

An. Aula Dei 20(1-2):163-181.

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

Por L.A. BASSO*, J. MACHIN* y F. PELLICER**

* Estación Experimental de Aula Dei, Apdo. 202. ZARAGOZA

** Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio,
Universidad de Zaragoza

Palabras Clave: salinidad, red de drenaje, calidad de aguas,
contaminación, aguas superficiales.

ABSTRACT

Basso, L.A.; J. Machín y F. Pellicer. (1990). Salt loadings from Bardenas I, Monegros I and Cinca irrigation return flows to the surface waters of the Ebro river basin. *An. Aula Dei* 20 (1-2): 163-181.

Salt discharges from irrigated land contribute significantly to the rising salinity of surface waters in the Ebro river basin, NE Spain.

In this paper, salt loadings from the Bardenas I, Monegros I and Cinca irrigation projects were evaluated according to the volume and salt concentration (Total Dissolved Solids) of their respective return flows.

For the 1987-88 hydrologic year, the Bardenas I irrigation return flows showed the highest salt loads per year (about 273,000 tons) as well as per unit of irrigated land (6 tons per hectare).

On the other hand, the contribution of the three irrigation districts studied amounted to 488,279 tons of salts, which represents the 5.9% of the total mass of salts carried by the Ebro river near its mouth in Tortosa.

INTRODUCCION

La contaminación por salinidad de las aguas superficiales es un problema ampliamente conocido en muchas regiones áridas y semiáridas del mundo. Como ejemplos se pueden mencionar las cuencas de los ríos Colorado en E.E.U.U. (U.S.D.I., 1983), Indo en Paquistán (Fairchild, 1983) y Murray en Australia (Sheperd, 1981), donde los respectivos gobiernos han respondido al problema creando organizaciones y alegando recursos para combatir los daños que ocasiona.

Con respecto a la cuenca del Ebro, el balance de sales realizado por Alberto et al. (1986), puso de manifiesto la existencia en la misma de áreas con información insuficiente como, por ejemplo, las cuencas de los ríos Cinca y Arba, desagües naturales de importantes polígonos de riego: Bardenas I, Cinca y Aragón y Cataluña.

Con el objeto de paliar, de alguna forma, tal laguna, en este trabajo se ha cuantificado la masa total de sales exportadas hacia los cauces de los ríos Aragón, Arba, Gállego, Flumen, Cinca, Alcanadre, y en último término hacia el Ebro, por la red de drenaje de tres polígonos de riego (Bardenas I, Monegros I y Cinca) durante el año hidrológico de 1987-88.

AREA DE ESTUDIO

Los tres polígonos de riego están situados en la zona de transición entre el Somontano Pirenaico y el Centro de la Depresión del Ebro (Figura 1).

La naturaleza litológica de este sector de la cuenca del Ebro es consecuencia de su evolución geológica. La disposición de los sedimentos en la zona se puede diferenciar de la forma siguiente: los más groseros, constituidos por conglomerados y areniscas, se depositan en el borde de la cuenca y pasan gradualmente a facies detríticas más finas (limos y arcillas), en transición a calizas y sedimentos evaporíticos, fundamentalmente yesíferos, acompañados de rocas salinas haloideas, en el centro de la depresión.

El clima es semiárido, aumentando la aridez hacia el centro de la depresión. La pluviometría es de aproximadamente 500 mm anuales, distribuidos de forma irregular durante el año. La amplitud estacional de las temperaturas es grande. Los vientos son frecuentes, y por lo tanto, la evaporación es apreciable en la zona.

Los suelos de la zona son mayoritariamente de dos tipos: los suelos sobre terrazas y glaciais y los suelos salinos y/o sódicos. Los primeros no presentan problemas de drenaje o de acumulación de sales, características que los hacen muy interesantes desde el punto de vista agrícola, a pesar de que presentan factores limitantes tales como escasa profundidad y variable pedregosidad. La principal característica de estos suelos es la presencia de una costra caliza endurecida, compuesta fundamentalmente de carbonato cálcico.

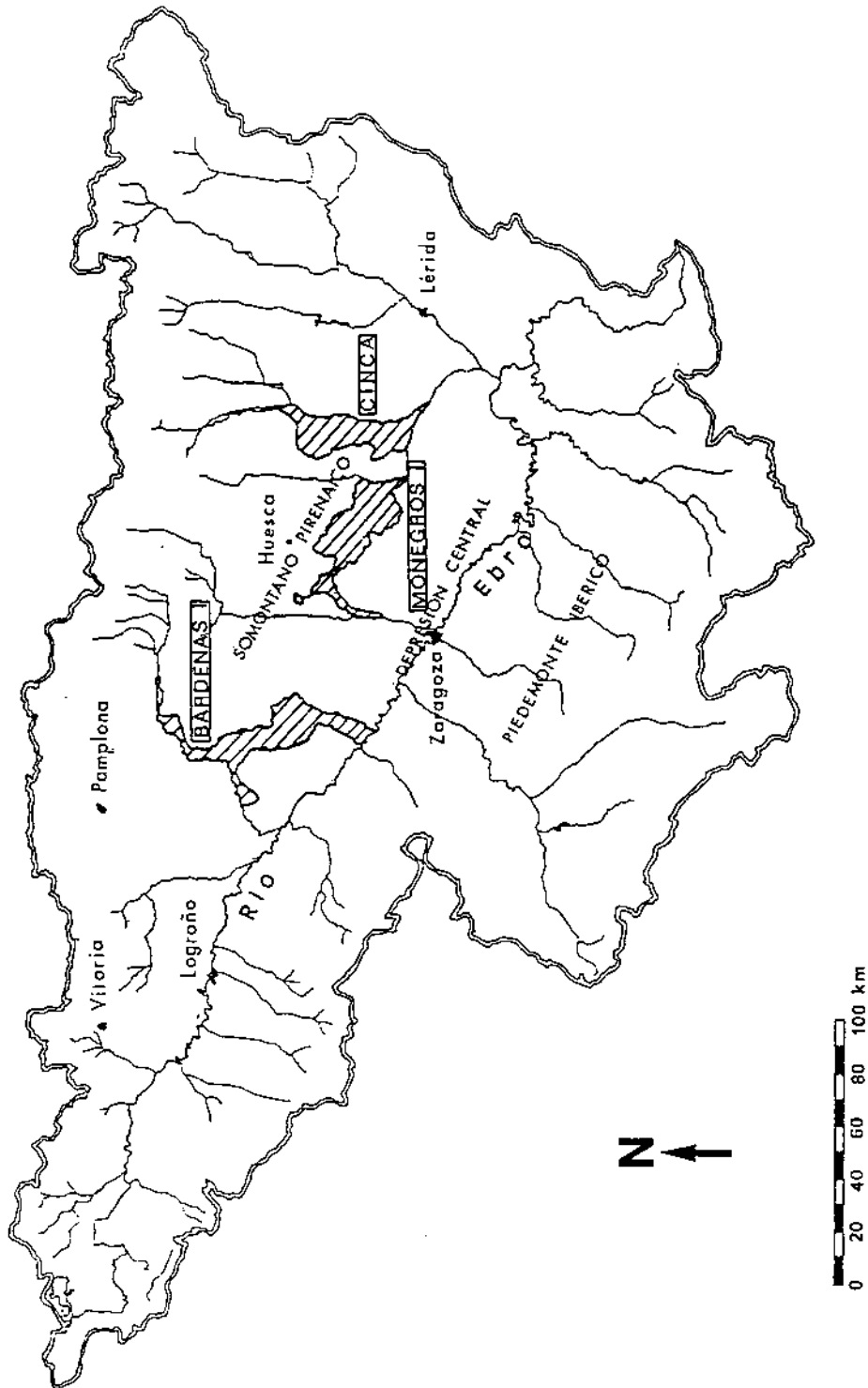


Figura 1.- Situación geográfica de los polígonos de riego Bardenas I, Monegros I y Cinca en la Cuenca del Ebro.

Por otro lado, la superficie total de suelos afectados por sales en los tres polígonos es de aproximadamente 75000 ha, lo que representa un 24% del total de suelos con problemas de salinidad en la cuenca del Ebro (Basso, 1989). Las principales características de estos suelos son las siguientes: i) predominio de suelos salino-sódicos (conductividad eléctrica del extrato saturado, CEE, mayor de 4 dS m⁻¹ y porcentaje de sodio intercambiable, PSI, mayor de 15%; ii) son suelos de textura franco-limosa o franco-arcillo-limosa; iii) los suelos alcalinos (pH > 8.5) aparecen localmente; iv) el sodio es el catión dominante en la mayoría de las muestras; v) los sulfatos y cloruros son los aniones dominantes, con un relativo predominio de este último y vi) los contenidos en materia orgánica son bajos.

En los suelos libres de salinidad se cultivan el maíz, alfalfa, girasol y algunos cultivos hortícolas. En suelos con salinidad moderada y en el secano se cultiva la cebada.

El principal método de riego es por gravedad. En algunos sectores de los polígonos se utilizan aspersores.

La calidad del agua de los canales y acequias utilizadas para el riego es buena con respecto a la salinidad (CE media de 0.29 dS m⁻¹).

MATERIAL Y METODOS

Selección de puntos de muestreo y aforo

Las Figuras 2, 3 y 4 indican la localización aproximada de los puntos de muestreo y aforo para los tres polígonos de regadío.

En la selección y localización de tales puntos a lo largo de los drenajes se tuvieron en cuenta que estos estuvieran situados en tramos finales de los desagües a fin de poder contabilizar las sales aportadas a los mismos a través de entidades menores de drenaje.

El total de puntos de muestreo ha sido de 91 de acuerdo con la distribución siguiente: 35 puntos de control sobre 32 desagües de Bardenas I (los colectores de drenaje C-2, C-4 y C-6 tienen a lo largo de sus respectivos cauces 2 puntos de control A y B ya que presentan una considerable longitud y reciben las aguas de otros desagües); 31 puntos en 29 desagües de Monegros I (el C-7 y el C-9 poseen 2 puntos de control) y 25 puntos repartidos en 23 desagües del polígono del Cinca (los barrancos de La Clamor y La Clamor Vieja cuentan con 2 puntos de muestreo cada uno).

Toma de muestras

El muestreo del agua de los desagües tuvo lugar en dos épocas del año hidrológico 1987-88: la de "no riego" (octubre-marzo) y la de "riego" (abril-septiembre). El esquema de toma de muestras seguido ha sido el siguiente:

- 1 único muestreo en la estación de "no riego". Se tomaron muestras en cada uno de los 91 puntos seleccionados. Los resultados de estas campañas sirvieron para seleccionar aquellos desagües cuya salinidad era superior a la media del polígono correspondiente.

- 4 muestreos en la estación de "riego". Los 3 primeros se llevaron a cabo solo en aquellos puntos de control seleccionados a par-

tir del muestreo en la época de "no riego" y con el fin de obtener un mejor conocimiento de la variación temporal de la calidad de las aguas de los desagües. El último muestreo fue realizado en todos los puntos de control a efectos de comparación con el de "no riego".

En total se recogieron y analizaron 285 muestras de agua, de las cuales 93 corresponden a la estación de "no riego" y 192 a la de "riego".

Cabe señalar la puntualidad de estos muestreos y por consiguiente la aproximación de los resultados obtenidos tanto para las estaciones de "no riego" y "riego" como en la masa de sales exportada por el conjunto de la red de drenaje de los tres polígonos hacia las aguas superficiales de la cuenca del Ebro.

Aforo de caudales

Se ha seguido el método denominado "velocidad-área" (Shaw, 1983), que consiste en medir la velocidad del agua en la vertical de varios puntos, de profundidad conocida, de una sección transversal del curso de agua.

Para medir la velocidad del agua en los desagües se utilizaron dos métodos: flotador (para todos los muestreos) y molinete (solo en el último muestreo de la estación de "riego").

En el primer método el cuerpo flotante utilizado para medir la velocidad del agua ha sido una pieza de corcho de características apropiadas. Para calcular la velocidad del agua se ha observado el tiempo empleado por el flotador para cruzar la sección del desagüe con el conocimiento de la distancia recorrida. La velocidad así calculada, representa una velocidad superficial media, ya que en todos los casos se han realizado tres o más medidas según la anchura del desagüe y las características de la sección. De acuerdo con Custodio y Llamas (1976), las velocidades superficiales medias calculadas por el método del flotador son mayores que la velocidad "real" media del agua que pasa por la sección. En consecuencia los caudales aforados por este método serán también mayores.

Por otro lado, al utilizar el molinete se tuvieron en consideración las características hidráulicas de los canales de drenaje. En este sentido, se empleó el molinete universal OTT c 31 - 10001 para aquellas ocasiones en que los cauces eran profundos (profundidades superiores a 1.0 m) mientras que el minimolinete OTT c2 - 10150 ha sido empleado en cauces de poca profundidad.

Por fin se calculó la sección de los desagües en función de su anchura y profundidad. De acuerdo con esto se ha dividido la sección del cauce en el punto de aforo en varias subsecciones. La suma de la superficie de todas ellas nos da el área total de la sección.

Así como en la toma de muestras, el aforo de los desagües también ha sido puntual. En este sentido los caudales obtenidos representan valores del momento de la toma de muestras.

Determinación de características y parámetros de salinidad

Los instrumentos o técnicas utilizados y las características químicas determinadas en las muestras de agua, han sido las siguientes:

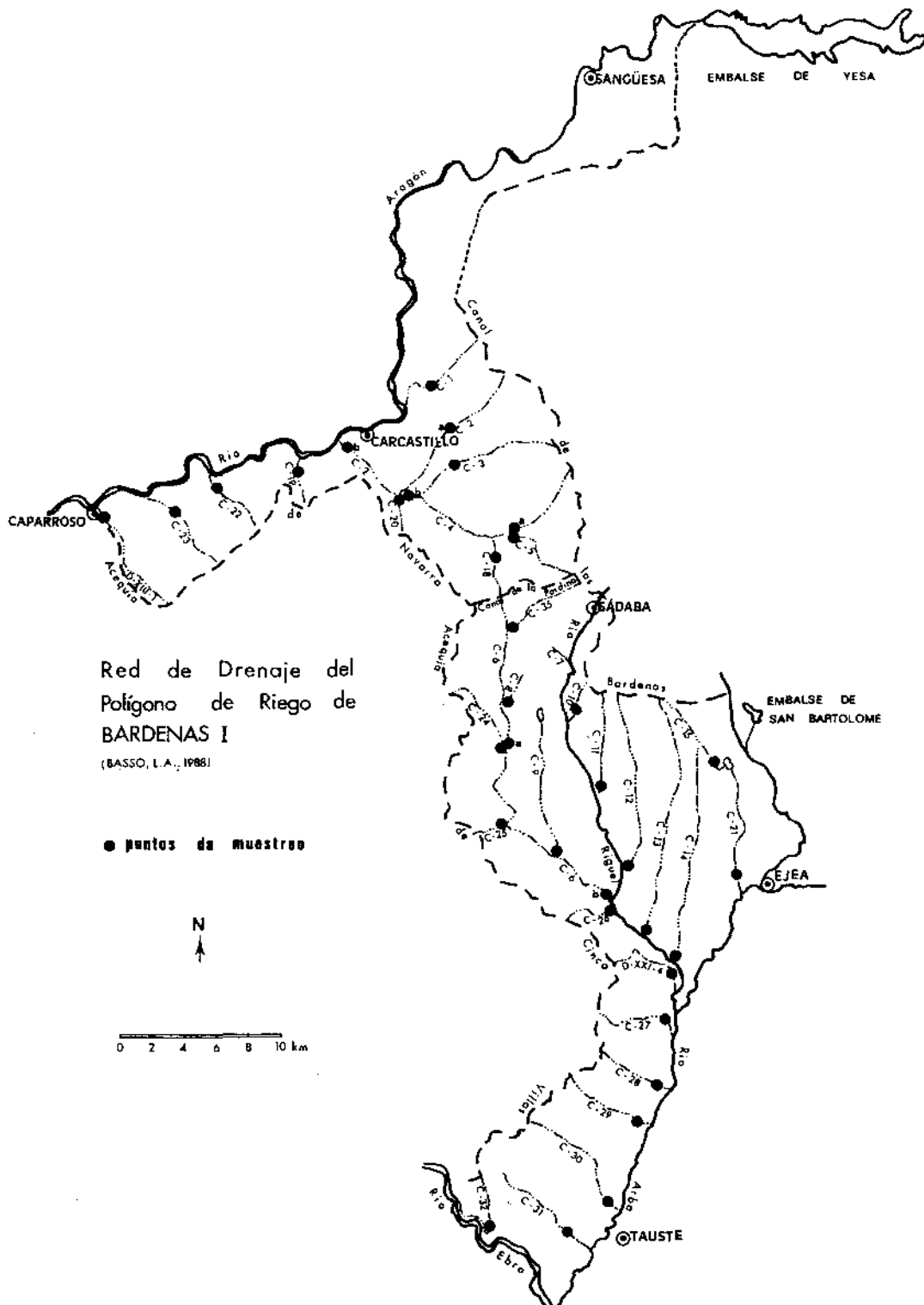


Figura 2.- Red de drenaje y puntos de muestreo y aforo del polígono de riego Bardenas I.

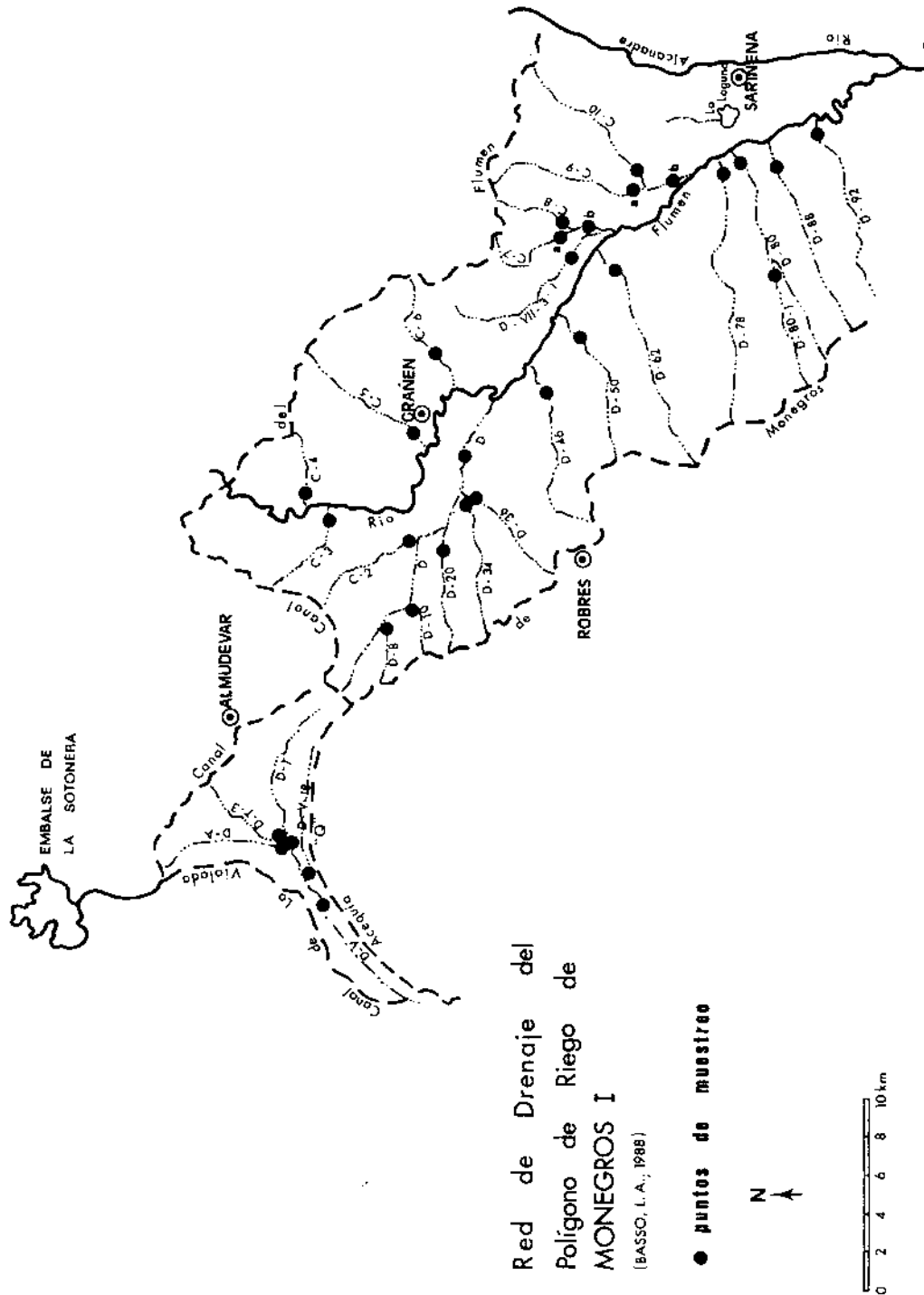


Figura 3.- Red de drenaje y puntos de muestreo y aforo del polígono de riego Monegros I.

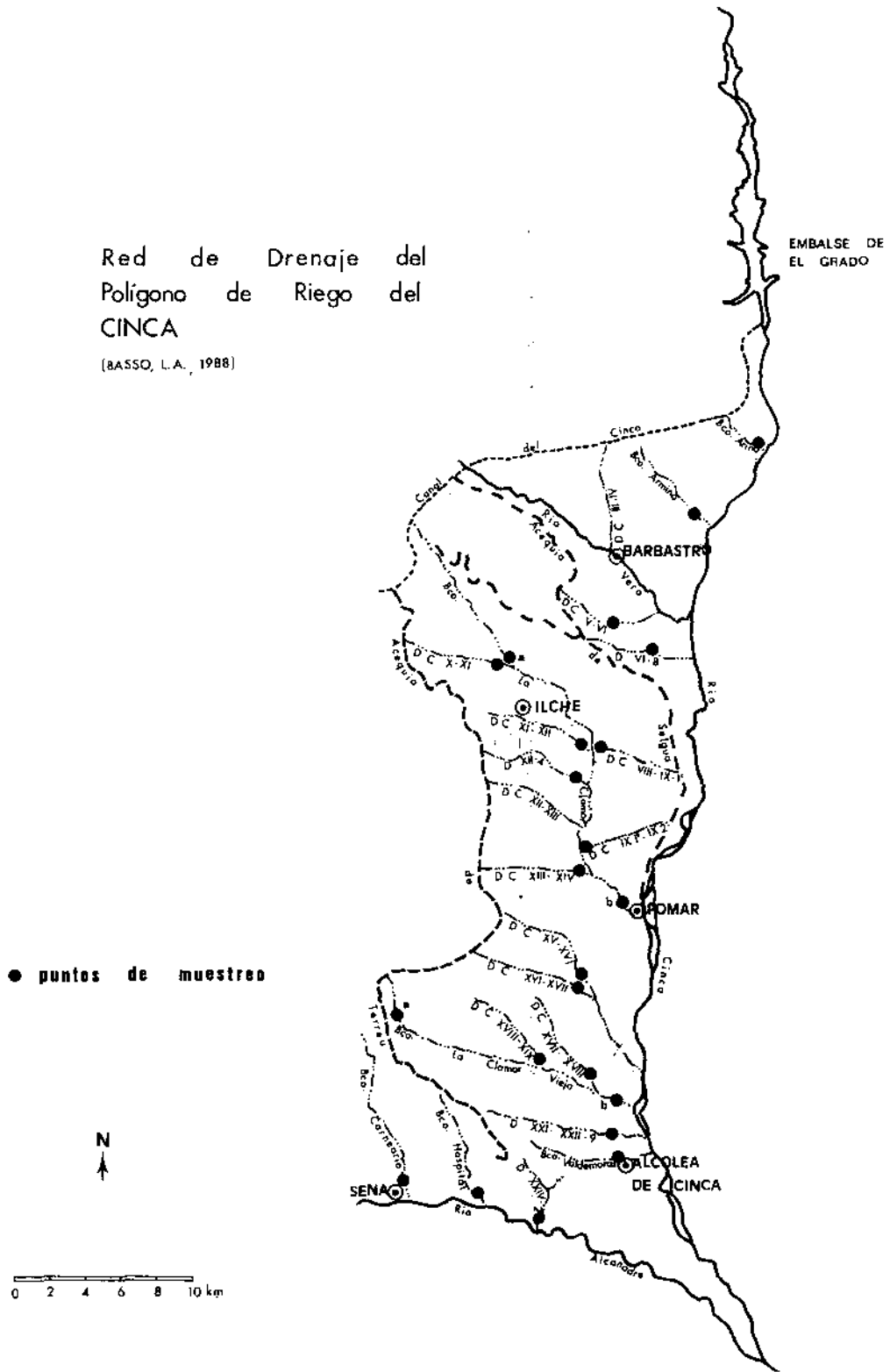


Figura 4.- Red de drenaje y puntos de muestreo y aforo del polígono de riego Cinca.

- conductímetro CRISON 522: conductividad eléctrica (CE).
- pHmetro ORION 901 Research Microprocessor Ionalyzer: pH.
- titrimetría: carbonatos, bicarbonatos y cloruros.
- espectrofotometría: sulfatos.
- Inductively Coupled Plasma (ICP): calcio, magnesio, sodio, estroncio y boro.
- fotometría de llama: potasio y litio.

Como parámetro derivado se ha considerado los "Sólidos Disueltos Totales" (TDS, en mg L⁻¹), a partir de la suma de aniones (carbonatos, 1/2 bicarbonatos, sulfatos y cloruros) y cationes (calcio, magnesio, sodio y potasio).

RESULTADOS Y DISCUSION

Corrección de caudales

Teniendo en cuenta la limitación del método del flotador antes mencionada, se ha establecido una relación entre los valores de caudal (Q) obtenidos a través del método del flotador y los calculados a partir de las medidas con molinete, utilizando los datos correspondientes al último muestreo de la estación de "riego".

La Figura 5 presenta la relación entre las dos variables y la ecuación de regresión lineal obtenida. Los puntos corresponden a 71 desagües de los tres polígonos de riego. Se observa que las medidas realizadas por ambos métodos están altamente correlacionadas ($r = 0.96$). La ecuación ha servido para transformar en Q (molinete) los caudales aforados con flotador en el período de "no riego" y en los tres primeros muestreos de la estación de "riego". Los valores Q (molinete) han sido considerados en el momento de establecer la masa total de sales exportada hacia los ríos de la cuenca por la red de drenaje de los tres polígonos de riego.

Por otro lado el Cuadro 1 muestra los valores medios de caudal de los desagües de los polígonos de riego, desglosado para la estación de "no riego" y "riego". Analizando el cuadro se puede observar el aumento de los caudales en la estación de riego. Eso se debe fundamentalmente a los vertidos hacia los desagües de aguas de cola de las acequias y canales de riego. En el caso del polígono de Monegros I, el incremento en el volumen de agua transportada por la red de drenaje en época de "riego" llega a ser 8 veces mayor que en la estación de "no riego".

Cuadro 1.- Caudal medio de los desagües en la estación de "no riego" y "riego".

| Polígono | Q medio (m ³ s ⁻¹) | |
|------------|---|-------|
| | No riego | Riego |
| Bardenas I | 0.151 | 0.437 |
| Monegros I | 0.066 | 0.553 |
| Cinca | 0.039 | 0.268 |

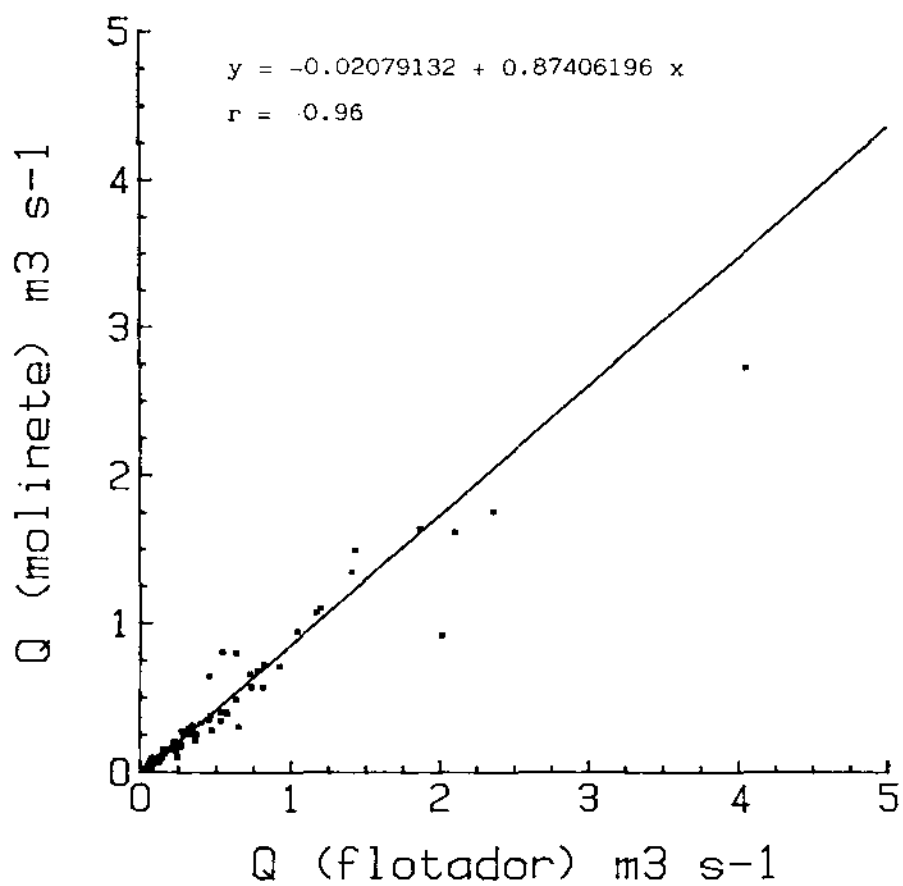


Figura 5.- Correlación entre caudales aforados con molinete y aforados por el método del flotador.

Concentración salina

La conductividad eléctrica (CE en dS m^{-1}) ha sido medida en todas las muestras de agua con el fin de evaluar la salinidad de las aguas de drenaje procedentes de los polígonos de regadío. Por otro lado, a partir de los análisis de cationes y aniones de estas mismas aguas, se ha podido determinar el TDS, medida directa de la salinidad.

El Cuadro 2 muestra los valores medios de CE y TDS de las aguas de drenaje de los tres polígonos estudiados en la estación de "no riego", "riego" y año hidrológico 1987-88, obtenidos a partir del muestreo realizado en época de "no riego" y en el último de época de "riego". Los valores de CE y, consecuentemente, los de TDS, son más elevados en la estación de "no riego" que en la de "riego". Ello es consecuencia de que en esta última época la concentración salina de los desagües disminuye debido a los bajos contenidos en sales de las aguas de cola de las acequias y canales de riego que vierten sus aguas directamente a los drenajes, aumentando los caudales de estos y, consecuentemente, disminuyendo la concentración salina de las aguas.

Cuadro 2.- Valores medios de Conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos Totales de la red de drenaje.

| Polígono | CE (dS m^{-1}) | | | TDS (mg L^{-1}) | | |
|------------|---------------------------|-------|------|----------------------------|-------|------|
| | No riego | Riego | Año | No riego | Riego | Año |
| Bardenas I | 3.85 | 1.42 | 2.04 | 2793 | 895 | 1382 |
| Monegros I | 3.59 | 1.30 | 1.54 | 2650 | 917 | 1102 |
| Cinca | 2.14 | 1.22 | 1.34 | 1516 | 881 | 962 |

MASA TOTAL DE SALES EXPORTADA A LA RED HIDROGRAFICA DEL EBRO

La estimación de la masa de sales que aporta la red de drenaje de los tres polígonos estudiados a las aguas superficiales de la cuenca del Ebro ha sido calculada con los datos de caudal (Q) y concentración salina, caracterizada por los "Sólidos Disueltos Totales" (TDS), de los principales desagües de los polígonos.

Los muestreos se distribuyen en dos períodos: "riego" (abril-septiembre) y "no riego" (octubre-marzo). Esto obedece no solo a los distintos caudales en cada época sino también a una variación en la concentración salina e incluso en la composición iónica de las aguas de drenaje.

Los resultados para ambos períodos así como para el año hidráulico completo se presentan en los Cuadros 3, 4 y 5 para cada uno de los polígonos en estudio.

De entre todos los desagües pueden separarse un pequeño número que supone una considerable masa de sales. Estos desagües son: C-2, C-4, C-6, C-30, C-31 y C-32 en Bardenas I; D-V y D en Monegros I y, en el Cinca, el Barranco de La Clamor, correspondiendo todos a sectores con presencia de suelos salinos y/o sódicos.

Cuadro 3.- Aporte salino de la red de drenaje del polígono Bardenas I

| Desagüe | Toneladas de Sales | | |
|----------|--------------------|----------------|-------------------------|
| | EPOCA DE NO RIEGO | EPOCA DE RIEGO | AÑO HIDROLOGICO 1987-88 |
| C-1 | 120 | 75 | 194 |
| C-2A | 3.002 | - | - |
| C-2B | 30.280 | 12.006 | 42.287 |
| C-3 | 2.419 | 4.087 | 6.506 |
| C-4A | 1.680 | - | - |
| C-4B | 24.785 | 5.685 | 30.470 |
| C-5 | 1.316 | 1.603 | 2.920 |
| C-6A | 4.146 | - | - |
| C-6B | 32.420 | 24.523 | 56.944 |
| C-8 | 75 | 1.080 | 1.155 |
| C-9 | 2.766 | 2.442 | 5.208 |
| C-10 | 210 | - | - |
| C-11 | 423 | 884 | 1.307 |
| C-12 | 7.149 | 5.232 | 12.381 |
| C-13 | 4.172 | 4.196 | 8.368 |
| C-14 | 1.771 | 5.380 | 7.152 |
| C-15 | 11 | 654 | 665 |
| C-18 | 1.897 | 643 | 2.540 |
| C-19 | 195 | 1.045 | 1.240 |
| C-20 | 865 | - | - |
| C-21 | 1.108 | 954 | 2.062 |
| C-22 | 4.123 | 2.209 | 6.331 |
| C-23 | 5.262 | 2.312 | 7.574 |
| D-XIII-1 | 11.792 | 6.010 | 17.802 |
| C-24 | 447 | 801 | 1.249 |
| C-25 | - | 3.922 | - |
| D-XXI-4 | 221 | 904 | 1.125 |
| C-26 | 26 | 27 | 53 |
| C-27 | 1.931 | 5.100 | 7.031 |
| C-28 | 1.076 | 11.139 | 12.214 |
| C-29 | 61 | 2.580 | 2.641 |
| C-30 | 16.980 | 20.835 | 37.815 |
| C-31 | 7.019 | 18.455 | 25.475 |
| C-32 | 2.271 | 20.200 | 22.471 |
| C-35 | 1.326 | 170 | 1.496 |

Un caso especial puede constituirlo el desagüe C-12 (Bardenas I), con una elevada masa de sales que no se ve justificada por los tipos de suelos presentes. El elevado consumo de agua de riego en este sector (12.365,79 m³/ha), muy superior a la media del polígono (9.031,03 m³/ha), de acuerdo con datos de Confederación Hidrográfica del Ebro para la campaña de riego de los años 1986-87, podría ser la causa de esta aparente anomalía, concordando con las observaciones de Oster y Tanji (1985), según los cuales un "exceso" en el agua de riego aplicada se traduce en caudales elevados y, consecuentemente, en una mayor cantidad de sales exportadas hacia los ríos. También podrían ser causa de la elevada masa de sales exportada por este desagüe, aportes salinos provenientes de las laderas saso-valle erosionadas en el tramo final del desagüe.

Basándose en los datos de los Cuadros 3, 4 y 5 se ha confeccionado un cuadro-resumen (Cuadro 6) que presenta la masa total de sales exportada por los polígonos tratados, desglosada para época de "no riego", "riego" y anual, y en el que se indican los ríos receptores de los aportes salinos.

Para ver la importancia relativa de estos aportes salinos en

el contexto de la Cuenca se ha realizado un balance de sales durante el año hidrológico 1987-88 en las estaciones de los ríos situadas aguas abajo de estos polígonos de riego. Para ello se han

Cuadro 4.- Aporte salino red de drenaje, polígono Monegros I.

| Desagüe | Toneladas de Sales | | |
|---------|--------------------|----------------|-------------------------|
| | EPOCA DE NO RIEGO | EPOCA DE RIEGO | AÑO HIDROLOGICO 1987-88 |
| D-V | 11.719 | 30.507 | 42.227 |
| D-V-18 | 897 | 7.614 | 8.510 |
| D-T | 3.111 | 7.396 | 10.507 |
| D-T-3 | 98 | 6.490 | 6.588 |
| D-8 | 914 | 620 | 1.534 |
| D-10 | 903 | 2.858 | 3.761 |
| C-2 | 1.402 | 216 | 1.618 |
| C-3 | 245 | 304 | 549 |
| C-5 | 396 | 2.145 | 2.541 |
| C-6 | 1.159 | 1.009 | 2.168 |
| C-7B | 456 | 772 | 1.227 |
| C-7A | 267 | 559 | 825 |
| C-8 | 182 | 376 | 558 |
| C-9B | 2.821 | 6.017 | 8.838 |
| C-10 | 2.255 | 3.336 | 5.591 |
| D-20 | 1.040 | 4.757 | 5.797 |
| D | 9.915 | 27.929 | 37.844 |
| D-34 | 4.926 | 5.761 | 10.687 |
| D-36 | 1.979 | 7.367 | 9.346 |
| D-46 | 147 | 4.701 | 4.848 |
| D-50 | 437 | 2.972 | 3.410 |
| D-62 | 1.456 | 8.461 | 9.917 |
| D-78 | 2.517 | 13.294 | 15.811 |
| D-80 | 2.229 | 14.980 | 17.209 |
| D-80-1 | 1.339 | 1.714 | 3.053 |
| D-88 | 489 | 1.613 | 2.101 |
| D-92 | 2.591 | 4.247 | 6.838 |

Cuadro 5.- Aporte salino red de drenaje, polígono de riego Cinca.

| Desagüe | Toneladas de Sales | | |
|------------------|--------------------|----------------|-------------------------|
| | EPOCA DE NO RIEGO | EPOCA DE RIEGO | AÑO HIDROLOGICO 1987-88 |
| Bco. Carneario | 729 | 2.725 | 3.453 |
| Bco. Hospital | 59 | 481 | 540 |
| D-XXIV-2 | 117 | 421 | 538 |
| Bco. Valdemoras | 134 | 2.117 | 2.251 |
| D-XXI-XXII-9 | 426 | 2.702 | 3.128 |
| Clamor Vieja (B) | 1.160 | 8.100 | 9.260 |
| D.C-XVII-XVIII | 8 | 268 | 276 |
| D.C-XVIII-XIX | 119 | 584 | 703 |
| D.C-XVI-XVII | 843 | 406 | 1.249 |
| D.C-XV-XVI | 21 | 9 | 30 |
| La Clamor (B) | 9.252 | 25.367 | 34.619 |
| D.C-IX-19-IX-29 | 1.916 | 2.289 | 4.205 |
| D.C-XIII-XIV | 783 | 1.607 | 2.391 |
| D.C-XII-XIII | 7 | - | - |
| D.C-VIII-IX-19 | 1.460 | 1.263 | 2.723 |
| D.C-XI-XII | 78 | 347 | 425 |
| D-XII-4 | - | 218 | - |
| D.C-X-XI | - | 2.223 | - |
| D-VI-8 | 348 | 1.890 | 2.238 |
| D.C-V-VI | 2.478 | 2.768 | 5.245 |
| D.C-III-IV | 74 | 173 | 246 |
| Bco. Ariño | 54 | 1.722 | 1.776 |

utilizado los caudales medios mensuales (m^3s^{-1}) del año hidrológico 1987-88 dados por Confederación Hidrográfica del Ebro en cada una de las estaciones. La salinidad se ha estimado utilizando el caudal medio mensual y las ecuaciones de regresión caudal-CE (Quilez, comunicación personal) y CE-TDS (Aragües et al., 1986b) presentados en el Cuadro 7. La información de base utilizada para obtener las ecuaciones de regresión caudal-concentración ha sido la publicada por el M.O.P.U. en sus libros de calidad de aguas. Los datos utilizados en las de Q-CE corresponden a los años hidrológicos 1972 a 1987, excepto en la estación del Arba en Gallur en que se utilizaron datos a partir de 1972. Por otro lado, los datos para obtener las ecuaciones de regresión entre TDS y CE corresponden a los años hidrológicos 1974 a 1982, excepto, también, en la estación del Arba en Gallur en que se utilizaron datos a partir de 1972.

La masa de sales que transporta el río Cinca en Fraga ha sido imposible de estimar porque hasta el momento no habían sido calculados los datos de caudal medio mensual del río. Con respecto a la estación del Gállego en Zaragoza presenta el problema de las detracciones de aguas por las acequias.

A partir de estos datos ha sido posible estimar la contribución a la salinización de los ríos Aragón y Arba, y en última instancia, del río Ebro, de la red de drenaje del polígono Bardenas I (Cuadro 8).

Cuadro 6.- Masa total de sales exportada por los polígonos Bardenas I, Monegros I y Cinca en el año hidrológico 1987-88.

| Polígono | Río receptor | T o n e l a d a s | | |
|------------|--------------|-------------------|---------|---------|
| | | NO RIEGO | RIEGO | ANUAL |
| Bardenas I | Aragón | 51.771 | 23.657 | 75.428 |
| | Riguel/Arba | 74.567 | 100.211 | 174.778 |
| | Ebro | 2.271 | 20.200 | 22.471 |
| | | 128.609 | 144.068 | 272.677 |
| Monegros I | Gállego | 11.719 | 30.507 | 42.226 |
| | Flumen | 24.857 | 83.994 | 108.801 |
| | | 36.576 | 114.451 | 151.027 |
| Cinca | Cinca | 14.788 | 45.256 | 60.044 |
| | Alcanadre | 905 | 3.626 | 4.531 |
| | | 15.693 | 48.882 | 64.575 |

Se observa que la participación en el proceso de contaminación salina de la red de drenaje que vierte sus aguas hacia el río Arba es mayor que la que fluye hacia el río Aragón. Ello se debe fundamentalmente a la mayor extensión de áreas con suelos salinos y/o sódicos en la cuenca de recepción del río Arba.

Cuadro 7.- Ecuaciones de regresión CE (dS m⁻¹) - Q (m³ s⁻¹) y ecuaciones de regresión TDS (mg L⁻¹) - CE (dS m⁻¹) de las estaciones del Aragón en Caparroso, Arba en Gallur y Ebro en Tortosa.

| Río/Estación | Regresión Q-CE | Regresión CE-TDS |
|-----------------------|--|------------------------|
| Aragón/ /Caparroso | CE = 0.57531026 * Q ^{-0.11511513} | TDS = 7.505 + 510 CE |
| Arba/Gallur | CE = 3.69869435 * Q ^{-0.36943355} | TDS = -66.886 + 644 CE |
| Ebro/Tortosa | CE = 2.07802079 * Q ^{-0.15696335} | TDS = 70.347 + 515 CE |

Se ha calculado la masa de sales transportada por el Ebro en Tortosa en el año hidrológico 1987-88 en el que se ha evidenciado una aportación de 8,2 millones de toneladas de sales, así como la masa total de sales exportada en el mismo año por la red de drenaje de los polígonos estudiados, que asciende a 488.279 toneladas. Este valor implica que la contribución anual de estos polígonos a la salinización de las aguas superficiales de la cuenca es del orden de un 5,9%, valor que hay que tomar como una aproximación, ya que el presente estudio ha tenido en cuenta datos puntuales y de un único año hidrológico.

Cuadro 8.- Contribución de la red de drenaje del polígono de riego Bardenas I a la salinización de los ríos Aragón y Arba.

| Río/Estación | Toneladas de Sales/Año | | % |
|------------------|------------------------|----------------|------|
| | Río | Red de drenaje | |
| Aragón/Caparroso | 370.179 | 75.428 | 20,3 |
| Arba/Gallur | 353.035 | 174.778 | 49,5 |

APORTES SALINOS POR UNIDAD DE SUPERFICIE DE RIEGO

Los Cuadros 9, 10 y 11 presentan el aporte de sales por unidad de superficie de riego para los períodos de "no riego", "riego" y anual para los tres polígonos estudiados.

De los mismos puede concluirse que para la mayoría de los desagües de los tres polígonos, los aportes salinos por superficie regada o regable son mayores en época de "riego" que en época de "no riego", con la excepción de los aportes correspondientes a los desagües que drenan hacia el río Aragón (Bardenas I). Para explicar lo que ocurre en este sector del polígono de Bardenas I, habría que profundizar en todas las circunstancias locales que han concurrido en la época de riego del año del estudio (cantidad de agua de riego aplicada, anomalías pluviométricas, etc.), así como tener en cuenta el uso del suelo en la cuenca de recepción de

cada desagüe, distinguiendo dos grandes grupos: cultivos de cereales con riego de primavera y cultivos de verano con riego de abril a septiembre.

En Monegros I y en el Cinca los aportes salinos por unidad de superficie regable en período de "riego" son 3,1 veces mayores que en período de "no riego", mientras que en Bardenas I son solo 1,1 vez mayor. En la estación de "riego" el aporte medio de sales por ha regada o regable varía desde 3,04 t/ha en Bardenas I hasta las 1,37 t/ha en el Cinca, quedando el polígono de Monegros I en posición intermedia con un valor de 2,17 t/ha.

Los desagües que drenan áreas con presencia de yesos figuran entre los que más sales aportan por unidad de superficie regada o regable. Es el caso de los desagües D-XIII-1 y C-32 (Bardenas I); D-V, D-V-18, D-T-3 (polígono de La Violada-Monegros I); y el D.C-V-VI y D-VI-8 (Cinca).

Cuadro 9.- Aporte de sales por unidad de superficie de riego en el polígono Bardenas I.

| Desagüe | Toneladas de sales/ha regada | | |
|----------|------------------------------|----------------|-------------------------|
| | EPOCA DE NO RIEGO | EPOCA DE RIEGO | AÑO HIDROLOGICO 1987-88 |
| C-1 | 0.11 | 0.07 | 0.18 |
| C-28 | 3.81 | 1.51 | 5.32 |
| C-3 | 2.24 | 3.78 | 6.02 |
| C-4B | 5.03 | 1.15 | 6.18 |
| C-5 | 1.16 | 1.41 | 2.57 |
| C-18 | 1.63 | 0.55 | 2.18 |
| C-20 | 3.57 | - | - |
| C-19 | 0.24 | 1.29 | 1.53 |
| C-22 | 3.22 | 1.73 | 4.95 |
| C-23 | 5.50 | 2.42 | 7.92 |
| D-XIII-1 | 9.17 | 4.67 | 13.84 |
| C-35 | 1.64 | 0.21 | 1.85 |
| C-8 | 0.11 | 1.55 | 1.66 |
| C-24 | 1.49 | 2.66 | 4.15 |
| C-9 | 3.05 | 2.70 | 5.75 |
| C-25 | - | 3.03 | - |
| C-68 | 2.88 | 2.18 | 5.06 |
| C-11 | 1.03 | 2.14 | 3.17 |
| C-12 | 6.35 | 4.64 | 10.99 |
| C-13 | 2.35 | 2.36 | 4.71 |
| C-14 | 0.82 | 2.49 | 3.31 |
| C-15 | 0.02 | 0.97 | 0.99 |
| C-21 | 0.34 | 0.29 | 0.63 |
| C-26 | 0.05 | 0.06 | 0.11 |
| D-XXI-4 | 0.24 | 0.99 | 1.23 |
| C-27 | 2.05 | 5.42 | 7.47 |
| C-28 | 7.73 | 80.08 | 87.81 |
| C-29 | 0.09 | 4.06 | 4.15 |
| C-30 | 22.65 | 27.79 | 50.44 |
| C-31 | 6.52 | 17.15 | 23.67 |
| C-32 | 3.91 | 34.80 | 38.71 |
| | X=2.71 | X=3.04 | X=5.75 |

De entre todos los desagües, el C-28 (Bardenas I) destaca por un aporte anual de casi 88 toneladas de sales por ha regada. Esta cifra tan elevada puede ser explicada por la presencia de suelos salinos en la cuenca del desagüe y por una contribución de aguas de escorrentía salinas procedentes de la plataforma calcárea de La

Plana de La Negra, cuya superficie no se incluye en la cuenca del desagüe, aun cuando su extensión es apreciable.

Cuadro 10.- Aportes de sales por unidad de superficie de riego en el polígono Monegros I.

| Desagüe | Toneladas de sales/ha regable | | |
|---------|-------------------------------|----------------|-------------------------|
| | EPOCA DE NO RIEGO | EPOCA DE RIEGO | AÑO HIDROLOGICO 1987-88 |
| D-V | 3.26 | 8.49 | 11.75 |
| D-V-18 | 1.68 | 14.30 | 15.98 |
| D-T-3 | 0.22 | 14.38 | 14.60 |
| D-T | - | 5.71 | - |
| D-8 | 3.79 | 2.57 | 6.36 |
| D-10 | 2.00 | 6.33 | 8.33 |
| D-20 | 1.04 | 4.77 | 5.81 |
| D-34 | 3.46 | 4.05 | 7.51 |
| D-36 | 2.34 | 8.70 | 11.04 |
| D | 1.39 | 3.93 | 5.32 |
| D-46 | 0.08 | 2.59 | 2.67 |
| D-50 | 0.28 | 1.93 | 2.21 |
| D-62 | 0.97 | 5.66 | 6.63 |
| D-78 | 0.57 | 3.01 | 3.58 |
| D-BG-1 | 1.35 | 1.73 | 3.08 |
| D-80 | 1.00 | 6.73 | 7.73 |
| D-88 | 0.56 | 1.84 | 2.40 |
| D 92 | 1.35 | 2.20 | 3.55 |
| C-2 | 0.36 | 0.06 | 0.42 |
| C-3 | 0.30 | 0.37 | 0.67 |
| C-5 | 0.24 | 1.31 | 1.55 |
| C-6 | 0.64 | 0.55 | 1.19 |
| C-78 | 0.22 | 0.37 | 0.59 |
| C-8 | 0.43 | 0.88 | 1.31 |
| C-98 | 0.62 | 1.33 | 1.95 |
| C-10 | 0.72 | 1.06 | 1.78 |
| | x=0.69 | x=2.17 | x=2.86 |

Finalmente, el valor medio del aporte anual de sales para el polígono de riego de "La Violada" (primer tramo del Canal de Monegros) encontrado en este trabajo, 11.75 t sal/ha es inferior a las 18 t sal/ha de riego obtenidas por Aragües et al. (1986a), si bien estos autores efectuaron un seguimiento mucho más detallado que el realizado en el presente estudio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar sus más sinceros agradecimientos a las valiosas sugerencias y consejos facilitados por el Dr. Ramón Aragües y Dolores Quílez, ambos del Departamento de Suelos y Riegos del S.I.A./D.G.A. y a todo el personal del Departamento de Edafología de la E.E.de Aula Dei.

Cuadro 11.- Aporte de sales por unidad de superficie de riego en el polígono Cinca.

| Desagüe | Toneladas de sales/ha regable | | |
|------------------|-------------------------------|----------------|-------------------------|
| | EPOCA DE NO RIEGO | EPOCA DE RIEGO | AÑO HIDROLÓGICO 1987-88 |
| Bco. Carnerario | 0.37 | 1.39 | 1.76 |
| Bco. Hospital | 0.09 | 0.76 | 0.85 |
| D-XXIV-2 | 0.18 | 0.66 | 0.84 |
| Bco. Valdenoras | 0.18 | 2.83 | 3.01 |
| Clamor Vieja (8) | 0.21 | 1.44 | 1.65 |
| D.C-XVII-XVIII | 0.01 | 0.29 | 0.30 |
| D.C-XVIII-XIX | 0.07 | 0.32 | 0.39 |
| D.C-XVI-XVII | 0.46 | 0.22 | 0.68 |
| D.C-XV-XVI | 0.02 | 0.01 | 0.03 |
| La Clamor (8) | 0.57 | 1.55 | 2.12 |
| D.C-IX-19-IX-29 | 1.60 | 1.92 | 3.52 |
| D.C-XIII-XIV | 0.45 | 0.92 | 1.37 |
| D.C-XII-XIII | 0.01 | - | - |
| D.C-VIII-IX-19 | 0.75 | 0.65 | 1.40 |
| D.C-XI-XII | 0.12 | 0.52 | 0.64 |
| D-XII-4 | - | 0.26 | - |
| D.C-X-XI | - | 1.94 | - |
| D-VI-8 | 0.58 | 3.15 | 3.73 |
| D.C-V-VI | 6.58 | 7.36 | 13.94 |
| D.C-III-IV | 0.16 | 0.38 | 0.54 |
| Bco. Ariño | 0.18 | 5.74 | 5.92 |
| | X=0.44 | X=1.37 | X=1.81 |

RESUMEN

Los retornos salinos de los regadíos de la cuenca del Ebro son una de las causas que contribuyen a la salinización de los ríos de la misma.

Se ha cuantificado la masa total de sales exportada a los ríos receptores de la red de drenaje de los polígonos de Bardenas I, Monegros I y Cinca, a partir del producto del caudal de los desagües por su concentración salina, expresada por los "Sólidos Disueltos Totales".

La red de drenaje de Bardenas I ha sido la que más aporta sales a las aguas superficiales, tanto en términos globales (273.000 toneladas de sales en el año hidraulico 1987-88) como en términos relativos (media de 6 toneladas de sales por ha regada).

En conjunto los tres polígonos de riego aportaron para el año hidrológico de 1987-88, 488.279 toneladas de sales, lo que corresponde a un 5,9% de la masa total de sales transportada por el Ebro en Tortosa.

REFERENCIAS

- Alberto, F.; R. Aragüés y D. Quílez. (1986). Balance de sales de la cuenca del Ebro. En: El Sistema Integrado del Ebro. Estudio interdisciplinar. ISBN: 84-398-7293-3: 279-291.
- Aragüés, R.; F. Alberto; J. Faci; J. Machín; J.L. Arrúe; K.K. Tanji y D. Quílez. (1986a). Calibración del modelo conceptual hidrosalino en el polígono piloto de riego. En: El Sistema

- Integrado del Ebro. Estudio Interdisciplinar. ISBN: 84-398-7293-3: 311-317.
- Aragüés, R.; F. Alberto y D. Quílez. (1986b). Relaciones entre los parámetros químicos de las aguas superficiales en la cuenca del Ebro. En: El Sistema Integrado del Ebro. Estudio Interdisciplinar. ISBN: 84-398-7293-3: 253-277.
- Basso, L.A. (1989). La contribución de los efluentes de riego de los polígonos Bardenas I, Monegros I y Cinca a la salinización de las aguas superficiales de la cuenca del Ebro. Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza. Tesis de Master. 197 pp.
- Custodio, E. y Llamas, M.R. (1976). Hidrología subterránea. 2 tomos, Omega, 1ª ed., Barcelona. 2359 pp.
- Fairchild, W.D. (1983). Drainage and salinity control programs in Pakistan. En: French, R.H. (Ed.). Salinity in watercourses and reservoirs. Butterworth Publishers, Boston. pp. 43-52.
- Oster, J.D. y K.K. Tanji. (1985). Chemical reactions within root zone of arid zone soils. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 111 (3): 207-217.
- Shaw, E.M. (1983). Hidrology in Practice. Van Nostrand Reinhold (UK) Co. Ltd., 569 pp.
- Sheperd, K.J. (1981). South Australia's approach to salinity management in the river Murray. En: Holmes, J.W. y T. Talsma (Eds.). Land and stream salinity. Elsevier, Amsterdam. pp. 335-352.
- U.S.D.I. (1983). Colorado river water quality improvement program. Status report, U.S.D.I., Bureau of reclamation. 126 pp.