

REHABILITACIÓN DE SUELOS SALINO-SÓDICOS: ESTUDIO DE CASO EN EL DISTRITO DE RIEGO 086, JIMÉNEZ, TAMAULIPAS, MÉXICO

Rehabilitation of Saline-Sodic Soils: A Case Study in Irrigation District 086, Jimenez, Tamaulipas, Mexico

Juana Irma Manzano Banda¹, Patricio Rivera Ortiz^{2*},
Florencio Briones Encinia² y Carlos Zamora Tovar¹

RESUMEN

Se evaluó el efecto de la aplicación de estiércol bovino, yeso, ácido sulfúrico y lavado de suelos sobre la concentración de sales solubles y proporción de sodio en dos suelos salino-sódicos, provenientes del Distrito de Riego 086 de Jiménez, Tamaulipas, México. Se utilizaron macetas con 6 kg de suelo bajo condiciones de invernadero para ensayar dos niveles de salinidad-sodicidad (suelo Carretas con nivel moderado y suelo Macahuistle con nivel alto), dos mejoradores inorgánicos (yeso y ácido sulfúrico) y un mejorador orgánico (estiércol). Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial $2 \times 2 \times 3$. Las variables de respuesta fueron conductividad eléctrica (CE), porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y pH. La salinidad inicial en el suelo Carretas, con $CE = 7.75 \text{ dS m}^{-1}$ y Macahuistle con $CE = 22.2 \text{ dS m}^{-1}$, disminuyó a menos de 4 dS m^{-1} . El PSI inicial del suelo Carretas fue 18.4 y el del suelo Macahuistle 34, valores que se abatieron a niveles menores de 8. El pH inicial de 7.8 en el suelo Carretas y 8 en el suelo Macahuistle, disminuyeron a un valor de 7.4 con la aplicación de estiércol y ácido sulfúrico. El lavado redujo la salinidad y sodicidad de ambos suelos hasta niveles satisfactorios para cultivos convencionales, con y sin de la aplicación de estiércol bovino, yeso y ácido sulfúrico.

Palabras clave: lavado, estiércol bovino, yeso, ácido sulfúrico.

¹ Instituto de Ecología Aplicada, ² Facultad de Ingeniería y Ciencias, UAT. Centro Universitario Adolfo López Mateos. Av. División del Golfo no. 35, Col. Libertad. 87019 Cd. Victoria, Tamaulipas, México.
^{*} Autor responsable (lida@uat.edu.mx)

Recibido: mayo de 2013. Aceptado: mayo de 2014.
Publicado en Terra Latinoamericana 32: 211-219.

SUMMARY

The effects of cattle manure, gypsum, sulfuric acid, and flushing water application on contents of soluble salts and sodium rate were evaluated in two saline-sodic soils of the 086 Irrigation District in Jimenez, Tamaulipas, Mexico. Portions of 6 kg of soils were used in pots in a greenhouse to assay two levels of saline-sodicity (soil Carretas with moderate saline-sodicity levels and the soil Macahuistle with high levels), two inorganic soil amendments (gypsum and sulfuric acid) and one organic soil amendment (cattle manure). The experimental design was completely randomized with a $2 \times 2 \times 3$ factorial arrangement. Response variables were electric conductivity (EC), exchange sodium percent (ESP) and pH. As a result of treatments, the initial EC in soils Carretas and Macahuistle, 7.75 and 22.2 dS m^{-1} , was diminished to values lower than 4 dS m^{-1} . ESP of the soil Carretas (18.4) and Macahuistle (34) were lowered to less than 8. Finally, the initial pH of 7.8 in the soil Carretas and 8 in the soil Macahuistle decreased to 7.4. Flushing water reduced salinity and sodicity of both soils to satisfactory levels for conventional crops, with and without the application of cattle manure, gypsum and sulfuric acid.

Index words: flushing water, cattle manure, gypsum, sulfuric acid.

INTRODUCCIÓN

La salinidad y sodicidad son condiciones de algunos suelos que limitan la producción agrícola ya que provocan que se vuelvan infértiles e improductivos, causando un problema de amplia afectación para la agricultura mundial, principalmente en las regiones áridas y semiáridas (Zahran, 1990; Liang *et al.*, 2005; Corwin

et al., 2007). Según Rhoades y Loveday (1990) los daños globales por suelos ensalitrados abarcan más de 20 millones de ha. En México, el problema de la salinidad se presenta principalmente en las zonas áridas y semiáridas con riego, y a lo largo de las costas. Se estima que la superficie afectada es del orden de 1 millón de ha (Fernández, 1990; Serrato-Sánchez *et al.*, 2002). Dicha situación es crítica debido a que disminuye la productividad de algunos distritos de riego, lo cual es relevante toda vez que las superficies con riego producen cerca del 40% de los alimentos (Karim, 2014). El Distrito de Riego 086 (DR 086) en el estado de Tamaulipas es uno de los más afectados por salinización del suelo debido a la elevación del manto freático, las infiltraciones de los canales de riego y el drenaje deficiente del suelo en esta zona agrícola (González, 1979; SARH, 1982; CONAGUA, 1990). Diversos estudios indican que en zonas de riego, dicha problemática se debe a los contenidos de sales acumuladas a través del tiempo, ocasionado por un inadecuado manejo del suelo y agua de riego (Schoups *et al.*, 2005; Corwin *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2007). Otros factores contribuyen a exacerbar el problema, incluyendo el riego prolongado con aguas salinas, suelos de baja permeabilidad y climas secos subhúmedos o muy secos (Cardona *et al.*, 2004; Tejada y González, 2005; Corwin *et al.*, 2007). En consecuencia, disminuye la fertilidad del suelo afectando el rendimiento de cultivos y causando pérdidas económicas.

Existen métodos físicos, químicos y biológicos para recuperar los suelos afectados por sales, entre los que destacan la adición de abonos orgánicos que mejoran la estructura y permeabilidad del suelo, el uso de enmiendas químicas basadas en el empleo de sales cálcicas de alta solubilidad que intercambian el sodio por calcio y la aplicación de ácidos o sustancias formadoras de éstos (Tejada *et al.*, 2006; Aceves, 2011). Aunado a lo anterior, el lavado de las sales solubles con aguas de baja salinidad y la construcción de obras de drenaje contribuyen a la rehabilitación del suelo (Richards, 1980). Serrato-Sánchez *et al.* (2002), ensayaron el lavado del suelo y la aplicación de estiércol para recuperar suelos salinos; evaluaron la producción de materia seca de zacate rye grass anual (*Lolium multiflorum* Lam.) y concluyeron que ésta fue mayor en los tratamientos en comparación con el testigo, recomendando el uso de agua de lluvia en el lavado del suelo, en virtud de que dicha práctica sea económicamente costea. Montaña *et al.* (1985)

analizaron el proceso de recuperación de suelos salinos mediante el uso de columnas de suelo y cuatro tipos de yeso agrícola (sulfato de calcio); comprobaron su efectividad al bajar el pH de 8.5 a 7.9. En este sentido, Núñez *et al.* (1985) manifestaron la conveniencia de incorporar yeso agrícola a suelos sódicos así como la aplicación de lavado con agua pluvial.

En 1979 el Programa de Fertilidad del Estado de Tamaulipas encontró que los problemas de salinidad y sodicidad en el DR 086 se debían al uso inadecuado del agua para riego y al deficiente funcionamiento de los drenes, entre otras causas (González, 1979). A su vez, la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos en 1982 publicó que la salinidad de los suelos de la región se debe a la disolución de rocas sedimentarias de origen marino que los originaron y, por otro lado, al uso excesivo de las láminas de riego, al drenaje interno lento o muy lento y a las elevaciones del manto freático en las parcelas. La CONAGUA (1990), realizó un estudio para cuantificar la superficie de suelo salinizado en una superficie de 10 548 ha, reportando 2659 ha libres de sales, 5768 con problemas de salinidad y 2121 ha con características salino-sódicas. Asimismo, dicha dependencia reportó en 1999 que más de 30% de la superficie irrigable del DR 086 (40 000 ha) se encontraba afectada por diversos grados de salinidad y sodicidad, en particular el módulo III con 3 380 ha, que presentaba daños en 86% de su extensión total, debido principalmente a la presencia de material aluvial original rico en sales, al uso inadecuado del agua de riego y al deficiente manejo de suelos arcillosos sensibles al ensalitramiento. A partir de la hipótesis de que la aplicación de mejoradores de suelo, incluyendo estiércol, yeso y ácido sulfúrico combinados con el lavado del suelo disminuyen los niveles de salinidad y sodicidad en los suelos afectados del DR 086, hasta niveles óptimos para el desarrollo de cultivos comunes, se definió el esquema de este trabajo. Por lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto del lavado del suelo y la aplicación de estiércol bovino, yeso y ácido sulfúrico sobre el contenido de sales solubles y la proporción de sodio intercambiable en suelos salino-sódicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se realizó con suelos salino-sódicos del Distrito de Riego (DR) 086 ubicado en los municipios de Abasolo, Jiménez y Soto la Marina, en

el estado de Tamaulipas, México. Para la localización y selección de los sitios con problemas de salinidad y sodicidad, se utilizó información contenida en documentos de las oficinas administrativas del DR 086 en la cabecera municipal de Abasolo, dependientes de la CONAGUA. Con la información obtenida se identificaron los suelos con problemas en el módulo III de dicho distrito, que se ubica en el Ejido Ignacio Allende, municipio de Santander Jiménez, en las coordenadas: 24° 9' 23.38" N y 98° 24' 51.37" O. Dichos documentos incluyen la información de suelos salinos y sódicos del DR 086 (CONAGUA, 1999). Los datos se verificaron con análisis químicos de las muestras de suelo tomadas en dos sitios antes del experimento.

Dentro del módulo III del DR 086 se seleccionaron: el sitio Carretas, con nivel salino-sódico moderado, ubicado cerca del canal lateral 39 + 995 en las coordenadas 24° 07' 51.55" N, 98° 25' 31.02" O, y el sitio Macahuistle, con suelos de nivel salino-sódico alto, ubicados en la proximidad del canal lateral 27 + 700 en las coordenadas 24° 08' 52.46" N y 98° 25' 56.36" O. En cada sitio, se colectó suelo a una profundidad de 0 a 60 cm, obteniendo 200 kg de suelo, el cual se transportó al Laboratorio de Investigación y Diagnóstico Agrícola de la Facultad de Ingeniería y Ciencias de la Universidad Autónoma de Tamaulipas para su preparación, análisis químico y la experimentación en condiciones de invernadero.

Se determinó la conductividad eléctrica (CE) en extracto de saturación por el método del puente de Wheatstone con un instrumento Fisher Scientific AR50; el pH medido en suspensión con agua destilada, en una relación suelo-agua 1:2 con un potenciómetro Fisher Scientific AR50; la relación de adsorción de sodio (RAS) utilizando la concentración de Ca^{++} , Mg^{++} y Na^+ solubles, el porcentaje de sodio intercambiable (PSI), ambos indicadores conforme a la ecuación de Richards (1980) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) por medio de una solución extractora de acetato de sodio 1 N (Hesse, 1971). Los carbonatos totales se determinaron por titulación con HCl (Allison y Moodie, 1965). Los cationes Ca^{++} y Mg^{++} solubles se cuantificaron por el método del versenato (Jackson, 1976), las concentraciones de Na^+ y K^+ solubles por espectrometría de emisión con flamómetro Corning 410; los iones CO_3^{2-} y HCO_3^- por titulación con ácido sulfúrico (Bower y Wilcox, 1965) y el ion Cl^- por el método de Mohor (Bower y Wilcox, 1965); la concentración de SO_4^{2-} por el método

turbidimétrico (APHA, 1980) con espectrofotómetro UV-visible Perkin Elmer modelo Lambda EZ150.

Diseño Experimental

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con tres repeticiones, con arreglo factorial $2 \times 2 \times 3$, para el ensayo de 2 suelos, 2 niveles de mejorador orgánico o estiércol bovino y 3 niveles de mejorador inorgánico con tres réplicas por tratamiento. El suelo de cada sitio se mezcló hasta ser homogeneizado para su uso en el experimento en macetas, de acuerdo con el diseño experimental. Se ensayaron los mejoradores estiércol bovino, yeso y ácido sulfúrico; para yeso, de acuerdo con Montaña *et al.* (1985) y Redly y Darab (1981); para el ácido sulfúrico según Aceves (2011) y para estiércol según El-Shakweer *et al.* (1998), Nelson y Oades (1998), Otero *et al.* (2006) y Tejada *et al.* (2006). Se ensayaron los tratamientos citados y las diferentes combinaciones o interacciones; en el factor suelo se estudiaron dos niveles de salinidad y sodicidad, sitio Carretas (PSI 18.4) y sitio Macahuistle (PSI 34.0); el mejorador orgánico consistió en dos niveles de estiércol bovino, cero y 500 g maceta⁻¹, con la finalidad de mejorar la estructura y permeabilidad del suelo. Para el factor mejorador inorgánico se aplicó en cada unidad experimental (maceta) un nivel cero, 55.34 g de yeso

Cuadro 1. Tratamientos de estiércol bovino, yeso y ácido sulfúrico aplicados en suelos salino-sódicos de Carretas y Macahuistle, Tamaulipas.

Tratamiento	Suelo	Estiércol	Mejorador inorgánico
		- - - - - g maceta ⁻¹ - - - - -	
1-S1	Carretas	0	0
2-S1	Carretas	0	55.34 (CaSO ₄)
3-S1	Carretas	0	44.1 (H ₂ SO ₄)
4-S1	Carretas	500	0
5-S1	Carretas	500	55.34 (CaSO ₄)
6-S1	Carretas	500	44.1 (H ₂ SO ₄)
1-S2	Macahuistle	0	0
2-S2	Macahuistle	0	116.83 (CaSO ₄)
3-S2	Macahuistle	0	93.1 (H ₂ SO ₄)
4-S2	Macahuistle	500	0
5-S2	Macahuistle	500	116.83 (CaSO ₄)
6-S2	Macahuistle	500	93.1 (H ₂ SO ₄)

por maceta o 44.1 g de ácido sulfúrico. Las necesidades de mejoradores en los suelos se determinaron mediante la ecuación de Richards (1980). El Cuadro 1 muestra los tratamientos, origen del suelo y dosis de mejoradores.

Los tratamientos se instalaron en condiciones de invernadero, con control de temperatura por ventilación con aire húmedo para mantener condiciones ambientales de 26 a 35 °C y alrededor de 60% de humedad relativa. Se utilizaron macetas con capacidad de 10 L perforadas en la parte lateral inferior, donde se instaló un tubo de polietileno de 0.5 cm de diámetro para mantener un drenaje óptimo y coleccionar los lixiviados. En cada maceta se colocó una capa de grava de 2 cm de espesor en el fondo y papel filtro sobre la misma para evitar la pérdida del suelo; posteriormente se colocaron sobre la grava y el papel filtro 6 kg de la mezcla de suelo y mejorador (estiércol, CaSO_4 o H_2SO_4), conforme al diseño de tratamientos (Cuadro 1).

Aplicación de Estiércol y Mejoradores

Se aplicaron 500 g de estiércol bovino por maceta en 9 de las 18 macetas de cada sitio y se mezcló con el suelo para mejorar la estructura y permeabilidad de la mezcla; posteriormente se aplicó el mejorador inorgánico, yeso o ácido sulfúrico. Para el cálculo de la dosis de yeso se consideró el análisis de pureza por la técnica descrita por Peña (1980). Las necesidades de mejoradores por maceta para el suelo Carretas fueron de 55.3 g de yeso y 44.1 g de ácido sulfúrico; a su vez, para el suelo Macahuistle fueron de 116.8 g de yeso y 93.1 g de ácido sulfúrico. El sulfato de calcio se aplicó directamente al suelo formando una mezcla homogénea, mientras que el ácido sulfúrico se añadió disuelto en la cantidad de agua necesaria para que el suelo quedara a capacidad de campo, 2450 mL para el suelo Carretas y 2810 mL para el suelo Macahuistle. La solución de ácido se aplicó sobre la superficie del suelo de la maceta de forma intermitente en volumen de 0.5 L por aplicación, para favorecer el reemplazo de Na^+ por Ca^{2+} (Tejada *et al.*, 2006; Aceves, 2011). Las macetas con yeso se humedecieron con dichos volúmenes de agua para que el suelo quedara a capacidad de campo.

Lavado del Suelo y Calidad del Agua

Para conocer la lámina de lavado necesaria se utilizó la fórmula propuesta por Aceves (2011). En el cálculo

se consideró la necesidad de abatir la salinidad a un nivel adecuado para los cultivos agrícolas (2 dS m^{-1}). Asimismo, se realizó un análisis de salinidad del agua utilizada para el lavado de los suelos, determinando la CE, pH, RAS, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ solubles, CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- y SO_4^{2-} solubles. Dichas pruebas se efectuaron para valorar la salinidad del agua y su calidad para el lavado. La lámina calculada y aplicada en el suelo Carretas con estiércol fue de 79.7 cm, que en volumen representa $42.3 \text{ L maceta}^{-1}$; para el suelo Carretas sin estiércol fue de 63.2 cm, equivalente a $33.54 \text{ L maceta}^{-1}$. Para el suelo Macahuistle con estiércol fue 101.3 cm equivalente a $53.77 \text{ L maceta}^{-1}$ y para el suelo Macahuistle sin estiércol fue 80.28 cm, equivalente a $42.64 \text{ L maceta}^{-1}$. Se aplicó un lavado inicial con una lámina de riego de 10 cm y el resto del agua fue repartida equitativamente en tres lavados subsecuentes. Los intervalos entre aplicaciones de agua fueron 3, 3, 4 y 5 días respectivamente.

A los 45 días después del inicio del experimento se colectaron muestras de 300 g de suelo de la parte lateral de cada maceta y se prepararon para su análisis químico. Las variables de respuesta fueron CE, PSI y pH, para conocer el efecto de los tratamientos sobre la salinidad y sodicidad de los suelos.

Análisis Estadístico

La evaluación estadística de los datos obtenidos a partir de un diseño completamente al azar con arreglo factorial $2 \times 2 \times 3$ se realizó mediante un análisis de varianzas; para contrastar los promedios de los tratamientos se utilizó la prueba de Tukey con $P < 0.05$, utilizando el procedimiento GLM del paquete estadístico Statistical Analysis System (SAS Institute, 2000).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características de los Suelos Estudiados

Se obtuvieron valores de salinidad moderada (CE: 7.75 dS m^{-1}) y pH medianamente alcalino de 7.84 para el suelo Carretas; para el suelo Macahuistle se encontró una salinidad alta (CE: 22.2 dS m^{-1}) y pH medianamente alcalino de 8 (Cuadro 2). El PSI fue mayor de 15 en ambos sitios y la CIC mostró valores elevados. A partir de dichos análisis los suelos de ambos sitios se clasificaron como salino-sódicos (Richards, 1980).

Cuadro 2. Características de los suelos Carretas y Macahuistle; DR 086, Jiménez, Tamaulipas.

Prueba	Unidades	Suelo Carretas	Suelo Macahuistle
CE	dS m ⁻¹	7.75	22.2
pH		7.84	8.0
RAS		16.3	35.3
PSI		18.4	34.0
CIC	mEq 100g ⁻¹	21.3	22.2
CO ₃ totales	%	18.6	29.7
Ca ²⁺	mEq L ⁻¹	13.2	35.2
Mg ²⁺	mEq L ⁻¹	18.7	13.2
Na ⁺	mEq L ⁻¹	65.2	174.0
K ⁺	mEq L ⁻¹	0.01	0.01
CO ₃ ²⁻	mEq L ⁻¹	0.0	0.0
HCO ₃ ⁻	mEq L ⁻¹	1.35	3.6
Cl ⁻	mEq L ⁻¹	22.5	107.0
SO ₄ ²⁻	mEq L ⁻¹	73.2	111.0

Características del Agua para el Lavado de los Suelos

El agua utilizada para el lavado de los suelos presentó valores de RAS de 0.21 y de CE de 0.48 dS m⁻¹ (Cuadro 3), clasificándose como agua clase C1-S1, de buena calidad para el lavado debido a su baja salinidad y proporción de sodio. Según Richards (1980) esta agua se recomienda para usarse en el riego de la mayoría de los cultivos y suelos, ya que tiene escasa posibilidad de causar efectos salinos y alcanzar niveles peligrosos de Na⁺ intercambiable.

Efecto de los Mejoradores y Lavado sobre la Conductividad Eléctrica de los Suelos

La CE inicial en ambos suelos fue alta, después del lavado disminuyó en todas las macetas a valores tolerables por cultivos convencionales, de 2 a 3 dS m⁻¹, (Figura 1). Se observó, que independientemente de la aplicación de mejoradores inorgánicos, los valores mayores de CE en ambos suelos se presentaron cuando se aplicó estiércol, al parecer debido a las sales contenidas en el estiércol aportadas al suelo a través del abono, aumentando la concentración salina del suelo y la CE. El estiércol no indujo una baja en el contenido de sales en el suelo atribuida a su efecto benéfico sobre

la permeabilidad del suelo y por consiguiente sobre el drenaje del mismo, lo cual a su vez habría propiciado el lavado del suelo. Con base en lo anterior, se infiere que la adición de estiércol de forma continua puede aumentar el contenido de sales solubles en el suelo, por lo que debe evaluarse su aplicación y prever sus posibles efectos colaterales. La CE inicial de ambos suelos disminuyó drásticamente con la aplicación de lavado y mejoradores del suelo de 8 y 22 dS m⁻¹ hasta valores de 2 dS m⁻¹ cuando no se aplicó estiércol y a valores ligeramente superiores a 3 dS m⁻¹ cuando se aplicó el abono. Lo anterior indica que el lavado de suelos reduce el contenido de sales solubles en los mismos, independientemente de la aplicación de estiércol y mejoradores. El-Shakweer *et al.* (1998) y Otero *et al.* (2006) reportaron resultados favorables en relación con la aplicación de enmiendas orgánicas en suelos salinos y sódicos, con bajos niveles de producción. Cabe mencionar que valores menores de 4 dS m⁻¹ son viables para la mayoría de los cultivos, según la clasificación de suelos salinos propuesta por Richards (1980).

Para la potencial rehabilitación de los suelos, la mayor efectividad para el control de la CE se encontró en los tratamientos de lavado del suelo sin la aplicación de mejoradores, especialmente sin la adición de estiércol y en los tratamientos donde se aplicó lavado y yeso. Resultados similares fueron reportados por Montaña *et al.* (1985) en relación con la aplicación de yeso y por Cervantes *et al.* (1984) y Gili *et al.* (2004) en relación con el lavado del suelo utilizando solo agua. Behrouz *et al.* (2007) y Corwin *et al.* (2007) afirman que el agua

Cuadro 3. Características químicas del agua utilizada para el lavado del suelo.

Prueba	Unidades	Agua
CE	dS m ⁻¹	0.48
pH		7.7
RAS		0.21
Ca ²⁺	mEq L ⁻¹	2.6
Mg ²⁺	mEq L ⁻¹	3.0
Na ⁺	mEq L ⁻¹	0.5
K ⁺	mEq L ⁻¹	0.01
CO ₃ ²⁻	mEq L ⁻¹	0.0
HCO ₃ ⁻	mEq L ⁻¹	4.14
Cl ⁻	mEq L ⁻¹	0.57
SO ₄ ²⁻	mEq L ⁻¹	1.39

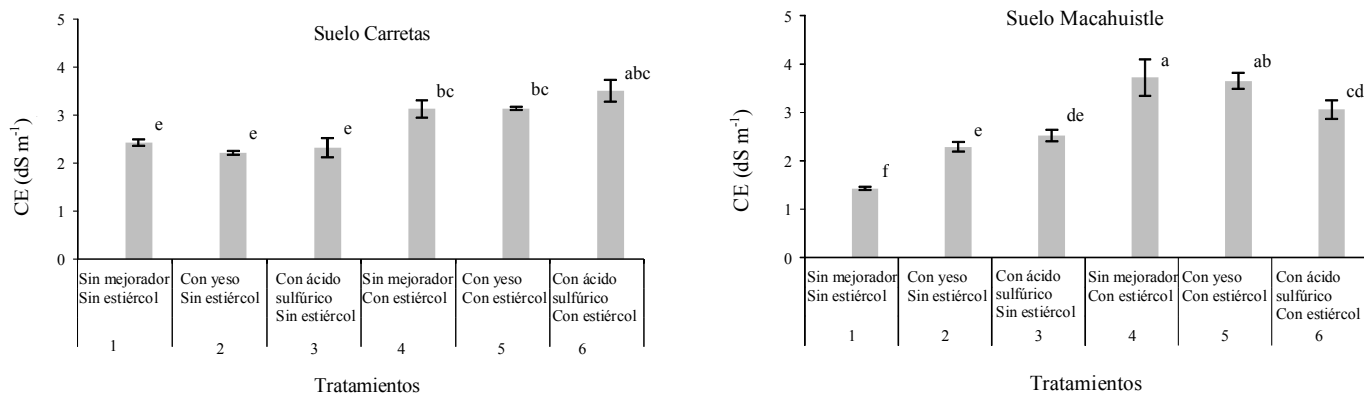


Figura 1. Efecto de la aplicación de estiércol, yeso y ácido sulfúrico, sobre la CE de los suelos de Carretas y Macahuistle, Tamaulipas. Valores con la misma letra son estadísticamente similares (Tukey, $P < 0.05$).

utilizada para el lavado de suelos debe tener salinidad menor a 4 dS m^{-1} . En relación con el uso de mejoradores químicos, los resultados de este estudio son semejantes a los reportados por Zérega (1993), el cual indica que solo el lavado del suelo es suficiente para lograr valores óptimos de CE en los suelos estudiados, clasificados inicialmente como salino-sódicos. Lo anterior sugiere que la aplicación de mejoradores químicos podría ser opcional y en consecuencia al usar únicamente el procedimiento de lavado de suelos se reduciría el costo económico de la recuperación de suelos salino-sódicos, semejantes a los suelos Carretas y Macahuistle.

Efecto de los Mejoradores y Lavado sobre el Porcentaje de Sodio Intercambiable

Antes de los tratamientos, el PSI fue alto en ambos suelos pero después de su aplicación disminuyó a valores menores de 4% en el sitio Carretas y de 7% en el suelo Macahuistle (Figura 2), los cuales no se consideran

perjudiciales (Richards, 1980). Al igual que para CE, el estiércol no contribuyó al mejoramiento de los suelos afectados con sodio intercambiable, en virtud de que el PSI fue mayor en los suelos tratados con estiércol. El lavado del suelo sin mejorador fue suficiente para eliminar el sodio del suelo, lo cual coincide con Serrato-Sánchez *et al.* (2002) y Gili *et al.* (2004). Cuando no se aplicó estiércol los niveles de PSI fueron cercanos a cero; sólo en el tratamiento de lavado sin mejoradores inorgánicos en el suelo Macahuistle el PSI fue de 4%. Los resultados contrastan con reportes sobre estiércol y otros residuos orgánicos utilizados como mejoradores de suelos sódicos: Nelson y Oades (1998) y Tejada *et al.* (2006), ya que al favorecer la permeabilidad del suelo debería promoverse el lixiviado de sodio provocado por el lavado. Sin embargo, el PSI en los suelos fue bajo con o sin la aplicación de estiércol. En el suelo Carretas el efecto de los mejoradores inorgánicos no fue significativo, por lo que no es necesaria su aplicación y el lavado del suelo con agua es suficiente para eliminar

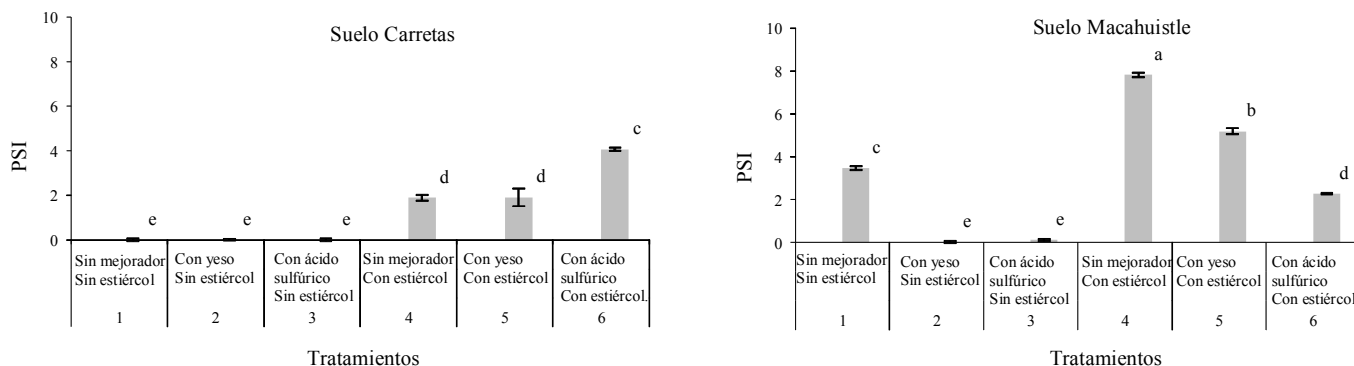


Figura 2. Efecto de la aplicación de estiércol, yeso y ácido sulfúrico, sobre el PSI de los suelos de Carretas y Macahuistle, Tamaulipas. Valores con la misma letra son estadísticamente similares (Tukey, $P < 0.05$).

las sales solubles y el sodio intercambiable. En el suelo Macahuistle el PSI fue menor al aplicar yeso y ácido sulfúrico, en presencia o ausencia de estiércol, contribuyendo al desplazamiento del sodio intercambiable; de los dos mejoradores, el ácido sulfúrico fue el más eficiente para eliminar dicho catión intercambiable.

Con el lavado del suelo se alcanzaron niveles adecuados de PSI (entre 4 y 8), dado que los promedios de los tratamientos (Figura 2) disminuyeron respecto a los valores iniciales (18.4 y 34). El uso conjunto de mejoradores inorgánicos y lavado favorecieron los suelos al bajar el PSI, lo cual coincide con Zérega (1993) quien señaló que la aplicación de dichas prácticas beneficia las condiciones del suelo. Los resultados sugieren que los suelos salino-sódicos estudiados podrían rehabilitarse solamente con la aplicación de lavado utilizando agua de buena calidad.

Efecto de los Mejoradores y Lavado sobre el pH de los Suelos

El lavado de los suelos por sí solo afectó poco el pH del suelo. En el sitio Carretas el cambio de pH fue de 0.1 unidades mientras que en el suelo Macahuistle el lavado no provocó ningún cambio (Figura 3). El efecto combinado de lavado y mejoradores fue significativo. En el caso del suelo Carretas, el pH disminuyó de un valor inicial de 7.84 a un promedio de 7.60 con un mínimo de 7.40 y en el suelo Macahuistle se redujo de 8 a 7.74, con un mínimo de 7.43. El mejorador que más disminuyó

el pH del suelo fue el ácido sulfúrico mientras que el yeso y el estiércol no tuvieron diferencias significativas entre sí, en esta variable. Resultados similares en relación con el uso de diferentes salinidades de agua de riego y niveles de lixiviación en el suelo son reportados por Behrouz *et al.* (2007).

El ácido sulfúrico tuvo un mayor efecto en el suelo previamente enriquecido con estiércol, dada la eficiencia en la neutralización de los compuestos de reacción alcalina. En el suelo Carretas la aplicación de ácido sulfúrico disminuyó el pH de 7.84 a 7.40, en tanto que en el suelo Macahuistle la disminución de pH fue de 8 a 7.43 con el mismo tratamiento (Figura 3). Los resultados concuerdan con Lebron *et al.* (1994) quienes mencionaron que la presencia de materia orgánica y pH bajo favorecen la estabilidad estructural de suelos salino-sódicos. Montaña *et al.* (1985) reportaron asimismo, que el uso de yeso es efectivo al solubilizar las sales del suelo, reduciendo el pH durante la lixiviación.

CONCLUSIONES

El lavado de los suelos salino-sódicos, provenientes de Carretas y Macahuistle, distrito de riego 86, Tamaulipas, tratados en macetas con agua de baja concentración salina, disminuyó la salinidad y sodicidad de ambos suelos hasta niveles adecuados para el desarrollo de cultivos convencionales, ya que redujo el contenido de sales solubles y la proporción de sodio intercambiable en el suelo. El uso de mejoradores resultó innecesario por lo que se concluye que la rehabilitación

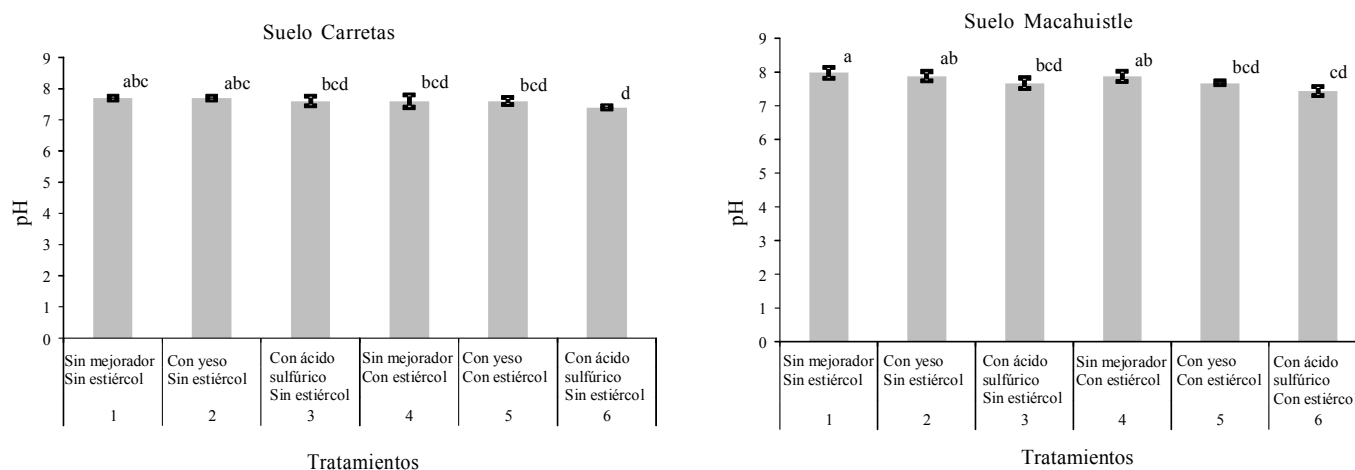


Figura 3. Valores de pH del suelo de los sitios Carretas y Macahuistle, Tamaulipas, después de la aplicación de estiércol, yeso y ácido sulfúrico. Valores con la misma letra son estadísticamente similares (Tukey, $P < 0.05$).

de dichos suelos salino-sódicos se podría lograr únicamente con la aplicación de lavado, aunque el cambio de pH del suelo sea pequeño.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al fondo mixto CONACYT-Gobierno del Estado de Tamaulipas por los apoyos otorgados para la realización de esta investigación. Proyecto número 186229.

LITERATURA CITADA

- Aceves N., E. 2011. El ensalitramiento de los suelos bajo riego. Fundación Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas A.C. México, D. F.
- Allison, L. E. and C. D. Moodie. 1965. Carbonates. pp. 1379-1396. *In*: C. A. Black (ed.). Methods of soil analysis. Part 2. Agron. Monogr. 9. ASA, CSSA and SSSA. Madison, WI, USA.
- Behrouz, M. F., M. Heidarpour, A. Aghakhani, and M. Feizi. 2007. Effects of irrigation water salinity and leaching on soil chemical properties in an arid region. *Int. J. Agri. Biol.* 9: 466-469.
- Bower, C. A and L. V. Wilcox. 1965. Soluble salts. pp. 993-940. *In*: C. A. Black (ed.). Methods of soil analysis. Part 2. Agron. Monogr. 9. ASA, CSSA and SSSA. Madison, WI, USA.
- Cardona, A., J. J. Carrillo-Rivera, R. Huizar-Álvarez, and E. Graniel-Castro. 2004. Salinization in coastal aquifers of arid zones: An example from Santo Domingo, Baja California Sur, México. *Environ. Geol.* 45: 350-366.
- Cervantes R., M., M. Ortega E., C. Ramírez A. y J. L. Rone P. 1984. La lixiviación de sales en los suelos salino-sódicos del Valle de Mexicali durante un proceso de lavado. *Agrociencia* 59: 149-168.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 1990. Estudio agrológico espacial de salinidad y drenaje del distrito de riego 086 municipio de Abasolo, Tamaulipas. pp. 1-82. Gerencia Tamaulipas Centro y Sur. Tamaulipas, México.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 1999. Estudio de salinidad de suelos, analizada por módulos: II, III, IV, V, VI del DR 086 Soto La Marina. Abasolo, Tamaulipas, México.
- Corwin, D. L., J. D. Rhoades, and J. Simunek. 2007. Leaching requirement for soil salinity control: Steady-state versus transient models. *Agric. Water Manage.* 90: 165-180.
- El-Shakweer, M. H. A., E. A. El-Sayad, and M. S. A. Ejles. 1998. Soil and plant analysis as a guide for interpretation of the improvement efficiency of organic conditioners added to different soils in Egypt. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 29: 2067-2088.
- Fernández G., R. 1990. Algunas experiencias y proposiciones sobre recuperación de suelos con problemas de sales en México. *Terra* 8: 226-240.
- Gili S., P., G. Marando I., J. Irisarri E. y M. Sagardoy R. 2004. Efecto de las técnicas de lavado y fertilización sobre la salinidad en suelos del alto valle de Río Negro y Neuquén, Argentina. *Agric. Téc.* 64: 295-304.
- González G., D. 1979. Salinidad en el Distrito de Riego No. 086. Cuarto Informe Técnico Zona Norte Centro y Sur. pp. 77-98. Programa de Fertilidad Estatal. Gobierno del Estado de Tamaulipas. Cd. Victoria, Tamaulipas, México.
- Hesse, P. R. 1971. A textbook of soil chemical analysis. Chemical Pub. Co. New York, NY, USA.
- Jackson, M. L. 1976. Análisis químico de suelos. Omega. Barcelona, España.
- Karim, M. H. 2014. Agricultural water reforms versus climate changes. *Basic Res. J. Agric. Sci. Rev.* 3: 6-12.
- Lebron, I., D. Suarez, and F. Alberto. 1994. Stability of a calcareous saline-sodic soil during reclamation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1753-1762.
- Li, X., Z. Wang, K. Song, B. Zhang, D. Liu, and Z. Guo. 2007. Assessment for salinized wasteland expansion and land use change using GIS and remote sensing in the west part of Northeast China. *Environ. Monit. Assess.* 131: 421-437.
- Liang, Y., S. Jin, M. Nikolic, Y. Peng, W. Chen, and Y. Jiang. 2005. Organic manure stimulates biological activity and barley growth in soil subject to secondary salinization. *Soil Biol. Biochem.* 37: 1185-1195.
- Montaña G., S., M. Ortega E., C. Ramírez A. y J. L. Rone P. 1985. Estudio de 3 yesos agrícolas y yeso puro bajo 2 formas de aplicación (incorporado al suelo y solubilizado en el agua) en el mejoramiento de la capa arable de un suelo sódico. *Agrociencia* 59: 169-186.
- Nelson, P. N. and J. M. Oades. 1998. Organic matter, sodicity and soil structure. pp. 51-75. *In*: M. E. Sumner and R. Naidu. (eds.). Sodic soils: Distribution, processes, management and environmental consequences. Topics in sustainable agronomy. Oxford University Press. New York, NY, USA.
- Núñez F., J. M. Ortega E., C. Ramírez A. y J. R. Rone P. 1985. El mejoramiento de suelos sódicos y aguas bicarbonatadas, utilizando yeso agrícola en diferentes láminas de aplicación. *Agrociencia* 59: 187-204.
- Otero, L., V. Gálvez, N. Navarro, G. Díaz, L. Rivero y A. Vantour. 2006. Contribución de las fracciones adsorbentes al intercambio catiónico de suelos arroceros de la llanura sur Habana-Pinar del Río. *Terra Latinoamericana* 24: 9-15.
- Peña, I. 1980. Salinidad de los suelos agrícolas, su origen, clasificación prevención y rehabilitación. Boletín técnico No. 10. SARH. México, D. F.
- Redly, M. and K. Darab. 1981. The evaluation of physicochemical process from the point of view of alkali soil amelioration. *Agrok és Talaj.* 30: 178-187.
- Rhoades, J. D. and J. Loveday. 1990. Salinity in irrigated agriculture. pp. 1089-1142. *In*: B. A. Stewart and D. R. Nielsen (eds.). Irrigation of agricultural crops. Agronomy Monograph No. 30. SSSA. Madison, WI, USA.
- Richards, L. A. 1980. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Limusa. México, D. F.
- SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos). 1982. Estudio agrológico espacial de salinidad y drenaje agrícola del D.R. No. 086. pp. 1-79. Abasolo, Tamaulipas, México.
- SAS Institute. 2000. SAS for windows. Release 6.12. Cary, NC, USA.
- Schoups, G., J. W. Hopmans, C. A. Young, J. A. Vrugt, W. W. Wallender, K. K. Tanji, and S. Panday. 2005. Sustainability of irrigated agriculture in the San Joaquin Valley, California. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 102: 15352-15356.

- Serrato Sánchez, R., A. Ortiz Arellano, J. Dimas López y S. Berúmen Padilla. 2002. Aplicación de lavado y estiércol para recuperar suelos salinos en la Comarca Lagunera, México. *Terra* 20: 329-336.
- Tejada, M. and J. L. González. 2005. Beet vinasse applied to wheat under dryland conditions affects soil properties and yield. *Eur. J. Agron.* 23: 336-347.
- Tejada, M., C. García, J. L. González, and M. T. Hernández. 2006. Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: Influence on the physical, chemical and biological properties of soil. *Soil Biol. Biochem.* 38: 1413-1421.
- Zahran, H. H. 1990. Rhizobium-legume symbiosis and nitrogen fixation under severe conditions and in arid climate. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 63: 968-989.
- Zérega, M. L. 1993. Manejo y uso agronómico de la cachaza en suelos cañeros. *Caña Azúcar* 11: 1-13.