

## EFFECTOS DEL RIEGO SOBRE LA SALINIDAD Y COMPOSICIÓN DEL COMPLEJO DE CAMBIO DE UN SUELO RECUPERADO DE LAS MARISMAS DE LEBRIJA.

A. Moreno Marín<sup>1</sup>, R. Vaz Pardo<sup>2</sup> y A. Gutiérrez Coto<sup>3</sup>.

Universidad de Sevilla, Escuela de Ingeniería Técnica Agrícola, Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola, Ctra. Utrera Km. 1, 41013 Sevilla. amoreno@us.es; <sup>2</sup>rvaz@us.es; <sup>3</sup>agcoto@us.es.

**RESUMEN.** Las Marismas del Guadalquivir, situadas en el antiguo estuario del río, ocupan una zona de unas 142.000 ha. Están formadas por suelos de origen aluvial muy arcillosos, y que presentan un carácter salino-sódico, con una capa freática poco profunda y salinizada. Parte de estos suelos han sido recuperados para la agricultura, mediante la instalación de un sistema de drenaje y la construcción del Canal del Bajo Guadalquivir para el aporte de agua de riego.

El objetivo de este trabajo es determinar, mediante el uso del modelo de simulación EXPRESO, (Rieu et al. 1998), la composición *in situ* de la solución del suelo y del complejo de cambio, y su evolución entre dos riegos sucesivos. Esto permitiría optimizar el momento de aplicación del riego y la cuantía del mismo para favorecer el lavado de sales.

Las muestras de suelo (0 - 0.30, 0.30 - 0.60 y 0.60 - 0.90 m) se tomaron en una parcela de 6 ha (Lebrija, Sector BXII), situada en el margen izquierdo del río, cultivada con remolacha azucarera y sometida a riego por aspersión. Se realizó un primer muestreo para la caracterización general de la parcela, y se escogió una subparcela de 0.5 ha para el seguimiento del equilibrio entre las especies adsorbidas y las solubles presentes en el suelo durante el tiempo transcurrido entre riegos. Los análisis en el laboratorio se realizaron sobre extracto de pasta saturada para los iones solubles, y mediante el método descrito por Tucker, (1974) para los iones cambiables.

Del muestreo inicial se deduce que son suelos arcillosos, salino-sódicos, ligeramente alcalino, pobres en materia orgánica y nitrógeno, y con un contenido medio en fósforo asimilable. Los datos obtenidos en el estudio entre riegos muestran un aumento significativo de la conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada ( $CE_{ps}$ ), para las muestras inmediatamente después del riego, observándose además un descenso significativo en el contenido de los iones cambiables. Este aumento de la  $CE_{ps}$  se prolonga hasta el quinto día después del riego en los primeros 0.60 m de profundidad, y durante algo menos entre 0.60 y 0.90 m. Estos datos se han utilizado como entrada en el programa EXPRESO, para el estudio de la evolución de las condiciones *in situ* del suelo.

**ABSTRACT.** The Guadalquivir river marshes, located in the ancient estuary, cover an area of 142.000 ha. They are formed on soils of alluvial origin, very clayey, with a saline – sodic nature and a shallow very saline water table. Part of this soils have been reclaimed to agricultural use by the installation of a drainage system and the construction of the “Bajo Guadalquivir” Channel for irrigation water supply.

The objective of this work is to determine the composition of the *in situ* soil solution and exchange complex, and its evolution between two consecutive irrigations, using the EXPRESO model, (Rieu et al, 1998). This estimation would permit us to optimize the irrigation application and its amount, in order to help the salt leaching.

The soil samples (0-0.30, 0.30-0.60 y 0.60-0.90 m) used in this work were obtained in a farm plot of 6 ha (Lebrija, Sector BXII), situated on the left bank of the river. Sugar beet was growing on it, and sprinkling irrigations were applied. There was a first sampling in order to characterize the plot. A 0.5 ha subplot was selected in order to study the evolution of the chemical equilibrium between adsorbed species and soil solution with the irrigation. The chemical analysis were determined in the saturated paste extracts for soluble ions. Exchangeable cations were determined using a method described by Tucker, 1974.

The initial sampling showed a soil of clayey texture, saline-sodic, slightly alkaline, calcareous, with low nitrogen and organic matter contents and medium values of available P. The experimental results obtained between two irrigations showed an increase in the saturated paste extract electrical conductivity ( $EC_{sp}$ ) and a decrease in the exchangeable after irrigation. This trend follows up for five days at the depth of 0 - 0.30 and 0.30 - 0.60 m, and not so long at 0.60 - 0.90 m. This data have been introduced in the EXPRESO model to know the evolution of the chemical composition of the soil solution, the exchange and precipitated phases at the *in situ* water content.

## 1. Introducción

Las Marismas del Guadalquivir son una formación geológica que ocupan una antigua laguna costera cercana a la desembocadura del río, cubriendo una superficie de unas 142.000 ha. Están formadas por la acumulación de materiales aportados por el río al gran estuario excavado en la era Diluvial. Estos suelos presentan una naturaleza arcillosa, compuestos principalmente de illita en avanzado estado de alteración, (Moreno et al., 1980). Los suelos, debido al uso de aguas de riego con altos contenidos en sales y a la evaporación, han ido aumentando su carácter salino, por lo que presentan dificultades para su uso agrícola. Sin embargo, un conjunto de medidas adoptadas para la adecuación y mantenimiento de esta zona apta para el cultivo (instalación de redes de drenaje, sistemas de irrigación y prácticas agrícolas adecuadas), han permitido la explotación agrícola de la zona. La parcela experimental en la que se desarrolla el presente estudio, se ubica en el Sector BXII (15.000 ha), que es la zona más recientemente acondicionada. Los trabajos de acondicionamiento terminaron en 1979, quedando dividida la zona en parcelas de 12 ha destinadas a uso agrícola.

Los sistemas de manejo agrícola a que están sometidos estos suelos, mediante técnicas de riego, drenaje y aplicación de tratamientos, están encaminados a la optimización de las condiciones para el cultivo. El objetivo es mantener los valores de  $CE_{ps}$  y porcentaje de sodio cambiante por debajo de  $4 \text{ dS m}^{-1}$  y 15 %, respectivamente.

Las especies cultivadas en la zona se restringen prácticamente a la remolacha azucarera y al algodón, ya que son resistentes a las condiciones salinas del suelo y al alto contenido en sodio.

Este trabajo estudia el efecto del riego en la evolución de la composición de la solución del suelo y del complejo de intercambio catiónico *in situ*. Estos datos, de difícil obtención en condiciones reales debido al carácter arcilloso del suelo, se estimaron a partir de datos experimentales obtenidos en laboratorio y procesados mediante el modelo de simulación EXPRESO.

Los datos obtenidos para estas especies químicas *in situ* permiten conocer las condiciones reales en que se desarrolla el cultivo, y el método ofrece una herramienta para la toma de decisiones sobre el momento de aplicación del riego y su cuantía.

## 2. Material y métodos

Las muestras de suelos usadas en este estudio fueron tomadas en una parcela de 6 ha (240 m x 250 m), situada en el margen izquierdo del río Guadalquivir, en el término de Lebrija. La parcela está equipada con un sistema de drenaje, formado por una serie de tubos de 250 m de longitud, enterrados a una profundidad media de 1 m y espaciados entre sí 5 m. Había sido sometida a un tratamiento con yeso el año anterior. La parcela experimental se dividió en 12 subparcelas de 0.5 ha (20 x 250 m) que se caracterizaron mediante un muestreo inicial

realizado en todas ellas en tres zonas paralelas al dren. En cada una de ellas se tomaron muestras a 0 - 0.3 m, 0.3 - 0.6 m, y 0.6 - 0.9 m de profundidad, uniendo material tomado a tres distancias del dren. Posteriormente la parcela fue cultivada con remolacha azucarera. Los riegos de la campaña fueron suministrados por aspersión usando el agua procedente del Canal del Bajo Guadalquivir.

Para el seguimiento de la evolución del suelo entre riegos se escogió una subparcela y dos episodios consecutivos de riego, y se realizaron muestreos siguiendo la pauta descrita para el muestreo inicial. El primer riego escogido comenzó el día 28/06/02 a las 23 h, y las muestras se tomaron 12 h antes del mismo, y 30, 100, 148 y 230 h después del inicio del riego. El segundo riego se produjo a las 184 h del primero. Se determinó en el laboratorio la composición de los extractos de pasta saturada de todas las muestras. En dichos extractos se midió la conductividad eléctrica, alcalinidad,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ . Los cationes intercambiables ( $\text{Na}_x$ ,  $\text{K}_x$ ,  $\text{Ca}_x$ ,  $\text{Mg}_x$ ) fueron determinados a partir de muestras de suelo, por diferencia entre las cantidades de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  totales extraídas por el reactivo de Tucker y las determinadas en el extracto de saturación.

Se determinaron los contenidos de humedad del suelo en el momento de la toma de muestras, y se usaron para estimación de los parámetros correspondientes a las condiciones *in situ*.

### 2.1. El Modelo EXPRESO

El modelo EXPRESO, descrito en (Rieu et al. 1998), es un modelo matemático desarrollado para calcular la especiación química de la solución del suelo y el equilibrio de intercambio con los cationes adsorbidos, ajustando estos parámetros para los procesos de dilución y concentración simulados. El modelo es utilizado para el procesamiento de datos experimentales determinados en laboratorio a partir de extractos de suelo. Para una presión parcial de dióxido de carbono ( $\text{PCO}_2$ ) y para una relación suelo/agua se calculan: (i) La especiación de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$  y  $\text{OH}^-$  en la fase acuosa. (ii) La cantidad de yeso y calcita (o Mg-calcita) precipitada en la fase sólida. (iii) La distribución de  $\text{Na}_x$ ,  $\text{Ca}_x$  y  $\text{Mg}_x$  en la fase adsorbida.

El cálculo se realiza a 25°C y una atmósfera, para una  $\text{PCO}_2$  dada o un valor de pH determinado. Deben cumplirse unos valores límite de fuerza iónica ( $I < 2 \text{ M}$ ) o conductividad eléctrica ( $CE < 150 \text{ dS m}^{-1}$ ).

Los datos referidos a las condiciones experimentales incluidos en la Tabla 2 fueron primero procesados por el programa EXPRESO, para obtener una serie de datos iniciales termodinámicamente coherentes.

El modelo está validado usando muestras de suelo de una parcela experimental de las mismas características situada en la misma zona geográfica, (Vaz, 1994).

### 3. Resultados y discusión

Los análisis del muestreo inicial de la parcela completa, dieron como resultado que se trataba de un suelo ligeramente alcalino ( $\text{pH} = 7.5 - 8.1$ ), pobre en materia orgánica ( $<1.4\%$ ) y nitrógeno, y con un contenido medio en fósforo asimilable ( $< 50 \text{ mg/Kg}$ ). El suelo de la parcela presenta una textura arcillosa ( $< 1\%$  de arena,  $30 - 33\%$  de limo y  $67 - 70\%$  de arcilla).

La humedad del suelo presenta poca variabilidad entre los distintos muestreos. Aunque en el momento del riego se produce un encharcamiento en la superficie del suelo, los muestreos sucesivos indican un mantenimiento en el contenido de humedad en las condiciones de cultivo, llegándose a este estado de equilibrio antes de las 30 h siguientes al riego. Se observa un aumento de la humedad del suelo con la profundidad, siendo aproximadamente un  $10\%$  mayor en la capa  $0.60 - 0.90 \text{ m}$  que en la de  $0 - 0.30 \text{ m}$ . La Tabla 1 muestra los valores promedio de los contenidos en humedad ( $\%$  (p/p)) para las muestras en los tres rangos de profundidad estudiados. El carácter arcilloso del suelo determina la existencia de un porcentaje de humedad elevado y con pocas variaciones entre riegos, a pesar de las condiciones climáticas (altas temperaturas y baja humedad ambiental).

**Tabla 1** Contenido en agua del suelo.

Tiempo	Humedad (%)		
	0-0.3 m	0.3-0.6 m	0.6-0.9 m
12 h a. r. <sup>a</sup>	21.20	24.81	26.29
30 h d. r. <sup>b</sup>	23.62	24.39	26.93
100 h d. r. <sup>b</sup>	22.70	25.17	26.48
148 h d. r. <sup>b</sup>	22.36	24.03	25.74
230 h d. r. <sup>b</sup>	24.10	24.03	26.99

<sup>a</sup> Antes del riego.

<sup>b</sup> Después del riego.

La Tabla 2 muestra la evolución durante el periodo experimental entre riegos de la composición de la solución del suelo y de la fase adsorbida. Para condiciones de saturación, los datos se obtuvieron experimentalmente a partir del extracto de pasta saturada y se equilibraron termodinámicamente por el modelo EXPRESO. Para condiciones *in situ*, los parámetros corresponden a los resultados estimados por el modelo EXPRESO a partir de los determinados experimentalmente en extracto de pasta saturada. Se usó un valor arbitrario de  $\text{PCO}_2 = 9,33 \times 10^{-3} \text{ atm}$ , determinado experimentalmente para estos suelos (Rieu et al., 1998).

Los resultados obtenidos para las concentraciones de los iones solubles, la CE y los cationes de cambio presentan variaciones significativamente diferentes ( $P < 0.05$ ), para los primeros  $0.30 \text{ m}$  de profundidad. Las variaciones observadas a mayor profundidad sólo cumplen esta condición en determinados casos, como corresponde a un suelo que presenta heterogeneidad en el contenido de sales

y a la existencia de una capa freática salinizada cercana a la superficie.

Los extractos de pasta saturada de las muestras tomadas 30 h después del inicio del riego a  $0 - 0.30 \text{ m}$  muestran concentraciones ( $\text{mmol/l}$ ) de las especies estudiadas ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ) y valores de CEps, significativamente mayores ( $P < 0.05$ ) a los iniciales, en muestras tomadas 12 h antes del riego. Este aumento se prolonga de forma menos acusada hasta el tercer muestreo ( $100 \text{ h}$  desde el inicio del riego). Posteriormente, se observa un descenso en las concentraciones de todos los iones y en la CEps, tendiendo a recuperarse los valores iniciales para el cuarto muestreo ( $148 \text{ h}$  del inicio del riego). Los iones solubles y la CEps en las muestras tomadas entre  $0.30 - 0.60 \text{ m}$  siguen una evolución similar, aunque menos acusada. Para  $0.60 - 0.90 \text{ m}$  no se observa una tendencia homogénea. Con el aumento de la profundidad, se observa un aumento significativo ( $P < 0.05$ ) de la CEps y de todos los iones solubles, excepto del  $\text{Ca}^{2+}$ .

Los datos *in situ*, obtenidos usando el programa de simulación, muestran una evolución similar a los datos experimentales estudiados en los extractos de pasta saturada. Se observa con el riego un aumento significativo ( $P < 0.05$ ) en la CE y las concentraciones de los iones  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Cl}^-$ , así como una posterior tendencia a la recuperación de los valores iniciales. En el caso de los iones  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  se observa una evolución en el tiempo inversa entre ellos, de forma que el aumento de concentración de uno conlleva la disminución del otro. Con el aumento de profundidad los valores de la concentración de los iones solubles y la CE muestran un aumento significativo, excepto en el caso del ion  $\text{Ca}^{2+}$  que muestra un ligero descenso.

El aumento de la concentración de iones en la solución del suelo con el riego se corresponde con el uso de agua de riego de alto contenido en sales ( $\text{CE} = 1.9 \text{ dSm}^{-1}$ ,  $\text{SAR} = 7.9 \text{ mmol}_c^{1/2} \text{ l}^{-1/2}$ ,  $[\text{Cl}^-] = 5.84 \text{ mmol l}^{-1}$ ,  $\text{pH} = 8.4$ ). La cesión de cationes procedentes del complejo de cambio y la solubilización de sales precipitadas en el medio, como el  $\text{CaSO}_4$ .

Para las condiciones simuladas *in situ*, el programa EXPRESO muestra siempre la existencia de  $\text{CaSO}_4$  precipitado en el medio. El programa también predice la precipitación de  $\text{CaSO}_4$  en algunos extractos de pasta saturada. En estos casos, las especies solubles  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  se encuentran en equilibrio con el precipitado, comprobándose que el producto de las actividades iónicas estimadas por el programa coincide con la constante del producto de solubilidad ( $K_{ps} = 1,41\text{E-}05$ ). El programa también indica la presencia de calcita ( $K_{ps} = 8.71\text{E-}09$ ) y calcita magnésica precipitada en las condiciones *in situ* y en algunos extractos de pasta saturada, como se observó experimentalmente.

El estudio comparativo realizado entre los datos obtenidos para el extracto de pasta saturada e *in situ*, muestra que los valores de la CE y las concentraciones de todos los iones de la solución del suelo *in situ* son significativamente mayores que en el extracto de saturación. La Fig. 1, muestra la evolución de la CEps y

CE *in situ* simuladas por el programa EXPRESO para las muestras tomadas a las distintas profundidades. Estos datos concuerdan con la diferencia en el contenido de humedad del suelo, con valores promedio de 92 % y 24 % para pasta

saturada e *in situ*, respectivamente, que explica las altas concentraciones de especies solubles existentes en las condiciones de campo.

**Tabla 2** Composición de la solución del suelo y cationes cambiables de la fase adsorbida para condiciones experimentales e *in situ* simuladas.

Capa de suelo 0-0.30 m profundidad										
Características de la solución del suelo										
	Extracto de pasta saturada					<i>In situ</i> (simulado)				
	12 h a. r.	30 h d. r.	100 h d. r.	148 h d. r.	230 h d. r.	12 h a. r.	30 h d. r.	100 h d. r.	148 h d. r.	230 h d. r.
K /mmol l <sup>-1</sup>	0.91* a	1.33*	1.40	0.91*	0.98* #	3.82* a	4.67	4.83	3.09*	3.38* #
Na /mmol l <sup>-1</sup>	32.50* a	41.56*	42.45*	35.09*	23.28* #	69.17* a	84.17*	81.60*	68.47*	41.57* #
Ca /mmol l <sup>-1</sup>	1.75 a	4.26	5.01	3.87	4.56	5.29	6.63	7.90*	6.40	7.28
Mg /mmol l <sup>-1</sup>	0.98* a	3.03*	3.50*	2.09*	3.05*	3.51* a	6.94*	7.86*	4.07*	6.10* #
Cl /mmol l <sup>-1</sup>	9.83* a	20.92*	23.59	15.09*	11.67* #	40.87* a	72.42*	80.64*	50.97*	38.57* #
SO <sub>4</sub> /mmol l <sup>-1</sup>	10.49* a	15.75*	15.70*	11.35*	10.55* #	22.5	19.65*	16.71*	18.83*	14.16* #
PH	7.60	7.44	7.40	7.47	7.40	7.41	7.37	7.33	7.34	7.32
SAR /((mmol l <sup>-1</sup> ) <sup>1/2</sup> )	15.67	12.64	11.76	11.68	6.55	18.71	19.21	17.89	14.84	6.85
EC /dS m <sup>-1</sup>	3.91* a	6.36*	6.63*	4.79*	4.50* #	9.64* a	11.80*	11.89*	9.42*	7.86* #
Composición del complejo de cambio										
Nax /cmolc Kg <sup>-1</sup>	4.28* a	2.69 *	2.72*	2.80	1.36* #	5.56* a	4.11*	4.04*	4.59*	2.08* #
Cax /cmolc Kg <sup>-1</sup>	16.88**a	12.42 *	13.56*	15.01*	14.00* #	15.57* a	10.76*	11.93*	13.97*	12.94* #
Mgx /cmolc Kg <sup>-1</sup>	7.35 a	6.18 *	6.53*	6.61*	6.57* #	7.36 a	6.43*	6.84*	6.73*	6.88*
Capa de suelo 0.30-0.60 m profundidad										
Características de la solución del suelo										
	Extracto de pasta saturada					<i>In situ</i> (simulado)				
	12 h a. r.	30 h d. r.	100 h d. r.	148 h d. r.	230 h d. r.	12 h a. r.	30 h d. r.	100 h d. r.	148 h d. r.	230 h d. r.
K /mmol l <sup>-1</sup>	1.28	1.22	1.91	1.17	1.14 #	5.57	5.17	7.09	4.21	4.55 #
Na /mmol l <sup>-1</sup>	45.61	58.86	73.50	39.78	42.61 #	114.36	144.72	158.21	87.86	101.29 #
Ca /mmol l <sup>-1</sup>	3.57	4.77	4.24	4.45	5.16	5.7	5.49	5.01	6.35	6.61
Mg /mmol l <sup>-1</sup>	4.39	6.68	7.95	6.24	6.81 #	13.19	18.08	20.41	14.92	17.00
Cl /mmol l <sup>-1</sup>	22.57	31.74	51.45	23.72	26.18	97.23	120.78	133.33	84.54	102.99
SO <sub>4</sub> /mmol l <sup>-1</sup>	17.29	23.63	27.93	16.84	18.52 #	27.81	30.51	39.01	23.89	22.83
PH	7.49	7.32	7.46	7.45	7.41	7.40	7.43	7.42	7.37	7.38
SAR /((mmol l <sup>-1</sup> ) <sup>1/2</sup> )	13.54	13.8	16.6	9.89	9.97	19.05	24.42	26.81	15.80	17.58
EC /dS m <sup>-1</sup>	6.97	9.33	10.42	7.12	7.77 #	16.15	19.82	22.27	14.13	15.76
Composición del complejo de cambio										
Nax /cmolc Kg <sup>-1</sup>	3.34	3.30	4.05	2.09	2.15	5.40	5.75	5.46	3.38	3.77 #
Cax /cmolc Kg <sup>-1</sup>	12.45	11.39	10.31	11.04	11.30	9.70	8.19	6.96	9.23	8.94
Mgx /cmolc Kg <sup>-1</sup>	8.28	7.81	8.23	7.71	7.61	8.64	8.56	8.81	8.23	8.36
Capa de suelo 0.60-0.90 m profundidad										
Características de la solución del suelo										
	Extracto de pasta saturada					<i>In situ</i> (simulado)				
	12 h a. r.	30 h d. r.	100 h d. r.	148 h d. r.	230 h d. r.	12 h a. r.	30 h d. r.	100 h d. r.	148 h d. r.	230 h d. r.
K /mmol l <sup>-1</sup>	2.07	2.00	1.96	1.86	1.78	8.34	7.99	6.59	6.78	6.21
Na /mmol l <sup>-1</sup>	103.37	95.46	102.16	88.42	86.96	273.73	264.07	231.17	202.05	209.75
Ca /mmol l <sup>-1</sup>	4.53	5.13	4.02	4.25	5.14	5.26	5.29	4.98	4.73	5.96
Mg /mmol l <sup>-1</sup>	8.85	11.41	9.03	9.45	10.24	29.54	36.31	25.27	27.67	28.89
Cl /mmol l <sup>-1</sup>	70.65	75.67	68.23	58.17	65.06	276.20	290.45	222.43	191.39	221.13
SO <sub>4</sub> /mmol l <sup>-1</sup>	28.09	27.18	29.19	28.09	25.09	35.11	33.94	36.36	38.33	29.84
PH	7.46	7.44	7.49	7.36	7.36	7.45	7.43	7.46	7.48	7.42
SAR /((mmol l <sup>-1</sup> ) <sup>1/2</sup> )	22.67	19.07	22.60	16.30	17.97	38.19	33.76	34.21	28.37	29.84
EC /dS m <sup>-1</sup>	13.74	14.91	13.63	11.66	12.64	33.26	34.33	28.82	27.18	27.65
Composición del complejo de cambio										
Nax /cmolc Kg <sup>-1</sup>	5.73	3.97	5.84	3.47	3.90 #	9.19	6.74	8.58	6.04	6.26 #
Cax /cmolc Kg <sup>-1</sup>	7.72	7.80	8.25	7.92	7.91	6.24	5.26	6.81	5.76	6.38
Mgx /cmolc Kg <sup>-1</sup>	10.05	8.53	9.86	8.97	9.25	8.56	7.93	8.96	8.17	8.16

a Indican diferencias significativas entre los valores para los muestreos a 12 h.a.r. y 30 h.d.r. con (P < 0.05).

\* Indican diferencias significativas de los parámetros con la profundidad con (P < 0.05).

# Indica diferencias significativas de los parámetros con respecto al tiempo con (P < 0.05).

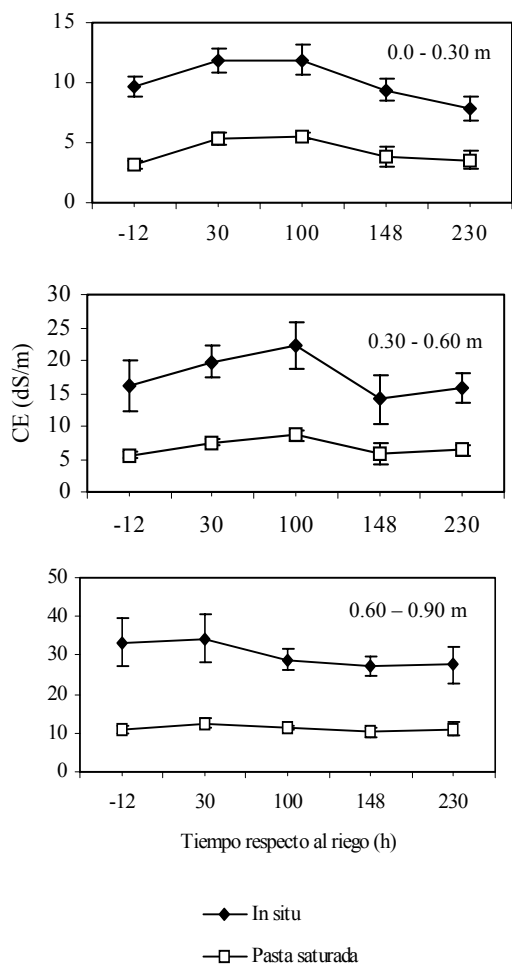


Fig. 1. Valores de CE en extracto de pasta saturada e *in situ*.

La Fig. 2 muestra la evolución con el tiempo de la concentración del ion  $Ca^{2+}$  en el extracto de pasta saturada y en condiciones *in situ* simuladas.

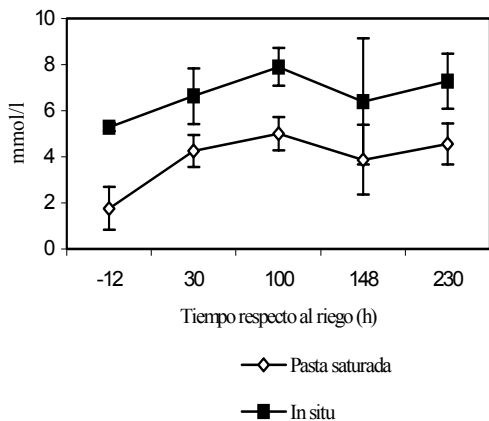


Fig. 2. Concentración de  $Ca^{2+}$  en la solución del suelo

Las especies adsorbidas que componen el complejo de intercambio catiónico ( $Nax$ ,  $Cax$ ,  $Mgx$ ), a 0 - 0.30 m, muestran con el riego una evolución inversa a los

correspondientes cationes solubles. Se produce un descenso significativo ( $P < 0.05$ ) inmediatamente después del riego y una posterior tendencia a la recuperación de los valores iniciales. En la Fig. 3 se muestra la variación en el tiempo de las cantidades de  $Cax$  en condiciones de saturación e *in situ*. Para las profundidades 0.30 - 0.60 m y 0.60 - 0.90 m no se observan tendencias definidas en las variaciones. Los valores simulados *in situ* son, respecto a los estimados en condiciones de saturación, significativamente mayores para el  $Nax$  y menores para el  $Cax$ . El  $Mgx$ , muestra para los datos *in situ* valores mayores a 0 - 0.30 y 0.30 - 0.60 m.

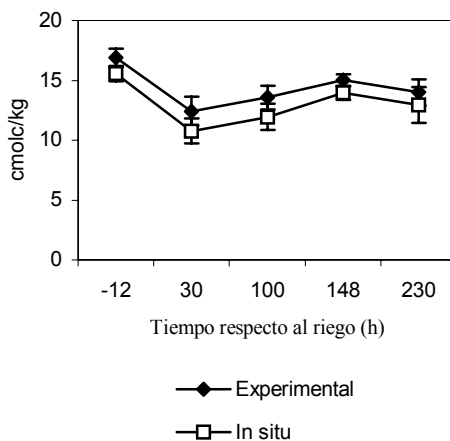


Fig. 3. Variación del contenido de  $Cax$ .

El segundo riego, aplicado a las 184 h del primero, fue el último de la campaña. La interpretación de los resultados obtenidos muestra que se trató de un riego poco homogéneo, con un aporte de agua mayor que el anterior. Se originó el lavado de  $Na^+$ ,  $Cl^-$  y  $SO_4^{2-}$  y se observó una dispersión en los datos experimentales.

La comparación de los valores de las concentraciones de los iones mayoritarios en la solución del suelo ( $Na^+$  y  $Cl^-$ ) en condiciones *in situ*, muestran su dependencia de las condiciones de riego aplicadas. El volumen de agua usado en el primer riego estudiado permite el mantenimiento de los valores de salinidad del suelo. Sin embargo, la aplicación de un mayor volumen de riego conlleva el arrastre de sales y el consiguiente lavado de estos iones en el suelo.

El uso de este método de estudio permitiría, además del conocimiento del comportamiento de las especies químicas en el suelo, la optimización del uso racional de los recursos hídricos para conseguir una disminución en la salinidad de la capa superficial, que conllevaría una mejora en la producción agraria.

El conocimiento de las concentraciones de los iones solubles en la solución del suelo *in situ* supone también una herramienta para la elección de las especies cultivables, en función de las limitaciones que presente la planta por las sales existentes.

#### 4. Conclusiones

Los resultados obtenidos en el presente estudio muestran que la aplicación de un riego moderado conlleva el inmediato aumento de especies solubles en la solución del suelo, mientras que un volumen de riego mayor provoca el lavado de los iones mayoritarios. En ambos casos el riego provoca la disminución en el contenido de iones adsorbidos en el complejo de intercambio catiónico. Posteriormente, se observa una tendencia al restablecimiento de los valores de las especies solubles y adsorbidas a los anteriores al riego.

Se confirma la capacidad del modelo de simulación EXPRESO, Rieu et al. (1998), para el cálculo de la composición de la solución del suelo y de la fase de intercambio en condiciones *in situ* a partir de datos experimentales obtenidos a una diferente relación suelo:agua en el laboratorio. Los datos generados por el modelo cumplen condiciones de coherencia termodinámica y conservación de masas.

*Agradecimientos.* Este trabajo se ha realizado con la ayuda financiera de la Junta de Andalucía (contrato N° C01-078). Los autores quieren agradecer la colaboración del Departamento de Ciencias Agroforestales de la Universidad de Sevilla, por poner a disposición de este estudio su parcela experimental, sita en Lebrija (Sector BXII).

#### Referencias

- Moreno, F., Arrue, J. L., Murillo, J. M., Pérez, J. L. y Martín, J., 1980. Mineralogical composition of clay fraction in marsh soils of SW Spain. *Polish J. Soil Sci.*, 13: 65 - 72.
- Moreno, F., Cabrera, F., Fernández - Boy, E., Girón, I., Fernández, J. E. y Bellido, B., 2001. Irrigation with saline water in the reclaimed marsh soils of south-west Spain: impact on soil properties and cotton and sugar beet crops. *Agricultural Water Management*, 48, 133-150.
- Moreno, F., Cabrera, F., Andreu, L., Vaz, R., Martín-Aranda, J. y Vachaud, G., 1995. Water movement and salt leaching in drained and irrigated marsh soils of southwest Spain. *Agricultural Water Management*, 27, 25-44.
- Moreno, F., Martín, J. and Mudarra, J. L., 1981. A soil sequence in the natural and reclaimed marshes of the Guadalquivir river, Sevilla (España). *Catena*, 8 : 201-221.
- Personal del Laboratorio de Salinidad de los E. U. A., 1973. Diagnostico y rehabilitación de los suelos salinos y sódicos. Richards, L. A., Editor.
- Rieu, M., Vaz, R., Cabrera, F. y Moreno, F., 1998. Modeling the concentration or dilution of saline soil-water systems. *European Journal of soil Science*, 49, 53-63.
- Tucker, B. M., 1974. Laboratory procedures for cation exchange measurements on soils. Division of soils technical paper N°. 23. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Adelaide, S.A.
- Vaz, R., 1994. Efectos del riego sobre algunas propiedades químicas y físicas de un suelo salino en recuperación de las Marismas del Guadalquivir. Tesis.