

**La participación de los yesos en la salinización de las aguas  
superficiales de la cuenca del Ebro.  
II. Contribución relativa de los iones  $\text{SO}_4^{--}$  y  $\text{Ca}^{++}$  a la salinidad**

Por F. ALBERTO y A. NAVAS

Estación Experimental de Aula Dei, ZARAGOZA

Recibido el 12-IX-1986

**A B S T R A C T**

Alberto, F. y A. Navas. The role of gypsum in the salinization of surface waters in the river Ebro basin. II. Relative contribution of  $\text{SO}_4^{--}$  and  $\text{Ca}^{++}$  ions. *An. Aula Dei* 18 (1-2): 19-29.

Based on the data analysis of 48 monitoring sites in the water-quality network of the Ebro River basin, the high correlation coefficients found between electrical conductivity of water and the concentrations of  $\text{SO}_4^{--}$  ( $r = 0.741$ ) and  $\text{Ca}^{++}$  ( $r = 0.787$ ) and regression coefficients about 5 in both cases, show how these two ions along with  $\text{Cl}^-$  and  $\text{Na}^+$  are the major components of water salinity.

When considering the entire basin some inconsistencies can be detected between the areas occupied by gypsiferous lithofacies and the values for the salinity of water in their respective watersheds; however the relationship improves clearly when using the cartographic synthesis made in a previous work instead of older mappings of gypsiferous formations.

The low correlation observed between  $\text{Cl}^-$  and  $\text{SO}_4^{--}$  and  $\text{Na}^+$  and  $\text{Ca}^{++}$  ions indicates the different proportion between gypsum and halite in the watersheds studied and/or their different accessibility to the mechanisms to reach the running waters.

**I N T R O D U C C I O N**

Entre las fuentes naturales de sales que contribuyen a la salinización de las aguas de la Cuenca del Ebro el papel de los yesos merece una consideración especial.

Siendo la solubilidad del yeso en agua de aproximadamente  $2.61 \text{ g.L}^{-1}$  y habida cuenta de la gran extensión ocupada por las litofacies yesíferas (22% de la superficie total), es inmediato suponer que su participación en la salinidad de las aguas será de cierta importancia.

La incidencia de altas concentraciones de  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{SO}_4^{--}$  sobre la calidad de las aguas tiene importantes implicaciones a nivel sanitario (potabilidad), doméstico e industrial (corrosiones, necesidad de utilización de ablandantes, etc.). En el caso del uso agrícola, los problemas son de menor trascendencia económica, salvo los derivados de la obturación de aspersores y goteros, o de

CUADRO 1 - Valores de CE ( $dS m^{-1}$ ) y composición iónica media ( $meq L^{-1}$ ) de las aguas de las estaciones de muestreo -con un número de pares de valores superior a 10 en 1980- de la red COCA en la Cuenca del Ebro.

LOCALIZACION			nº de	CE 25	Cloruros	Sulfatos	Bicarbonatos	Calcio	Magnesio	Sodio
RIO	ESTACION	Nº	pares de valores	$dSm^{-1} \cdot 10^{-3}$	$meq L^{-1}$	$meq L^{-1}$	$meq L^{-1}$	$meq L^{-1}$	$meq L^{-1}$	$meq L^{-1}$
Ebro	Miranda	1	16	397,8	0,74	1,10	1,23	2,89	0,71	0,68
Ebro	Castejón	2	16	744,37	2,52	2,91	1,57	4,18	1,20	3,16
Ega	Andosilla	3	16	1561	5,04	3,9	2,27	6,36	1,58	5,62
Arga	Peralta	4	16	1847	7,6	1,77	1,7	4,34	2,67	7,49
Aragón	Caparroso	5	16	359,3	0,79	0,79	1,39	2,6	0,83	0,80
Jalón	Huermeda	9	16	1077,16	2,51	6,27	2,13	6,94	3,67	2,56
Ebro	Zaragoza	11	16	989,2	3,75	3,86	1,73	4,83	1,83	3,46
Martín	Híjar	14	10	2076,1	2,79	20,7	1,77	16,23	6,26	1,94
Guadalupe	Alcañiz	15	16	847,2	0,90	6,35	1,75	7,2	2,8	0,58
Cinca	Fraga	17	16	792,30	2,75	3,31	1,49	3,78	1,72	3,63
Aragón	Jaca	18	16	230,8	0,135	0,204	1,17	2,22	0,49	0,11
Valira	Seo de Urgel	22	10	155,7	0,19	0,30	0,71	1,46	1,76	0,24
Segre	Lérida	24	10	581,8	0,95	2,90	1,40	4,1	1,36	1,33
Segre	Serós	25	16	646,38	1,24	3,18	1,39	4,34	1,53	1,65
Ebro	Tortosa	27	16	867,5	2,90	3,84	1,51	4,95	1,70	3,29
Iregua	Islallana	36	10	254,9	0,266	1,04	0,89	2,43	0,411	0,25
Najerilla	Torremontaño	38	10	329,5	0,34	1,58	1,21	3,30	0,83	0,28
Jiloca	Calamocha	42	16	871,07	1,42	5,16	2,11	7,25	2,57	1,04
Arba	Gallur	60	12	1360,4	6,69	3,98	2,3	4,3	3,32	7,10
Arga	Echauri	69	16	673,1	3,31	0,90	1,61	3,42	1,17	2,93
Ega	Estella	71	10	688,5	2,08	1,41	2,34	5,47	0,90	1,69
Zadorra	Arce	74	16	503,49	0,73	1,14	1,84	3,81	1,04	0,71
Jalón	Grisen	87	12	990,91	2,59	4,53	1,90	6,17	2,53	2,67
Gallego	Zaragoza	89	12	1883,9	9,1	6,39	2,73	8,59	2,67	12,29
Nela	Trespaderne	92	10	395,2	0,85	0,68	1,39	2,96	0,58	0,77
Oca	Oña	93	10	842,6	1,80	4,58	2,11	7,15	1,74	1,91
Segre	Balaguer	96	16	573,2	1,15	3,08	1,3	4,20	1,21	1,924
Noguera R.	Piñana	97	16	383,3	0,68	1,69	1,06	2,94	0,78	0,716
Aragón	Yesa	101	16	286,8	0,31	0,38	1,43	2,39	0,65	0,27
Huerva	Mezalocha	105	10	500,3	0,7	1,87	1,58	3,64	1,77	0,59
Ebro	Sástago	112	16	1176,6	4,57	5,10	1,78	6,21	2,23	5,23
Segre	Pons	114	10	314,6	0,436	0,914	1,06	2,6	0,530	0,436
Ebro	Mendavia	120	32	660,53	2,0	2,09	1,44	4,08	0,96	2,41
Ebro	Flix	121	16	799,14	2,63	3,52	1,53	4,58	1,62	3,03
Gallego	Anzánigo	123	16	244,6	0,274	0,532	1,304	2,061	0,596	0,236
Ebro	Palazuelos	161	12	346,5	0,62	1,13	1,27	2,98	0,56	0,60
Ebro	Pignatelli	162	10	743,4	2,52	2,06	1,60	4,21	1,12	2,71
Bayas	Miranda	165	12	498,4	0,60	1,28	1,63	4,20	0,78	0,84
Jerea	Palazuelos	166	10	387,4	0,30	0,56	1,83	3,65	0,72	0,25
Noguera R.	Camarasa	169	10	244,5	0,422	0,695	0,811	1,985	0,300	0,371
Zadorra	Vitoria	179	12	539,9	0,99	1,22	1,88	4,06	0,59	1,13
Ebro	Conchas de H.	208	10	443,8	0,82	1,26	1,37	3,20	0,62	1,01
Gallego	Zuera	209	10	1894,5	9,35	6,75	1,38	6,84	2,57	10,78
Ebro	Ribarroja	210	10	807,4	2,46	3,27	1,48	4,54	1,49	2,88
Ebro	Presa Pina	211	12	1082,08	3,96	4,12	1,83	5,71	1,74	4,09
Cidacos	Calahorra	213	10	1141,9	5,28	4,56	1,51	5,32	1,67	6,31
Huerva	Zaragoza	216	12	1085,75	3,17	5,63	1,87	6,57	2,15	3,51
Cinca	Monzón	228	12	525,9	2,12	1,17	1,19	2,58	0,849	2,280

Las estaciones con 16 pares de valores corresponden al periodo 1973-80 ; con 12 pares al 1975-80 ; con 10 pares al 1976-80.

la depreciación comercial de frutos y hortalizas, debida a la aparición sobre ellos de depósitos blanquecinos cuando son regados por aspersión con aguas de altos contenidos en yeso.

La calidad química del agua, baja en el centro de la depresión, muestra una grave tendencia a degradarse como resultado de los usos del agua --urbano, industrial y agrícola-- (Alberto et al., 1983) y exige arbitrar medidas a corto, medio y largo plazo, que reduzcan esta tendencia.

Sin limitar el uso del agua, y en tanto se instauran medidas conducentes a una utilización más racional del recurso, la mejor alternativa que se ofrece para detener la tendencia actual, es la reducción de los aportes naturales de sales de las que el yeso es un componente importante.

Por ello, la cuantificación de la contribución del yeso a la salinidad y el estudio de los mecanismos por los que alcanza las aguas superficiales, constituyen un objetivo prioritario.

### Componentes mayoritarios de la salinidad de las aguas

El cuadro 1 contiene los valores medios de composición iónica de las aguas superficiales de la Cuenca del Ebro, calculados a partir de los datos recogidos en los anuarios de Calidad de Aguas de la red COCA, editados por el M.O.P.U. Del total de estaciones de muestreo allí consignadas (69), las medias corresponden a las 48 que en 1980 reunían un número de datos superior a 20.

Las rectas de regresión entre valores medios de CE y  $\text{Cl}^-$  o  $\text{Na}^+$  evidencian a través de los altos coeficientes de correlación y de regresión (próximo a 5), que ambos iones contribuyen de modo significativo a la salinidad de las aguas de la cuenca (Figura 1 y Cuadro 2).

CUADRO 2 – Ecuaciones de regresión lineal y coeficientes de correlación entre CE y  $d\text{Sm}^{-1}$  y concentración de diversos iones en  $\text{meq L}^{-1}$  de las aguas superficiales de la Cuenca del Ebro. (Datos red COCA.)

X	Y	N.º datos	r	S	a	b
CE	$\text{Cl}^-$	48	.879***		-.907	4.17
CE	$\text{Na}^+$	48	.833***		-1.062	4.66
CE	$\text{SO}_4^{=}$	48	.741***		-.781	5.00
CE	$\text{Ca}^{++}$	48	.787***		1.567	3.95
$\text{Cl}^-$	$\text{Na}^+$	48	.984***		-.147	1.16
$\text{SO}_4^{=}$	$\text{Ca}^{++}$	48	.954***		2.430	.71
$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{=}$	48	.397***		1.750	.56
$\text{Na}^+$	$\text{Ca}^{++}$	48	.400***		3.690	.36

(Significación estadística: \*\*\* = 99.99%)

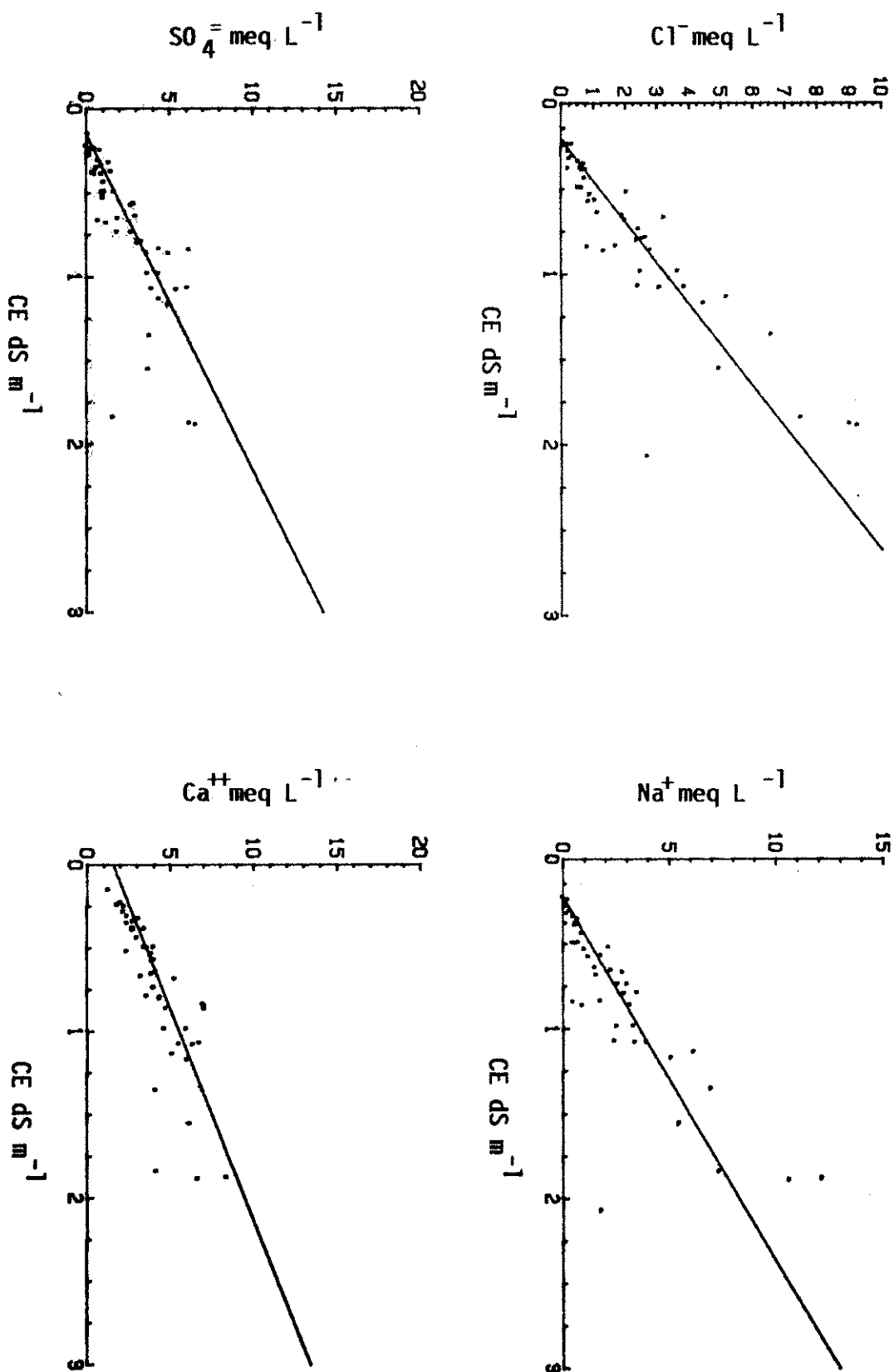


FIG. 1 - Regresiones lineales entre CE y  $\text{Cl}^{-}$  o  $\text{Na}^{+}$  y CE y  $\text{SO}_4^{2-}$  o  $\text{Ca}^{2+}$  en 48 estaciones de muestreo de la red COCA (Período 1972-80).

El alto coeficiente de correlación entre  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ , junto a que el de regresión está próximo a la unidad, evidencia que la halita es la principal fuente de ambos iones (Figura 2 y Cuadro 2).

### Participación de los iones $\text{Ca}^{++}$ y $\text{SO}_4^{--}$ en la salinidad

Siguiendo un razonamiento análogo al realizado para los iones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ , las regresiones lineales entre CE y  $\text{SO}_4^{--}$  o  $\text{Ca}^{++}$  (Figura 1, Cuadro 2) señalan la significativa contribución de ambos iones a la salinidad de las aguas superficiales de la Cuenca del Ebro.

El análisis de la recta de regresión entre  $\text{SO}_4^{--}$  y  $\text{Ca}^{++}$  muestra que en los valores más bajos la linealidad de la relación se ve alterada como consecuencia de la contribución del calcio de los bicarbonatos, y denota a través de la pendiente menor que la unidad (Cuadro 2) la existencia de aportes de sulfato de fuentes distintas del yeso, o bien la pérdida de calcio por precipitación o cambio iónico durante el transporte a través de los suelos y sedimentos. Sin embargo el alto coeficiente de correlación entre ambos iones permite asegurar una procedencia común para ambos, el yeso.

A pesar de la existencia de coeficientes de correlación altamente significativos entre CE y  $\text{Cl}^-$  o  $\text{Na}^+$  y de CE con  $\text{SO}_4^{--}$  o  $\text{Ca}^{++}$  (Cuadro 1), la correlación entre aniones  $\text{Cl}^- - \text{SO}_4^{--}$  y/o cationes  $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{++}$  (Fig. 2, Cuadro 2) presenta bajos niveles de significación; ello parece indicar que los yesos en la cuenca no aparecen en igual proporción acompañados de otras sales más solubles, hecho puesto de manifiesto por López de Azcona (1962), Pérez Mateos et al. (1962) y Collantes y Griffó (1982) para el contenido en haluros de los yesos. Pero, fundamentalmente, las razones de la falta de paralelismo y proporcionalidad en el proceso de incorporación a las aguas de los iones correspondientes, habría que buscarla en la existencia de diferencias en la proporción relativa de yeso y halita en las respectivas cuencas, en su distinta accesibilidad a los mecanismos de incorporación a las aguas, y en el diferente comportamiento de ambas sales, especialmente por sus distintos productos de solubilidad, que pueden dar lugar a que en determinadas condiciones (ciclos sucesivos de evaporación y disolución) se produzcan en las aguas que finalmente alcanzan los cauces superficiales concentraciones relativas de  $\text{ClNa}$  frente al  $\text{SO}_4\text{Ca}$ , aunque en origen las escorrentías fueran de igual naturaleza.

De todo ello se puede concluir que, globalmente, en la cuenca no hay una fuente importante de sulfatos ajena al yeso, ni una fuente importante de sodio y cloruros ajena a la halita. La participación relativa en la salinidad de ambos minerales difiere entre las estaciones de muestreo consideradas (Figura 2), pero en cada una de ellas, como se ha puesto de manifiesto en un análisis individual, la relación  $\text{Cl}^- - \text{SO}_4^{--}$  se mantiene constante o varía dependiendo de los condicionantes anteriormente enunciados.

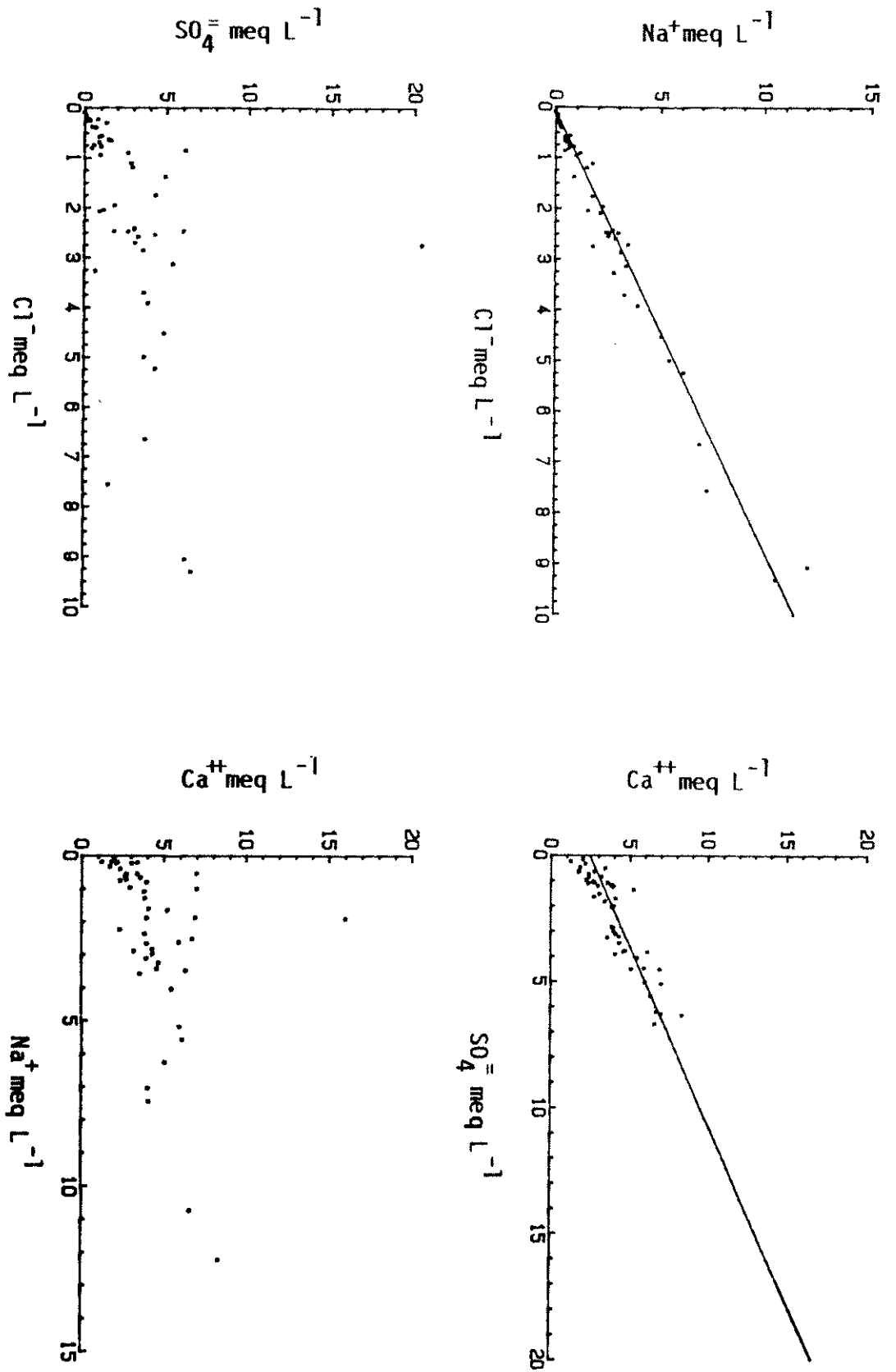


FIG. 2 - Regresiones lineales entre  $\text{Cl}^-$  -  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4 =$  -  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Cl}^-$  -  $\text{SO}_4 =$ , y  $\text{Na}^+$  -  $\text{Ca}^{++}$  en 48 estaciones de muestreo de la red COCA (Período 1972-80).

### Relación entre áreas yesíferas y niveles de salinidad en la cuenca

Para el conjunto de la cuenca y en base a estimaciones de contenidos medios de sales en diversos ríos obtenidos a partir de las correlaciones entre caudales y CE de las aguas, se han podido trazar las isolíneas de CE en  $\text{dSm}^{-1} \cdot 10^{-3}$  (Alberto et al., 1983). La superposición de este mapa de isolíneas sobre la distribución de las formaciones con yesos en la cuenca del Ebro (Figura 3) ha puesto de manifiesto que:

--- La inmensa mayoría de las formaciones con yesos aparecen enmarcadas por la isolínea de salinidad superior a  $400 \text{ dSm}^{-1} \cdot 10^{-3}$ ; únicamente quedan fuera de ella algunos afloramientos con yesos del Triásico (Facies Keuper, "Tramo rojo intermedio" del Muschelkalk y Facies Röt) y otros de litofacies detríticas con yesos diseminados del Terciario, de entre los cuales el más representativo es el de los yesos masivos del anticlinal de Tudela de Segre-Oliola-Sanahuja, situado en el límite de esta isolínea. Por lo tanto, las aguas superficiales de CE menor de  $400 \text{ dSm}^{-1} \cdot 10^{-3}$ , discurren por terrenos en los que las formaciones yesíferas son de reducida extensión superficial.

-- Entre las isolíneas de 400 a  $1000 \text{ dSm}^{-1} \cdot 10^{-3}$  se observa un progresivo incremento relativo de las áreas ocupadas por las formaciones con yesos.

Por otra parte la superposición del mapa de isolíneas de aportes salinos a la red hidrográfica por  $\text{m}^2$  y mm de precipitación (Alberto et al., 1983) sobre el mapa de la "Distribución de las Formaciones con Yesos en la Cuenca" (Navas, 1983) muestra que la inmensa mayoría de las áreas ocupadas por dichas formaciones, quedan comprendidas dentro de la isolínea de aportes salinos superiores a 100 mg por  $\text{m}^2$  de cuenca y por mm de precipitación (Fig. 4).

### Situaciones atípicas en la relación entre terrenos yesíferos y nivel salino de las aguas

Las anteriores consideraciones indican una congruencia satisfactoria para el total de la cuenca entre la presencia de yesos y la calidad de las aguas. No obstante, existen inconsistencias a nivel puntual que requerirán estudios específicos.

Algunas de estas situaciones se ponen de manifiesto al realizar una comparación sistemática de los valores de TDS (sólidos disueltos totales,  $\text{mg L}^{-1}$ ) con las superficies ocupadas por terrenos yesíferos ( $\text{km}^2$ ).

En unas áreas, la falta de coincidencia en la cartografía de base utilizada sobre la presencia o no de yesos es evidente; este hecho se ha detectado en las cuencas del Jalón, Martín, Guadalope, Matarraña y Alcanadre. En otras,

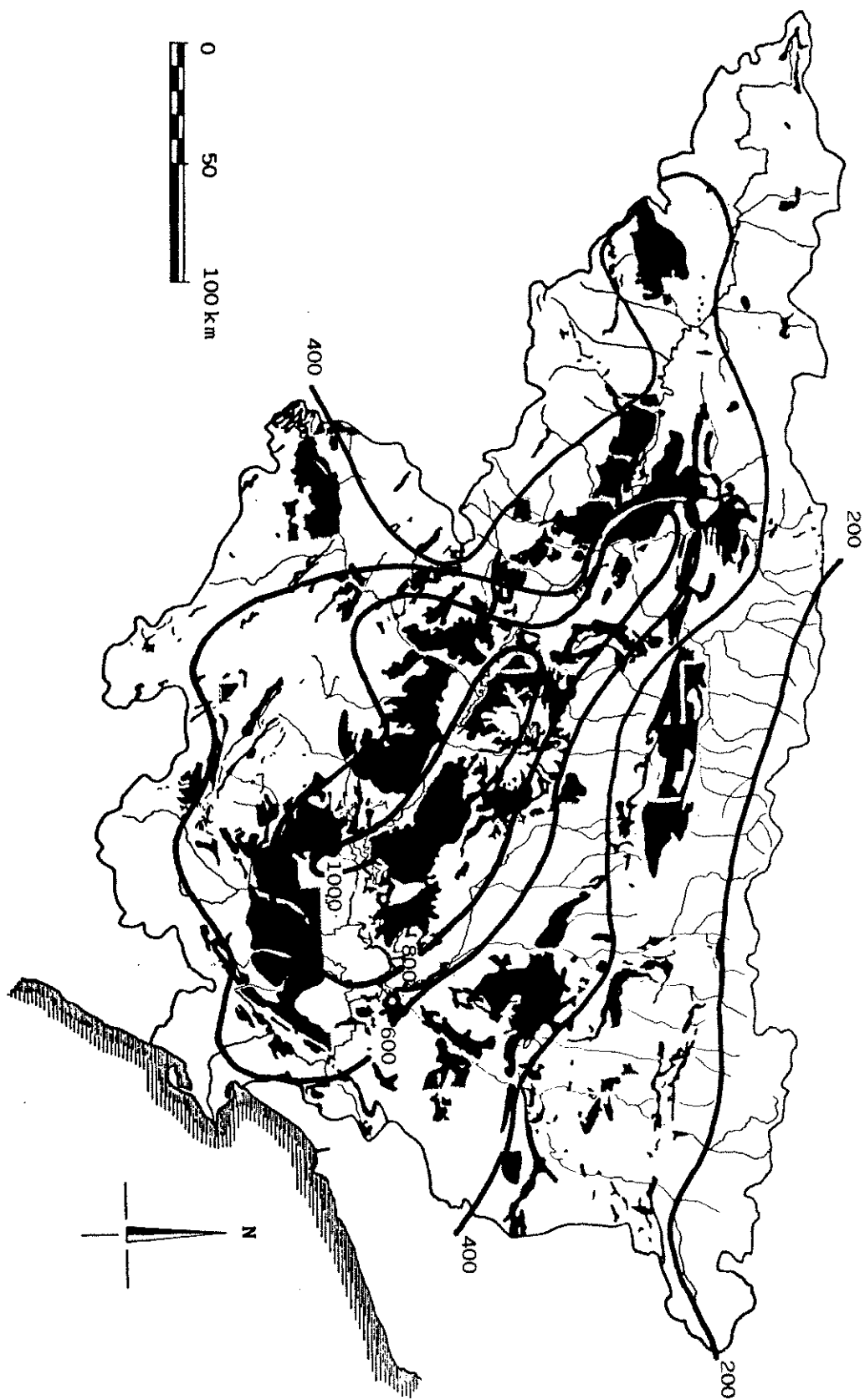


FIG. 3 - Mapa de superposición de isolíneas de  $\text{CE dSm}^{-1} \cdot 10^{-3}$  de la red hidrográfica sobre la distribución de las formaciones con yesos en la Cuenca del Ebro.



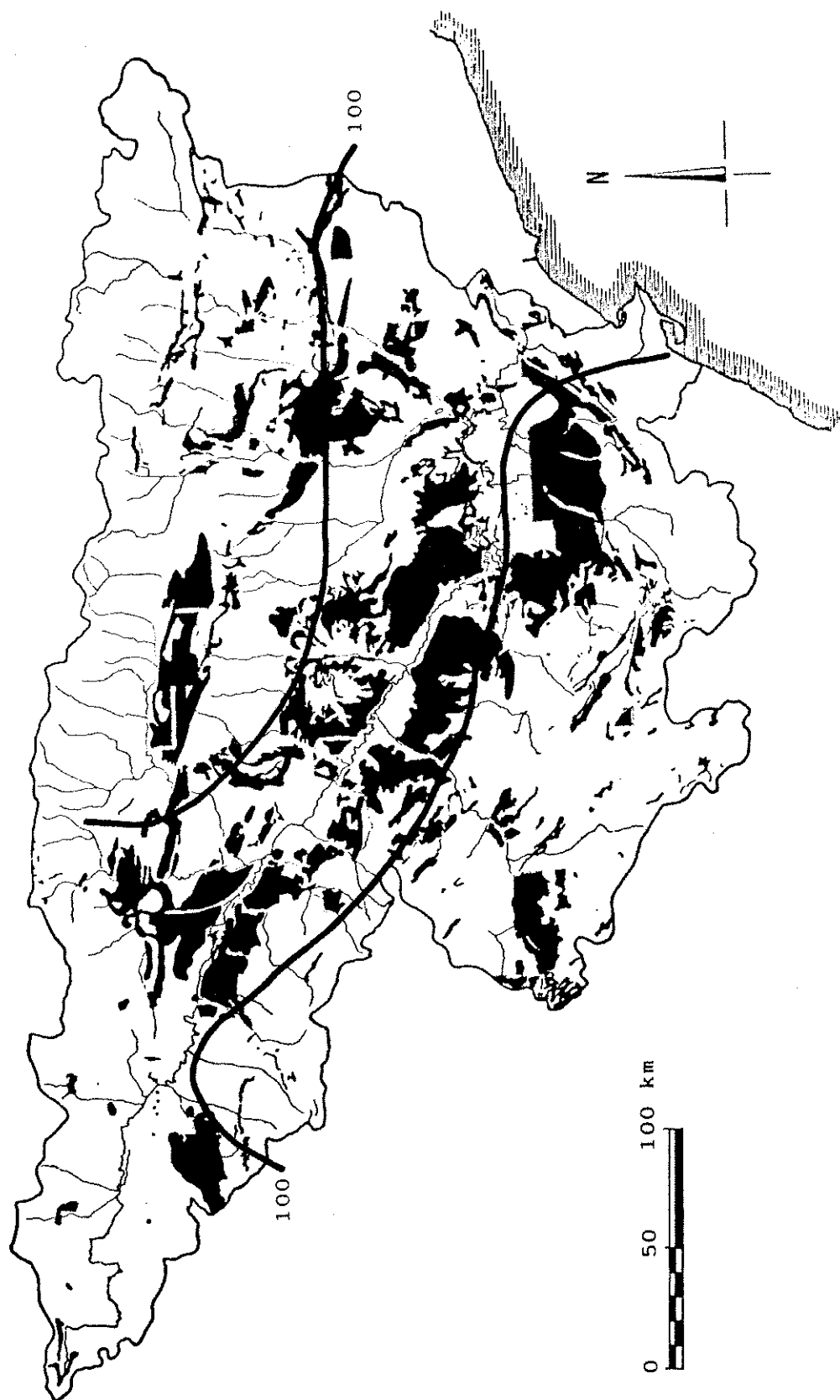


FIG. 4 – Mapa de superposición de las isolíneas de aportes salinos iguales a 100 mg por m<sup>2</sup> de cuenca y mm de precipitación sobre la distribución de las formaciones con yesos en la Cuenca del Ebro.

podiera ser que las áreas de yesos estén sobreestimadas (cabecera del Jalón, y cuencas del Martín, Guadalope y Matarraña, etc.), o bien subestimadas (cuenca del Segre aguas arriba de Pons, cuenca del Najerilla, del Alcanadre aguas arriba de Ontiñena, cuenca baja del Zadorra, etc.). Estas observaciones sugieren la necesidad de revisar la cartografía de las litofacies yesíferas con unos criterios más detallados y específicos.

### **Mecanismos de incorporación del yeso y propuesta para la reducción de aportes a las aguas circulantes**

El yeso que se incorpora a las aguas superficiales lo hace a través de numerosas vías.

La deflacción eólica (fenómeno de gran transcendencia en la Cuenca del Ebro, determinado por los fuertes vientos, la abundancia de materiales yesíferos —el 22% de la superficie—, la elevada susceptibilidad a la erosión eólica de muchos de estos materiales —limos yesíferos—, y las condiciones dominantes de aridez) pone en suspensión en la atmósfera partículas yesíferas que se redistribuyen por toda la cuenca y se incorporan a las aguas superficiales a través de la lluvia y de la precipitación seca.

Las escorrentías superficiales de los terrenos yesíferos (y de muchas áreas contaminadas por ellos), aportan en solución o suspensión (dado el frecuente carácter torrencial de las precipitaciones en el centro de la depresión) yeso disuelto o en partículas a las aguas circulantes en las que, finalmente, los yesos en suspensión acaban disolviéndose.

Los cursos fluviales se ponen en contacto en numerosos puntos del cauce con las litofacies yesíferas produciendo directamente su disolución, acción que combinada con la de otros agentes erosivos, condiciona con relativa frecuencia el desplome de grandes bloques de yeso sobre el propio cauce.

Las aguas subterráneas y subsuperficiales que atraviesan terrenos yesíferos, disuelven yeso a lo largo de su recorrido llegando a alcanzar en muchos casos la saturación.

Todos estos mecanismos de incorporación vienen influenciados por los caracteres morfo-texturales de los yesos, la estructura del depósito y la relación y naturaleza de las litologías acompañantes, junto con otros condicionantes geomorfológicos y topográficos (existencia de acuíferos, etc.), climáticos (precipitaciones totales, distribución de las mismas, etc.) y antrópicos (usos de los suelos sobre terrenos yesíferos, etc.), que en conjunto incrementan o limitan esta participación.

Además de estas contribuciones que denominaríamos directas, el yeso participa con otros iones distintos del  $\text{Ca}^{++}$  en la salinización de las aguas, a través de procesos de intercambio de su calcio por otros iones localizados en el complejo de cambio de los suelos y sedimentos por los que circulan las aguas saturadas en yeso. Este mismo mecanismo es responsable de que los aportes de sales a las aguas superficiales sean superiores a los esperados (los derivados de la solubilidad del yeso), cuando las aguas que lo contienen

circulan a través de materiales yesíferos.

Por todo ello, el establecimiento de un programa para reducir los niveles actuales de salinidad en las aguas de la Red Hidrográfica del Ebro, a través de la disminución de la participación de los yesos debería fundamentarse en la sucesión de objetivos siguiente:

- Cuantificación de la contribución relativa de los yesos a la salinización.
- Análisis de mecanismos o procesos que intervienen.
- Evaluación de la participación relativa de cada mecanismo en el aporte total de yeso.

- Finalmente, elaboración de alternativas viables, que consideren no solo la importancia relativa de la contribución de cada mecanismo y sus pautas de variación temporal, sino también la eficiencia económica de la actuación (relación costo-beneficio), que depende a su vez de la ubicación del foco salino en la cuenca y de la posibilidad técnica o socioeconómica de lograr su eliminación.

## RESUMEN

El análisis de los datos correspondientes a 48 estaciones de muestreo ubicadas en la Red Hidrográfica del Ebro señala, a través de los altos coeficientes de correlación (.741, .787) y de los coeficientes de regresión próximos a 5 entre CE ( $\text{dSm}^{-1}$ ) y  $\text{SO}_4^{--}$  o  $\text{Ca}^{++}$  ( $\text{meqL}^{-1}$ ), la alta participación que ambos iones tienen en la salinidad de las aguas superficiales, constituyendo junto a los iones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$  los componentes mayoritarios de ella.

Aun persistiendo algunas incoherencias notables, la congruencia por tramos entre superficies ocupadas por litofacies yesíferas y niveles de salinidad en las cuencas de recepción respectivas mejora, si se considera la cartografía de síntesis realizada (ver separata I) respecto de cartografías anteriores de distribución de terrenos yesíferos.

El bajo nivel de correlación existente entre  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{--}$  y entre  $\text{Na}^+$  y  $\text{Ca}^{++}$ , refleja la diferente proporción existente entre yeso y halita en las cuencas estudiadas y/o su diferente accesibilidad a los mecanismos de incorporación a las aguas.

## REFERENCIAS

- Alberto, F., J. Machín y R. Aragues. 1983. Razones y distribución espacial de la salinidad de los suelos y aguas superficiales de la Cuenca del Ebro. El Sistema Integrado del Ebro. Barcelona 1983.
- Collantes, L.P. y J.L. Griffo. 1982. Panorámica general del yeso en España. Los yesos de la Cubeta de Calatayud en la provincia de Zaragoza. *Tecniterrae*, 46: 53-63.
- López de Azcona, J.M. 1962. Estudio geoquímico de los yesos de la España Peninsular. I Coloquio Internacional sobre las Obras Públicas en los terrenos yesíferos. Comunicación 0.6-6. Servicio Geológico O.P. Madrid.
- Navas, A. 1983. Las litofacies yesíferas de la Cuenca del Ebro. Síntesis cartográfica y consideraciones sobre su papel en la planificación territorial. Tesis de Master. IAMZ, 239 pp. 2 tomos, 9 mapas.
- Pérez, J., J. Catalán y J. Alonso. 1962. Yesos en la Cubeta del Ebro. I Coloquio Internacional sobre las Obras Públicas en los terrenos yesíferos. Comunicación 0.6-9. Servicio Geológico O.P. Madrid.