

Cuadernos I. Geográfica	25	pp. 25-44	Logroño	1999
-------------------------	----	-----------	---------	------

VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA PERDIDA DE SOLUTOS EN UN POLIGONO DE REGADIO DE BARDENAS DURANTE UNA CAMPAÑA DE RIEGO

T. LASANTA MARTÍNEZ¹
W. MOSCH^{1 Y 2}
M.C. PÉREZ RONTOMÉ¹
M. MAESTRO MARTÍNEZ¹
J. MACHÍN GAYARRE³

RESUMEN: Se estudia la concentración de solutos en un polígono de regadío de Bardenas durante el verano de 1999. Se señala que el balance de sedimentos es 8,4 veces mayor en el agua de salida de la cuenca que en el de entrada, correspondiendo mayoritariamente a sales disueltas. La distribución espacial de la concentración de solutos muestra dos áreas diferenciadas: En una dominan los iones SO_4^{2-} , Ca^{2+} y Mg^{2+} , mientras que en la otra las concentraciones más altas corresponden a Na^+ , HCO_3^- y Cl^- . Se discute sobre el papel de los cultivos y de la gestión del riego como fuentes de solutos.

ABSTRACT: Solute concentration from an irrigated area has been studied during the summer of 1999. Total sediment outputs are 8.4 times greater than inputs, largely corresponding to dissolved salts. The spatial distribution of solute concentration shows two different areas: In the first one SO_4^{2-} , Ca^{2+} and Mg^{2+} ions prevail, while in the second one the highest concentrations correspond to Na^+ , HCO_3^- and Cl^- . The role of crops and irrigation management is discussed as solute sources.

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

1 y 2. Instituto Pirenaico de Ecología, Zaragoza (CSIC). Apdo 202 - Zaragoza.

Department of Physical Geography. University of Amsterdam. Nieuwe Prinsengracht 130. 1018VZ Amsterdam (Holanda).

3. Estación Experimental de Aula Dei, Zaragoza (CSIC). Apdo 202 - Zaragoza.

Palabras clave: pérdida de sales, regadío, calidad del agua, erosión, ambiente semiárido, Bardenas (Zaragoza).

Key words: salt, irrigation, water quality, erosion, semiarid environment, Bardenas (Zaragoza).

1. Introducción

Desde 1940 se han puesto en regadío más de 1.000.000 de ha en España. Una proporción importante de esta superficie se localiza en áreas de ambiente semiárido con suelos sódicos y/o salinos, lo que ha dado lugar a fuertes críticas desde una perspectiva medioambiental. Por un lado, el incremento de agua en el suelo por riego y las elevadas tasas de evapotranspiración, que se producen en este tipo de ambientes, favorecen la salinización de la capa superficial de los suelos a través de un proceso de capilaridad, con consecuencias muy negativas para el desarrollo de los cultivos (Pérez Ybarra, 1994). Por otro lado, las aguas de escorrentía salen muy cargadas en iones, empeorando su calidad y causando efectos de salinización sobre otros campos de regadío que las reutilizan y sobre la fauna y vegetación de los ríos (Porta y Boixadera, 1988). Szabolc (1989) señala que más de 10 millones de hectáreas irrigadas se abandonan anualmente en el mundo como resultado de la salinización.

El centro de la Depresión del Ebro constituye una de las áreas donde más se ha incrementado la superficie de regadío. Frutos (1993) señala que en Aragón había 226.629 ha de regadío en 1950, mientras que en 1990 se alcanzaban las 407.469 ha, lo que significa un incremento del 79,8% en cuarenta años. La mayor parte de los nuevos regadíos se localizan en Monegros y Bardenas, áreas de suelos salino-sódicos y de ambiente semiárido. Alberto *et al.* (1986a) calcularon que en la cuenca del Ebro hay más de 310.000 ha de suelos afectados por sales.

Es lógico que exista una amplia bibliografía sobre el impacto de los regadíos en la salinidad de suelos y aguas de la cuenca del Ebro. La mayor parte de los estudios hacen referencia a los cambios que tienen lugar en el suelo (Herrero, 1982; Esquisabel, 1987), al balance de nutrientes a escala de grandes polígonos y cuencas (Faci *et al.*, 1985; Alberto *et al.*, 1986b; Bellot *et al.*, 1989a; Basso, 1994), o a las consecuencias en la calidad del agua que llega a los ríos (Herrero *et al.*, 1989; Bellot y Golley, 1989; Golley y Bellot, 1991). Sin embargo, la bibliografía apenas se ha ocupado de la variabilidad espacial de la concentración de solutos dentro de una cuenca, siendo éste un aspecto fundamental para conocer su procedencia y el papel que ejercen tanto los usos agrícolas como las características de los suelos. Este trabajo trata de aportar información sobre las variaciones espaciales en la concentración de solutos en un polígono de regadío de Bardenas durante una campaña de riego.

2. Area de estudio

El trabajo se ha llevado a cabo en la cuenca de recepción del colector 27, incluido en el polígono de riego de Bardenas I. Se localiza muy próximo al pueblo de colonización de El Sabinar (término de Ejea de los Caballeros) en la provincia de Zaragoza (Fig. 1). Su superficie es de 650 ha.

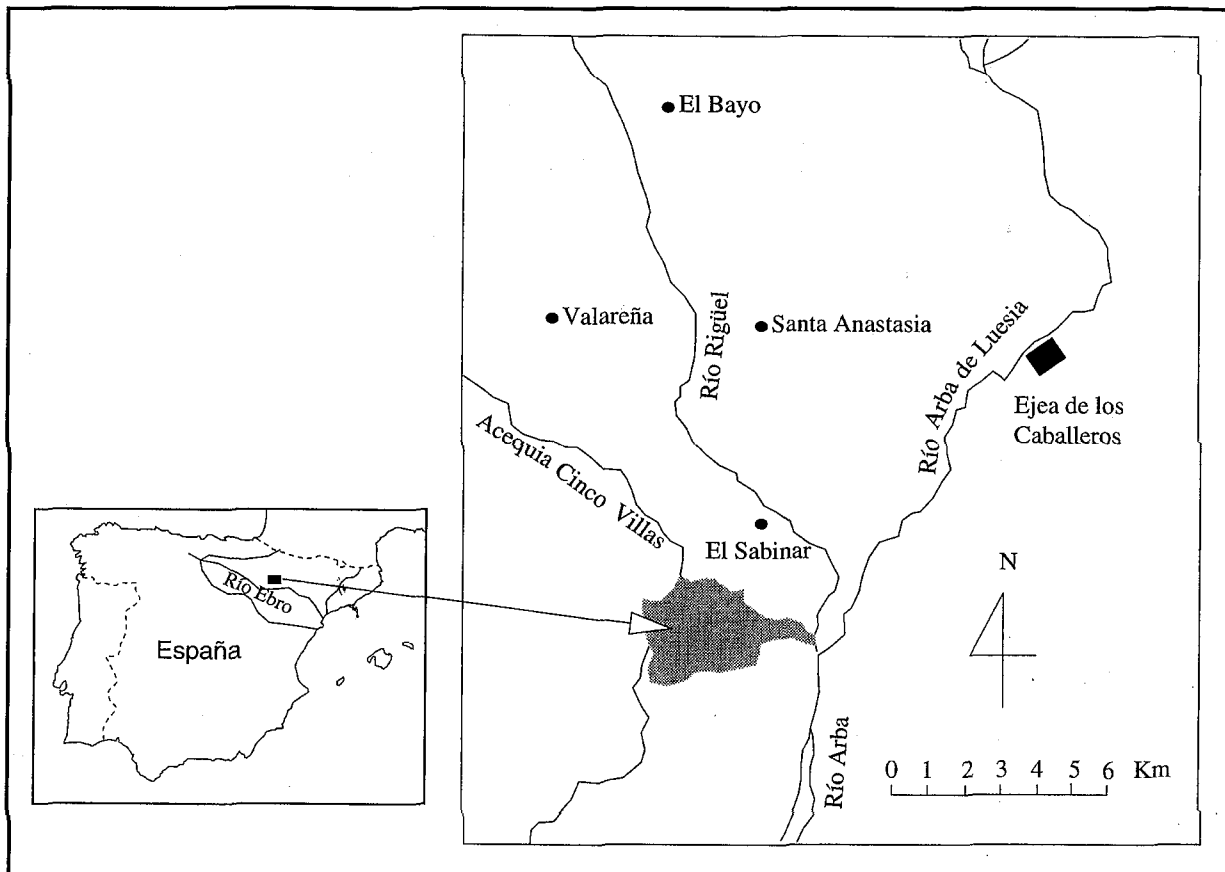


Fig. 1: Area de estudio

En la cuenca estudiada se diferencian cuatro unidades geomorfológicas (Fig. 2). Bordeando la cuenca por el Norte y el Oeste aparece el sector de topografía más elevada de materiales margo-arcillosos, sobre los que se ha desarrollado un relieve acarcavado. En el interior de la cuenca se han desarrollado dos niveles de glacis. El glacis I es mucho más extenso y recorre la mayor parte de la cuenca, mientras que el glacis II ocupa dos sectores muy localizados. Ya en la desembocadura del colector principal en el río Rigüel aparece un nivel de terraza. La totalidad de ésta y la mayor parte de los glacis se cultivan. Dentro de la cuenca también hay un retazo de glacis III y en el sector occidental se inician los primeros escarpes correspondientes a la plataforma estructural de la Loma Negra.

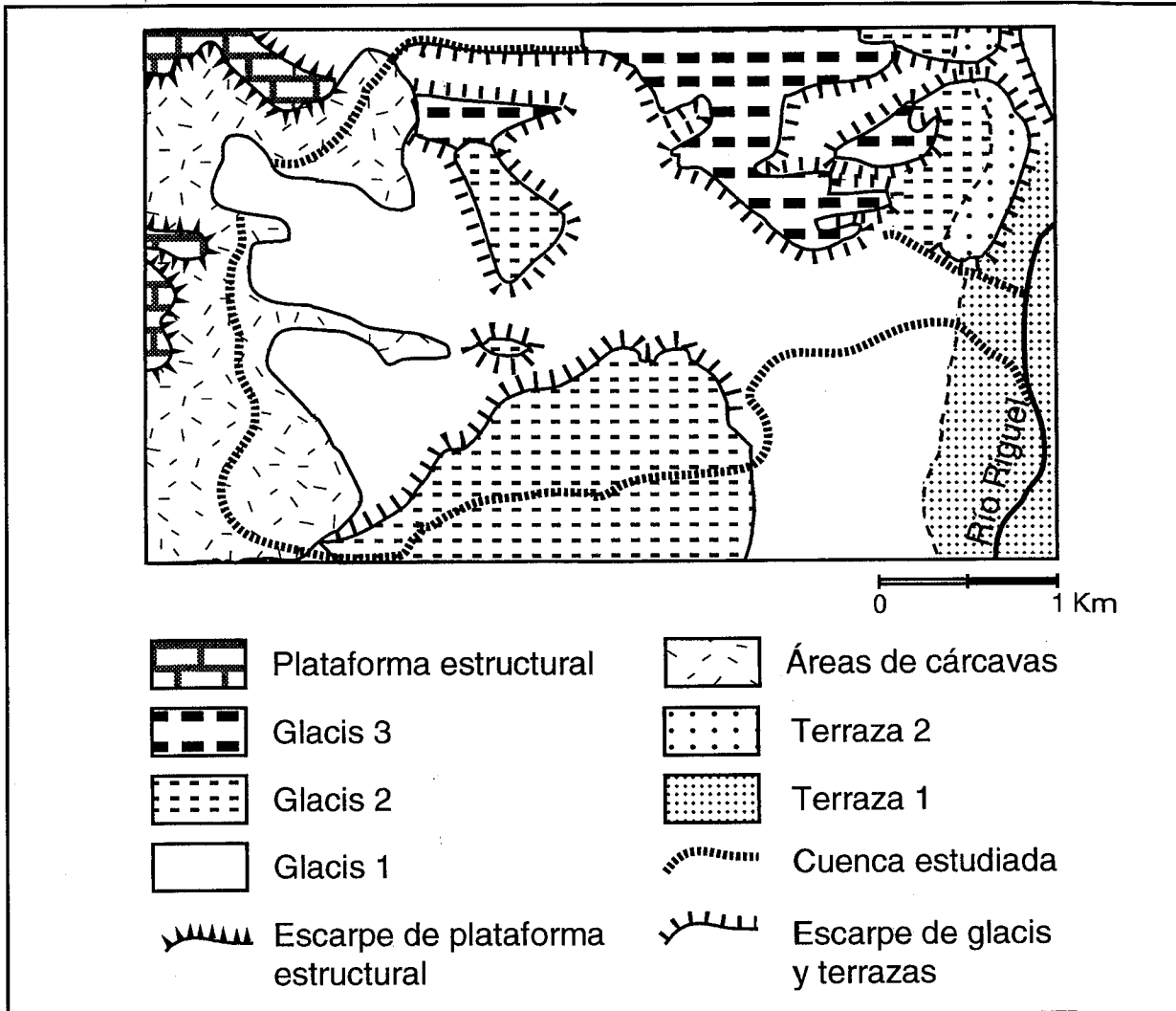


Fig. 2: Unidades geomorfológicas, según J.M. García-Ruiz

El clima es mediterráneo-continentalizado. En las estaciones próximas de El Bayo y Santa Anastasia se registran 449 y 423,5 mm/año, respectivamente. La temperatura media en ambos observatorios es de 14°C. Martínez Cob *et al.* (1998) incluyen el polígono estudiado entre las isoyetas de 420 y 480 mm, mientras que la evapotranspiración media alcanza valores entre 1070 y 1140 mm. La aridez es el elemento que mejor define el clima de esta zona, con un destacado déficit anual.

Desde 1959 se riegan 433 ha dentro del área estudiada, dedicadas a diferentes especies de cereal y al cultivo de forrajes, principalmente. El espacio agrícola se localiza en la terraza y en los glacis. Las 213 ha restantes, concentradas en el sector acarcavado, están cubiertas por vegetación típica de ambientes semiáridos (*Rhamnus lycioides*, *Brachypodium ramosum*, *Helianthemum pilosum*, *Tymus*

vulgaris, *Salsola vermiculata*, *Lavandula latifolia*) o aparecen sin cubrimiento vegetal; ocasionalmente en áreas pendientes se localizan pinos de repoblación.

La puesta en regadío dió lugar a la formación de un paisaje de campos aban- calados sobre glacis. Las parcelas presentan una topografía plana (desniveles infe- riores al 1%), y pequeños caballones en los márgenes para retener el agua. La nivelación de los campos es una práctica frecuente, que el agricultor realiza casi todos los años antes de sembrar el campo. Se trata de evitar la escorrentía y favo- recer la infiltración del agua ante la escasa permeabilidad de este tipo de suelos (Porta *et al.*, 1986).

El sistema de riego es por gravedad, distribuyéndose el agua por varias ace- quias que parten de la principal (la acequia Cinco Villas), que procede del embal- se de Yesa. El periodo de riego se inicia a finales de primavera y se extiende hasta mediados de octubre.

Un sistema de siete colectores recoge las aguas de escorrentía y las conduce a un colector principal que desagua en el río Riguel. Los colectores están exca- vados en materiales arcillo-limosos muy erosionables, siendo muy frecuentes des- prendimientos en los márgenes, muchos de ellos vinculados a fenómenos de *piping*. En los taludes y en el fondo de los colectores se desarrolla una abundan- te vegetación de carrizo (*Phragmites*) y de anea o espadaña (*Typha*), que frenan el avance del agua.

3. Metodología

En primer lugar se elaboró el mapa geomorfológico a partir de fotografía aérea y trabajo de campo. Teniendo en cuenta las unidades cartografiadas se tomaron muestras de suelo en las tres unidades que ocupan mayor superficie (Glacis I y II, y áreas de cárcavas); no se tomó ninguna muestra de la Terraza I, al no incluir esta unidad ningún punto de muestreo por su escasa participación superficial en la cuenca. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio del Departamento de Edafología de la Estación Experimental de Aula Dei (CSIC, Zaragoza).

Con el apoyo del Catastro de Rústica y con recorridos por el área de estudio se realizó el mapa de usos del suelo. La información se incorporó a un Sistema de Información Geográfica (IDRISI) para cuantificar la superficie ocupada por cada cultivo. El ciclo de los cultivos, especialmente el tipo de fertilización y el número de riegos, se conoció por las encuestas realizadas a los agricultores.

En el campo se seleccionaron 14 puntos de muestreo. Uno de ellos se locali- za en la acequia principal, mientras que los 13 restantes se distribuyen por los 7 colectores (Fig. 3). Los puntos de muestreo coinciden con el tramo final de cada colector o se sitúan un poco más abajo de la intersección de dos colectores. Su distribución espacial permite tener información sobre la variabilidad espacial de la concentración de solutos en función de las diferencias edáficas y de los usos

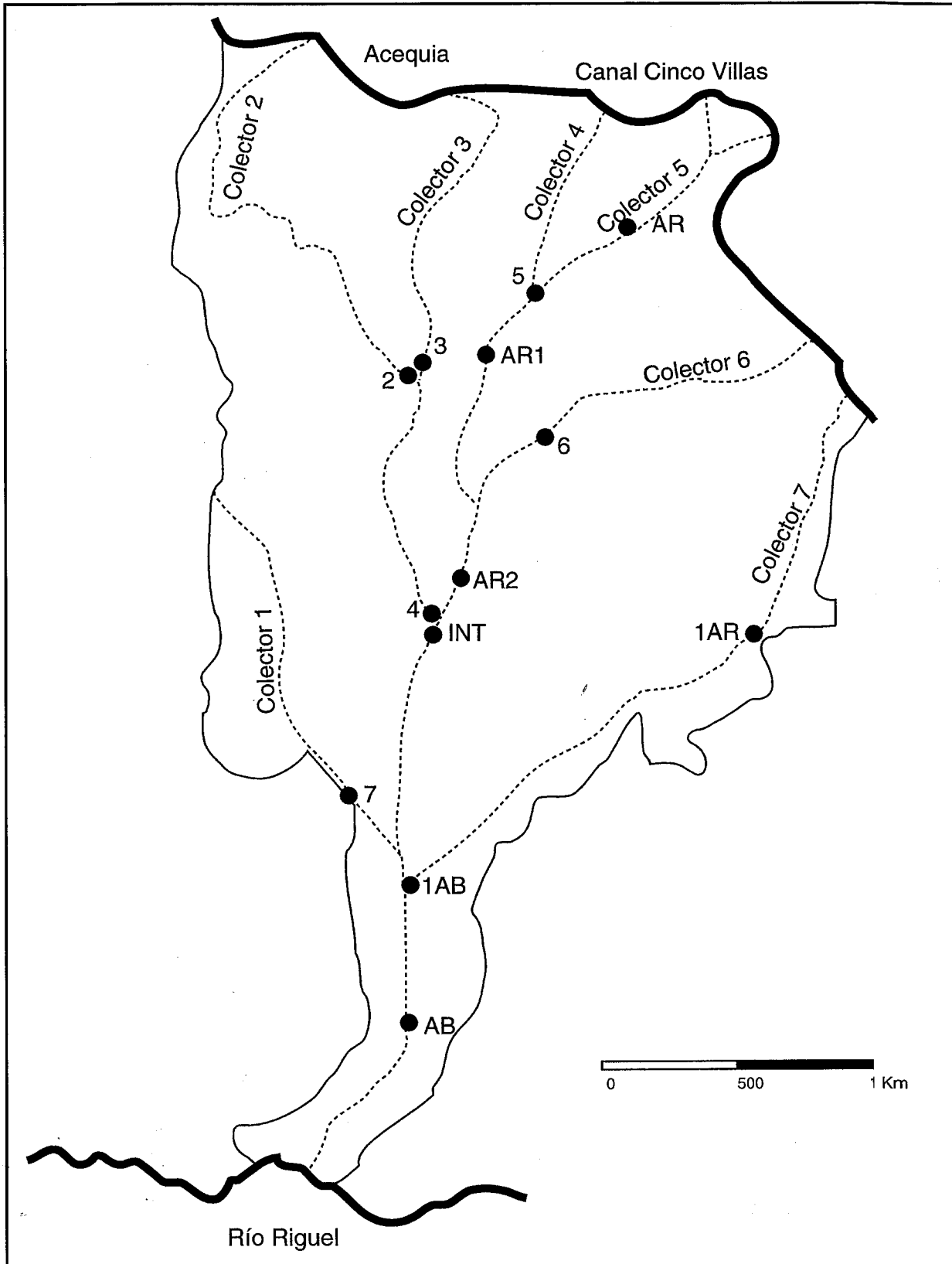


Fig. 3: Distribución de puntos de muestreo.

del suelo. Durante la campaña de riego de 1999 se tomaron 15 muestras de agua en cada punto, con una periodicidad aproximada de 10 días, alternando días en que los agricultores estaban regando con otros en que no. En el laboratorio del Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC, Zaragoza) se llevaron a cabo los análisis químicos de los principales cationes y aniones, mediante fotometría de llama y valoraciones colorimétricas para los primeros y con espectroscopía uv-visible para los segundos.

Periódicamente se midió el caudal en la confluencia del colector principal con el río Rigüel. Se siguió 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.

4. Resultados

4.1. Características de los suelos

La composición granulométrica indica que en la parte baja de la cuenca las muestras de suelo son limo-arcillosas o arcillo-limosas, mientras que en el sustrato y en el glacis II aumenta la proporción de arenas, dando lugar a suelos franco arenosos o franco limosos (Basso, 1994). Los análisis químicos demuestran que los suelos dominantes en la cuenca son salino-sódicos, con elevada salinidad (valores de hasta 30dSm^{-1}), valores altos de SAR (máximo de 53) y pH muy elevado, a veces por encima de 8,5 (Basso, 1994).

La tabla 1 indica la composición química de los suelos analizados. Se observa que las tres unidades geomorfológicas muestreadas presentan valores muy similares, tanto en aniones como en cationes. No obstante, el área de carcavas da en general valores algo más bajos, con excepción de SO_4^{2-} y Ca^{2+} .

Tabla 1. Caracterización química de los suelos. Valores en meq L⁻¹

U.G.	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Total Aniones	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Total Cationes
G2	2.64	53.50	18.00	74.14	13.49	9.46	54.93	0.25	78.13
G1	2.49	60.01	31.08	93.66	26.31	16.03	50.17	2.4	94.92
Cárcavas	2.80	20.29	32.70	55.79	27.17	8.75	21.12	0.69	57.54

4.2. Los usos agrícolas del suelo

El espacio sin cultivar ocupa 213 ha, mientras que el cultivado asciende a 433 ha. Los cultivos forrajeros ocupan el 45,2% del espacio agrícola (Tabla 2). El arroz, con 96,9 ha (el 22,4%), es el segundo cultivo en extensión, seguido por los cere-

ales de invierno (60,9 ha), el girasol y el maíz. De forma casi testimonial hay que señalar la dedicación de 8 ha a hortalizas (tomates y cebollas) y la presencia de algunas parcelas de campos abandonados.

Tabla 2. Distribución de cultivos en el verano de 1999

Cultivo	ha	%
Cereales de invierno	60,9	14,1
Maíz	19,0	4,4
Arroz	96,9	22,4
Girasol	32,5	7,5
Forrajes	195,6	45,2
Hortalizas	8,1	1,8
Barbecho	4,7	1,1
Campos abandonados	15,2	3,5
TOTAL	432,9	100,0

La figura 4 refleja la distribución de los usos del suelo. El espacio no cultivado ocupa fundamentalmente la cabecera de la cuenca, coincidiendo con la topografía más alta y con el área de cárcavas, mientras que los cultivos se extienden por los glacis y terrazas. No se ha podido establecer una relación estrecha entre cada cultivo y las distintas unidades geomorfológicas, ya que depende de factores muy complejos entre los que destacan la rotación de cultivos y la disponibilidad de tierras del agricultor. Aún con todo, la figura 4 permite asociar el arroz a 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 el glacis II y con la parte más elevada del glacis I. El resto de los usos agrícolas se distribuyen por el sector central de la cuenca, alternando con parcelas de alfalfa. La localización de los dos cultivos de mayor extensión tiene mucho que ver con la composición textural del suelo. En el sector bajo del glacis I dominan suelos de textura limo-arcillosa con muy escasa pedregosidad; aquí la infiltración del agua tiene grandes dificultades, permaneciendo los suelos encharcados durante mucho tiempo, lo que resulta muy favorable para el cultivo del arroz. En el glacis II y en el sector más alto del glacis I, por el contrario, la proporción de arena aumenta al igual que la pedregosidad, favoreciendo la infiltración del agua en profundidad y el desarrollo de la alfalfa, que debido a su extenso y potente aparato radicular es capaz de captar agua de las capas profundas del suelo.

Dos aspectos de la gestión agrícola tienen gran relevancia: la fertilización y el riego. El abonado agrícola constituye la principal incorporación de nutrientes al

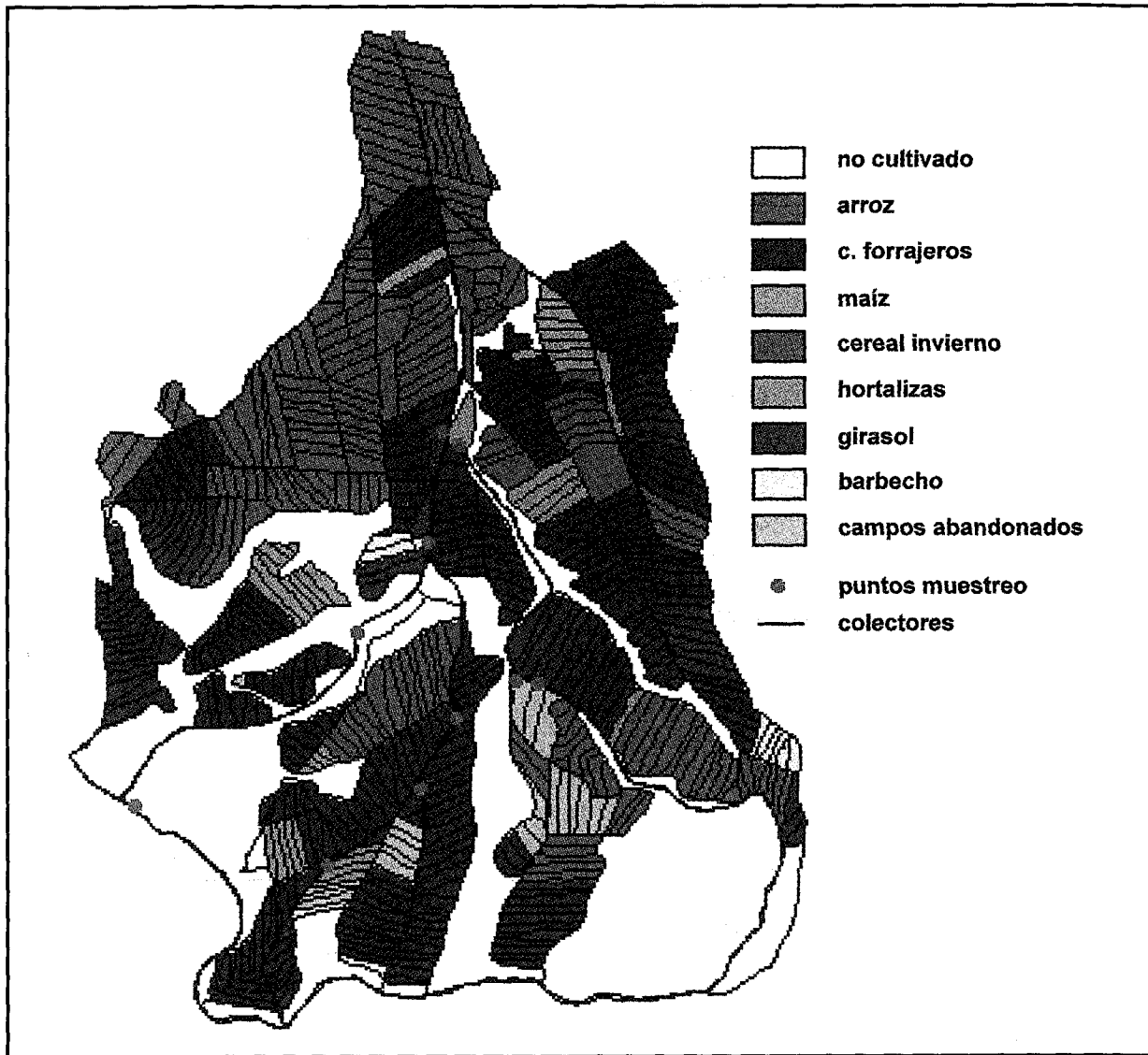


Fig. 4: Distribución de los usos del suelo.

suelo, especialmente de nitrógeno, fósforo y potasio. El riego, por su parte, implica la entrada y salida de iones en cantidades diferentes, como veremos posteriormente.

El tipo de abonado utilizado más usualmente es el complejo 12-24-8. Es un abonado de fondo que se incorpora antes de la siembra del cultivo. Por cada 100 kg. que el agricultor derrama aporta al campo 12 kg de nitrógeno amoniacal, 24 kg de anhídrido fosfórico y 8 kg de óxido potásico. Además añade 0,5 kg de magnesio, 10,6 kg de azufre y 2,5 kg. de hierro. La tabla 3 incluye el aporte de los principales nutrientes en los cultivos más representativos, así como el número de riegos.

Tabla 3. Cantidad de abonado en kg por hectárea y número de riegos al año.

Cultivos	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	S	H	Nº riegos
Cereales	24	48	16	0,3	21,2	5	2
Maíz	120	240	80	1,5	106	25	7
Arroz	72	144	48	1,8	63,6	15	P
Girasol	120	120	40	0,75	53	12,5	3
Alfalfa	60	120	40	0,75	53	12,5	12

Fuente: Elaboración propia a partir de encuestas a los agricultores

El maíz es el cultivo que recibe mayor cantidad de abono, mientras que los cereales de invierno cuentan con las menores aportaciones. El arroz, la alfalfa y el girasol gozan de una fertilización parecida, aunque el girasol recibe más nitrógeno debido al añadido de nitrato en la fase de cultivo. El número de riegos varía mucho; así, el arroz permanece encharcado todo el tiempo, salvo los días previos al tratamiento con sulfato; la alfalfa recibe como mínimo 12 riegos, que se distribuyen durante la primavera y el verano. El maíz y el girasol concentran los riegos de julio a septiembre, mientras que los cereales de invierno suelen registrar dos riegos en primavera.

4.3. Distribución espacial de la concentración de solutos.

Los caudales experimentan escasas variaciones a lo largo de la campaña de riego, fluctuando los valores extremos entre 0,19 y 0,29 m³/s en la desembocadura del colector principal, donde -como es lógico- se registran los caudales más elevados de la cuenca. La mayor parte del caudal llega del área cultivada con arroz, donde el agua rebosa de las parcelas casi permanentemente. El Atfy *et al.* (1991) comprobaron en estudios llevados a cabo en Egipto que existía una estrecha relación entre el caudal de los colectores de drenaje y el área cultivada con arroz. En el resto de los cultivos apenas se produce escorrentía superficial, generándose, sobre todo en la alfalfa, muy moderados flujos de escorrentía subsuperficial.

La figura 5 (Diagrama de escalas logarítmicas verticales de Schoeller - Berkloff) representa la concentración de varios iones en los 15 muestreos. Se han seleccionado 4 puntos como ejemplo de lo que ocurre en todos ellos. Se observa que la concentración de cada ion experimenta escasas variaciones a lo largo del tiempo de muestreo. Tan sólo el magnesio y, en menor medida, el sulfato tienen mayor dispersión en la concentración. El punto 2 tiene un comportamiento ligeramente diferente dando lugar a una banda más amplia, que se explica sobre todo por unos niveles de concentración mucho más altos, como se verá después.

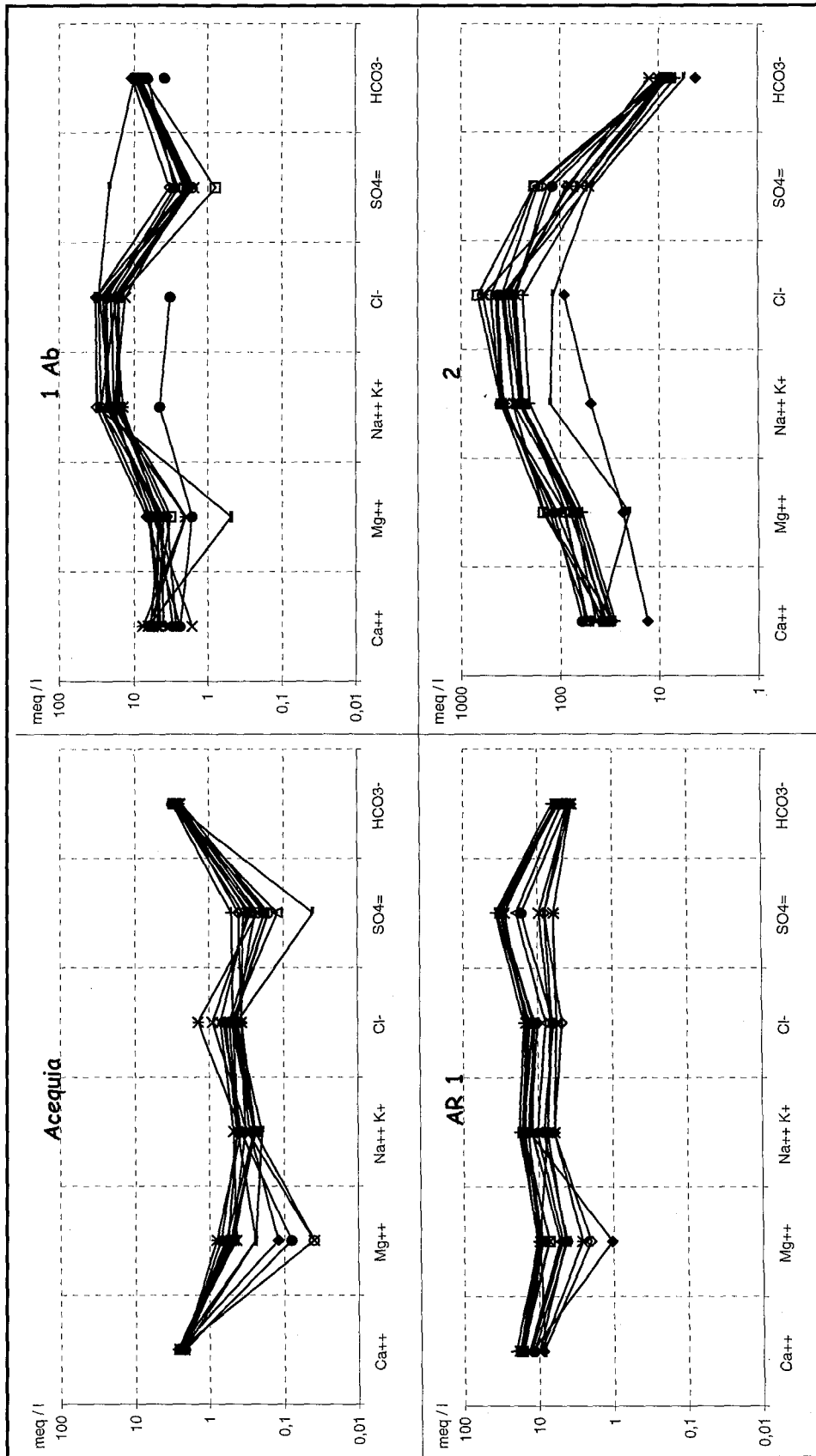


Fig. 5: Variación de la concentración de solutos en cuatro puntos representativos durante todos los días de muestreo.

En cualquier caso, la figura 5 pone de relieve el comportamiento regular de las concentraciones en cada punto en el tiempo, lo que permite sacar diferencias espaciales entre los puntos.

Aunque escapa a los objetivos de este trabajo es importante señalar, inicialmente, que la exportación de solutos es muy superior a la de sedimentos en suspensión en todos los puntos de muestreo. Ello se puede explicar porque la participación de solutos fluctúa poco en la escorrentía, cualquiera que sea el nivel del caudal, mientras que el material en suspensión está muy condicionado por el tipo de caudal, aumentando con caudales elevados especialmente si tienen que ver con tormentas.

La tabla 4 muestra los valores medios de concentración. Las salidas más significativas de solutos están en forma de SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} , HCO_3^- y Cl^- , por el alto contenido de estos iones en los suelos. Sin embargo, la contribución de K^+ , Mg^{2+} , NO_3^- y PO_4^{3-} es muy escasa (en conjunto menos del 5% del total), como corresponde a suelos pobres en dichos nutrientes pese a los aportes del agricultor.

Tabla 4: Concentración media de solutos en mg/l

	Conductividad	K^+	Na^+	Ca^{++}	Mg^{++}	HCO_3^-	NO_3^-	Cl^-	PO_4^{3-}	SO_4^{2-}	Residuo en suspensión	Residuo en solución
	$\mu\text{S/cm}$	mg/l										
Acequia	293,5	1,1	6,7	49,2	4,8	175,5	1,6	20,6	2,8	9,4	20,4	270,5
AR	5142,7	6,3	569,6	526,6	191,4	348,1	0,3	763,8	28,9	1602,5	31,7	5005,4
AR1	2498,6	3,6	276,8	281,8	78,2	291,3	1,1	356,5	15,6	833,4	62,1	2213,3
AR2	2072,5	4,3	250,3	217,8	86,3	287,7	3,6	346,6	15,3	656,6	101,2	1883,7
3	2968,7	2,8	360,7	220,1	99,3	257,7	2,9	507,7	10,0	881,9	32,4	2392,2
5	5389,3	6,9	553,4	478,3	175,2	350,8	1,3	705,3	24,1	1496,3	110,8	4713,1
Int	2840,4	3,4	433,1	190,5	90,6	339,9	12,7	665,2	15,0	598,6	65,3	2453,7
2	30637,3	10,4	6323,0	780,4	1037,3	499,4	227,6	12820,0	13,6	3921,0	48,5	29063,5
7	4080,7	2,7	643,2	104,4	109,0	752,3	13,6	1003,3	10,5	406,8	46,8	3050,1
4	969,0	2,4	77,2	81,2	41,2	347,9	13,7	155,7	10,7	40,2	19,0	665,4
6	1735,7	3,5	262,9	89,6	54,4	497,3	4,6	361,0	23,8	123,7	47,0	1294,2
1AR	2758,1	2,8	457,9	99,0	51,2	594,1	12,2	713,0	15,9	176,9	30,8	2077,0
1AB	2851,3	2,8	475,7	89,0	47,8	522,9	11,6	752,6	14,6	139,1	47,1	2030,3
AB	3227,4	3,2	471,3	155,8	74,4	400,6	15,7	767,1	14,5	345,3	52,7	2384,2

Si comparamos la concentración en la acequia (registro de entrada) con el punto AB, localizado en el tramo final del colector principal, un poco antes de desaguar en el río Rigüel, se observa que la concentración es superior en la salida que en la entrada para todos los iones, al igual que ocurre con el material en suspensión. La concentración media de este último es de 20,41 mg/l en el agua de la acequia, mientras que alcanza el valor de 52,69 mg/l en el punto AB. Mayor incremento se produce con los solutos, pasando de 270,5 mg/l a 2.384,2 mg/l, lo que supone multiplicar la carga de salida por 8,8 respecto a la de entrada. Todos los iones aumentan la concentración, si bien los mayores incrementos tienen lugar en el Na^+ (se multiplica la concentración por 70,6) en el Cl^- (por 37,3), en el SO_4^{2-} (por 28,8) y en el Mg^{2+} (por 15,7), mientras que son mucho más moderados en el resto.

Entre el punto de entrada y de salida hay, sin embargo, una gran variabilidad espacial en la concentración de iones, como se ve en la tabla 4. La figura 6 refleja mediante los diagramas poligonales de Stiff, la concentración de aniones y cationes siguiendo el esquema incluido en la parte inferior derecha. Conviene aclarar que se utiliza la misma escala para todos los puntos, salvo para el 2, en el que los valores se han dividido por 10, y para la acequia en que se han multiplicado por 10. En la tabla 5 se han calculado los coeficientes de correlación entre los puntos muestreados, usando 8 parámetros: K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- y NO_3^- . Los resultados obtenidos permiten definir claramente dos grupos (Tabla 6), quedando 3 puntos independientes.

Tabla 5: Coeficientes de correlación múltiple entre K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- y NO_3^- .

	Acequia	AB	AR	AR1	AR2	1AB	1AR	2	3	4	5	6	7	INT
Acequia	1	0,348	-0,03	-0,02	0,014	0,452	0,450	0,156	0,000	0,334	-0,01	0,470	0,049	0,215
AB		1	0,539	0,506	0,582	0,945	0,940	0,881	0,588	0,585	0,513	0,821	0,900	0,874
AR			1	0,99	0,985	0,254	0,302	0,479	0,995	0,038	0,999	0,215	0,311	0,877
AR1				1	0,995	0,236	0,301	0,386	0,988	0,115	0,994	0,254	0,251	0,853
AR2					1	0,327	0,391	0,445	0,991	0,194	0,987	0,342	0,331	0,894
1AB						1	0,991	0,775	0,317	0,732	0,230	0,917	0,878	0,682
1AR							1	0,715	0,368	0,798	0,283	0,957	0,836	0,707
2								1	0,508	0,177	0,439	0,486	0,920	0,770
3									1	0,100	0,991	0,284	0,360	0,905
4										1	0,04	0,932	0,457	0,346
5											1	0,208	0,271	0,863
6												1	0,672	0,590
7													1	0,676
INT														1

Tabla 6. Puntos de muestreo homogéneos a partir de los coeficientes de correlación y de los diagramas poligonales de Stiff

Grupo I: AR, AR1, AR2, 3, 5, INT	Grupo II: AB, 1AB, 1AR y 6
Unidad geomorfológica: Area de cárcavas, I Glacis II y Glacis I (sector alto)	Unidad geomorfológica: Glacis (sector bajo)
Uso: alfalfa, vegetación natural y suelo desnudo	Uso: Arroz
Alta concentración de SO_4^{2-} , Ca^{2+} y Mg^{2+}	Alta concentración de Na^+ , HCO_3^- y Cl^-
Baja aportación relativa de: Na^+ , Cl^- y HCO_3^-	Baja aportación relativa de SO_4^{2-} , Ca^{2+} y Mg^{2+}
Muy baja concentración de K^+ , PO_4^{3-} y NO_3^-	Muy baja concentración de K^+ y PO_4^{3-} , y moderada de NO_3^-

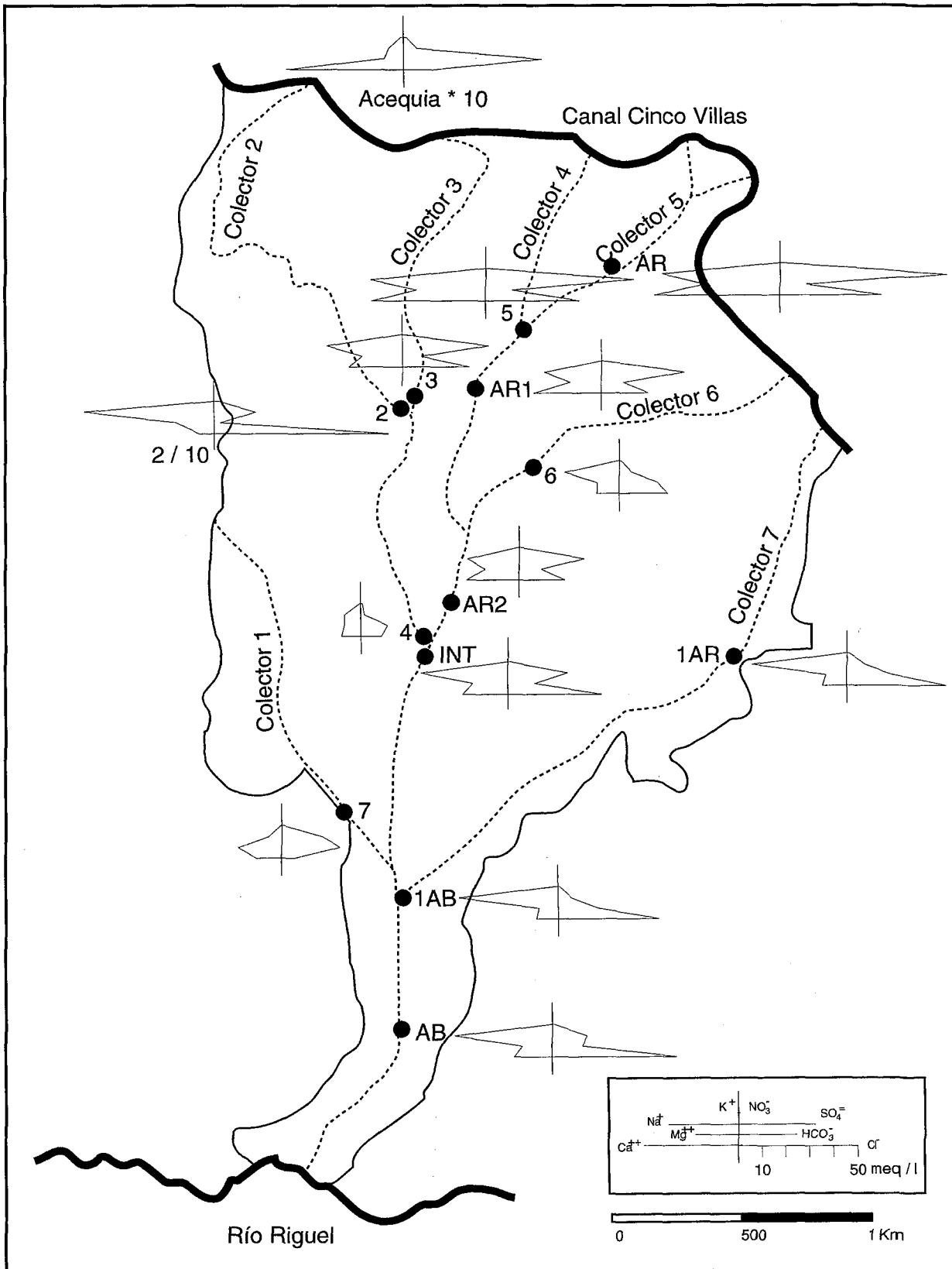


Fig. 6: Representación mediante polígonos de Stiff de la concentración media de solutos.

El grupo I incluye los puntos AR, AR1, AR2, 3 y 5. Recibe aguas del área de cárcavas y de los glacis II y del sector alto del glacis I, es decir del espacio no cultivado (que durante el periodo de riego debe aportar muy poco, tan sólo la escorrentía derivada de las lluvias) y del cultivado básicamente con alfalfa. El coeficiente de escorrentía en este cultivo es muy bajo en relación con su alta capacidad de infiltración, favorecida por su aparato radicular, y sobre todo por la topografía llana de las parcelas y el caballón de los márgenes que retiene el agua en la parcela. Cuando se produce escorrentía tiene que ver casi siempre con el desarrollo de pequeños procesos de piping, que se ven favorecidos por este cultivo (García-Ruiz *et al.*, 1986 y 1997). Presenta una alta concentración de SO_4^{2-} , que aporta entre el 35 y el 40% del total de solutos. La participación de Ca^{2+} y de Mg^{2+} , aunque menos importante en la contribución total que la de Na^+ y Cl^- , es destacable por presentar concentraciones más altas que los puntos de muestreo no incluidos en este grupo. Es muy baja la aportación de K^+ , NO_3^- y PO_4^{3-} , que en conjunto no alcanzan el 2% del total de solutos. En este grupo también se incluye el punto INT, pese a dibujar un diagrama poligonal ligeramente diferente, debido a la mayor concentración de Na^+ y la menor de SO_4^{2-} . Sin embargo, su alta correlación con el punto 3 y la similitud en la concentración de la mayoría de los iones aconseja añadirlo a este grupo.

El grupo II lo forman los puntos 1AR, 1AB y AB, localizados en el sector bajo del glacis I, que está cultivado por arroz de forma exclusiva. Presenta altas concentraciones en Na^+ (del 20 al 22% del total de solutos), en HCO_3^- (entre el 18 y el 28%), y de Cl^- (entre el 33 y el 37% del total). El Ca^{2+} y el SO_4^{2-} , por el contrario, tienen aportaciones más modestas que los puntos del grupo I. La contribución de K^+ , NO_3^- y PO_4^{3-} es muy baja (por debajo del 2%), aunque hay que reseñar las mayores pérdidas de nitratos en este grupo que en el grupo I. El punto 6 tiene claras coincidencias con este grupo en las concentraciones de K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , PO_4^{3-} y SO_4^{2-} , aunque difiere en el Na^+ , NO_3^- y Cl^- . Presenta una correlación muy alta con AR que permite incluirlo en el grupo II.

Los puntos 2, 4 y 7, localizados en el sector central de la cuenca donde existe mayor diversidad de cultivos, tienen un comportamiento muy distinto a los dos grupos definidos. Llama especialmente la atención el punto 2 que 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 y destacando sobre todo las altísimas concentraciones de Na^+ y Cl^- , que suponen el 75% de las pérdidas de solutos. El punto 4 tiene valores muy bajos en la mayoría de los aniones; sólo los 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. El punto 7 tiene valores muy altos de Na^+ , HCO_3^- y Cl^- (en conjunto supo-

ne una aportación del 78,7% de los solutos), mientras que en el resto de iones la concentración se sitúa a medio camino entre el grupo I y II.

La tabla 7 ayuda a conocer qué tipo de sales dan origen a los iones que se exportan. En todas las muestras hay una concentración de Cl⁻ y de Na⁺ muy elevada, lo que parece indicar que el cloruro sódico es una de las sales dominantes en su área de recepción; en el grupo II parece ser casi la única, y en el punto 2 la más destacable con mucha diferencia. En el área del grupo I, sin embargo, los iones encontrados indican la abundancia relativa de otras sales, que dadas las características del área de estudio, podrían ser el sulfato de calcio y el sulfato de magnesio, mientras que en el punto 4 debe aparecer junto al carbonato cálcico. Tan sólo en el punto 7 la presencia de cloruro sódico parece poco abundante en comparación con el carbonato cálcico y el sulfato de magnesio.

Tabla 7: Concentración media de solutos en meq/l

	Conductividad	K ⁺	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻
	μS/cm	meq/l								
Acequia	293,47	0,03	0,29	2,46	0,39	2,88	0,03	0,58	0,11	0,25
AR	5142,67	0,16	24,77	26,28	15,76	5,71	0,00	21,52	0,91	33,39
5	5389,33	0,18	24,06	23,87	14,42	5,75	0,02	19,87	0,76	31,17
2	30637,33	0,27	274,91	38,94	85,37	8,19	3,67	361,13	0,43	81,69
3	2968,67	0,07	15,68	10,98	8,17	4,23	0,05	14,30	0,32	18,37
AR1	2498,60	0,09	12,03	14,06	6,43	4,77	0,02	10,04	0,49	17,36
6	1735,67	0,09	11,43	4,47	4,48	8,15	0,07	10,17	0,75	2,58
AR2	2072,47	0,11	10,88	10,87	7,10	4,72	0,06	9,76	0,48	13,68
4	969,00	0,06	3,36	4,05	3,39	5,70	0,22	4,39	0,34	0,84
Int	2840,40	0,09	18,83	9,51	7,45	5,57	0,21	18,74	0,47	12,47
7	4080,73	0,07	27,96	5,21	8,97	12,33	0,22	28,26	0,33	8,48
1AR	2758,13	0,07	19,91	4,94	4,21	9,74	0,20	20,08	0,50	3,69
1AB	2680,78	0,10	17,36	7,76	8,09	7,68	0,26	62,36	0,41	10,93
AB	3227,40	0,08	20,49	7,77	6,13	6,57	0,25	21,61	0,46	7,19

5. Discusión y conclusiones.

En el centro de la Depresión del Ebro 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. Muchos de estos suelos se han puesto en regadío a lo largo del siglo XX, con el fin de incrementar la productividad agrícola, aumentar la diversidad de cultivos y mejorar el nivel de rentas de los agricultores. Desde un punto de vista social y económico los regadíos han cumplido una función muy importante hasta muy recientemente. Sin embargo, su impacto ambiental ha sido puesto de manifiesto reiteradamente, ya que 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.

En las páginas precedentes se ha señalado que el agua de la cuenca sale mucho más cargada de sedimento que la que entra, siendo ésta última de buena calidad para el riego (Alberto *et al.*, 1980; Aragüés, 1986). El agua de la acequia tiene una concentración media de 290,9 mg/l, mientras que en el punto de salida es de 2.436,9 mg/l, lo que significa aumentar la concentración por 8,4 veces. La mayor parte de los materiales corresponden a solutos, mientras que los sedimentos en suspensión participan en una baja proporción (con el 2,2% del total). La alta concentración de iones disueltos se debe a la elevada presencia de sales solubles en los suelos, lo que facilita su transporte por las aguas de escorrentía. Por otro lado, el desequilibrio entre solutos y material en suspensión sugiere que existe un contacto duradero entre el agua y las sales, como corresponde a unos flujos de retorno que surgen por rebosamiento del agua encharcada en campos de arroz o por canales subsuperficiales en parcelas de alfalfa.

Los análisis químicos del suelo no muestran grandes variaciones entre las unidades geomorfológicas de la cuenca, lo que permite pensar que los usos del suelo y la gestión del riego deben contribuir a explicar la diversidad espacial en la producción de solutos. De hecho, numerosos estudios (Girona, 1986; Hanson, 1989; Tanji y Hanson, 1990; Hoffman *et al.*, 1991) han comprobado que el sistema de riego tiene gran influencia en la concentración de solutos, siendo el sistema de gravedad el que causa mayores pérdidas al generar volúmenes de escorrentía más elevados. En este sentido, Quilez *et al.* (1987) señalan, a partir de un modelo de simulación de riego aplicado a La Violada, que descensos del 20 y 40% en el agua utilizada para el riego implican la disminución de la masa de sales exportadas en un 28% y 58%, respectivamente.

Dentro de la cuenca existen grandes diferencias en la concentración de solutos, observándose dos tendencias muy claras. El grupo I, constituido por 6 puntos localizados en el sector alto de la cuenca (área de cárcavas, glacis II y parte alta del glacis I) con suelo incultivado o cultivado con alfalfa, tiene elevadas pérdidas de SO_4^{2-} , y una destacada participación relativa del Ca^{2+} y Mg^{2+} , mientras que son bajas las concentraciones de Na^+ , HCO_3^- y Cl^- . Una posible interpretación podría estar en el arrastre por la escorrentía subsuperficial de partículas de SO_4^{2-} , que parecen algo más abundantes en los niveles inferiores del suelo que en la capa superficial, según las calicatas realizadas por Basso (1994). La importancia de los drenajes subsuperficiales en la pérdida de nutrientes ha sido reiteradamente puesta de manifiesto (Tanji *et al.*, 1975; Wichelns y Nelson, 1987; Harker, 1993; Tan *et al.*, 1993, entre otros).

Los puntos de muestreo del grupo II se localizan en el sector bajo del glacis I, recogiendo las aguas sobrantes de campos cultivados con arroz. Los flujos de retorno presentan altas concentraciones de Na^+ , HCO_3^- y Cl^- , y bajas de SO_4^{2-} y Ca^{2+} . El agua de escorrentía se caracteriza por permanecer bastante tiempo encharcada

en las parcelas y salir cuando rebosa por el caballón. En estas condiciones arrastra sobre todo los iones componentes de sales muy presentes en la capa superficial del suelo, como ocurre con el cloruro sódico.

Las pérdidas de N, P y K son muy bajas, como corresponde a suelos que presentan importantes deficiencias en estos nutrientes pese al abonado químico que efectúa el agricultor. Bellot *et al.* (1989b) comprobaron, en el polígono de riego de La Violada, que las salidas de estos elementos eran muy bajas, estableciéndose un balance positivo entre entradas y salidas. A una conclusión similar llegan Banasik *et al.* (1999) al estudiar el balance de nutrientes en dos cuencas de Estados Unidos y Polonia; comprueban que sólo el 14% del NO_3 y el 5% del PO_4 aportado en la fertilización se pierde por las aguas de escorrentía. Por otro lado, no se presenta variabilidad espacial entre los puntos de muestreo, quizá porque tampoco existen destacadas diferencias de fertilización entre los cultivos.

Agradecimientos:

Este trabajo se ha realizado con apoyo del proyecto de investigación: *Impacto ambiental del regadío de Bardenas I: Fuentes de contaminación agrícola y transporte de nutrientes en los efluentes de riego*, financiado por la CICYT (Proyecto HID96-1306).

Referencias bibliográficas

- ALBERTO, F., y ARAGÜÉS, R. (1986): La problemática general de la salinidad en la cuenca del Ebro. En: *Sistema Integrado del Ebro. Estudio Interdisciplinar*. 221-236.
- ALBERTO, F., ARAGÜÉS, R. y QUILEZ, D. (1986b): Balance de sales de la cuenca del Ebro. En: *Sistema Integrado del Ebro. Estudio Interdisciplinar*. 279-291.
- ALBERTO, F., ARAGÜÉS, R., MACHÍN, J. y 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., MACHÍN, J. y ARAGÜÉS, R. (1986a): La problemática general de la salinidad en la cuenca del Ebro. En: *Sistema integrado del Ebro. Estudio interdisciplinar*: 221-236.
- BANISAK, K., MITCHELL, J.K., WALKER, S.E. y RUDZKA, E. (1999): Comparison of nutrient outputs from two lowland watersheds with different agricultural practices. In: *Impact of Land-Use Change on Nutrient Loads Diffuse Sources* (L. Heathwate, Ed.). IAHS Publ.no. 257: 13-16.
- BASSO, L.A. (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, 2 Tomos.
- BELLOT, J. y GOLLEY, F.B. (1989a): Nutrient input and output of an irrigated agroecosystem in an arid mediterranean landscape. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 25: 175-186.

- BELLOT, J., AGUINACO, M.T., PUJALTE, E. y GOLLEY, F. (1989b): Lorses of nutrients in drainage water of an irrigated agroecosystem. *Ecology International Bulletin*, 17: 31-40.
- BELLOT, J., GOLLEY, F.B. y AGUINACO, M.T. (1989): Environmental consequences of salts exports from an irrigated landscape in the Ebro River Basin, Spain. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 27: 131-138.
- EL ATFY, H., EL GAMAAL, H. y VAN MOURIK, E. (1991): Discharge rates, salinities and the prefomance of subsurface collector drains in Egypt. *Irrigation and Drainage Systems*, 5: 325-338.
- ESQUIZABEL, C. (1987): *Estudio agroecológico del polígono de riego de la Violada (Huesca): Heterogeneidad espacial y dinámica de nutrientes en suelos bajo cultivo de trigo y maíz*. Tesis-Master en Ciencias. Instituto Agrónomico Mediterráneo, Zaragoza.
- FACI, J., ARAGÜÉS, R., ALBERTO, F., QUILEZ, D., MACHÍN, J. y ARRÚE, J.L. (1985): Water and salt balance in an irrigated area of the Ebro Basin (Spain). *Irrigation Science*, 6: 29-37.
- FRUTOS, L.M. (1993): Los cambios de la agricultura de regadío aragonesa (1950-1980). En: *Medio siglo de cambios agrícolas en España* (Gil Olcina, A. y Morales Gil, A., Eds). Instituto de Cultura Juan Gil-Albert, Diputación Provincial de Alicante: 771-803.
- GARCÍA-RUIZ, J.M., LASANTA, T., ORTIGOSA, L.M. y 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. y ALBERTO, F. (1997): Soil erosion by piping in irrigated fields. *Geomorphology*, 20 (3-4): 269-278.
- GIRONA, J. (1986): Manejo del riego en condiciones de salinidad. En: *Salinidad de los suelos: aspectos de su incidencia en regadíos de Huesca* (J. Herrero, Coord.). Diputación General de Aragón: 75-117.
- GOLLEY, F.B. y BELLOT, J. (1991): Interactions of landscape ecology, planning and design. *Landscape and Urban Planning*, 21: 3-11.
- GRACIA, F.J. (1986): Dinámica erosiva del piping: un ejemplo en la Depresión del Ebro. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 12(1-2): 11-24.
- HANSON, B.R. (1989): A systems approach to drainage reduction in the San Joaquín Valley. *Agricultural Water Management*, 16: 97-108.
- HARKER, D.B. (1993): Characteristics, trends and surface water quality implications of the saline effluent. In: *Salinity in watercourses and reservoirs* (French, R.H., Ed). Butterworth Publishers, Boston.
- HERRERO, J. (1982): *Salinidad del suelo en salobres de Monegros y Somontano oscense como condicionante de la vegetación*. Institución Fernando El Católico: 50 pp., Zaragoza.

- HERRERO, J., RODRIGUEZ, R. y PORTA, J. (1989): *Colmatación de drenes en suelos afectados por salinidad*. Institución Fernando el Católico: 133 pp., Zaragoza.
- HOFFMAN, G.J., RHOADES, J.D., LETEY, J. y SANG SHENG (1991): Salinity management. *Environmental Impact Assessment: Agriculture and Forest Commision*: 667-715.
- MARTÍNEZ BELTRÁN, J. (1978): *Drainage and reclamation of salt affected soils Bardenas Area, Spain*. Inst. for Land Reclamation and Improvement: 321 pp., Holanda.
- MARTÍNEZ COB, A., FACI, J.M. y BERCERO, A. (1998): *Evapotranspiración y necesidades de riego de los principales cultivos en las comarcas de Aragón*. Institución Fernando el Católico: 223 pp., Zaragoza.
- PÉREZ YBARRA, C. (1994): Alteraciones ambientales en las transformaciones en regadío. *El Campo*, 131: 117-132.
- PORTA, J. y BOIXADERA, J. (1988): Suelos y salinidad en el valle del Ebro. En: *The basis of Grop Production (Ranagosa et al., Eds.)*. AEAC: 177-201, Barcelona.
- PORTA, J., HERRERO, J. y LATORRE, S. (1986): Evaluación de suelos para riego: criterios y problemática en los regadíos de Huesca. En: *Salinidad de los suelos: aspectos de su incidencia en regadíos de Huesca* (J. Herrero, Coord.). Diputación General de Aragón: 119-146.
- QUILEZ, D., ARAGÜÉS, R. y FACI, J. (1987b): Calibración, verificación y aplicación de un modelos conceptual hidrosalino del sistema "flujos de retorno de riego". *Investigaciones Agrarias: Producción y protección vegetal*, 2 (2): 165-182.
- SHAW, E.M. (1983): *Hydrology in Practice*. Van Nostrand Reinhold (U.K.) Co.Ltd 569 pp.
- SUMMER, M.E. (1999): The agricultural system: potential production and environmental consequences. En: *Rural planning from an environmental systems perspective*. Galley, F. y Bellot, J., Eds. Springer-CIHEAM: 173-191.
- SZABOLIS, I. (1989): *Salt-Affected Soils*. Boca Ratón, Fl: CRC press.
- TAN, C.S., DRURY, C.F., GAYNOR, J.D. y WELACKY, T.W. (1993): Intigrated soil, crop and water management system to abate herbicide and nitrate contamination of the great lakes. *Water Science Technology*, 28: 497-507.
- TANJI, K.K. y HANSON, B.R. (1990): Drainage and return flows in relation to irrigation management. In: *Irrigation of agricultural Crops* (B.A. Sterward y D.R. Nielsen, Eds). Agronomy monograph, 30: 1057-1087, Madison, WI, USA.
- TANJI, K.K., HENDERSON, S.K., GUPTA, M. y QUEK, A.F. (1975): Water and salt transfers in Sutter Basin, California. *Transactions of the ASAE*, 18(1): 111-115.
- WICHELNS, D. y NELSON, D. (1987): Empirical analysis of salt and selenium concentrations in subsurface drainage water. *USCID National Meeting-1987*: 109-118.