

# El proceso de recuperación de dos suelos salinos de la Depresión Media del Ebro. II. Dinámica de las sales durante el lavado

por R. Aragüés y F. Alberto

C.R.I.D.A.-03 - I.N.I.A. - ZARAGOZA  
Estación Experimental de Aula Dei. ZARAGOZA

Recibido el 5-V-1978

## A B S T R A C T

ARAGÜÉS, R. y ALBERTO, F., 1978. — Reclamation of two saline soils of the middle Ebro Valley (Spain). II. Dynamics of salts during the leaching process. *An. Aula Dei*, **14** (1/2): 245-258

The ionic dynamics of two soils of the Middle Ebro Valley (Spain) were studied in the laboratory during its leaching process with deionized water. The amount of salts remaining in both soils at the end of leaching was approximately 20% of the total soluble salts present. The results obtained explain the different behaviour observed for the two soils in the first part of this work, indicating the influence of the gypsum content on the variables examined (Electrical Conductivity, Hydraulic Conductivity and pH). The performed salt computation shows the differences in salt leaching velocities, and indicates that the leaching of «toxic salts» (according to some Russian workers) is very fast. However, in considering this point as the end of leaching, it is neglected the effect of total osmotic potential on plants, in clear discrepancy with the American criteria, usually accepted.

## INTRODUCCION

En la parte primera de este trabajo se justificó la importancia del estudio de las modificaciones físico-químicas que se producen en un suelo salino al lavarlo. El análisis de la evolución de la conductividad eléctrica (CE), conductividad hidráulica (K) y pH durante el proceso de lavado de los dos suelos salinos estudiados, con-

dujo a la conclusión de que ambos eran recuperables —en condiciones de laboratorio— por el método clásico de inundación, sin observarse descensos en la K o aumentos sustanciales en el pH que impidiesen la disminución de la CE a niveles aptos para las plantas.

Aunque la CE de la solución del suelo es comúnmente utilizada por los edafólogos para expresar su salinidad, y su validez, utilidad y precisión han sido ampliamente comprobadas, ésta no es suficiente para explicar todos los fenómenos relacionados con la salinidad del suelo. La presencia o ausencia de iones tóxicos asociados generalmente a situaciones salinas (boro, litio, etc.), los fenómenos de toxicidad específica asociados generalmente a especies concretas (cloruro, sodio, etc.) y de adsorción y cambio, y la influencia que las especies iónicas (sodio, calcio, magnesio, etc.) tienen sobre las propiedades físicas del suelo, no son ni cualitativa ni cuantitativamente mesurables a través del parámetro CE. Por ello, para entender mejor las razones de las modificaciones químicas y fisicoquímicas que se producen en un suelo salino al lavarlo, es necesario estudiar la dinámica de las sales durante el proceso antes mencionado.

El problema se ha abordado desde las dos ópticas científicas existentes en la literatura: la americana, que asigna una especial significación a la dinámica de cationes por sus implicaciones coloidales, y la rusa, que hace jugar un papel principal a los aniones y al efecto de las sales tóxicas y no tóxicas sobre las plantas.

Por otro lado, el efecto del yeso presente en los dos suelos estudiados, cuya importancia quedó señalada en la parte primera de este trabajo, queda aquí demostrado más claramente a través de la determinación de los iones sulfato y calcio y su cómputo como  $\text{Ca SO}_4$  para cada estadio de lavado.

## MATERIAL Y METODOS

Las características de los suelos estudiados (CU y HN), y el método de lavado utilizado en la experiencia, se detallan en la parte primera de este trabajo (ARAGÜES y ALBERTO, 1978).

El cálculo de las sales solubles totales se realizó de la siguiente manera: se colocaron 10 g. de cada suelo, CU y HN, en tubos de

centrífuga de 50 ml. Se añadieron 25 ml. de agua desionizada y se agitó en agitador mecánico de vaivén durante 30 minutos. Se centrifugó a 3.000 r.p.m. durante 5 minutos y se decantó la solución sobrenadante. Esta operación se repitió hasta alcanzar en la solución decantada una CE de 0.1 mmhos  $\text{cm}^{-1}$ . Los decantados se recogieron, se llevaron a volumen, y en el total se determinaron las concentraciones de aniones y cationes por los métodos propuestos por RICHARDS (1954), excepto sulfatos que se determinó por el método de Nemeth. Todo el proceso se realizó por duplicado para obtener valores más representativos de los suelos estudiados.

El método utilizado por la escuela rusa para realizar el cómputo de sales tóxicas y no tóxicas, se basa en la unión de determinados aniones y cationes (expresados en base equivalente) para dar las correspondientes sales. Primero se computan los carbonatos, luego los bicarbonatos, a continuación los sulfatos y por último los cloruros. De forma general, la unión se inicia por las sales más insolubles, para seguir con las más solubles. El orden, por lo tanto, es el anteriormente establecido, y estos aniones se van uniendo ordenadamente al calcio, después al magnesio y por fin al sodio (IVANOVA, 1939; KOVDA, 1965; SELIAKOV, 1965; BAZILEVICH, 1968). Hay que señalar que el número de miliequivalentes de aniones y cationes debe ser idéntico, para que al realizar el cómputo los valores obtenidos sean coherentes. Ello obliga a una conversión porcentual de los valores analíticos, que pueden modificar en parte los valores reales. Para convertir estos valores a meq/l. se tomó como valor medio el de  $1/2 \Sigma$  (cationes + aniones). Como se verá más adelante el error introducido al realizar este artificio matemático es despreciable en este trabajo. Sin embargo, conviene resaltar que en aquellos casos en que la suma de aniones y la de cationes no sean aproximadamente equivalentes, el método ofrecería serias dudas científicas.

El método seguido por la A. O. A. C. (1965) para aguas es justamente el contrario del indicado más arriba. Se empieza computando las sales más solubles, para acabar con las más insolubles. Como se comprobó, ambos métodos conducen a idénticos valores de sales. El cómputo se realizó en un ordenador IBM modelo 1130\*.

\* Se agradece a D. Valerio Gómez la confección del programa para el ordenador.

## RESULTADOS, DISCUSION Y CONCLUSIONES

### 1. *Dinámica iónica del lavado*

El lavado es el proceso de transporte (con disolución previa, en su caso) de las sales solubles de un suelo por el agua que pasa a través del mismo. Es lógico pensar, que la velocidad de eliminación de las sales dependerá en gran medida de la mayor o menor solubilidad de las mismas, así como de factores inherentes al proceso de transporte en un material no inerte. Entre estos últimos, conviene resaltar aquí dos fenómenos que ayudarán a interpretar los resultados analíticos de cationes y aniones de los extractos obtenidos, en relación con las condiciones en que se realizó la extracción y la composición del suelo: *a*) el «efecto de dilución catiónica», por el que se favorece la adsorción de los divalentes por los coloides del suelo, ya que su actividad viene aumentada más que la de los monovalentes por efecto de la dilución de la solución del suelo (DUCHAFOUR, 1970), y *b*) el efecto de adsorción negativa (o exclusión aniónica) en las proximidades de las partículas del suelo cargadas negativamente con el consiguiente resultado de que la concentración de la solución del suelo fuera de la zona de interacción de las partículas aumenta. Además, las especies aniónicas «aparecen» antes en los percolados, debido al fenómeno de exclusión antes mencionado. El efecto de adsorción negativa es directamente proporcional a la superficie específica del suelo, y a su naturaleza coloidal, -e inversamente proporcional a la concentración de su solución (BOWER and GOERTZEN, 1955).

Las figuras 1 y 2 muestran los resultados obtenidos en este apartado. En ellas se representa en ordenadas  $C/C_r$  (donde  $C$  es la concentración acumulativa ( $C = \sum c_i$ ) del ion en consideración en el estadio de lavado «*i*» correspondiente, y  $C_r$  es la concentración total de ese ion obtenida en el método de sales solubles totales), frente al número de volúmenes de poros desplazados por la solución infiltrante,  $V_p/V_0$  (donde  $V_p$  es la fracción de percolado (25 ml.), y  $V_0$  es la capacidad volumétrica de agua de la columna de suelo en estudio). En el eje superior de las abscisas se representan los centímetros equivalentes de agua percolados.

De forma general, se observa que ninguna curva alcanza valores unidad. En otras palabras, los valores de aniones y cationes

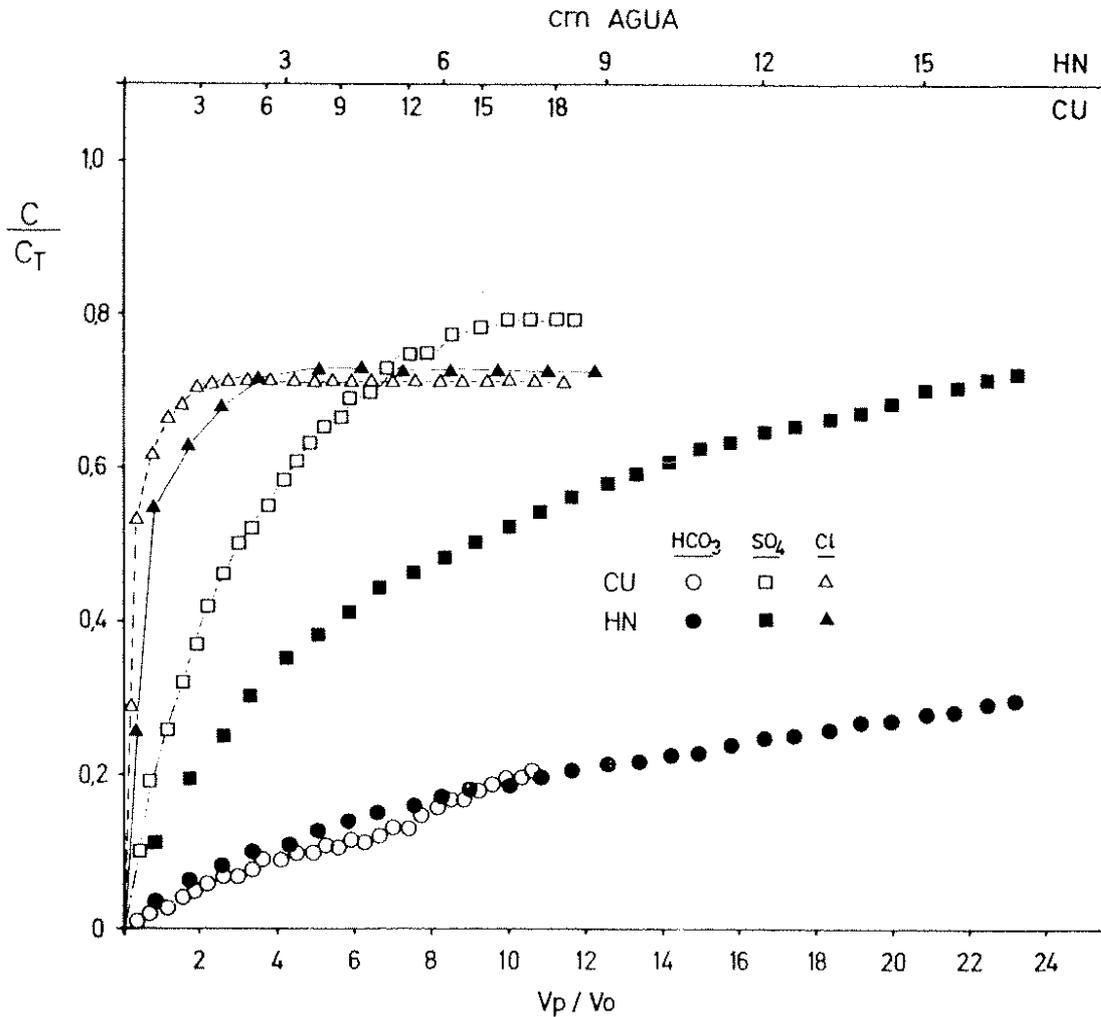


FIG. 1. Dinámica aniónica durante el proceso de lavado de los suelos CU y HN.

obtenidos en el método de sales solubles totales (SST) fueron mayores que los correspondientes acumulativos obtenidos por percolación de las columnas de suelo. Ello puede justificarse porque la eliminación de sales en SST fue más completa que en la percolación (valores finales de 0.1 mmho/cm. en el primero, frente a valores finales de aproximadamente 0.8 en el segundo), por la posibilidad de una solubilización total o parcial de partículas sólidas en SST, que no se solubilizaron (o lo hicieron en menor medida) en la percolación y por los efectos de dilución catiónica y adsorción negativa antes mencionados. Por otro lado, la existencia de zonas ciegas u ocluidas en las columnas de suelo (agua estagnante), contribuiría a la disminución relativa de los valores de C. Ambos

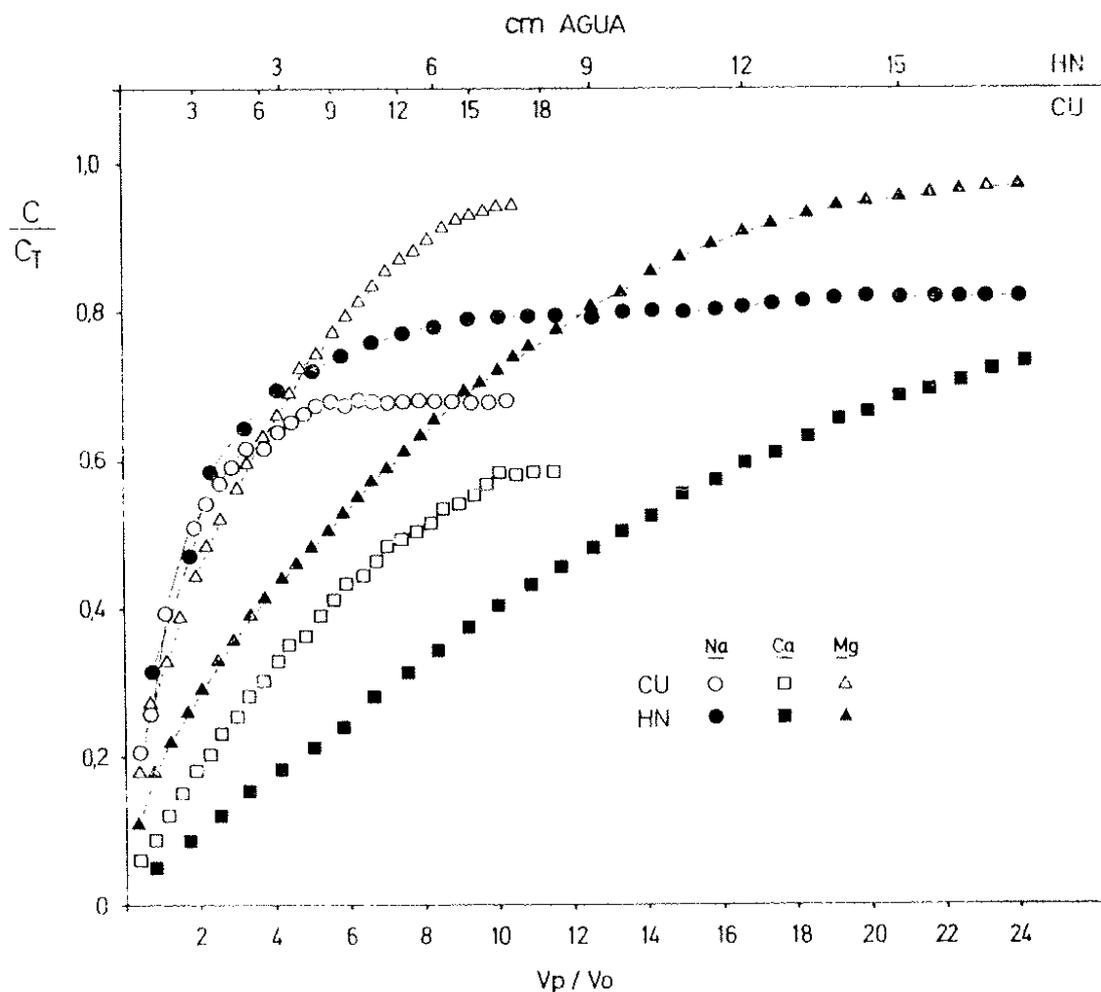


FIG. 2. Dinámica catiónica durante el proceso de lavado de los suelos CU y HN.

hechos condicionan, en mayor o menor medida, el que la razón  $C/C_T$  no alcance valores unidad.

En general, se observa que las pendientes de las curvas para el suelo CU son mayores que las correspondientes de HN, demostrando claramente la mayor efectividad del lavado en CU, como quedó señalado en la parte primera de este trabajo.

Como era de esperar, las curvas para bicarbonatos muestran una tendencia claramente diferenciada de las demás. En efecto, la pendiente muy baja de las curvas, y los valores muy pequeños de  $C/C_T$  (entre 0.2 y 0.3 para el final de la experiencia), son reflejo de la dinámica química del sistema  $\text{CaCO}_3 - \text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$  por la que viene gobernada la aparición de los iones bicarbonato. Además, como ya se mencionó en la parte I de este trabajo, el

aumento de pH observado para el suelo CU en sus últimas fracciones de percolado, coincide con un aumento correspondiente de la pendiente de la curva para ese suelo.

Por el contrario, las curvas para cloruros son las de mayor pendiente de todo el proceso, reflejo de la alta solubilidad asociada a sus sales, y del efecto de adsorción negativa antes mencionado. Los aparentemente bajos valores de  $C/C_r$  obtenidos para el ion  $Cl^-$ , comúnmente considerado como muy móvil e «inerte», son cuestionables, aunque pueden justificarse en parte por lo mencionado más arriba. Otro fenómeno que ayudaría a explicar este comportamiento no previsto es la posibilidad de una adsorción específica de los iones cloruro a los grupos alúmina de las superficies caoliníticas (BOLLAND, *et al.*, 1976), que por la mecánica del experimento tendría más importancia en el proceso de percolación.

Las curvas de sulfatos son de especial significación para justificar algunas de las conclusiones obtenidas en la parte primera de este trabajo. Así, mientras para HN la curva muestra una lenta pero continua disolución a lo largo de todo el proceso, para CU la parte final de la curva se hace asintótica, indicando que la cantidad de yeso que se disuelve es mínima en las últimas fracciones de percolado. Ello justifica, por un lado, el aumento relativo de pH observado para CU en las últimas fracciones de percolado, y por otro el que el suelo HN, a pesar de alcanzar valores altos de SAR en el extracto saturado, se comportase satisfactoriamente en el proceso de lavado sin aparecer los fenómenos negativos típicos de los suelos salino-sódicos (bruscos descensos de K y elevados valores de pH). Parece interesante indicar que la mayor pendiente de las curvas para las primeras fracciones de percolado reflejan primordialmente la presencia de sulfatos «solubles» (entendiendo por sulfatos solubles aquellos que lo son más que el yeso), especialmente  $Na_2SO_4$  como se observa en la figura 3, así como probablemente la de yeso de pequeño tamaño de cristal (mayor superficie específica), y el efecto salino atribuible a otras sales de iones no comunes al  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ . La menor pendiente del tramo final de las curvas representa la solubilidad del yeso para las condiciones del experimento. Además, se observa que aproximadamente un 20 % de las sales de sulfatos presentes en CU no han sido disueltas o han sido retenidas por la columna de suelo.

Las curvas para los cationes (fig. 2) son más complejas, pues aquí intervienen además las conocidas interacciones en la interfase sólido-solución; así, los fenómenos de intercambio catiónico no tienen por qué haber sido equivalentes en SST y en la percolación de las columnas de suelo (por ejemplo, debido al efecto de dilución catiónico), lo que dificulta la interpretación de los resultados. Otra limitación a considerar es que, para facilitar la mecánica del experimento, la columna de suelo HN (100 g.) tenía aproximadamente una altura mitad de la CU (200 g.). Es lógico pensar que la presencia de agua estagnante fuera mayor para este último caso, como parece quedar en parte reflejado por los valores  $C/C_r$  menores en CU que en HN. Teniendo en cuenta estas limitaciones, es aparente que las pendientes de las curvas CU son mayores que las correspondientes HN en todos los casos excepto en el sodio. Es decir, mientras de forma general la efectividad del lavado catiónico es mayor en CU que en HN, en el caso del sodio es básicamente la misma para ambos suelos al inicio de la experiencia, y apreciablemente mayor en HN para el final de la experiencia. En otras palabras, hay un 12 % más de sodio retenido por el suelo CU en relación con el retenido por HN; este sodio, presumiblemente adsorbido —al menos en parte— en las posiciones de cambio de las partículas sólidas, justifica el mayor descenso relativo de la conductividad hidráulica  $K$ , y el aumento relativo de pH observados en el suelo CU en la parte I de este trabajo. Por otro lado, la primera parte de las curvas, de elevada pendiente, se corresponde con el «sodio soluble» presente en la solución del suelo (ver también figs. 3 y 4), mientras que la segunda parte, de pendiente mucho menor, debe atribuirse al sodio de cambio intercambiándose con el calcio proveniente del yeso presente en el suelo. De ahí que las pendientes de las curvas para calcio sean menores que las correspondientes para sulfatos. Por otro lado, hay que señalar que los valores  $C/C_r$  para el magnesio son los más altos obtenidos en la experiencia.

De la figura se deduce que el suelo CU ha llegado aparentemente a un equilibrio dinámico, como se demuestra por las curvas prácticamente asintóticas al final de la experiencia, mientras que en HN —a pesar de haber utilizado la mitad de suelo que en CU—, todavía se observan variaciones iónicas —con toda probabilidad debidas a la disolución del yeso—, que demuestra un aumento del

sodio y magnesio puestos en solución provenientes del complejo de cambio, y un descenso relativo de la pendiente del calcio debido a su adsorción en las posiciones de cambio.

En conclusión, el estudio de la dinámica iónica del lavado explica adecuadamente los resultados obtenidos en la parte primera de este trabajo; principalmente, permite justificar el comportamiento no previsto del suelo HN (salino-sódico, según la clasificación del U. S. Salinity Laboratory), e indica la importancia que la dinámica iónica tiene sobre las propiedades físico-químicas (K y pH) del suelo. Además, demuestra que aunque la efectividad aparente del lavado —expresada en términos de CE— es alta, la cantidad de sales retenidas es apreciable, lo cual deberá tenerse en cuenta en tanto en cuanto posible fuente de salinidad. Finalmente, indica que el proceso de lavado es en general lento, lo que conduce a la conclusión de que el tiempo debe ser una variable a considerar en los procesos de recuperación de estos suelos, y en especial del HN.

## 2. *Cómputo de sales*

La mayoría de los científicos establecen diferencias a la hora de interpretar los valores de aniones y especialmente de cationes en función de su efecto sobre las plantas, principalmente para algunas especies concretas (árboles frutales, plantas ornamentales, etc.). Algunos autores rusos (como los citados en el apartado de material y métodos), sugieren la necesidad de computar los resultados analíticos y transformarlos en sales, y con ellos poder establecer diferencias entre sales tóxicas y no tóxicas. En este sentido entienden por umbral de toxicidad de las sales, la máxima cantidad de las mismas en el suelo, por encima de la cual el crecimiento y desarrollo de las plantas no halófitas se ve impedido o perjudicado. Correspondientemente, un suelo salino queda definido como aquel cuyo contenido en sales solubles excede el umbral de toxicidad.

El umbral de toxicidad de las sales depende de su composición, del grado de humedad del suelo y de otras propiedades del suelo (tamaño de partículas, etc.), así como de las condiciones climáticas, el tipo de plantas y su estado fisiológico de desarrollo, las prácticas agrícolas, etc. A pesar de estas limitaciones, BAZILEVICH (1968)

ha realizado una escala tentativa de umbral de toxicidad de los iones, aplicables a diferentes regiones áridas:

<i>Anión</i>	<i>Umbral de toxicidad</i>	
	<i>%</i>	<i>meq/100 g.</i>
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0.001	0.03
Cl <sup>-</sup>	0.01	0.3
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.05	0.8
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.08	1.7

En general, todos los cationes se consideran tóxicos para las plantas, pero de forma especial el sodio, que influye también negativamente sobre las condiciones del suelo. En cuanto a las sales, consideran especialmente tóxicos el carbonato sódico, así como el carbonato magnésico y los bicarbonatos de sodio y magnesio. El bicarbonato cálcico se considera no tóxico. Entre los sulfatos, los de sodio y magnesio se consideran tóxicos; el sulfato cálcico no tóxico. Todos los cloruros son tóxicos.

Las figuras 3 y 4 muestran el cómputo de sales realizado para cada fracción de percolado. Cada punto representa el promedio de cuatro valores. Como se deduce de ambas figuras, la dinámica iónica del lavado de estos dos suelos viene bien representada por únicamente cinco sales distintas, aunque el número de sales potencialmente computables era de doce. Ello permite una representación de los resultados más clara y sencilla que si se realizase en forma iónica, lo cual no es menospreciable en procesos complejos como el que nos ocupa.

En general, las curvas computadas están de acuerdo con lo expuesto en apartados anteriores, y su continuidad, sin cambios bruscos, excepto en un punto para el Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en el suelo CU, demuestra la coherencia del método de computación para los suelos estudiados y la mecánica del experimento. Así, las pendientes de las curvas computadas están en relación directa con las solubilidades relativas de las sales representadas: el Na Cl, la sal más soluble a la temperatura en que se realizó el experimento, es la de mayor pendiente (mayor velocidad de lavado), seguida por el Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Mg SO<sub>4</sub>, etc. Como era lógico esperar, se observa de nuevo la mayor efectividad de lavado del suelo CU frente al HN (ver curvas de Na Cl para ambos suelos). Por otro lado, el método de cómputo

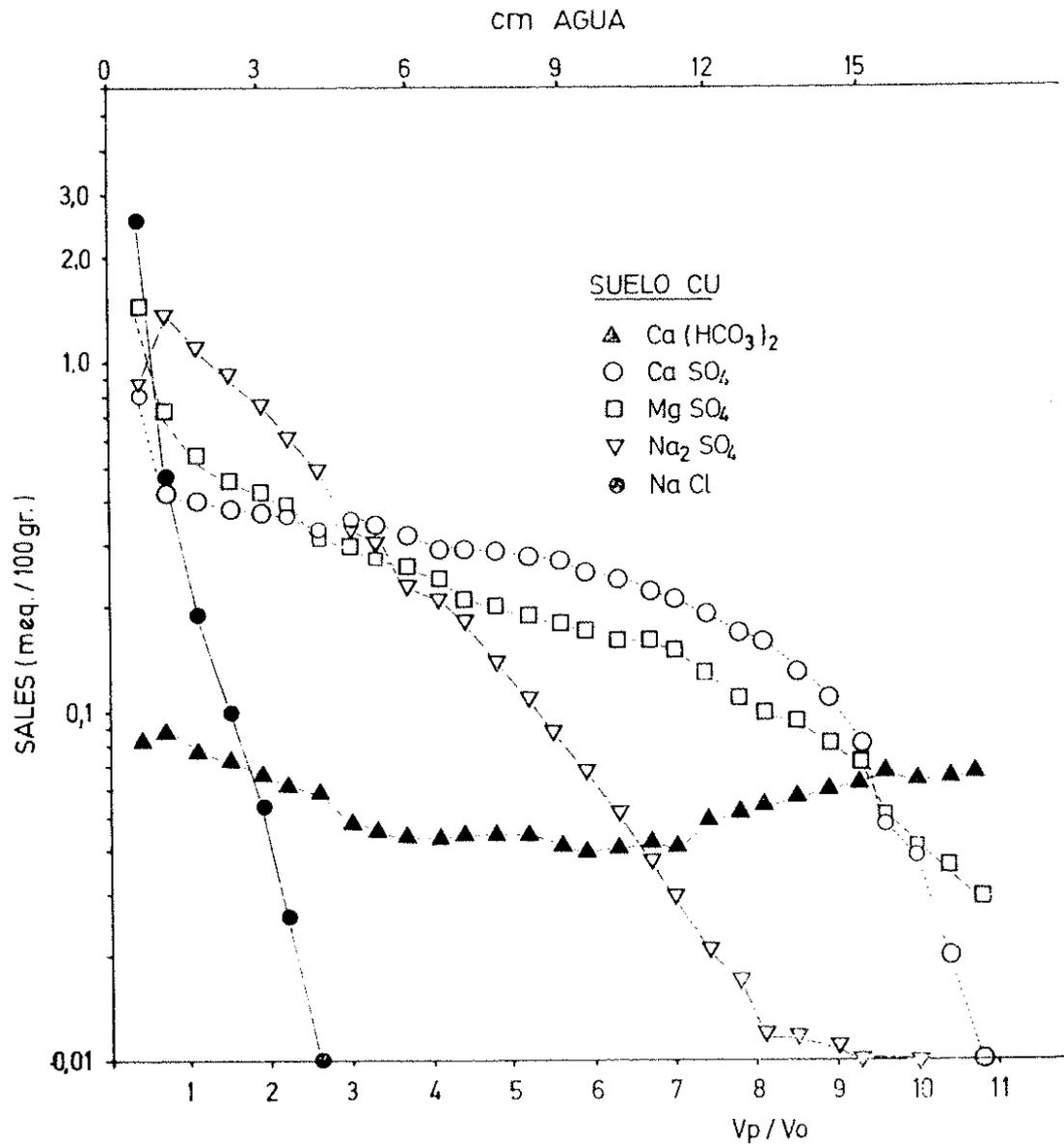


FIG. 3. Cómputo de sales durante el proceso de lavado del suelo CU.

realizado permite ver claramente el aumento relativo del bicarbonato cálcico en el suelo CU para el final de la experiencia, coincidiendo con el aumento de pH observado para este suelo en la parte I de este trabajo. Además, se observa la importante diferencia de las curvas de  $\text{CaSO}_4$  para ambos suelos: mientras para CU la curva de  $\text{CaSO}_4$  desciende al final bruscamente, indicando la extinción (o no solubilización y lavado hacia las aguas de percolado) del yeso, para HN la curva es mucho más «plana», y los

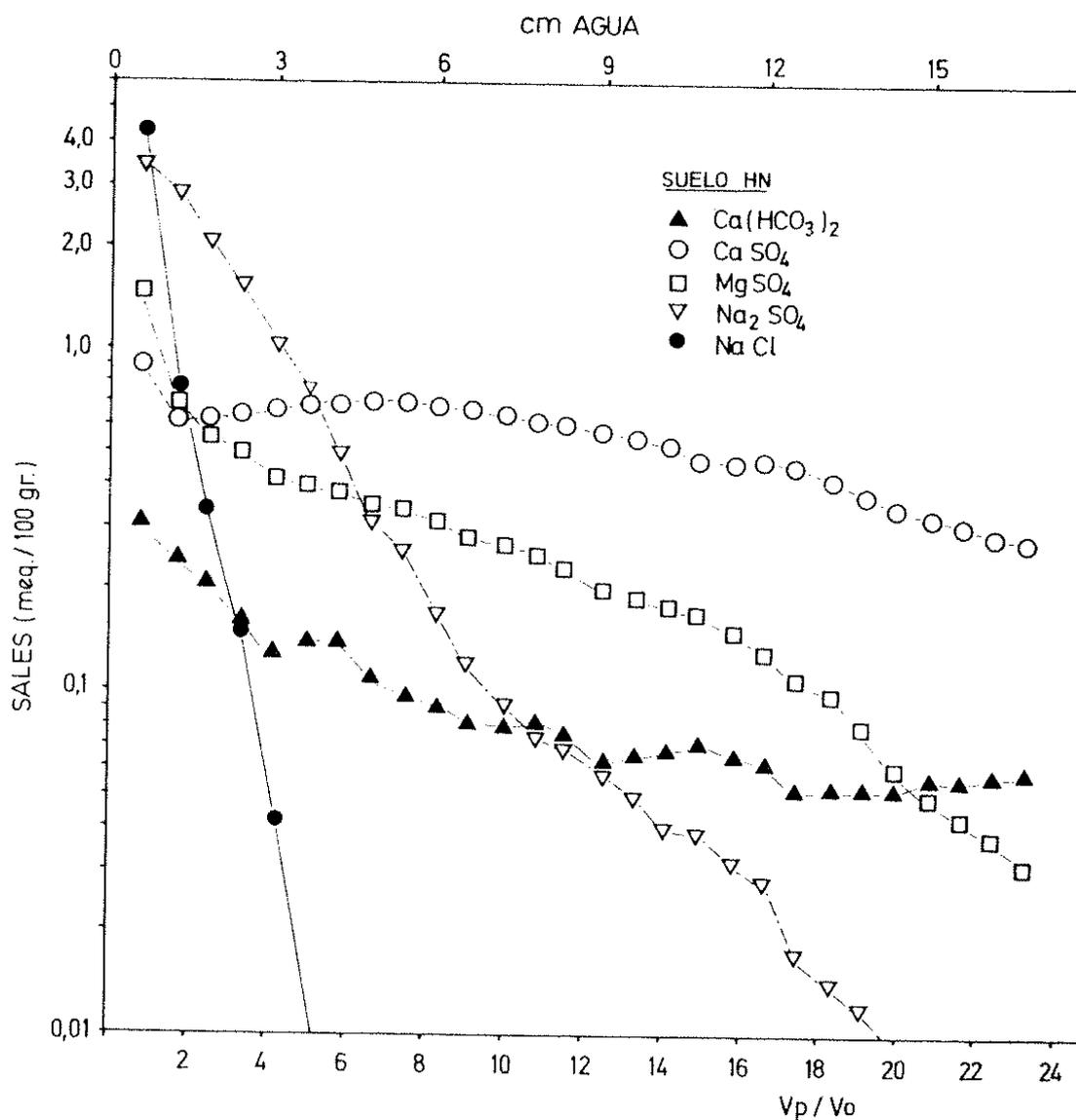


FIG. 4. Cómputo de sales durante el proceso de lavado del suelo HN.

correspondientes valores de  $\text{CaSO}_4$  para el final de la experiencia son todavía elevados. Ello confirma el papel beneficioso del yeso ejercido en el suelo HN.

De acuerdo con los umbrales de toxicidad señalados más arriba, el suelo CU era tóxico en  $\text{NaCl}$  y el HN en  $\text{NaCl}$  y  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Al realizar el lavado, un volumen de poros desplazados fue suficiente para lavar las sales tóxicas en CU, mientras en HN fueron necesarios casi tres volúmenes de poros. Hay que señalar que a estos niveles de lavado, ambos suelos son todavía salinos según la clasi-

ficación del U.S. Salinity Laboratory (RICHARDS, 1954) comúnmente aceptada, indicando una importante discrepancia de puntos de vista de la escuela rusa y americana para este punto en particular.

En conclusión, el cómputo de sales realizado en este trabajo permite observar de una forma clara y sencilla las diferentes velocidades de eliminación de las sales, de acuerdo con su mayor o menor solubilidad, y especialmente resalta la diferencia de comportamiento de los dos suelos estudiados, debido a sus diferencias en la cantidad de yeso presentes en ambos (computado como  $\text{Ca SO}_4$ ). Por otro lado, demuestra que la eliminación de las sales tóxicas es muy rápida. Sin embargo, el considerar este punto como final deseable de lavado, parece subestimar el efecto que el potencial osmótico total tiene sobre la planta, en clara discrepancia con la escuela clásica americana, comúnmente aceptada.

### RESUMEN

En el presente trabajo se analiza la dinámica iónica en los percolados de dos suelos salinos de la Depresión Media del Ebro, durante el proceso de su recuperación, por lavado (en condiciones de laboratorio) con agua desionizada. La cantidad de sales retenidas —o no disueltas— en ambos suelos al final del lavado representan aproximadamente un 20 % de las sales solubles totales presentes. Los resultados obtenidos explican las diferencias de comportamiento de los dos suelos, observadas en la parte primera de este trabajo, resaltando la importancia que el yeso tiene en las variables estudiadas (conductividad eléctrica, conductividad hidráulica y pH). Por otro lado, el cómputo de sales realizado permite observar las diferentes velocidades de eliminación de las sales demostrando que la de las «sales tóxicas» (según algunos autores rusos) es muy rápida. Sin embargo, el considerar este punto como final del lavado, llevaría a subestimar el efecto del potencial osmótico total sobre la planta, en clara discrepancia con los criterios americanos, comúnmente aceptados.

## REFERENCIAS

## A. O. A. C.

- 1965 Methods of analysis. 10 th Ed. Association of Oficial Agricultural Chemist. Washington. 530 pp.
- ARAGÜES, R., ALBERTO, F.  
1978 El proceso de recuperación de dos suelos salinos de la depresión media del Ebro. I: Evolución de la conductividad eléctrica, conductividad hidráulica y pH durante el lavado. *An. Aula Dei*, **14** (1-2):
- BAZILEVICH, N. I., YE. I. PANKOVA, V. V.  
1968 (Clasificación tentativa de suelos por salinidad). *Pochvovedenie*, **6**, 1.477-1.488.
- BOLLAND, M. D. A., A. M. POSNER, J. P. QUIRCK  
1976 Surface charge on Kaolinites in aqueous suspensions. *Aust. J. Soil Res.*, **14** (2): 197-216.
- BOWER, C. A., J. O. GOERTZEN  
1955 Negative adsorption of salts by Soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **19**: 147-151.
- DUCHAFOUR, P.  
1970 Précis de Pédologie. Masson et Cie. Paris, 482 pp.
- IVANOVA, YE. N., ROZANOV, A. N  
1939 (Clasificación de suelos salinos). *Pochvovedenie*, **7**: 234-249.
- KOVDA, V. A.  
1965 Alkaline soils of sodium carbonate salinization. *Agrokémia és Talajtan*, **14**: 624-632.
- RICHARDS, L. A.  
1954 Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *USDA. Agric. Handbook*, **60**:
- SELIKOV, S. N.  
1965 (Determinación de las reservas de sales solubles en suelos salinizados). *Pochvovedenie*, **6**: 957-969.