el periodo de riego y $1,8 \text{ t ha}^{-1}$ los días sin riego, mientras que los segundos $1,2 \text{ t ha}^{-1}$ y $0,7 \text{ t ha}^{-1}$, respectivamente.

4.3 Distribución espacial de las fuentes de materiales

Con el fin de identificar las posibles fuentes de materiales se realizó un análisis Cluster y los diagramas poligonales de Stiff, a partir de la concentración de iones en los puntos de muestreo. En el análisis Cluster (Fig. 7) no se incluyeron la acequia

y el punto 2, debido a sus valores extremos (muy baja concentración en la acequia y muy alta en el punto 2. Por ello, en la figura 8 (Diagramas poligonales de Stiff) ambos utilizan diferentes escalas que el resto de los puntos de muestreo; en el punto 2 los valores se han dividido por 10 y para la acequia se han multiplicado por 10. Ambos análisis permiten la identificación de 3 grupos (Tabla 3).

El grupo I incluye los puntos AR, 5 y 3. Recibe aguas del área de cárcavas y del sector alto del glacis I. Los usos del suelo dominante son la vegetación natural, intercalada entre áreas de suelo desnudo, y la alfalfa. Inmediatamente por encima del punto 3 hay varios campos abandonados como consecuencia del elevado grado de salinidad del suelo. Este grupo

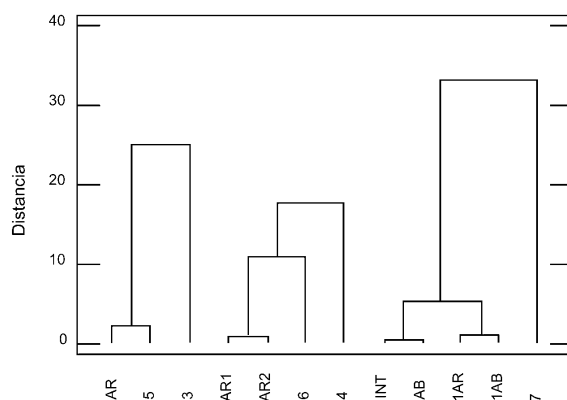


Figura 7. Análisis cluster a partir de la concentración de iones en los puntos de muestreo
 Figure 7. Cluster analysis of the ionic concentrations in the sampling points

Tabla 3. Puntos homogéneos a partir de un análisis Cluster y de los diagramas poligonales de Stiff
 Table 3. Homogeneous points from Cluster analysis and Stiff diagrams

	Grupo I	Grupo II	Grupo III
Unidad geomorfológica	Glacis I (sector alto) y área de cárcavas	Glacis II y III, y área de cárcavas	Glacis I (sector medio y bajo)
Uso del suelo dominante	Alfalfa, campos abandonados y vegetación natural	Alfalfa, vegetación natural y suelo desnudo	Arroz
Concentración de iones	Alta	SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Ca^{2+} y K^+	Na^+ , Cl^- , HCO_3^- y NO_3^-
Media	Na^+ , Cl^- y PO_4^{3-}	SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Ca^{2+} y NO_3^-	Ca^+ , Mg^{2+} y PO_4^{3-}
Baja	NO_3^- , HCO_3^-	Na^+ , Cl^- , HCO_3^- y K^+	SO_4^{2-} y K^+



Figura 8. Representación mediante polígonos de Stiff de la concentración media de solutos
 Figure 8. Average solute concentration represented by Stiff diagrams

presenta una conductividad muy elevada (Tabla 4) con valores que suelen superar los $5000 \mu\text{S cm}^{-1}$, por la elevada concentración de solutos (valores medios por encima de los $4,5 \text{ gL}^{-1}$). Tiene una alta concentración de SO_4^{2-} , que es el ion que mejor define a este grupo. La participación de Ca^{2+} y Mg^{2+} , aunque menos importante en la contribución total que la del Na^+ y Cl^- , es destacable por presentar concentraciones más altas que los puntos de muestreo no incluidos en este grupo. La aportación de NO_3^- y HCO_3^- es muy baja, tanto en la contribución total como en relación a los dos grupos restantes.

El grupo II lo componen los puntos AR1, AR2, 4 y 6, que recogen las aguas del sector central de la cuenca, en concreto de un área de cárcavas y de los

niveles de glacis II y III. La vegetación dominante en el entorno del punto 6 es la natural, con amplias áreas de suelo desnudo, si bien en los glacis II y III el cultivo más extenso es la alfalfa, que también lo es en AR1 y AR2. Este grupo es el peor definido en cuanto a la composición química de sus aguas, sin que exista un ión claramente dominante. No obstante, en AR1 y AR2, los SO_4^{2-} presentan una composición relativamente parecida al grupo I, aunque dibujan polígonos más achatados, quizá como consecuencia de una concentración de iones más baja en relación con un caudal ligeramente superior en estos puntos que en los del grupo I, localizados aguas arriba. La menor presencia de Na^+ también contribuye a achatar los polígonos. El punto 4 tiene

valores muy bajos en la mayoría de los aniones; sólo HCO_3^- , NO_3^- y PO_4^{3-} tienen concentraciones del mismo orden de magnitud que la mayoría de los puntos muestreados. Presenta, además, la conductividad más baja y las menores concentraciones de solutos y de material en suspensión (Tabla 4). El punto 6 presenta una conductividad y concentración de solutos también muy baja. No obstante, en AR1 y AR2, los SO_4^{2-} presentan una composición relativamente parecida al grupo I, aunque dibujan polígonos más achatados, quizá como consecuencia de una concentración de iones más baja en relación con un caudal ligeramente superior en estos puntos que en los del grupo I, localizados aguas arriba. La menor presencia de Na^+ también contribuye a achatar los polígonos. El punto 4 tiene valores muy bajos en la mayoría de los aniones; sólo HCO_3^- , NO_3^- y PO_4^{3-} tienen concentraciones del mismo orden de magnitud que la mayoría de los puntos muestreados. Presenta, además, la conductividad más baja y las menores concentraciones de solutos y de material en suspensión (Tabla 4). El punto 6 presenta una conductividad y concentración de solutos también muy baja.

El grupo III está compuesto por los cinco puntos restantes (INT, AB, IAR, 1AB y 7), es decir, los localizados en la parte baja de la cuenca, coincidiendo con el sector inferior del glacis I y el culti-

vo casi exclusivo de arroz. Los valores de conductividad ocupan una posición intermedia entre los grupos I y II (los valores extremos de las medias son de $2757 \mu\text{S cm}^{-1}$ y $4463 \mu\text{S cm}^{-1}$) con una concentración de solutos también intermedia (entre 1987 mgL^{-1} y 3024 mgL^{-1}). Los iones dominantes son el Na^+ y Cl^- , con alta participación relativa también de HCO_3^- y NO_3^- . El Ca^{2+} y el SO_4^{2-} , por el contrario, tienen aportaciones más modestas que los puntos del grupo I y parecidas al grupo II. Dentro del grupo III, los puntos INT y AB tienen mayor proporción de SO_4^{2-} debido a su localización en el colector principal, por lo que se ven afectados por la alta concentración de este ion en los puntos de cabecera, mientras que en 1AR, 1AB y 7 dominan muy claramente el Na^+ y Cl^- .

Por último, se observa en la tabla 4 y en la figura 8 que el punto 2 transporta una cantidad de solutos muy superior al resto de los puntos de muestreo, multiplicándose la concentración de la mayor parte de los iones por 10; destacan las altísimas concentraciones de Na^+ y Cl^- , que suponen las dos terceras partes de las pérdidas de solutos.

La tabla 4 ayuda a conocer qué tipo de sales dan origen a los iones que se exportan. En la mayoría de las muestras hay una concentración muy elevada de Cl^- y Na^+ , lo que parece indicar que el cloruro sódico es una de las sales dominantes en su área de

Tabla 4. Concentración media de solutos en meq L^{-1}
Table 4. Average concentration of solutes (meq L^{-1})

	Conduc $\mu\text{S cm}^{-1}$	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	NO_3^-	Cl^-	PO_4^{3-}	SO_4^{2-}	Suspensión	Solución
		meq L^{-1}									mg L^{-1}	
Acequia	302,9	0,03	0,37	2,47	0,42	2,88	0,03	0,50	0,08	0,33	18,2	304,9
AR	5132,2	0,14	24,31	28,85	14,46	5,38	0,01	20,11	0,87	52,64	46,5	4829,3
5	4934,7	0,16	24,34	24,43	13,46	5,55	0,02	18,62	0,72	49,10	227,1	4538,6
3	30605,0	0,26	272,28	34,41	63,68	7,69	3,13	310,52	0,43	144,75	55,4	27265,5
2	5572,3	0,14	33,70	16,77	14,78	4,78	0,19	26,59	0,52	68,45	25,2	4716,4
AR1	2861,5	0,09	12,80	15,14	6,82	4,67	0,03	10,58	0,48	25,35	78,9	2402,4
6	1858,3	0,09	12,72	4,61	4,26	7,77	0,05	9,40	0,86	4,87	34,0	1389,0
AR2	2494,6	0,10	11,59	13,14	6,73	4,62	0,07	9,79	0,49	22,60	60,4	2139,4
4	1170,7	0,06	4,64	6,61	4,06	5,90	0,30	3,70	0,40	1,96	21,9	1102,4
INT	3738,1	0,10	22,71	10,11	7,24	5,89	0,26	22,16	0,48	24,28	53,0	2481,9
7	4463,4	0,09	29,29	5,32	9,01	11,60	0,15	30,52	0,36	12,78	111,0	3023,6
1AR	2903,7	0,09	19,96	4,97	4,48	9,28	0,19	20,18	0,54	2,76	38,1	2139,9
1AB	2757,3	0,08	19,62	4,73	4,10	8,43	0,16	21,45	0,47	2,48	28,7	1987,0
AB	3542,6	0,10	22,24	8,98	7,15	6,35	0,27	22,93	0,48	16,82	41,5	2651,1

abastecimiento. En el grupo III es la sal claramente dominante, si bien en los puntos situados en el colector principal (INTy AB) los yesos contribuyen de manera significativa. El sulfato de magnesio y el sulfato de calcio parecen las más representativas del grupo I, mientras que el cloruro sódico tendría menor presencia. En el grupo II la identificación de las posibles sales transportadas es más compleja, si bien en los puntos AR1 y AR2 (situados en el colector principal), parecen compartir protagonismo el sulfato de calcio y el cloruro sódico; esta última es la más abundante en el punto 6, mientras que en el punto 4 lo es el carbonato cálcico.

5. Discusión y conclusiones

En este trabajo se ha señalado la escasa eficiencia en la gestión del riego del polígono estudiado, ya que más de la cuarta parte de las entradas salen como flujo de escorrentía superficial. Entre octubre de 1999 y septiembre de 2000 salieron de la cuenca aproximadamente $3,55 \text{ hm}^3$, lo que equivale a $5.491 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, si se considera el total de la cuenca, o $8.193 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ si sólo se considera la superficie cultivada.

Uno de los problemas de la producción de elevados flujos de agua de retorno es la pérdida de calidad del agua que riega otros campos situados aguas abajo y posteriormente vuelve al río (Machín *et al.*, 1996). Se ha visto anteriormente que tanto el agua de lluvia como la de riego es de elevada calidad, lo que ya pusieron de relieve Alberto *et al.*, (1980) y Basso *et al.* (1992). El agua de la acequia tiene una conductividad media de $303 \mu\text{S cm}^{-1}$, mientras que en la salida de la cuenca el valor medio es de $3543 \mu\text{S cm}^{-1}$, como consecuencia del fuerte incremento de solutos que registra el agua en su recorrido por la cuenca: entre la acequia y el punto de salida se multiplican por 8,7. Todos los solutos experimentan incrementos muy importantes, si bien cloruros, sodio y sulfatos lo hacen en mayor proporción. La alta concentración de iones disueltos se explica por la elevada presencia de sales solubles en los suelos. Los sedimentos en suspensión registran un incremento mucho más moderado, duplicando sólo su concentración. El desequilibrio en la concentración de solutos y material en suspensión sugiere que existe un contacto duradero entre el agua de riego y

las sales, lo que permite incrementar la concentración de solutos (Brown *et al.*, 1974; Caster, 1976). Ello es normal en flujos de retorno que surgen por rebosamiento del agua encharcada en campos de arroz o por conductos subsuperficiales (pipes) en parcelas de alfalfa. Este último es el proceso que produce la mayor proporción de la escorrentía en cultivos de alfalfa (García-Ruiz *et al.*, 1986 y García-Ruiz y Lasanta, 1995).

El incremento de la conductividad durante el periodo sin riego es consecuencia de los menores caudales de escorrentía, de la mayor aportación parcial que tienen en esta fase las áreas sin cultivar y de los retornos sub-superficiales que han lavado las sales de los suelos. Por un lado, existe una relación inversa entre caudal y concentración salina, como se ha puesto reiteradamente de manifiesto en áreas irrigadas en ambientes semiáridos (Miller *et al.*, 1998; Wichelns y Nelson, 1987; Hasker, 1983). Por otro lado, hay que tener en cuenta la mayor salinidad de los suelos en el espacio no cultivado respecto al cultivado.

Los elevados flujos de agua de retorno y su alta concentración implican importantes pérdidas de materiales, evaluadas en $15,2 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, similares a las $13,6 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ obtenidas por Basso (1994) en la misma cuenca durante el año hidrológico 1991-92. Los valores entran dentro de un rango normal para este tipo de ambientes. Basso *et al.* (1990) registraron cantidades de $5,1$ y $2,3 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en polígonos de riego de los sistemas de Monegros y Cinca respectivamente. Bellot *et al.* (1989) obtuvieron pérdidas de $10,7 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en un polígono de 5256 ha en La Violada (Zaragoza), mientras que Faci *et al.* (1985) llegaron a cuantificar $21 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en el mismo polígono.

De las $15,2 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de materiales exportados en la cuenca estudiada, el 98,6 % corresponde a solutos y sólo el 1,4 % a sedimento en suspensión, como corresponde a litologías altamente solubles y a flujos de escorrentía que entran en contacto con el suelo durante mucho tiempo. Los iones que más se exportan son los cloruros, sulfatos, sodio, bicarbonatos y calcio, mientras que el potasio, fosfatos y nitratos salen de la cuenca en pequeñas cantidades. Machín y Navas (1997) cuantificaron una pérdida de nitratos en los colectores de riego de Bardenas I de aproximadamente $96 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Bellot y Golley (1989) llegaron a las mismas con-

clusiones, señalando que el balance de nutrientes era positivo para el N, P y K, al superar las entradas (agua de lluvia, de riego y fertilización del agricultor) a las salidas, mientras que era muy deficitario en el resto de los iones. Banasik *et al.* (1999) comprobaron, por su parte, que los nitratos y fosfatos se exportaron por las aguas de escorrentía en cantidades mínimas: el 14 % y el 5 %, respectivamente, de los aportes por fertilización.

Llama la atención que durante el periodo de riego se exporten $8,8 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (el 57,9 % del total) y el resto del año $6,4 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (el 42,1 %), cuando los días de riego suponen el 66,8% del año. Ello se explica porque en los días sin riego el caudal tiene una mayor concentración, sin disminuir exageradamente su volumen, como consecuencia de la escasa eficiencia en la gestión del riego, que satura los suelos y hace que el 26,5 % del agua que entra en la cuenca salga como flujo de retorno. La eficacia del riego se ha propuesto como el método más adecuado para reducir la exportación de materiales. En este sentido, Quílez *et al.* (1987) comprobaron que descensos del 20 y 40 % del agua utilizada para el riego disminuían la masa de sales exportada en un 28 % y 58 %, respectivamente.

Las diferencias espaciales en conductividad y en la concentración de solutos parecen explicarse por la mayor contribución parcial de los suelos incultivados (de tipo salino-sódico) en el grupo I que en el grupo II, donde el arroz domina como monocultivo. El arroz tiende a reducir la conductividad como consecuencia de sus elevados caudales de retorno y por el hecho de que se forma una lámina de agua en la que la parte superior, que es la que sale como escorrentía por rebosamiento del caballón, no está en contacto con el suelo. Por otra parte, diferentes autores han señalado la importancia de los drenajes subsuperficiales en el incremento de la pérdida de materiales y nutrientes (Tanji *et al.* 1975; Grismer, 1993; Cain, 1995; Tan *et al.* 1993; García-Ruiz *et al.*, 1997), por lo que el cultivo de alfalfa con abundante presencia de procesos de *piping*, contribuiría también a incrementar la concentración y la conductividad.

La distinta exportación de sales entre el sector alto y bajo de la cuenca parece explicarse por la diferente distribución de los usos del suelo y por la gestión del riego. Así, trabajos de Navas (1990b) y Desir (2001) señalan que el sulfato de calcio es la

sal dominante en la escorrentía, producida en áreas desnudas y de vegetación natural, mientras que Lasanta *et al.* (1999) sugieren que el incremento del ión sulfato en la parte alta de la cuenca se relacionaría con el dominio de los flujos subsuperficiales en los cultivos de alfalfa, ya que en las calicatas realizadas por Basso (1994) dicho ión se incrementa en los niveles inferiores del suelo. Por el contrario, los flujos de escorrentía superficial producidos en el arroz arrastrarían los iones componentes del cloruro sódico, por su elevada presencia en la capa superficial del suelo.

Agradecimientos

Este trabajo ha contado con el apoyo de los proyectos de investigación: «Water resources management in a changing environment: the impact of sediment on sustainability» (WARMICE, ENV 4-CT98-0789), financiado por la Comisión Europea (Dirección General XII); «La identificación de fuentes de sedimento y áreas generadoras de escorrentía en relación con los cambios de uso del suelo» CICYT (REN2000-1709-CO4-01/GLO). «La recuperación del espacio agrícola como estrategia de gestión integrada del territorio en áreas de montaña: El ejemplo de los Altos Valles del Aragón y del Gállego» DGA (P049/2000). «Los retornos salinos del sistema de riego Bardenas I y su contribución a la salinización de las aguas superficiales» CICYT (Nat 90-1077 — CO2-O2). «Impacto ambiental del regadío de Bardenas I. Fuentes de contaminación y transporte de nutrientes en los efluentes de riego» CICYT (HID. 96-1306).

Referencias bibliográficas

- Alberto, F.; Aragüés, R.; Machín, J. & Cuchi, J.A. (1980). Calidad del agua para el riego II. Aplicación a aguas de la Depresión del Ebro. *ITEA*, 38, 55-71.
- Alberto, F.; Aragüés, R. & Quílez, D. (1986). Balance de sales de la cuenca del Ebro. En: *Sistema Integrado del Ebro. Estudio interdisciplinar*, Zaragoza (España), 279-291.
- Alberto, F.; Machín, J. & Aragüés, R. (1986). La problemática general de la salinidad en la Cuenca del Ebro. En: *El sistema Integrado del Ebro. Estudio Interdisciplinar*. Zaragoza (España), 221-236.
- Aragüés, R. & Cerdá, A. (1998). Salinidad de aguas y suelos en la agricultura de regadío. En: *Agricultura sostenible* (R. M. Jiménez-Díaz & J. Lamo de Espinosa, eds.). Ediciones Multiprensa, 249-274.
- Banasik, K.; Mitchell, J.K.; Walker, S.E. & Rudzka, E. (1999). Comparison of nutrient outputs from two lowland watersheds with different agricultural practices. En: *Impact of Land-Use*

- Change on Nutrient Loads Diffuse Sources* (L. Heathwater, ed.). IAHS Publ. N° 257, 13-16.
- Basso, L. Machín, J. & Pellicer, F. (1990). Masa de sales exportada por la red de drenaje de Bardenas I, Monegros I y Cinca a las aguas superficiales de la cuenca del Ebro. *Anales de Aula Dei*, 20 (1-2), 163-181.
- Basso, L. Machín, J. & Pellicer, F. (1992). Análisis estadístico multivariante aplicado a la calidad del agua de drenaje. *Invest. Agr. Prod. Prot. Veg.*, 7(2), 227-244.
- Basso, L. (1994). *Los retornos salinos del polígono de riego de Bardenas I y su contribución a la salinización de los ríos Arba y Riguel*. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza, 2 tomos.
- Bellot, J. & Golley, F. (1989). Nutrient Input and Output of an irrigated agroecosystem in an arid mediterranean landscape. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 25, 175-186.
- Bellot, J.; Golley, F. & Aguinaco, M.T. (1989). Environmental consequences of salts exports from a irrigated landscape in the Ebro River Bassin, Spain. *Agriculture, Ecosystems and environment*, 27, 131-138.
- Brown, M.J.; Carter, D.L. & Bondurant, J.A. (1974). Sediment in irrigation and drainage water and sediment inputs and outputs for two large tracts in Southern Idaho. *J. Environ. Qual.*, 3(4), 347-351.
- Cain, D. (1985). Quality of the Arkansas River and irrigation return flows in the lower Arkansas River Valley, Colorado. *Water Resources Investigations Report*, 84, 42-73.
- Carter, D.L. (1976). Guidelines for sediment control in irrigation return flow. *J. Environ. Qual.*, 5(2), 119-124.
- Desir, G. (2001). *Erosión hídrica de terrenos yesíferos en el sector central de la Depresión del Ebro*. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza, 318 pp.
- Faci, J.; Aragüés, R.; Alberto, F.; Quílez, D.; Machín, J. & Arrué, J.L. (1985). Water and salt balance in an irrigated area of the Ebro Basin (Spain). *Irrigation Science*, 6, 29-37.
- Fairchild, W.D. (1983). Drainage and salinity control programs in Pakistan. In: *Salinity in water courses and reservoirs* (R.J. French, ed.). Butherworth Publishers, Boston, 43-52.
- García-Ruiz, J.M.; Lasanta, T.; Ortigosa, L.M. & Arnáez, J. (1986). Pipes in cultivated soils of La Rioja: origin and evolution. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supp.*, 93-100.
- García-Ruiz, J.M. & Lasanta, T. (1995). The effects of irrigation on soil piping: A case study in the Ebro Depression, Spain. *Physics and Chemistry of the Earth*, 20 (3-4), 315-320.
- García-Ruiz, J.M.; Lasanta, T. & Alberto, F. (1997). Soil erosion by piping in irrigated fields. *Geomorphology*, 20 (3-4), 269-278.
- Grismer, M.E. (1993). Subsurface drainage system design and drain water quality. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 119, 537-543.
- Harker, D.B. (1983). Characteristics, trends and surface water quality implications of the saline effluent. En: *Salinity in watercourses and reservoirs* (R.H. French, ed.). Butterworth Publishers, Boston.
- Lasanta, T.; Mosch, W.; Pérez Rontomé, M.C.; Maestro, M. & Machín, J. (1999). Variabilidad espacial de la pérdida de solutos en un polígono de regadío de Bardenas durante una campaña de riego. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 25, 25-44.
- Machín, J.; Basso, L. & Navas, A. (1995). Salinity of the return flows from a pilot basin in the Bardenas I irrigation project. ESSC Meeting. *The soil as a strategic resource: Degradation processes and conservation measures*. La Laguna. Tenerife.
- Machín, J. & Navas, A. (1996). *Niveles de nutrientes en el polígono de riego Bardenas I*. Informe técnico, Consejería de Ordenación Territorial, DGAZaragoza, 140 pp.
- Machín, J.; Navas, A. & Tardos, J.M. (1996). Niveles de nitrato en los retornos de riego de Bardenas I y su influencia sobre la calidad del río Arba. En: *Agua y Medio Ambiente II* (TIASA, ed.), 255-260.
- Machín, J. & Navas, A. (1997). Impact of irrigation on the nitrate contamination of the surface waters in Bardenas (NE Spain). In: *Freshwater contamination*. IAHS, 243, 109-116.
- Machín, J. & Navas, A. (2000). *Análisis y evaluación de los efectos de los regadíos sobre la salinidad de las aguas*. Informe técnico. Confederación Hidrográfica del Ebro, Anexos 3, 78 pp.
- Maianu, A. (1983). Salinity sources and problems of the Danube River Basin. In: *Salinity in water courses and reservoirs* (R.J. French, ed.). Butherworth Publishers, Boston, 105-114.
- Martínez Cob, A.; Faci, J.M. & Bercero, A. (1998). *Evapotranspiración y necesidades de riego de los principales cultivos en las comarcas de Aragón*. Institución Fernando el Católico, Zaragoza (España) 223 pp.
- Navas, A. (1983). *Las litofacies yesíferas en la Cuenca del Ebro. Síntesis cartográfica y consideraciones sobre su papel en la planificación territorial*. Tesis-Master. Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza, Zaragoza (España), 894 pp.
- Navas, A. (1989). Incidencia de la erosión de suelos yesíferos en la salinidad de la escorrentía. *Cuaternario y Geomorfología*, 3 (1-4), 17-25.
- Navas, A. (1990,a). The effect of simulated runoff on the erosion of gypsiferous soils. *Land Degradation and Rehabilitation*, 2, 117-126.
- Navas, A. (1990,b). The effect of selected physiographic factors on dissolved gypsum transport by simulated runoff on gypsiferous soils. *Catena*, 17, 409-416.
- Navas, A. (1991). The pattern of gypsum transport in the Ebro river network. *Catena*, 18, 45-49.
- Navas, A. (1993). Soil losses under simulated rainfall in semiarid shrublands of the Ebro valley. *Soil Use and Management*, 9 (4), 152-157.
- Navas, A. & Machín, J. (1995). Salinidad en las aguas superficiales de la cuenca del Ebro. En: *La calidad de las aguas continentales españolas. Estado actual e Investigación*. (M.

- Alvarez Cobelas & F. Cabrera Capitán, eds.). Geofoma Ediciones, 223-231. Logroño.
- Pérez Ybarra, C. (1994). Alteraciones ambientales en las transformaciones en regadío. *El Campo*, 131, 117-132.
- Porta, J. & Boixadera, J. (1988). Suelos y salinidad en el valle del Ebro. En: *The basis of Grop Production* (Ranagosa et al., eds.). AEAL, 177-201, Barcelona.
- Quilez, D.; Aragüés, R. & Faci, J. (1987). Calibración, verificación y aplicación de un modelo conceptual hidrosalino del sistema «flujos de retorno de riego». *Investigaciones Agrarias: Producción y protección vegetal*, 2 (2), 165-182.
- Riba, O. & Macau, F. (1962). Situación, características y extensión de los terrenos yesíferos en España. *I Coloquio sobre Obras Públicas en los terrenos yesíferos*. Servicio Geológico de Obras Públicas. Madrid.
- Shaw, E.M. (1983). *Hydrology in Practice*. Van Nostrand Reinhold (U.K.). Co. Ltd, 569 pp.
- Tan, C.S.; Drury, C.F.; Gaynor, J.D. & Welacky, T.W. (1993). Irrigated soil, crop and water management system to obate herbicide and nitrate contamination of the great lakes. *Water Science Technology*, 28, 497-507.
- Tanji, K.K.; Henderson, S.K.; Gupta, M. & Quek, A.F. (1975). Water and salt transfers in Sutter Basin, California. *Transactions of the ASAE*, 18 (1), 111-115.
- Tanji, K.K. (1990). A conceptual hidrosalinity model for predicting salt load in irrigation return flows. En: *Managing saline coater for irrigation* (H.E. Dregne, ed.). Lubbock, Texas.
- Wichelns, D. & Nelson, D. (1987). Empirical analysis of salt and selenium concentrations in subsurface drainage water. *USCID, National Meeting-1987*, 109-118.
- Yaron, D. (1981). The salinity problem in irrigation. An introductory review. In: *Salinity in irrigation and water resources* (D. Yaron, ed.). Marcel Dekker, New York, Inc., 1-20.

Enviado el 30 de mayo de 2001

Aceptado el 13 de septiembre de 2001