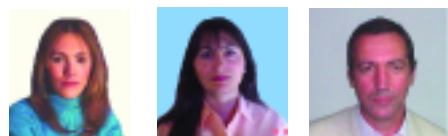


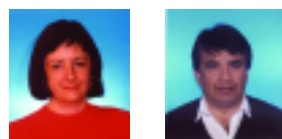


# Restauración de suelos salinizados mediante técnica de intercambio catiónico



Por Cecilia López, Silvina Videla, y Eduardo Ercoli,

Laboratorio de Bioprocesos, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza



Cecilia Calleja y Oscar Segura

Yacimiento Loma La Lata, REPSOL YPF, Neuquén

El presente trabajo es un estudio para la restauración de suelos salinizados por el vertido de aguas de producción, utilizando la técnica de intercambio catiónico. Se presentan datos de la etapa inicial que corresponde a estudios de laboratorio. Se trabaja en columnas de suelo para definir las propiedades físicoquímicas del suelo y evaluar las posibilidades de rehabilitarlo mediante la aplicación de mejoradores químicos y lavados sucesivos. El suelo en estudio tiene características salino-sódicas, con un PSI de 50%, sus partículas son arcillosas y se encuentran totalmente dispersas formando una capa superficial dura y compacta que impide el crecimiento de la vegetación. En los ensayos de laboratorio se pudo comprobar que el agregado de una enmienda química, siguiendo los lineamientos del Manual de suelos salinos y sódicos propuestos por USDA (United States Department of Agriculture), y el posterior lavado de suelo permiten disminuir el PSI a valores inferiores al 15%, valor límite que no debe ser superado para evitar el deterioro de la estructura y la calidad del suelo. Los resultados de este estudio preliminar permitieron justificar la realización de un estudio piloto sobre cinco hectáreas de terreno salinizado.

El presente trabajo fue realizado con suelo proveniente de un sitio salinizado. El primer relevamiento tuvo como objetivo determinar las causas por las cuales no crecía vegetación en las 54 hectáreas que abarca el sitio. Una vez realizados los análisis de rutina se concluyó que la zona no se encontraba afectada por hidrocarburos pero las concentraciones de sales, que en su mayor parte correspondían a cloruro de sodio, provocaron el deterioro del suelo superficial y la falta de crecimiento vegetal. Ante esta realidad se propuso a la empresa Repsol YPF realizar un estudio en laboratorio que permitiera definir si era posible aplicar las técnicas de rehabilitación de suelos salinos sódicos para mejorar las propiedades físico-químicas del suelo. En laboratorio se realizaron dos ensayos con columnas de suelo. El primer ensayo tuvo como objetivo determinar la fracción de agua de lavado, velocidad de infiltración y caracterización de lixiviados. El segundo ensayo consistió en el cálculo de la enmienda química y el agregado de yeso al suelo para evaluar la eficiencia de la enmienda y del lavado. Los resultados obtenidos de los ensayos en columnas permitieron iniciar una primera etapa de trabajos de rehabilitación sobre cinco hectáreas de campo.

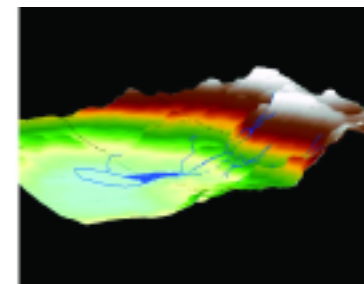
## Desarrollo

### Condiciones ambientales que afectan el suelo en estudio

#### Características del suelo

El suelo en estudio proviene de un sitio salinizado de 54 hectáreas, ubicado en la provincia de Neuquén, en la región Extra Andina y en la subregión Árida Serrana (según el *Atlas de suelos de la República Argentina*). En esta región, se hallan los siguientes grupos y subgrupos de suelos: Torriortentes y Torripsamientos típicos (del orden de los Entisoles). Estos son suelos secos o salinos de regiones áridas, frías o cálidas, dominantes en los depósitos de arenas estabilizados o móviles de las dunas y médanos, de depósitos eólicos actuales o de sitios geológicos anteriores. La mayoría son neutros o calcáreos y se encuentran sobre pendientes moderadas a fuertes. Estos suelos son característicos de las provincias de clima seco.

Poseen restricciones climáticas, poca capacidad de retención hídrica y, a veces, baja a moderada capacidad de provisión de nutrientes dada su escasa capacidad de



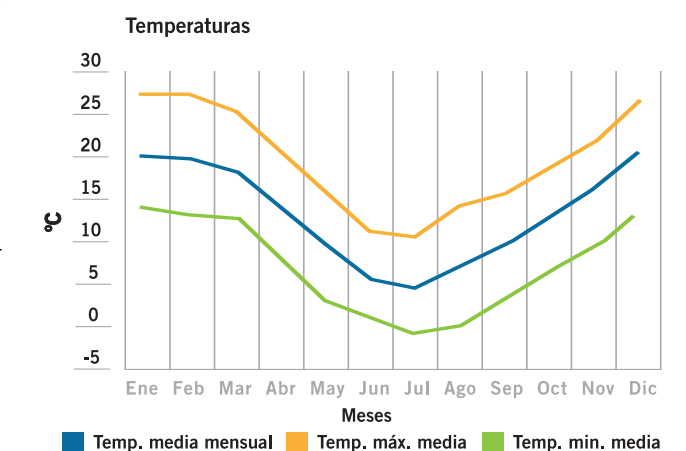
intercambio catiónico. Se caracterizan por tener texturas medias a gruesas (franca, franca arenosa, areno franca) siendo común, también, encontrar perfiles esqueléticos donde los fragmentos gruesos superan el 75% por volumen de suelo. En otros casos, pueden presentar horizontes subsuperficiales enriquecidos levemente con carbonato de calcio o con sales solubles. En general estos suelos son profundos, bien drenados y masivos o débilmente estructurados.

Poseen muy bajos contenidos de materia orgánica, que no excede el 1%. Poseen dispares valores de capacidad de intercambio catiónico, según la naturaleza y composición mecánica de los materiales que les han dado origen, siendo el caso más frecuente valores próximos a 15 meq/100g de suelo, que debe atribuirse enteramente al constituyente arcilla, dada la exigua participación de materia orgánica que presenta. Su complejo de intercambio posee plena saturación con bases y su pH está próximo a la neutralidad, casi siempre apenas por encima de 7; pueden presentar fases salinas y sódico salinas.

#### Información climática

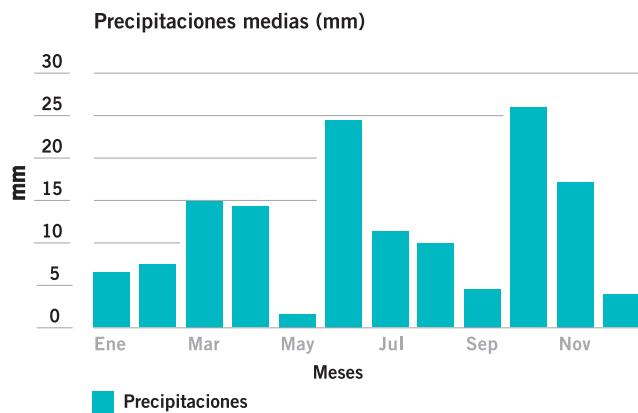
Específicamente el área en estudio se encuentra enmarcada en el clima semiárido de meseta. Este tipo de clima constituye una transición hacia el clima árido patagónico. Las precipitaciones son menores a 300 mm/año. Esta región se caracteriza por un déficit hídrico que se acentúa de oeste a este.

Las temperaturas medias anuales oscilan alrededor de los 13 °C. Las temperaturas medias de enero son cercanas a los 21 °C, mientras que el promedio del mes de julio es de 4,8 °C.



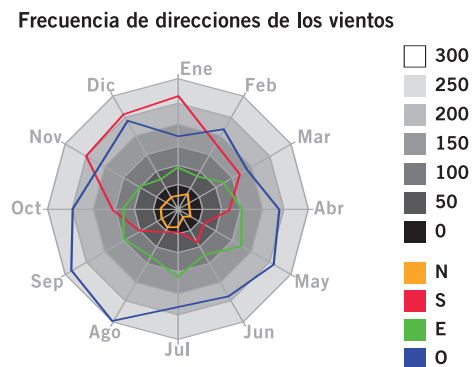
#### Precipitaciones

El régimen pluvial es de tipo Pacífico, con máximas en invierno. Las precipitaciones anuales son de 140,5 mm lo que ubica a la región dentro de la franja seca de la República Argentina.



### Régimen de vientos

La dirección de los vientos predominantes es del oeste (W) en el invierno y para la época estival desde el suroeste (SW). La velocidad del viento decrece en los meses de verano, produciéndose los picos máximos en la primavera, en coincidencia con las oscilaciones de temperatura.



### Características físicas del suelo

Para la determinación de características físicas se utilizaron los métodos de evaluación de calidad y salud del suelo de la USDA. Al suelo obtenido de la Laguna se le determinó una serie de análisis que serán utilizados como base del estudio, puesto que indican la situación actual del predio.

Las muestras de suelo para evaluar fueron tomadas de los primeros 0,30 m.

Se distinguen cuatro perfiles de suelos, cada uno con las siguientes características:

Perfil	Color	Textura	Estructura
	Pardo rojizo hasta los 30 cm de profundidad	Arcillo arenoso	Laminar
	Marrón rojizo hasta el metro de profundidad	Areno arcilloso	En bloques, maciza
	Amarillo anaranjado	Arenoso	Suelta
	Amarillo grisáceo	Arenoso	Compacta: tosca dura

El suelo está compuesto por partículas arenosas y arcillosas. En su mayor proporción se encuentran las partículas de arcilla, que pertenecen al grupo de las arcillas montmorilloníticas. Las características de este tipo de arcilla es que posee la propiedad de hincharse y dilatarse, conforme cambia el contenido en agua. El suelo carece de plasticidad cuando está mojado, pero en seco se torna muy compacto y casi impenetrable al impacto mecánico.



Costras salinas

Perfiles de suelos

Los agregados del suelo superficial presentan una estructura en forma de bloques, siendo los más pequeños de un tamaño comprendido entre los 5 y 10 mm de diámetro. Los bloques más grandes tienen hasta 5 cm de diámetro. Los agregados están bien formados y definidos *in situ*, y cuando se los disturba, la estructura se quiebra en agregados muy evidentes, confiriéndole al suelo una estructura fuerte. Poseen un alto grado de estabilidad que puede ocasionar algunos problemas en la labranza o movimientos en la capa superficial, debido a la dureza y compactación de los agregados. El color pardo rojizo suele ser característico de suelos que contienen compuestos ferrosos o arcillas saturadas con Fe<sup>++</sup>. La densidad del suelo es la relación de la masa de las partículas de suelo seco con el volumen combinado de las partículas y los poros. Los suelos arenosos de baja porosidad tienen una mayor densidad (1,2 a 1,8 g/cm<sup>3</sup>) que los suelos arcillosos (1,0 a 1,6 g/cm<sup>3</sup>), los cuales tienen un mayor volumen de espacio de poros. Se encontró que el suelo evaluado tiene una densidad promedio entre ambas partículas.

### Caracterización química

Para la determinación de propiedades químicas se utilizaron las siguientes técnicas analíticas:

- pH, Método EPA SW 9045C.
- Conductividad, EPA 9050 A y *Soil Quality Test Kit Guide. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo.*
- Capacidad de intercambio catiónico y cationes intercambiables: método del acetato de amonio y determinación por absorción atómica para determinación de los cationes.
- Aniones en extracto de saturación. Extracto: métodos N° 2, N° 3a y N° 3b. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Cloruros: método de Mohr.

Carbonatos y bicarbonatos: método N°12 Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Sulfatos: método N° 14a. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos

- Cationes en extracto de saturación: Sodio, Potasio, Calcio y Magnesio. Extracto: método N° 2, N° 3a y N° 3b. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Lectura: Métodos EPA SW 846 Serie 7000.

### Salinidad total

Estas determinaciones permiten obtener las condiciones de salinidad que presenta el suelo y las relaciones químicas que intervienen en el proceso de salinidad.

pH	9,05
Conductividad (mS/cm)	5,0

Según la clasificación de la USDA, el pH del suelo es muy fuertemente alcalino.

La conductividad indica que el suelo es moderadamente salino.

### Concentración de cationes y aniones en extracto

Cationes	Concentración (meq/l)	Aniones	Concentración (meq/l)
Sodio	42,6	Cloruros	26,9
Potasio	0,5	Sulfatos	7,44
Calcio	5,3	Carbonatos	N/C
Magnesio	0,9	Bicarbonatos	7,4

Se observa un exceso de sodio; este representa el 86% del total de los cationes analizados y se encuentra en combinación directa con los cloruros, sulfatos y bicarbonatos encontrados en el suelo. Las concentraciones de calcio y magnesio se encuentran por debajo de los requerimientos mínimos para un buen desarrollo radicular. La concentración de cloruros y bicarbonatos son tóxicas para el desarrollo de las plantas. El cloruro de sodio es el responsable de la dispersión de las arcillas lo que provoca el encostramiento superficial y problemas de permeabilidad al agua.

### Capacidad de intercambio catiónico

Los constituyentes superficiales activos de los suelos que tienen propiedades de intercambio de cationes se llaman en conjunto "complejo de intercambio". La cantidad total de cationes intercambiables que un

suelo puede retener se denomina "capacidad de intercambio catiónico" (CIC) y generalmente se expresa en miliequivalentes por 100 gramos de suelo.

A partir de la CIC se expresan las cantidades relativas de varios cationes intercambiables presentes en el suelo, como porcentaje de la capacidad de intercambio catiónico.

Unidades	CIC	Ca	Mg	Na	K
meq/100g suelo	33,17	11,10	4,58	16,30	1,28
%	100	33,16	13,82	49,15	3,86

Como puede observarse el sodio en el complejo de cambio ha desplazado al calcio generando los problemas de intoxicación que se presentan visiblemente en el suelo. Por lo tanto, se debe recuperar esa pérdida y a su vez lograr la disminución del PSI desde su valor actual de 49% hasta un porcentaje inferior al 15%.

### Desarrollo experimental

En el proceso de intercambio catiónico, el desplazamiento del catión sodio va a estar condicionado por la presencia del agua. La incorporación del agua y su transporte a través del perfil del suelo es el factor limitante en este proceso de intercambio catiónico. Por esta razón, el objetivo de este primer ensayo fue la determinación de:

- Velocidad de infiltración del agua en un perfil de suelo de 30 cm de espesor.

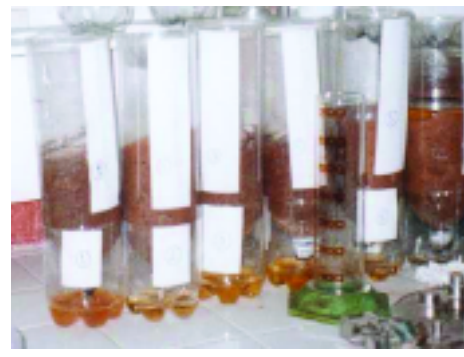
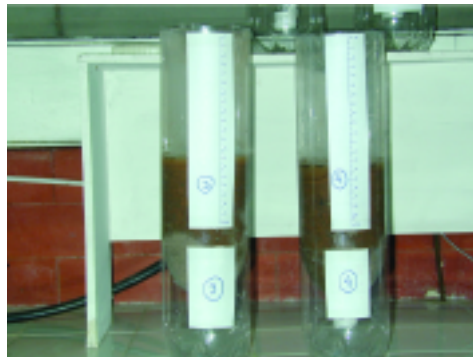
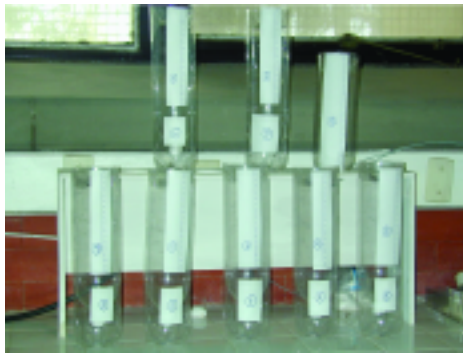
### INFORMACIÓN DEL SUELO:

#### Análisis

Textura	Arcillo Arenoso
Capa compactada	Superficial (2 cm)
Raíces	No
Vegetación	No
Profundidad del horizonte superior	30 cm
Rocas	Despreciable
Color	Pardo rojizo
Olor	S/O
Agregados	Minerales
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,23
Contenido de agua en volumen (g/cm <sup>3</sup> ) y proporción agua: suelo	0,033
Porosidad del suelo (%)	53,5
Porosidad de aireación del suelo (%)	50,12
Fracción de humedad del suelo	0,026
Espacio de poros ocupado por agua (%)	6,58
Porcentaje de agua del suelo en volumen (%)	3,33
Volumen de rocas (cm <sup>3</sup> ) por 350 cm <sup>3</sup> de suelo	Despreciable

#### Estructura

Tipo	Tamaño	Grado	Índice de estructura	Desleimiento o estabilidad
En bloques	Medio-grueso	Fuerte	50%	Clase 5



- Volumen de agua lixiviada.
- Capacidad de retención hídrica (cantidad de agua necesaria para llevar el suelo a saturación).

#### Primer ensayo

Como primer paso, se procedió al armado de las columnas de suelo, para lo cual se utilizaron lechos percoladores contruados con las mitades superiores de botellas de PET de 2,25 litros de capacidad, soportadas boca abajo por sus medias botellas correspondientes. Se utilizó agua destilada de conductividad 0,01 mS/cm. El suelo utilizado en algunos casos fue tamizado en 2 y 4 mm.

Los datos obtenidos son los siguientes:

### Conclusiones del primer ensayo

#### Volumen de agua lixiviada

Para que el suelo alcance su estado de saturación (capacidad de retención hídrica) y permita un mínimo volumen de lixiviado se requieren de grandes volúmenes de agua. Los tiempos para que la lámina de agua atravesase el perfil de suelo es de aproximadamente 10 días. Para el trabajo en campo se deberán tener en cuenta estos datos para no aplicar en una sola etapa grandes volúmenes de agua.

Muestra	Granulometría	Textura	Volumen de suelo (cm <sup>3</sup> )	Volumen de agua agregado (cm <sup>3</sup> )	Volumen de agua lixiviada (cm <sup>3</sup> )	CE del suelo lavado (mS/cm)	CE del lixiviado (mS/cm)
5	2 mm	Arcillo arenosa	100	200	20	4,4	3,40
6	2 mm	Arena	100	150	90	<1	0,3
7	Sin tamizar	Arcillo arenosa	200	200	45	5,4	0,45
8	4 mm		200	200	11	-	15,27
9	con partículas		200	200	13,2	-	0,72
10	4 mm sin		200	200	30	8,30	0,73
11	partículas finas		100	200	28	7,36	0,45

Muestra	Volumen de agua (cm <sup>3</sup> )	Volumen de suelo (cm <sup>3</sup> )	Tiempo	Velocidad de infiltración		
				cm <sup>3</sup> /min	cm <sup>3</sup> /h	cm <sup>3</sup> /s
5	200	100	10 días	0,013	0,83	0,00022
6	150	100	2 minutos	75	4500	1,25
7	200	200	23 minutos	8,69	521,4	0,15
8	200	200	10 días	0,014	0,833	0,0002
9	200	200	8 días	0,017	1,04	0,0003
10	200	200	5 minutos	40	2400	0,66
11	200	100	2 minutos	100	6000	1,67

#### Velocidad de infiltración

De los ensayos realizados se concluye que el suelo en estudio se comporta de la siguiente forma: posee una velocidad de infiltración muy rápida, de 521,4 cm<sup>3</sup>/h cuando el suelo se encuentra sin tamizar. Esto se debe a que el suelo presenta agregados compactos que impiden que el agua penetre en su superficie en forma homogénea pasando, entonces, a través de grietas y canaliculos entre terrones.

Posee una velocidad de infiltración lenta, menor a 1 cm<sup>3</sup>/h cuando el suelo se encuentra tamizado. En este caso se comprobó que los suelos más finos retienen mayores volúmenes de agua y que a su vez, esta necesita más tiempo para pasar a través del perfil.

Otra característica encontrada es la presencia de arcillas con capacidad de expansión en presencia del agua. Esto dificulta el paso del agua a través del perfil.

#### Variación de la conductividad del suelo y del lixiviado como consecuencia del lavado

En la botella 5, después de los 10 días que demoró el volumen de agua en atravesar el suelo, se observó una variación importante de la conductividad en el suelo (7,34 mS/cm de conductividad inicial vs. 4,4 mS/cm de conductividad final). El agua lixiviada también presentó una conductividad importante, ya que arrastró una gran canti-

dad de sales, una vez producido el "lavado" (0,01 mS/cm de conductividad inicial vs. 3,4 mS/cm de conductividad final).

#### Segundo ensayo

Una vez conocida la capacidad que tiene el suelo para lavar las sales en exceso, se procedió a determinar la cantidad de mejorador necesario para disminuir el porcentaje de sodio intercambiable de 49% a valores inferiores a 15%. Para este ensayo se utilizaron las columnas de suelo armadas en el primer ensayo. Éstas fueron llenadas con suelo hasta una altura de 15 cm, que es la profundidad de restauración deseada. El volumen de suelo contenido en las columnas como así también su densidad aparente, fue registrado en la hoja de trabajo para hacer el cálculo de la enmienda. El suelo empleado fue el caracterizado para el ensayo anterior y tamizado en 4 mm. Se incorporó yeso comercial (CaSO<sub>4</sub>) en la superficie del suelo dentro de las columnas. El mismo fue calculado en la proporción necesaria para disminuir el PSI a los valores propuestos. En este ensayo se realizó también un control de los lixiviados a fin de observar el cambio en las propiedades del suelo, tanto en su parte física a través de una mejor permeabilidad y aumento del volumen lixiviado, como en la parte química a través del intercambio de cationes.

El lavado del suelo se realizó con agua destilada. Se prepararon tres columnas, todas con el suelo caracterizado y con el mismo volumen de suelo agregado. A las columnas denominadas 3 y 4 se les incorporó la mitad de la dosis requerida de yeso (6 gramos). En cambio, en la columna 5 se incorporó la dosis total de yeso calculada (13 gramos).

Los datos de los resultados obtenidos luego del enyesado, son los siguientes:

#### Previo a la enmienda

Na (me/100g)	16,3
Ca (me/100g)	11,1
Mg (me/100g)	4,58
K (me/100g)	1,28
CIC (me/100g)	33,26
PSI %	49,01

Columnas	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>
Na (me/100g)	5,49	5,19	1,24
Ca (me/100g)	23,55	21,55	0,42
Mg (me/100g)	2,71	0,42	0,67
K (me/100g)	2,32	2,29	0,43
CIC (me/100g)	34,07	29,45	17,62
PSI %	16,11	17,62	8,68

Lixiviados (meq/l)	Columna 3	Columna 4
Sodio	145,8	164,4
Potasio	1,27	1,33
Calcio	28,9	33,7
Magnesio	4,9	5,5
Cloruros	45,48	51,25
Sulfatos	120,62	138,54
Carbonatos	N/C	N/C
Bicarbonatos	12,10	13,91

## Conclusiones del segundo ensayo

En los tres casos se logró disminuir el porcentaje de sodio intercambiable. La eficacia de la enmienda es mayor en la quinta columna ya que en ella, el PSI es 8,68%, teniendo en cuenta que en esta columna se utilizó la totalidad de enmienda calculada. En los lixiviados analizados se puede observar que existe una mayor concentración del catión Sodio, que es el que se desea reemplazar y que está asociado directamente a los sulfatos incorporados en la enmienda.

## Conclusiones

De las experiencias realizadas en laboratorio se concluye que:

- El suelo del lugar es tratable.
- Las velocidades de infiltración son bajas, por lo que requerirá de periodos prolongados de tiempo para que se efectúe el lavado del suelo.
- Se requerirán de grandes volúmenes de agua de buena calidad para realizar el intercambio de las bases.
- Las dos características mencionadas anteriormente se deben a la textura del suelo, que además le confiere una capacidad de retención hídrica elevada. Todos estos datos intervendrán en el diseño del sistema de riego, drenaje y recolección de lixiviados.
- Se puede utilizar, y con un buen rendimiento, el sulfato de calcio como enmienda química para ese sitio específico.
- En los ensayos se observó que el rendimiento mayor se obtiene con una menor granulometría del suelo.
- La homogeneización de la mezcla suelo-yeso favorece la eficacia de la enmienda química.
- Es de destacar que luego de realizada la enmienda química se observó un aumento en la velocidad de infiltración del suelo, lo que implica una mejoría en sus propiedades físicas. ■

## Bibliografía

- Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos, *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos*, USDA, Editorial Limusa, 1994.
- Bermejo, Vicente, *Evaluación de parámetros físico-químicos en la recuperación de un suelo salino sódico*. Investigación Agropecuaria, Estación experimental regional agropecuaria Alto Valle de Río Negro, INTA, 1984.
- Instituto de calidad de suelos, *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo*. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica, 1999.
- Chambouleyron, Jorge Luis, "Riego y drenaje" en *Enciclopedia Argentina de agricultura y jardinería*, Fascículos 2, 3 y 4, Buenos Aires, Editorial Acme, 1980.
- Juárez Badillo, Eulalio y Rico Rodríguez, Alfonso, "Fundamentos de la mecánica de suelos" en *Mecánica de suelos*, Tomo 1, Editorial Limusa, 1998.
- Urbano Terrón y Rojo Hernández, *Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell*, Editorial Mundi-Prensa, 1992.