

LA SALINIDAD EN EL NUEVO REGADÍO DE QUINTO (ZARAGOZA)

J. Herrero y A. Bercero

S. I. A. y S. E. A.

Diputación General de Aragón. Apartado 727. 50080 Zaragoza

RESUMEN

La puesta en marcha del nuevo regadío de Quinto (Zaragoza) brindó la oportunidad de estudiar su salinidad inicial. Los muestreos indican que tanto en suelos como en freáticos y efluentes hay saturación de calcio y abundancia de sulfato y magnesio. Los elevados contenidos de yeso reducen la utilidad del extracto 1:5 suelo:agua, que puede completarse mediante el ensayo con acetona en el propio extracto.

Al mismo tiempo se estableció una metodología de seguimiento de la salinidad edáfica, mediante lecturas in situ con un instrumento portátil. Se calibró un sensor electromagnético (SEM) hasta varias profundidades para medida de salinidad edáfica. Los resultados son correctos pese a las desfavorables condiciones por la presencia de calizas someras impenetrables con barrena, abundantes suelos con horizonte de yeso, y contenidos de humedad desiguales a lo largo del polígono. El SEM presenta limitaciones en el intervalo de baja salinidad, que podrán evaluarse en detalle si se dispone de sondeos más profundos.

Palabras clave: Salinidad. Suelo. Regadío. SEM. Yeso.

SUMMARY

SALINITY IN THE NEW-IRRIGATED DISTRICT OF QUINTO (ZARAGOZA, SPAIN)

Development of the new irrigation district of Quinto (Zaragoza) affords the opportunity to characterize the initial salinity status of the soils within this district. Analyses of samples from soils, water tables and effluents indicate high concentrations of calcium, sulphate and magnesium. Horizons of pure gypsum are common, making the soil:water extract 1:5 unsuitable to assess soil salinity; an acetone assay using the same extract is proposed.

Moreover, a method has been developed for monitoring soil salinity, in situ, using a hand-held electromagnetic sensor (SEM). The SEM was calibrated for several soil depths in order to predict soil salinity results were right despite the unfavourable soil conditions such as shallow auger-impenetrable limestone beds, gypsum horizons, and variable soil-water contents. Limitations in the SEM precision become important in the lower salinity range and should be evaluated when deeper sampling is feasible.

Key words: Salinity. Soil. Irrigation. EMS. Gypsum.

INTRODUCCION

La viabilidad técnica y económica de los regadíos, sobre todo en países mediterráneos o más áridos, queda condicionada a menudo por la salinidad. Para la cuenca del Ebro, Alberto *et al.* (1983) cifran en 320.000 has la superficie afectada por salinidad. Resumiendo datos de IRYDA de varias fechas, Herrero y Aragües (1988) señalan como afectadas por distintos grados de salinidad un 47% de las 535.689 has correspondientes a varias zonas de la cuenca declaradas de interés nacional. Estas zonas están en la margen izquierda del Ebro, donde se sitúan la mayor parte de los regadíos aragoneses realizados en este siglo.

A la propuesta de nuevos regadíos en la margen derecha del Ebro se ha objetado en la última década la posible salinidad de los suelos y materiales subyacentes. La falta de una cartografía de suelos sistemática a la escala adecuada para las transformaciones en regadío y los resultados, insuficientemente evaluados, de las transformaciones ya efectuadas en la margen izquierda del Ebro, alimentan la polémica. Se argumenta que la tecnología de la aspersión evitará las nivelaciones, reputadas, no sin fundamento, como factor de gran incidencia en la sali-

nización. Por otra parte, la abundancia de yeso en muchos de estos posibles regadíos sugiere un escaso peligro de sodificación, proceso que, junto con desfavorables morfologías de suelos, se asocia a algunos resultados no deseados en regadíos de la margen izquierda del Ebro (Herrero *et al.*, 1989).

Obviando la polémica, se han puesto en marcha o se han proyectado varios regadíos de unos pocos miles de hectáreas en la margen derecha del Ebro. El seguimiento de la salinidad de estos regadíos, además del interés inmediato para prevenirla y corregirla, proporcionará criterios para futuras transformaciones, teniendo en cuenta las graves carencias en cartografía de suelos. Por el momento se espera que la puesta a punto de la medición in situ de la salinidad edáfica agilice las tareas de seguimiento.

Los objetivos del presente trabajo son: 1) estudiar la distribución de las sales tanto en los suelos como en aguas freáticas y efluentes, 2) calibrar un sensor electromagnético (SEM) para medida in situ de la salinidad edáfica, y 3) evaluar las prestaciones de un SEM en el seguimiento de la salinidad de estos suelos.

SITUACION Y CARACTERISTICAS DEL POLIGONO DE RIEGO

Quinto se sitúa a 40 km al sureste de Zaragoza. Tras la concentración parcelaria en el término municipal, se construyó una impulsión directa de agua desde el Ebro. El riego comenzó parcialmente en 1987, regándose en 1989 alrededor de 2500

has; de ellas unas 50 has por goteo y el resto por aspersión, predominando los pivotes y máquinas laterales. Están en proyecto nuevas obras para duplicar la superficie de este regadío.

En el polígono de riego y sus alre-

dedores son característicos los estratos horizontales, arcillas con intercalación de calizas y de yesos, de edad miocena. La mayor parte de lo actualmente regado es un saso de calizas lacustres, con frecuentes rodales de yeso, que a veces forma horizontes edáficos. Los suelos se han desarrollado a partir de estos materiales o de depósitos más recientes, finos en los rellenos de las vales y sobre todo en vertientes de algunas lomas que dominan al saso, y gravas en los restos de terrazas altas.

Los desniveles dentro del polígono son ligeros, pues ocupa una plataforma estructural (Mensua e Ibáñez, 1977) a favor de un paquete calizo, quedando las vales funcionales y sus escarpes en el borde del polígono regado. El drenaje profundo es prácticamente nulo, a causa de las arcillas miocenas. Puede haber flujo lateral por discontinuidades litológicas o texturales como son los estratos calizos y los rellenos de las zanjas de instalación de los tubos. En la plataforma hay ligeras depresiones cuya vegetación a menudo indica humedad y se dan, incluso en secano, encharcamientos esporádicos. Estos indujeron, después de comenzado el riego, a la apertura de azarbes e instalación de tubos de drenaje enterrados durante 1988-89.

Predominan los Lithic y Typic Torriorthents junto con los Typic Gypsiorthids, con patrones de distribución complejos asociados a cambios laterales del material parental. Las especies cultivadas y sus extensiones varían de una a otra campaña, tanto en el conjunto del polígono como en parcelas individuales. Ello,

junto a lo expuesto en el párrafo anterior, modificará el contenido de sales del polígono y su distribución.

Este regadío no requirió nivelaciones ni presenta salinidad generalizada. Se optó por la aspersión y se tienen parcelas en general mayores de 20 ha. Además, las zonas problemáticas se excluyeron del riego gracias al estudio previo de suelos. El resultado es que hay pocas manchas con descensos reseñables en los rendimientos y que la salinidad de éstas es menor que en los regadíos de la margen izquierda del Ebro. La forma y distribución de dichas manchas, así como su pequeño tamaño frente al de las parcelas, permite hasta ahora cultivos no especialmente tolerantes a la salinidad pese a alguna calva o a descensos localizados del rendimiento, a menudo percibidos como no graves por el agricultor individual. Los condicionantes técnicos y económicos del riego por aspersión, la gestión de este regadío, el precio del agua y el grado de exigencia social han hecho recurrir tempranamente al drenaje, y no a aumentar la cantidad de agua aplicada.

Las medias anuales de precipitación y de temperatura son 316 mm y 14.7 °C en el Observatorio de Zaragoza. Con datos del observatorio de Sástago, Faci (1988) calcula para el nuevo regadío de Quinto una lluvia media efectiva anual de 287 mm y una ET_0 (Blaney-Criddle/FAO) media anual de 1197 mm. Según el Sindicato de Riegos, en 1988 se bombearon 8.5 hm³ mientras que en 1989 fueron 11 hm³. El incremento se relaciona con la primavera muy lluviosa de 1988 (Fig. 1) y con el predominio de

cereal de invierno en dicho año. En 1989 la superficie dedicada a maíz (811 ha) superó a la de cereal de invierno (808 ha) y comenzó a implantarse la alfalfa, que ocupó

115 has y ha continuado en expansión. Otros cultivos importantes han sido: trigo, cebada, girasol, guisante, frutales, pradera.

El tramo del Ebro donde se toma

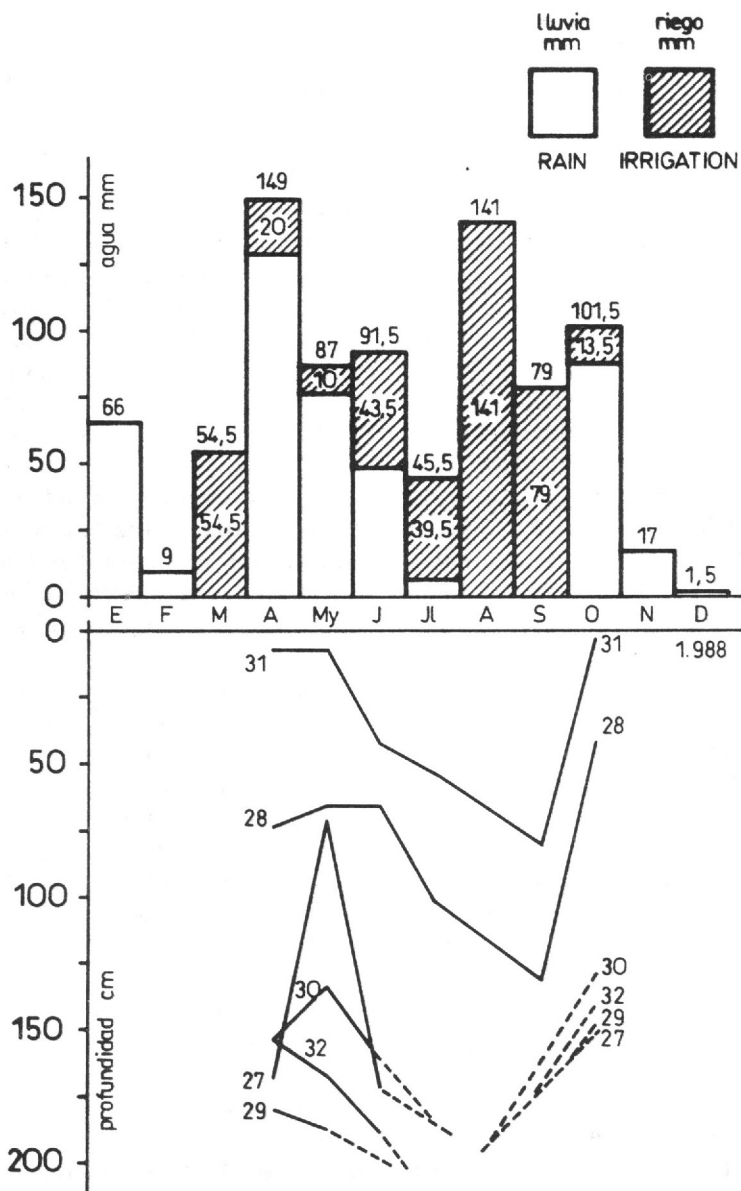


FIG. 1.—Lluvia y riego mensuales frente a los niveles freáticos de 6 sondeos en el nuevo regadío de Quinto. Datos de 1988.

el agua para el regadío tiene una CE media anual ponderada de 1.2 dS m^{-1} a 25°C y el registro de datos del MOPU desde 1974, muestra tendencia al aumento (Aragües, Alberto, 1983). Si se toman los volúmenes mensuales bombeados en

1988 y se les aplica la CE mensual del Ebro en Pina según los datos del MOPU (1987), la CE media del agua bombeada ha sido de 1.35 dS m^{-1} a 25°C , con calcio y sulfato como iones dominantes.

MÉTODOS DE SEGUIMIENTO DE LA SALINIDAD

Se comenzó el seguimiento en marzo de 1987, cuando el riego del polígono había empezado parcialmente. La salinidad de los efluentes se ha controlado repetidamente en tres puntos de desagüe midiendo la CE de todas las muestras y analizando iones en la mayoría de ellas. La salinidad de suelos y freáticos se evalúa a partir de puntos fijos de observación en las principales unidades fisiográficas establecidas por el estudio previo a la puesta en riego (IRYDA, 1978). En los enclaves cuya topografía u otras características presagiaban problemas de salinidad, la densidad de observaciones fue mayor. El aumento del número de puntos de observación en años posteriores estuvo en parte asociado a problemas de salinidad o encharcamiento.

En cada punto se sondeó hasta la profundidad máxima de 2 m, muestreando de 25 en 25 cm; además; se instaló un tubo perforado para muestrear el agua freática. Los sucesivos muestreos de suelo se hicieron a menos de 1 m de distancia del punto original. Se sigue así la evolución del perfil salino del suelo y la del contenido iónico y profundidad del freático cuando está accesible.

Antes del sondeo, se leyó en cada punto la conductividad eléctrica apa-

rente con un SEM (modelo EM 38, de Geonics), según la técnica de Rhoades descrita por Aragües *et al.* (1986). A lo largo de 1987 se establecieron 26 puntos, pasando a 63 en 1988. Estos 63 puntos se volvieron a muestrear en 1989. Además, desde 1988 las lecturas con SEM se extendieron a otros puntos del polígono hasta totalizar 148. Estas lecturas anuales se hacen en primavera, tres o cuatro jornadas después de unos días lluviosos, y se expresan en dS m^{-1} . Se designan como EMH para la posición horizontal del sensor y como EMV para la vertical.

Las lecturas de SEM se convierten a salinidad del extracto de suelo (CEe ó CE1:5) hasta la profundidad deseada, mediante regresión lineal entre estas variables. La mejor ecuación de regresión se obtiene por eliminación iterativa de los puntos con mayores residuos explicables por contenidos extremos de humedad en el momento del muestreo, así como de los que tienen profundidad de muestreo insuficiente para la profundidad que se desea integrar. Además, para los puntos seleccionados y la profundidad de integración que obtuvo mejor ajuste, se compara este método de regresión lineal con el derivado del diseño del sensor (Corwin y Rhoades, 1982) que

mejoró ligeramente los ajustes cuando se aplicó a parcelas en otros regadíos de la cuenca del Ebro (Díaz y Herrero, 1990).

El método derivado del diseño del sensor consiste en calcular un nuevo valor (EMH*) en los puntos con sondeo a partir de la lectura de EMV y del valor de CEe en esos puntos. Posteriormente, se pasa a establecer una regresión lineal entre EMH* y EMH, que permite estimar el valor de EMH* en los puntos donde no exista sondeo.

En aguas y en extractos de suelo se determinó la conductividad eléc-

trica. Además, en el extracto 1:5 se hizo un ensayo cualitativo de yeso evaluando el precipitado con acetona. En extractos de saturación y en aguas se determinaron los iones calcio y magnesio por absorción atómica y el sodio por fotometría de llama; los carbonatos y bicarbonatos por acidimetría; los sulfatos mediante turbidimetría y los cloruros potenciométricamente. En los casos en que no se obtenía electroneutralidad se analizó el ión nitrato mediante colorimetría con salicilato sódico y el potasio por fotometría de llama.

RESULTADOS

La Tabla 1 presenta parámetros de salinidad medios de todas las muestras recolectadas en marzo-abril de 1988 y uniendo esta campaña con la de 1987. Además, se presentan las mismas medias para distintas agrupaciones de puntos de muestreo en función de su pertenencia a determinadas unidades de paisaje.

Dos de las unidades de paisaje más características puestas en riego fueron el saso y los fondos de val. El primero por representar más del 70% de la superficie regada. Los segundos, de menor extensión, porque reciben los aportes de escorrentía e infiltración, lo que junto con sus texturas auguraba problemas.

El saso tiene una pedregosidad superficial considerable. Su horizonte superior, de unos 35 cm de espesor, descansa sobre estratos continuos de calizas lacustres cuarteadas, impenetrables con la barrena manual. A continuación hay un potente paquete impermeable de arcí-

llas con alguna pasada yesosa. Las calizas llevan asociados niveles discontinuos de yeso, tanto sacaroideo como farináceo, y yeso lenticular milimétrico en matriz arcillosa. Los cultivos de regadío no han presentado afecciones por salinidad en el saso, salvo en emplazamientos muy localizados. Tampoco se han detectado freáticos a las profundidades alcanzadas por la barrena. El contenido iónico del suelo del saso se expresa en la Tabla 1 mediante las medias de 61 muestras obtenidas en 32 puntos de sondeo en marzo-abril de 1988.

En las vales la pedregosidad superficial es muy escasa y los suelos profundos. Se han seguido los encharcamientos, los niveles freáticos y las eflorescencias superficiales, asociados a descensos de cosecha. El valor medio de la salinidad y contenidos iónicos de la solución del suelo de una de estas vales en regadío (Valdecorral), obtenido a partir

TABLA 1

Medias de parámetros de salinidad en suelos del nuevo regadío de Quinto.

Area computada	Puntos mues- treados	Profund. media (cm)	N.º de muestras analizad.	CEe dS m ⁻¹ 25 °C		Contenidos iónicos medios en mmol L ⁻¹							SAR de la media
				media	extrem.	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	
Todo el polígono. (1988)	70	85	253	7.9	0.96 35.50	32.0	18.5	48.5	ip	1.9	61.0	41.1	9.7
Todo el polígono. (1987 + 1988)	70	100	421	8.3	0.96 35.50	32.5	19.0	54.8	ip	1.4	63.8	44.0	10.8
Saso (1988)	32	35	61	4.4	1.17 15.52	30.7	9.6	15.5	ip	2.6	42.5	16.0	3.5
Vertientes arcillo- sas (1988)	9	115	42	9.9	1.70 21.70	31.8	22.1	69.5	ip	1.6	66.0	58.0	13.4
Depresiones (1988)	6	150	37	16.4	2.45 35.50	30.7	30.7	140.0	ip	1.8	112.9	105.5	25.3
Valdecorral (1988)	8	140	54	4.5	0.96 12.54	31.6	11.2	17.4	ip	1.5	45.3	14.3	3.8

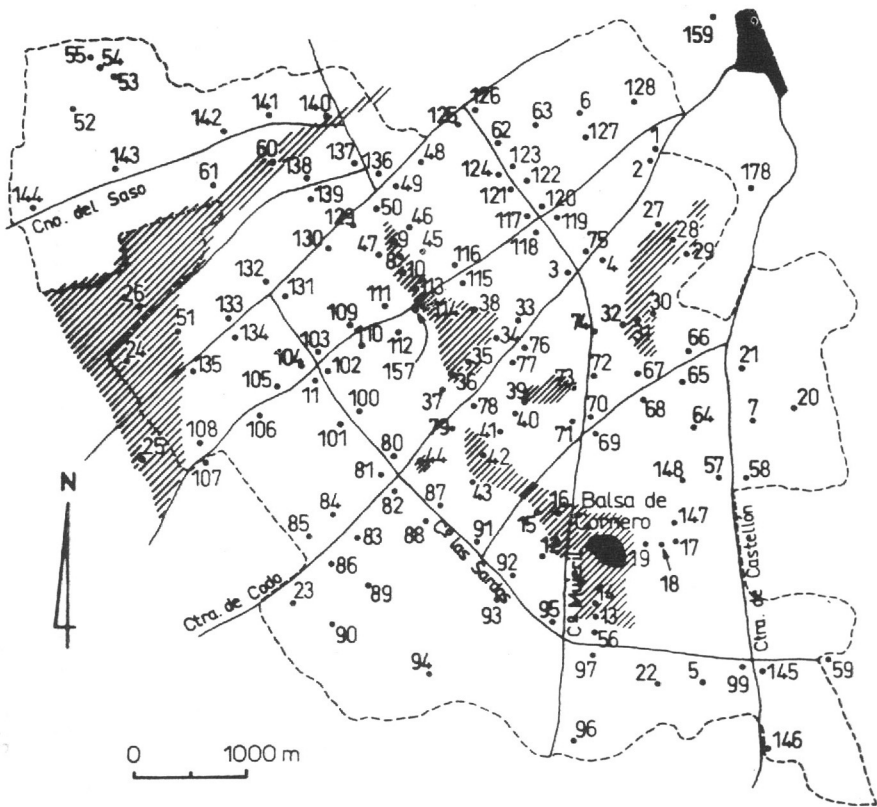


FIG. 2.—Situación de los puntos de muestreo y de lectura con SEM en el nuevo regadío de Quinto. Los puntos 157, 159 y 178 son de muestreo de efluentes. Las zonas rayadas son aquellas en que se observó encharcamiento y/o salinidad hasta abril del 1988.

de sondeos en 8 puntos, se encuentra en la Tabla 1. La misma Tabla presenta los valores medios de las muestras de 1988 correspondientes a 9 puntos situados en vertientes arcillosas en su empalme con el saso. Otra línea de la Tabla 1 se refiere a 6 puntos en las depresiones, es decir áreas del saso ligeramente deprimidas con drenaje superficial dificultoso y vegetación halófila.

La Tabla 2 refleja la CE y composición iónica media de muestras de freáticos procedentes de esos mismos puntos.

La Tabla 3 corresponde a aguas de drenaje muestreadas hasta julio de 1990 en tres puntos señalados en la Fig. 2.

La expresión de la salinidad edáfica mediante el extracto 1:5 en lugar del de saturación agiliza los análisis de laboratorio pero estos parámetros se correlacionan mal para suelos con yeso, y más si los contenidos de éste son muy dispares. Es el caso del polígono, donde hay horizontes constituidos mayoritariamente por yeso y otros muy arcillosos. La Tabla 4 permite com-

TABLA 2

Conductividad eléctrica y contenido iónico de aguas freáticas.

Período	N.º de puntos	N.º de muestras	CE dS m ⁻¹ 25 °C	N.º mues. analiz.	Contenidos iónicos medios mmol L ⁻¹								Parametros derivados	
					Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	SAR	Ca/Mg	
Valdecorral:														
-Con encharcam. ocasional	20-4-88/ 7-6-90	1	10	11.57	7	25.6	49.6	51.3	ip	4.2	61.5	63.2	8.4	0.52
-Sin encharcamiento	20-4-88/ 7-6-90	6	34	5.66	25	37.0	16.4	17.3	ip	4.5	34.8	35.8	3.3	2.26
Val (Fuentes):														
-Con encharcam. ocasional	25-5-87/ 7-6-90	3	16	14.11	13	38.6	55.5	87.9	ip	5.7	86.8	101.5	12.8	0.7
-Sin encharcamiento	25-5-87/ 27-1-88	1	6	4.19	5	30.8	11.2	12.5	ip	4.6	34.2	16.6	2.7	2.75
Valamendoleras:														
-Sin encharcamiento	23-10-89/ 23-3-90	1	2	5.62	1	30.7	40.8	35.5	ip	2.4	69.8	43.2	5.9	0.75
Resto de puntos con freático vertientes a Valdecarra:														
-Con encharcam. ocasional	25-5-87/ 7-6-90	9	64	15.42	51	30.3	48.8	143.7	ip	4.8	89.2	126.8	22.8	0.62
-Sin encharcamiento	25-5-87/ 7-6-90	5	18	10.94	18	33.2	38.1	72.6	ip	5.1	69.3	76.4	12.2	0.87

TABLA 3

Composición iónica media de aguas de drenaje muestreadas hasta 18-7-90.

Punto N.º	Fecha inicial muestreo	CE media		Contenidos iónicos medios en mmol L ⁻¹								Parámetros derivados	
		n.º de mues.	dS m ⁻¹ a 25 °C	n.º mues.	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	SAR	Ca/Mg
157	25-5-87	23	12.71	19	34.6	53.0	78.6	ip	2.7	84.8	86.0	11.9	0.65
159	20-4-88	10	14.15	9	30.4	59.9	90.7	ip	4.5	89.7	91.7	13.5	0.51
178	17-10-89	6	11.00	5	32.1	48.6	56.7	ip	3.7	71.2	67.6	8.9	0.66

TABLA 4

Regresiones $CEe = a + b CEI:5$ para 417 muestras de suelo y para 410 de ellas discriminadas por intensidad del precipitado con acetona en extracto 1:5.

Precipitación con acetona	Número muestras	a	b	r ²
Cualquiera	417	-1.83	3.83	0.73
Inexistente.	54	-0.24	5.52	0.93
Media	98	0.30	3.44	0.73
Fuerte.	258	-8.74	5.58	0.87

para la regresión de CEE sobre CE1:5 para 417 muestras de todo el polígono y para los tres grupos formados según la respuesta de su extracto 1:5 a un ensayo cualitativo de precipitación del sulfato cálcico realizado en 410 de dichas muestras.

En la figura 1 se presentan los valores mensuales de la precipitación según el observatorio de Quinto y los del agua de riego aplicada en la Valdecorral a partir de la facturación a los regantes, junto con la evolución del nivel freático en los puntos de la misma val, todo ello para el año 1988. La facturación de marzo incorpora las pequeñas cantidades de agua gastadas en los meses anteriores, desde noviembre.

La figura 2 es un croquis del polígono de riego con localización de los puntos de observación y zonas con síntomas de salinidad y/o encharcamiento detectadas hasta abril de 1988. Se consiguió visualizar las prestaciones del SEM comparando este croquis con los mapas de isóneas de EMH (no presentados) obtenidos a partir de las lecturas en 144 puntos en abril de 1988 y en junio de 1990.

La Tabla 5 presenta los ajustes obtenidos por regresión simple entre EMH (y EMV) y la CEE ponderada del perfil. Esta se determina a partir de las muestras extraídas en el momento de la lectura con SEM, incorporando sólo las muestras correspondientes a la profundidad máxima indicada en la Tabla. En aquellos sondeos en que no se alcanzó dicha profundidad, el programa utilizado atribuye la CEE ponderada disponible a la profundidad máxima indicada en la Tabla. No se presentan los ajustes realizados para CE1:5,

ya que en todos ellos el coeficiente de determinación es bajo, muy inferior al obtenido con CEE.

La Tabla 5 muestra en primer lugar los ajustes para todos los puntos del polígono en las campañas de muestreo de 1987 y 1988 y en ambas juntas. A continuación se repite el ajuste excluyendo dos puntos con residuos notoriamente grandes y que se encontraban en condiciones extremas de humedad en el momento del muestreo. Finalmente, la misma Tabla 5 presenta los ajustes obtenidos eliminando 46 puntos, unos por sus circunstancias parecidas a los antes excluidos, y los demás por haber sido muestreados hasta profundidad menor de 100 cm.

A partir de la Tabla 5 se puede seleccionar la agrupación de puntos (22), profundidad (1 m) y posición horizontal del sensor que ha obtenido mejor coeficiente de determinación. La ecuación correspondiente aparece en negrita en dicha Tabla y los valores calculados mediante esa ecuación se recogen en la tercera columna de la Tabla 6.

Para los mismos puntos y profundidad se aplica el método de calibración basado en el diseño del sensor (Corwin y Rhoades, 1982), para lo cual se calcula EMH* en todos los puntos y se comprueba que existe un buen ajuste ($r^2 = 0.896$) entre los valores calculados de EMH* y los leídos (EMH), con la ecuación

$$\text{EMH}^* = 0.517 + 3.066 \text{ EMH} \quad (\text{Ec. 1})$$

que permitiría estimar EMH* en otros puntos en que no hubiera sondeo. Adaptando las ecuaciones propuestas por Corwin y Rhoades (1982) para la profundidad de 1 m

TABLA 5

Regresión lineal entre lecturas de SEM (EMH ó EMV) y CEe media hasta distintas profundidades, para diferentes agrupaciones de los puntos muestreados.

Fecha del muestreo	Criterios de exclusión o inclusión de puntos	Número de puntos de muestreo computados	Profundidad máxima de muestreo computada (cm)	Posición de lectura del SEM	CEe = a + b SEM		
					a intercep-tor	b pendiente	r ² coef. deter-minado
Año 87	Se incluyen todos	36	100	H	2.426	4.3	0.640
			200	V	2.359	5.1	0.682
Año 88	Se incluyen todos	68	100	H	0.798	5.5	0.627
			200	V	-0.578	6.9	0.652
Año 87 + 88	Se incluyen todos	68	100	H	1.570	4.9	0.620
			200	V	0.187	6.7	0.692
Año 88	Mayores resíduos n.º 15: saturado n.º 46: muy seco	66	75	H	0.480	5.5	0.788
			100	H	0.638	5.5	0.791
Año 87 + 88	Id.	66	75	H	1.170	5.1	0.738
			100	H	1.353	5.1	0.732
Año 88	Se excluyen los 46 siguientes por (i) saturados: 9, 15, 16, 31, 38, 42; (ii) secos: 14, 19, 46; (iii) muestras hasta <100 cm: 2, 8, 11, 12, 20, 21, 22, 33, 34, 37, 40, 41, 43, 45, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 55, 56, 64 al 77	22	25	H	-0.813	6.1	0.614
			50	H	-0.439	6.0	0.765
			75	H	0.169	5.8	0.852
			100	H	0.756	5.6	0.874
			125	H	1.008	5.7	0.859
			150	H	1.218	5.7	0.813
			125	V	-0.153	6.5	0.812
			150	V	-0.172	6.7	0.828
			200	V	-0.803	7.5	0.843
			Año 87 + 88	Id.	22	75	H
100	H	1.596				5.0	0.815
125	V	0.815				5.9	0.817
150	V	0.835				6.1	0.836
200	V	0.318				6.8	0.858

$CEe = 2.127 EMH^* - 1.127 EMV$ (Ec. 2) puntos de muestreo los valores de CEe indicados en la cuarta columna se obtienen para cada uno de los 22 de la Tabla 6.

TABLA 6

CEe medida en 22 puntos del polígono de riego (abril de 1988) y valores predichos mediante los dos métodos presentados de calibración del SEM.

Punto de muestreo	CEe dS m ⁻¹ a 25 °C hasta 1 m de profundidad		
	En extracto de saturación	Predicha mediante:	
		Regresión con la lectura EMH	Método derivado del diseño del sensor
1	6.38	3.79	3.56
3	1.92	2.71	2.44
4	2.97	3.14	3.00
6	8.04	5.84	5.80
10	8.58	9.30	9.16
13	19.82	22.95	22.04
17	7.99	8.11	8.04
18	6.01	7.12	7.48
23	8.19	10.04	10.28
24	18.48	18.78	15.32
25	8.05	7.86	8.60
26	15.65	12.76	12.52
27	4.78	4.22	4.12
28	3.09	4.76	4.68
29	2.83	4.33	4.12
30	7.91	7.34	7.48
32	3.04	4.22	4.12
35	11.82	9.52	9.16
36	9.30	7.46	7.48
39	6.52	6.92	6.92
44	2.81	4.33	4.12
54	6.78	8.22	8.04
Media	7.77	7.66	7.71

DISCUSION

Lo reciente del regadío no permite señalar tendencias de salinidad. Los datos de CE e iones (Tablas 1 a 3) tienen interés para iniciar el seguimiento aunque su interpretación sea aún sólo incipiente. Estas Tablas reflejan saturación de sulfato y de calcio, ya que el yeso es prácticamente ubicuo en el polígono, tal como se apreció de visu. Ello también concuerda con los SAR no muy elevados y con la inexistencia de síntomas de sodificación edáfica que permite un buen funcionamiento de los tubos de drenaje enterrado.

Destacan los elevados contenidos de magnesio en aguas y en extractos de suelo, sin que hasta la fecha se hayan detectado efectos específicos sobre los suelos o las plantas. Deberá tenerse en cuenta la agresividad del magnesio que, junto con el yeso, puede deteriorar algunos elementos del sistema de riego y drenaje.

La Tabla 1 muestra que, sobre todo dentro de una misma unidad, los suelos con mayor contenido de iones sodio, magnesio y cloruro son los de texturas más finas, situados en depresiones del saso, y, en las vertientes arcillosas sobre este. Análogamente, se interpreta la Tabla 2 que refleja mayores contenidos de dichos iones en los puntos con encharcamientos ocasionales. Todo ello contrasta con la presencia de los horizontes de yeso muy puro en el saso, remarcando la diferente dinámica del yeso y las sales más solubles en condiciones de semiaridez. La composición de las aguas de drenaje (Tabla 3) resulta bastante uniforme pese a la distancia de los puntos de

muestreo, y traduce la diferente dinámica arriba indicada.

La figura 1 sugiere que los encharcamientos detectados no están de momento directamente asociados con el riego, aplicado en dosis moderadas, sino con la lluvia. Además, la asociación salinidad-encharcamiento se presenta también en secano, según indica la vegetación. La eliminación de márgenes y de áreas de eriales a pastos tras la concentración parcelaria, atestigüadas por la foto aérea de 1954, ha modificado sin duda el drenaje superficial. La percepción y las repercusiones de la salinidad o del encharcamiento tras la instalación del sistema de riego son diferentes y han exigido instalar el drenaje.

La comparación de la figura 2 con los mapas de isolíneas de EMH mostró que la estrategia adoptada para la distribución en campo de las lecturas con SEM ha logrado reflejar las zonas problemáticas. Sin embargo, la aplicación de estos mapas a estimaciones absolutas de salinidad para comparación con otros regadíos, debe hacerse con prudencia y siempre con el apoyo de calibraciones. Ello atañe incluso a la comparación de lecturas de SEM entre puntos o fechas del mismo polígono. La limitación es inherente al SEM a causa de las características intrínsecas del suelo y del estado de humedad en el momento de la lectura.

Estas limitaciones se advierten al confrontar las regresiones obtenidas para distintas agregaciones de los puntos de muestreo (Tabla 5).

Al estimar la CEe a partir de lecturas de SEM, la diferencia de valor obtenido puede ser importante según se aplique una u otra ecuación, sobre todo en la gama de contenidos salinos más elevados. La unión de dos campañas de muestreo hace bajar el coeficiente de determinación, seguramente por trabajar con dos estados de humedad diferentes para los mismos puntos y por no haber dispuesto de datos de temperatura de suelo en el momento de la medida.

El aminorar estas limitaciones requeriría cartografía detallada de suelos para establecer calibraciones en cada unidad, acometiendo después la generalización al polígono de riego y la comparación con otros.

Los coeficientes de determinación de CEe a partir de lecturas de SEM (Tablas 5 a 7) parecen aceptables frente a otros en condiciones más favorables (Susín y Aragües, 1989; Díaz y Herrero, 1990). Como no pueden tenerse contenidos de humedad uniformes en una campaña de muestreo, sólo la exclusión iterativa de puntos de muestreo permitió calibraciones aceptables (Tabla 5). También es desfavorable para la calibración la gran variedad de contenidos de yeso de los suelos. En algunos, el yeso es el componente casi exclusivo, y su "semisolubilidad" dificulta las calibraciones, de las que no se conocen antecedentes en estas condiciones.

La Tabla 4 indica que en el polígono puede estimarse la CEe de una muestra conociendo su CE1:5, con un coeficiente de determinación de 0.73. Este valor es concordante con la presencia de yeso y con sus variados contenidos en las muestras. Puede ser práctico completar la

determinación en laboratorio de la CE1:5 con un ensayo cualitativo de precipitación por acetona en el mismo extracto, que permite mejorar ostensiblemente los coeficientes de determinación.

Los coeficientes de las ecuaciones de regresión presentados en la Tabla 4 eran esperables, pero resultan llamativos en el grupo de las 258 muestras con precipitación fuerte por acetona. Nótese que los suelos estudiados, mejor que de yesíferos, deben calificarse de yesosos. Casi todas las 258 muestras aludidas contienen muchísimo más del 1.2% de yeso, que es suficiente para saturar tanto el extracto de saturación como el 1:5. Así se explica el valor del interceptor para este grupo de muestras (línea 4,^a de la Tabla 4), ya que las no salinas dan una densa nube de puntos en el valor $CEe = CE1:5 = 2.24 \text{ dS m}^{-1}$ a 25 °C. Desde ese punto se establece una línea de pendiente positiva debido a la presencia simultánea con el yeso de sales más solubles que controlan la pendiente de la recta. El comportamiento de CEe/CE1:5 para estas muestras quedaría también reflejado si se ajustase una ecuación no lineal con al menos un umbral en el valor $CE1:5 = 2.24 \text{ dS m}^{-1}$ a 25 °C.

Los ajustes para la predicción de CE1:5 de los perfiles a partir de las lecturas de SEM presentaron casi siempre $r^2 < 0.5$, por lo que no se continuó su análisis estadístico. Idealmente, las mejoras en la predicción de CEe a partir de CE1:5 y el precipitado con acetona, podrían elevar los coeficientes de determinación de CE1:5 en perfiles a partir de las lecturas de SEM. Este enfoque se ha desechado a causa de las dife-

rencias de contenido de yeso entre horizontes del mismo perfil que, además, se muestrean con intervalos de profundidad prefijada.

Se ensayó el método de predicción de la CEE a partir del diseño del sensor, que requiere conocer el valor EMH*. El ajuste de EMH con EMH* para todo el polígono no obtuvo buenos coeficientes de determinación. Ello parece lógico porque intervienen en el cálculo de EMH* los valores para los puntos de calibración de EMV y de CEE, y este último dato es muy incompleto en casi la mitad de los puntos muestreados cuyo sondeo profundizó menos de un metro. Sin embargo, cuando hay suficiente profundidad de muestreo, la predicción de EMH* es aceptable (Ec. 2).

Se comprobó que las regresiones entre la CEE medida y las predichas por cada uno de los dos métodos empleados (Tabla 6), dan ajustes lineales con términos independientes nulos y pendiente unidad, dentro de una significación del 95%. El método de regresión simple obtuvo un coeficiente de determinación del 87%, ligeramente superior al método derivado del diseño del sensor (86%). Esta diferencia tal vez traduce la contribución de las capas profundas, incorporada con EMV, y que se intenta eliminar con el cálculo de EMH*. Dicha contribución, en sus-

tratos con marcados contrastes verticales, empeoraría la regresión. Sin embargo, como las desviaciones típicas de la estimación son respectivamente de 1.80 y de 1.86 dS m^{-1} a 25 °C, la diferencia práctica entre ambos métodos es pequeña.

Estas desviaciones típicas en la estimación de CEE resultan altas para suelos poco salinos, haciendo imprecisa la predicción puntual del descenso de rendimientos. Por el contrario, la detección de zonas altamente salinas resulta muy aceptable. El próximo paso para intentar reducir las desviaciones típicas será establecer calibraciones para cada unidad de suelos, cuando se disponga de la cartografía.

Un aspecto a considerar es que los 22 puntos no son representativos de los 68 muestreados en todo el polígono. Su selección está sesgada al eliminar los puntos del saso, impenetrables con barrena manual a partir de 35 cm. La salinidad media es menor en estos puntos y además es posible que para ellos se obtuvieran ecuaciones de calibración diferentes. La presentación de los mapas de isóneas de EMH, útiles para comparación, hubiera podido inducir a transformaciones incorrectamente a CEE mediante las ecuaciones deducidas para una determinada agrupación de puntos.

CONCLUSIONES

Se han obtenido datos de CEE e iones de suelos y aguas utilizables en el futuro para determinar de modo directo las tendencias de salinidad en este regadío.

Los contenidos iónicos en freáticos y en la solución de los suelos denotan saturación de calcio y sulfato muy generalizada, asociable a la abundancia de yeso. Hay niveles

altos de magnesio. La sodificación es poco común. Estas condiciones se reflejan en las CE y contenidos iónicos de los efluentes, que deberán ser tenidos en cuenta al evaluar los impactos de nuevos regadíos en la calidad de las aguas.

El uso del extracto 1:5 como sustitutivo del de saturación para apreciaciones rápidas de salinidad queda comprometido por los contenidos de yeso en las muestras. Un ensayo semicuantitativo de yeso en el extracto 1:5 aumenta la utilidad de éste.

Pese a la elevada evapotranspiración y a los contenidos salinos de los materiales, la afección por salinidad en los cultivos no parece muy elevada. Como causas pueden apuntarse, además de las obras de drenaje en curso, la exclusión de riego de determinadas áreas gracias al estudio previo de suelos y la aplicación moderada de agua de riego.

El SEM resultó adecuado para diagnosticar la salinidad en este regadío al permitir lecturas expeditas en campo con sólo una persona. Los resultados del método de calibración por regresión simple con EMH y del derivado del diseño del sensor, que incorpora también a EMV, son similares.

Para una capa de 1 m de profundidad, ambos métodos obtienen desviaciones típicas menores de 1,9 dS m⁻¹ a 25 °C en la predicción de la CEE. Este valor deberá afinarse para tener resultados precisos en la gama de salinidad baja, correspondiente a la mayor parte de los suelos regados. De todos modos la representación de las isolíneas de EMH es capaz de reflejar los rasgos más destacados de la distribución de la salinidad en este polígono y la precisión es suficiente en el intervalo de salinidad más elevada.

BIBLIOGRAFIA

- ALBERTO, F., MACHIN, J. y ARAGÜES, R., 1983. Razones y distribución espacial de la salinidad de los suelos y aguas superficiales de la cuenca del Ebro. Seminario "El sistema integrado del Ebro". Barcelona.
- ARAGÜES, R., 1986. Métodos de medida de la salinidad del suelo. Comunicaciones INIA, Madrid.
- ARAGÜES, R. y ALBERTO, F., 1983. La salinización. 5.^a Conf. Hidrología General y Aplicada. SMAGUA: 41-78., Zaragoza.
- CORWIN, D. L. and RHOADES, J. D., 1982. An improved technique for determining soil electrical conductivity-depth relations from above-ground electromagnetic measurements. *Soil Sci. Am. J.*, 46: 517-520.
- DIAZ, L. y HERRERO, J., 1990. Calibraciones del sensor electromagnético para estimación de la salinidad del suelo (CEE y CE1:5). Comunicaciones VIII Jornadas Técnicas sobre Riegos: 197-204. Mérida.
- FACI, J. M., 1988. Establecimiento de un plan de riegos en La Loma de Quinto de Ebro. *Surcos de Aragón*, 11: 5-11.
- HERRERO, J. y ARAGÜES, R., 1988. Suelos afectados por salinidad en Aragón. *Surcos de Aragón*, 9: 5-8.

- HERRERO, J., RODRIGUEZ, R. y PORTA, J., 1989. Colmatación de drenes en suelos afectados por salinidad. Institución Fernando el Católico, Zaragoza.
- IRYDA, 1978. Estudio técnico-económico de soluciones para puesta en riego del área regable de Quinto (Zaragoza).
- MENSUA, S. e IBAÑEZ, M. J., 1977. Terrazas y glaciares del centro de la depresión del Ebro. Univ. de Zaragoza.
- M. O. P. U., 1989. Análisis de calidad de aguas 1987-88. Centro de Publicaciones del MOPU. Madrid.
- SUSIN, V. y ARAGÜES, R., 1989. Evaluación de la salinidad del suelo y efecto de la misma sobre el rendimiento de los cultivos extensivos en Aragón. Informe final del proyecto n.º 2385. SIA-DGA, Zaragoza.

Recibido de la Comisión: 21-5-91.
Aceptado para publicación: 8-10-91.