

MEJORA DE PROPIEDADES FÍSICAS POR EL USO DE ESPECIES MEGATÉRMICAS EN UN SUELO SÓDICO TEMPLADO

JOSÉ OTONDO¹; ELIZABETH JULIANA JACOBO² & MIGUEL ÁNGEL TABOADA^{3,4*}

Recibido: 04-11-14

Recibido con revisiones: 31-03-15

Aceptado: 31-03-15

RESUMEN

Las especies megatérmicas pueden disminuir el pH del suelo y los niveles de sodicidad cuando se implantan en suelos sódicos, pero poco se sabe acerca de su capacidad para mejorar la condición física de suelos sódicos templados. Se llevó a cabo un experimento con diseño en bloques con tres tratamientos durante cuatro años para evaluar la recuperación de un suelo sódico templado del norte de la Pampa Deprimida de la provincia de Buenos Aires, por las especies grama Rhodes (*Chloris gayana* Kuhn) y mijo perenne (*Panicum coloratum* L). En comparación con la comunidad vegetal nativa, ambas especies megatérmicas incrementaron la producción primaria neta aérea de 74 a 157% y disminuyeron 10 veces la superficie de suelo desnudo. Sin embargo, la sustitución de la vegetación sólo causó ligeros descensos en el pH de la capa superior del suelo (siempre superior a 9) y ningún cambio en la salinidad y en la sodicidad. En cambio, ambas especies megatérmicas mejoraron la condición física del suelo, como lo demuestran las disminuciones significativas de: a) la densidad aparente del horizonte A (1,26-1,35 Mg m⁻³ a 1,17-1,31 Mg m⁻³); b) la capacidad portante del suelo en contenidos bajos de humedad edáfica (7,48-8,88 MPa a 4,63-6,08 MPa); y c) la inestabilidad estructural (50 a 200% en magnitud). El stock de carbono orgánico del suelo del horizonte A (0-12 cm) fue aumentado en 620 Mg ha⁻¹ sólo por el mijo perenne. Entonces, más que disminuir el halomorfismo edáfico, las especies megatérmicas mejoraron principalmente la condición física del suelo sódico estudiado. Esto muestra un camino diferente de fito-estabilización para suelos sódicos de climas templados.

Palabras clave. Halomorfismo del suelo, densidad aparente, inestabilidad estructural, fito-estabilización.

IMPROVEMENT OF SOIL PHYSICAL PROPERTIES BY WARM SEASON GRASSES IN A TEMPERATE SODIC SOIL

ABSTRACT

Warm-season grasses may decrease soil pH and sodicity levels when planted in sodic soils, but little is known about their capacity to improve topsoil physical condition in temperate sodic soils. A randomized complete block design field experiment with three treatments was conducted during four years in order to evaluate the reclamation of a temperate sodic soil by Rhodes grass (*Chloris gayana* Kuhn) and perennial millet (*Panicum coloratum* L) in the north flooding Pampa of Buenos Aires Province. Both warm-season grasses increased aboveground net primary production by 74-157% and decreased by ten-fold bare soil surface as compared with the native short-grass steppe. However, grasses replacement caused only slight decreases in topsoil pH (always higher than 9) and no change in salinity or sodicity. In contrast, both warm season grasses improved topsoil physical condition, as shown by significant decreases in: a) topsoil bulk density (from 1.26-1.35 to 1.17-1.31 Mg m⁻³); b) soil bearing capacity at low soil water contents (from 7.48-8.88 MPa to 4.63-6.08 MPa); and c) soil structural instability (50 to 200 %). Only perennial millet increased organic carbon stock of the A horizon (0-12 cm) by 620 Mg ha⁻¹. Hence, warm season grasses mainly improved topsoil physical condition in the studied temperate sodic soil rather than decreasing soil halomorphism. This shows a different pathway of phyto-stabilization of sodic soils in temperate climates.

Key words. Soil halomorphism, soil bulk density, structural instability, phyto-stabilization.

1 INTA, Agencia de Extensión Rural Chascomús. Chascomús, Provincia de Buenos Aires.

2 Facultad de Agronomía UBA, Cátedra de Forrajicultura. Buenos Aires.

3 INTA, Centro de Investigaciones de Recursos Naturales, Hurlingham, Provincia de Buenos Aires.

4 CONICET

* Autor de contacto: taboada.miguel@inta.gov.ar

INTRODUCCIÓN

Los suelos salino-sódicos se encuentran presentes en al menos 75 países de todo el mundo, incluyendo la Argentina, que tiene 11,58 millones de hectáreas de suelos salinos y sódicos bajo un clima subhúmedo húmedo (INTA, 1990). Estos suelos limitan el crecimiento de las plantas debido a su alto pH, baja estabilidad estructural, bajos niveles de agua disponible para las plantas y los nutrientes (Rengasamy & Olsson, 1991; Qadir *et al.*, 2007; Wong *et al.*, 2010) y, consecuentemente, soportan comunidades vegetales dominadas por una estepa de pastos cortos con un 50% de suelo desnudo (Maddaloni, 1986; Perelman *et al.*, 2001; Wong *et al.*, 2010).

La recuperación de suelos salinos y sódicos se puede lograr a través de la implantación de especies con alta producción de biomasa aérea y subterránea y gran cobertura del suelo (Helalia *et al.*, 1992; Qadir *et al.*, 2007; Singh *et al.*, 2012), de las que se espera que disminuyan el pH del suelo. Ello se atribuye a diferentes causas: a) la liberación de protones, exudados de las raíces y ácidos orgánicos por la mayor biomasa radical (Qadir *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2010); b) aumentos de presión parcial de dióxido de carbono (pCO_2) debido a la mayor respiración de las raíces que disuelven calcita ($CaCO_3$), reemplazando así el Na^+ adsorbido mediante la liberación de Ca^{2+} ligado a la calcita (Semple *et al.*, 2003; Qadir *et al.*, 2007); y c) la adsorción del catión Na^+ a las raíces de algunas especies (Robbins, 1986).

En los suelos salinos y sódicos la recuperación también puede aumentar el contenido de carbono orgánico del suelo (COS) (Wong *et al.*, 2010) y mejorar la fertilidad del suelo (Shukla *et al.*, 2011). Además, se espera que las propiedades físicas del suelo desempeñen un papel complementario, por ejemplo, facilitando la lixiviación de sales y Na^+ . Esto resulta de: a) la formación de bioporos y grietas estructurales (Qadir *et al.*, 2007); b) la disminución de la densidad aparente (Murtaza *et al.*, 2009; Tan & Kang, 2009; Singh *et al.*, 2012); y c) el aumento de la humedad en saturación del suelo (Tan & Kang, 2009), de la actividad microbiana y enzimática (Tan & Kang, 2009; Singh *et al.*, 2012), y de la estabilidad de los agregados (Wong *et al.*, 2010). La mayor cobertura de los suelos implantados con especies mejoradoras contribuye a incrementar la captación de agua de lluvia por mayores tasas de infiltración (Mielke *et al.*, 1986; Mishra & Sharma, 2003).

Durante la última década, la presión de uso de áreas con suelos salinos y sódicos se ha incrementado en la Argentina, debido al aumento de las cargas de ganado en pas-

toreo y la expansión de las zonas agrícolas (Viglizzo *et al.*, 2010; Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2012). En un esfuerzo por aumentar la oferta de forraje para el ganado en estos suelos, la comunidad nativa de pastizal se sustituye a menudo con especies de pastos exóticos y más productivos, tales como agropiro criollo (*Thynopirum ponticum* Podp.), raigrass anual (*Lolium multiflorum* Lam.), trébol de olor amarillo (*Melilotus indicus* L.) y *Lotus tenuis*, Willd (Maddaloni, 1986; Oesterheld & León, 1987; Hidalgo *et al.*, 1989; Colabelli & Miñón, 1993; Taboada *et al.*, 1998; Rodríguez & Jacobo, 2010). Sin embargo, esta sustitución a menudo da como resultado un deterioro a corto plazo de las propiedades del suelo, la cobertura del suelo y la composición florística (Oesterheld & León, 1987; Taboada *et al.*, 1998; Rodríguez & Jacobo, 2010).

A diferencia de las especies exóticas de clima templado, en los últimos años se han propuesto para su uso en suelos salinos y sódicos dos especies megatérmicas C4, grama Rhodes (*Chloris gayana* Kuhn) y mijo perenne (*Panicum coloratum* L.), como sustitutas de la comunidad nativa existente de pastos cortos. Ambas especies son muy tolerantes a la salinidad y a cortos períodos de anegamiento (Semple *et al.*, 2003; Qadir *et al.*, 2007). Las experiencias anteriores infructuosas, por la introducción de especies tolerantes a las heladas (Oesterheld & León, 1987; Taboada *et al.*, 1998), sugieren que es importante previo a su recomendación evaluar la eficacia de las especies megatérmicas para la recuperación de suelos sódicos templados. Este estudio tiene como objetivo evaluar el impacto de estas dos especies megatérmicas sobre las propiedades del suelo en la Pampa Deprimida de la provincia de Buenos Aires, en una región templada cubierta principalmente por suelos sódicos con fuertes limitaciones. Se postula que, debido a su mayor producción de biomasa y el aumento de la cobertura del suelo, las especies megatérmicas mejoran los suelos sódicos a través de la disminución del halomorfismo, el aumento de los stocks de COS y una mejor condición física del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio y diseño experimental

El estudio se llevó a cabo en un campo ganadero ubicado en Punta Indio (35°24'14,51"S - 57°43'24,98"W), en el norte de la Pampa Deprimida, provincia de Buenos Aires. La vegetación de la zona de estudio es una estepa halófila, dominada por *Distichlis spicata*, *D. scoparia*, y en menor medida por *Sporobolus indicus*, *S. pyramidatus*, *Chloris berroi* y el alga cianofítica *Nostoc commune* (Perelman *et al.*, 2001). Durante los últimos

50 años el pastizal fue pastoreado continuamente por 0,35-0,45 vaca ha⁻¹ año⁻¹.

La comunidad nativa ocupa suelos con baja salinidad y moderadamente sódicos, que pertenecen a la Serie Comandante Giribone (Natracualf Típico) (INTA, 2011). La descripción del perfil del suelo estudiado se muestra en la Tabla 1.

Se llevó a cabo entre 2004 y 2009 un experimento no manipulativo de campo con un diseño de bloques al azar, con tres tratamientos y tres repeticiones por tratamiento, para evaluar el impacto de las especies megatérmicas sobre las propiedades del suelo. Los tratamientos fueron:

- suelo laboreado y sembrado con grama Rhodes (*Chloris gayana* Kuhn);
- suelo laboreado y sembrado de mijo perenne (*Panicum coloratum* L); y
- la comunidad vegetal nativa en suelo laboreado (estepa halófila).

El laboreo consistió en tres pasadas de rastra de discos a una profundidad de 7 cm en la primavera de 2004. En diciembre de 2004 se sembraron manualmente parcelas experimentales de 50 m² (10 m de largo x 5 m de ancho) con 7 kg ha⁻¹ de mijo perenne variedad Klein Panic (19% de poder germinativo) o 7 kg ha⁻¹ de grama Rhodes variedad Finecut (312 propágulos viables ha⁻¹). En la estepa halófila el suelo fue laboreado con rastra de discos y luego se dio lugar a la repoblación de la comunidad vegetal nativa. El pastoreo fue excluido durante el período de estudio en todas las parcelas.

Lluvias

Durante la temporada de crecimiento (2004-2009) las lluvias se registraron utilizando un pluviómetro instalado en el sitio, y los resultados se compararon con los datos históricos de lluvias (1957-2009) tomados en un sitio ubicado a 38 km, la estación del Servicio Meteorológico sitio de estudio, en la estación del Servicio Meteorológico Nacional en la Base Naval de Punta Indio.

Producción primaria neta y superficie con suelo desnudo

La productividad primaria neta aérea (PPNA) se determinó durante cuatro años consecutivos (2005/2006 a 2008/2009). Cada mes de marzo, la biomasa acumulada durante el período vegetativo (octubre-marzo) fue recortada a 7 cm de altura en seis submuestras 0,2 m² por parcela y secada en estufa a 70 °C.

En mayo y septiembre de 2007 y en enero de 2008 se midió la superficie de suelo desnudo (n = 4) con un marco de 0,2 m² subdividido en 20 rectángulos iguales. Estas fechas de muestreo corresponden a finales de la temporada de crecimiento (otoño), de latencia (invierno) y de crecimiento activo (verano), respectivamente.

Halomorfismo y propiedades físicas del suelo

En la primavera de 2007, y en el otoño, el invierno y el verano de 2008, se tomaron muestras de suelo para evaluar el

halomorfismo y las propiedades físicas del suelo. En cada tratamiento, se tomaron tres muestras disturbadas de los horizontes A (0-12 cm) y Bt1n (12-28 cm), para determinar el pH en pasta (en pasta de suelo saturado, por potenciometría), la conductividad eléctrica en extractos saturados de suelo (CE_{ES}, por conductimetría), y la relación de adsorción de sodio de extractos de saturación de suelo (RAS_{ES}), el cual fue calculado a partir de las concentraciones de Na⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺ en los extractos de saturación del suelo, que fueron determinadas por espectrofotometría de absorción atómica (Rhoades, 1982).

Se determinaron la densidad aparente (Dap) de la capa superior del suelo por el método del cilindro y, el contenido hídrico gravimétrico (CHG) por secado en estufa a 105°C (Burke et al., 1986). Estas determinaciones se hicieron en muestras no disturbadas (cilindros de 8 cm de altura y 8 cm de diámetro, n = 3). Se tomaron muestras no disturbadas (n = 3) de los primeros 10 cm del suelo para determinar su índice de inestabilidad estructural a través del cambio en el diámetro medio ponderado (CDMP) tal como es descrito por De Leenheer y De Boodt (1959). El CDMP surge de la diferencia o cambio entre el diámetro medio ponderado de los agregados tamizados en seco (tamices de 4,8; 3,4 y 2 mm de apertura) y agregados tamizados en agua (tamices de 4,8; 3,4; 2; 1; 0,5 y 0,3 mm de apertura). Cuando esta diferencia aumenta, disminuye la estabilidad estructural. Se determinó la tasa de infiltración de agua (TI; n = 3) utilizando un método rápido desarrollado por el USDA (1999). Para ello, se insertaron cilindros de 15,24 cm de diámetro a 8 cm en el suelo, dejando la superficie expuesta del suelo en el interior del infiltrómetro, la que fue cubierta con una película plástica. Se añadió una pulgada lineal (444 mL) de agua destilada a cada anillo, y después de retirar la envoltura de plástico, se registró el tiempo de infiltración. La capacidad portante del suelo (CP) se determinó (n = 10) a lo largo de transectas en zig-zag en el campo, utilizando el penetrómetro Proctor (Davidson, 1965).

Carbono orgánico del suelo

Al final del estudio (marzo de 2009), se tomaron cuatro muestras por tratamiento de la capa superior del suelo (0-0,12 m horizonte A), para determinar el contenido de carbono orgánico del suelo (COS), utilizando el método de Walkley y Black (Allison, 1965). Los stocks de carbono del suelo de los primeros 12 cm se calcularon utilizando los datos de Dap de cada tratamiento, según la fórmula:

$$\text{Stok de C (Mg ha}^{-1}\text{)} = \text{COS (kg Mg}^{-1}\text{)} * \text{D ap (Mg m}^{-3}\text{)} * 10000 \text{ m}^2 * 0,12 \text{ m [1]}$$

Análisis estadístico

Los cambios en las propiedades del suelo en los tres tratamientos fueron analizados mediante ANOVA para mediciones repetidas a través del tiempo. En el caso de los parámetros de halomorfismo del suelo, el efecto de los tratamientos se evaluó para cada profundidad por separado. Cuando las diferencias entre las

Tabla 1. Propiedades del suelo y descripción del perfil del suelo estudiado (Natracuallf Típico, Serie Comandante Giribone), siguiendo la metodología de Soil Survey Staff (1993).
 Table 1. Soil properties and profile description of the soil under study (Typic Natracuallf, Comandante Giribone Series), following Soil Survey Staff (1993) methodology.

espesor cm	Color (seco al aire)	clase textural	clase, tipo y grado de estructura	Consistencia			Carbonatos	Concreciones	Moteados	Raíces	
				seco	húmedo	saturado					
A	0-12	10YR 6/2	limoso	finos, moderados	fuerte	firme	moderadamente pegajosa y plástica	+++	Fe-Mn +	si	media +++
Bt1n	12-28	10YR 5/2	arcilloso	bloques subangulares, moderados	fuerte	firme	muy pegajosa y plástica	++	Fe Mn Ca ++	si	media +++
Bt2n	28-47	7.5YR6/4	arcilloso	bloques subangulares, finos, moderados	fuerte	muy firme	moderadamente pegajosa y plástica	+	Fe Mn Ca ++		finas ++
BC1	47-76	7.5YR4/6	limoso	bloques subangulares, medios, débiles	fuerte	firme	moderadamente pegajosa y plástica	+			finas +
BC2	76-95	7.5YR4/6	limoso	bloques subangulares, medios, débiles	fuerte	firme	ligeramente pegajosa y plástica				finas +
C	95-140	7.5YR 5/4	limoso	laminar	fuerte	firme	moderadamente pegajosa y plástica	+++			

medias fueron significativas, las medias individuales se compararon mediante la prueba de Tukey. Se utilizaron los coeficientes de correlación de Pearson para determinar la relación entre la PPNA y las precipitaciones y el suelo desnudo; entre la cobertura del suelo y el halomorfismo del suelo y las propiedades físicas; y entre el CHG y la Dap y la CP, respectivamente. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando InfoStat (INFOSTAT, 2007).

RESULTADOS

Lluvias

Excepto en el período muy seco 2008 - 2009, la precipitación anual (media = 642 ± 204 mm) fue similar al promedio histórico (1957-2009). Las precipitaciones se distribuyeron uniformemente a través de las campañas de 2005-2006, 2006-2007 y 2007-2008, y se concentraron en verano (enero-marzo) en 2004-2005 y 2008-2009. Durante la temporada de crecimiento de las especies me-

gatérmicas (octubre-marzo), las precipitaciones variaron entre 278 y 708 mm.

PPNA y suelo desnudo

La producción de biomasa durante la primera temporada (2004/05) fue muy baja, debido al lento crecimiento de las especies megatérmicas y la lenta recuperación de la comunidad halófila después de la labranza. En consecuencia, la primera evaluación de la PPNA se realizó en marzo de 2006, cuando se cosechó la biomasa aérea producida durante la segunda temporada. La PPNA fue significativamente mayor en 2006/0207 que en cualquier otro período de crecimiento, y siempre fue significativamente mayor en *Chlorisy Panicum* que en la comunidad halófila (Fig. 1a). El área de suelo desnudo fue significativamente mayor en la estepa nativa, y significativamente inferior en verano que en invierno y otoño (Fig. 1b).

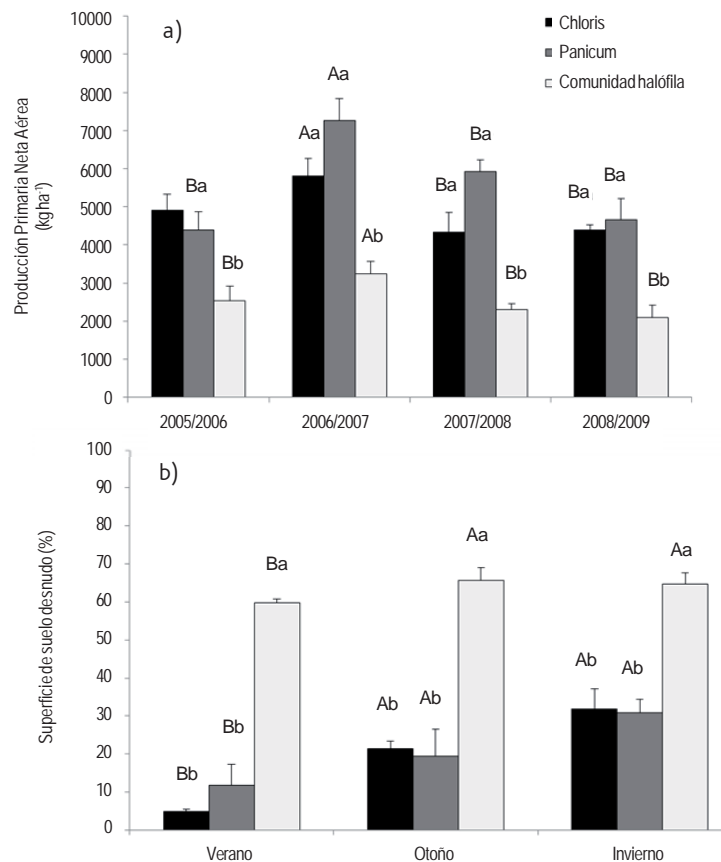


Figura 1. Producción primaria neta aérea en los diferentes tratamientos y las estaciones de crecimiento (a), y superficie de suelo desnudo en 2008 (b). Las líneas verticales indican un error estándar de la media. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas ($P < 0,05$) entre las estaciones (mayúsculas) y entre tratamientos (minúsculas).

Figure 1. Aboveground net primary production in the different treatments and growing seasons (a), bare soil surface in 2008 (b). Vertical lines indicate the standard error of the mean. Different letters above the bars indicate significant differences ($P < 0.05$) among growing seasons or seasons (upper case) and among treatments (lower case).

Aunque se mantuvo en niveles altos, el pH en pasta del suelo disminuyó significativamente tanto en el horizonte A y en los horizontes Bt1n con el establecimiento de especies megatérmicas (Fig. 2a, b). En contraste, ni la CE_{ES} (2.1 a 3.26 $dS\ m^{-1}$) ni la RAS_{ES} (7,51-21,2) se vieron afectadas. Estas propiedades variaron significativamente sólo entre las estaciones de crecimiento.

Carbono orgánico del suelo y propiedades físicas del suelo

El contenido de COS se incrementó significativamente por el establecimiento de especies de *Panicum*, no así de

Chloris. El stock de C del suelo que contempla a la Dap reflejó estas diferencias (Tabla 2).

El CHG del suelo no fue afectado por las especies megatérmicas, pero varió significativamente entre estaciones (11,0 a 32,3% en peso). Las variaciones de CHG no causaron variaciones en la Dap del suelo por procesos de expansión-contracción, en contraste con lo hallado por Taboada & Lavado (1993) en otros suelos sódicos de la región. Esto evitó la necesidad de estandarizar la Dap del suelo a un CHG constante.

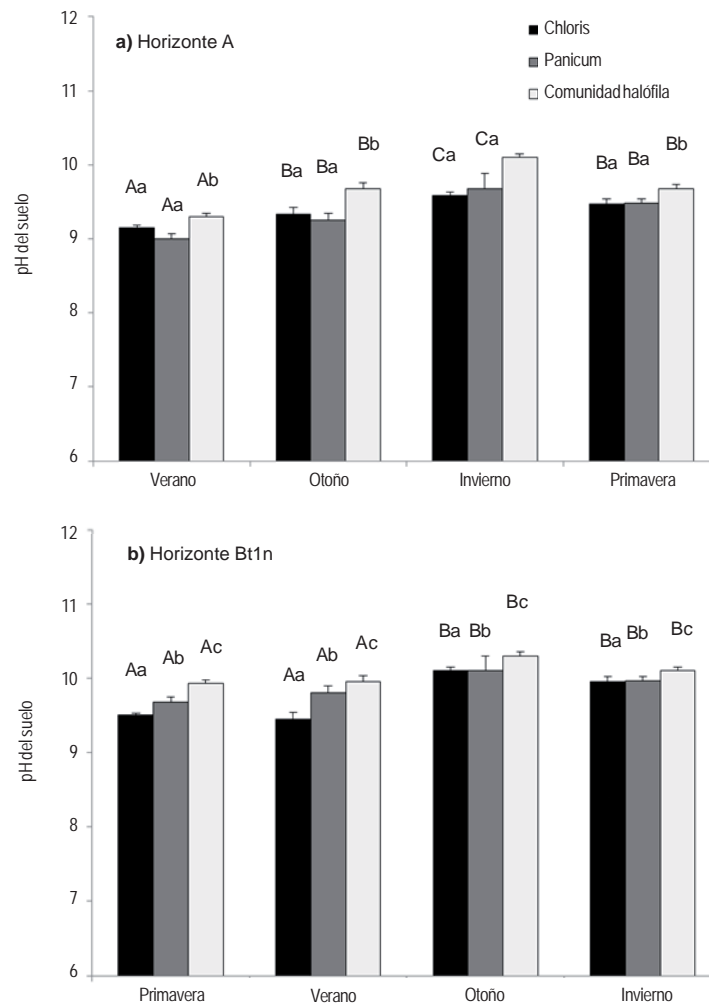


Figura 2. pH en pasta saturada del suelo en los horizontes A (a) y Bt1n (b) en los diferentes tratamientos y estaciones. Las líneas verticales indican el error estándar de la media. Letras diferentes indican diferencias significativas ($P < 0,05$) entre las estaciones (mayúsculas) y (en minúsculas) entre tratamientos.

Figure 2. Soil pH in saturated paste in the A (a) and Bt1n (b) horizons in the different treatments and seasons. Vertical lines indicate the standard error of the mean. Different letters indicate significant differences ($P < 0.05$) among seasons (upper case) and among treatments (lower case).

Tabla 2. Contenido de carbono orgánico del suelo (COS) y stock de C en los primeros 12 cm del suelo (medias y errores estándar). Las diferencias significativas ($P < 0,05$) entre tratamientos son mostradas por letras diferentes.

Table 2. Soil organic carbon content (COS) and soil C stock in the top 12 cm layer (means and standard errors). Significant differences ($P < 0,05$) among treatments are shown by different letters.

	COS (kg Mg ⁻¹)	Stock de C (0-12 cm) (Mg ha ⁻¹)
<i>Chloris</i>	10,2 (0.4) a	1505,5 (144) a
<i>Panicum</i>	17,6 (0.2) b	2618,9 (166) b
Comunidad halófila	11,9 (0.3) a	1870,7 (157) a

La Dap más baja del suelo tuvo lugar en otoño y la más alta en invierno; la Dap disminuyó por igual en ambas pasturas (*Chloris* y *Panicum*) (Fig. 3a). El CDMP de agregados fue menor en invierno y también fue disminuido por las especies megatérmicas (Fig. 3b). La TI del suelo fue muy variable entre las repeticiones y no se vio afectada significativamente por los tratamientos. De cualquier manera, la TI fue significativamente mayor en el otoño y, en relación con la comunidad halófila, aumentó más con *Chloris* que con *Panicum* (Fig. 3c).

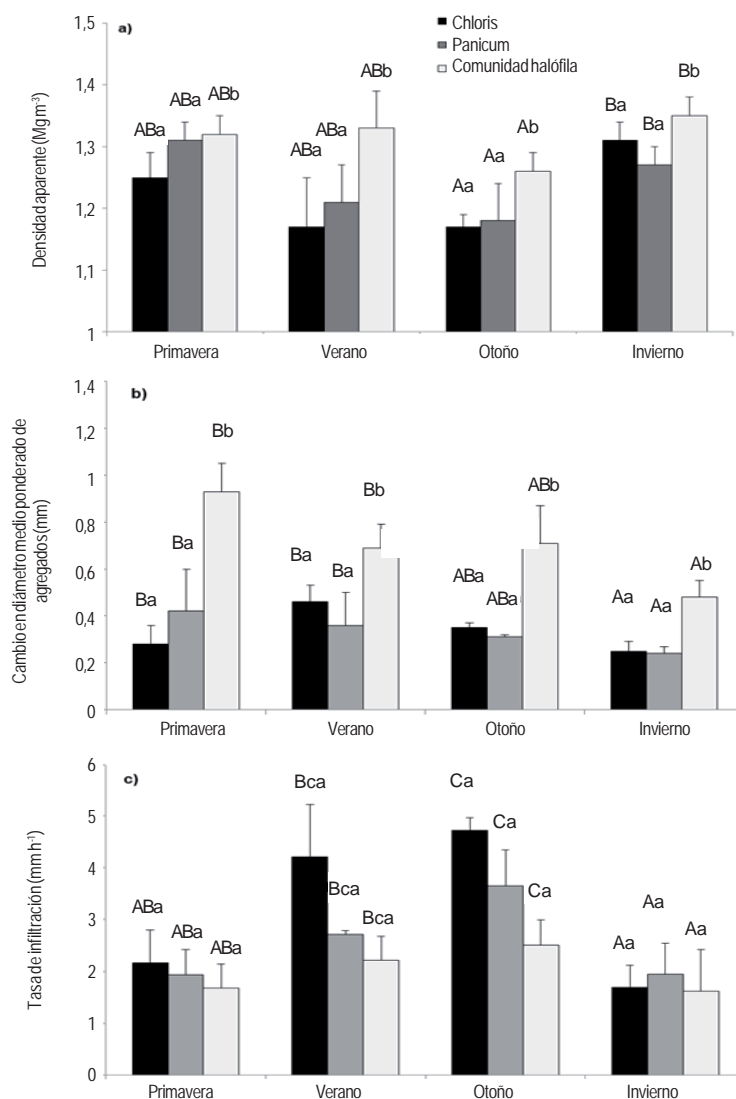


Figura 3. Densidad aparente del suelo (a), cambio en el diámetro medio ponderado de agregados (b), y la tasa de infiltración de agua (c) en los diferentes tratamientos y estaciones. Las líneas verticales indican el error estándar de la media. Las diferencias significativas ($P < 0,05$) entre estaciones (mayúsculas) y entre tratamientos (minúsculas) son mostrados por diferentes letras encima de las barras.

Figure 3. Soil bulk density (a), change in aggregate mean weight aggregate diameter (b), and water infiltration rate (c) in the different treatments and seasons. Vertical lines indicate one standard error of the mean. Significant differences ($P < 0,05$) among seasons (upper case) and among treatments (lower case) are shown by different letters above the bars.

La CP del suelo varió significativamente con el CHG (Fig. 4). Se ajustaron diferentes funciones exponenciales para *Chloris* y *Panicum* (juntos) y para la comunidad halófila, mostrando esta última mayor CP a bajo CHG, lo cual sucede generalmente en verano. En ese momento, la CP fue 8-12 veces mayor (4,63 a 8,88 MPa) que en cualquier otra época del año (0,37 a 1,08 MPa). Sólo en verano, la CP fue disminuida significativamente por los tratamientos *Chloris* y *Panicum*.

Relaciones entre variables

La PPNA fue independiente de la precipitación anual, mostró una baja correlación ($r = 0,348$) con la precipitación durante la estación de crecimiento, y se relacionó negativamente ($r = -0,904^{***}$) con la superficie de suelo desnudo. Excepto el valor RAS_{ES} y la CE_{ES} del horizonte Btn, todas las propiedades del suelo estudiadas mostraron correlación significativa con la superficie del suelo desnudo (Tablas 3 y 4).

DISCUSIÓN

El establecimiento de especies megatérmicas aumentó significativamente la PPNA y disminuyó la superficie de

suelo desnudo, en comparación con la comunidad nativa halófila (Fig. 1a, b). Esto afectó a las propiedades del suelo en diferentes formas. Se observaron leves pero significativas disminuciones del pH (Fig. 2a, b). Ello concordó con los resultados obtenidos por Casas & Pittaluga (1984), en otros suelos de la Pampa Deprimida, como resultado del establecimiento de agropiro alargado, una especie de clima templado, y Taboada *et al.* (1998) también encontraron poco efecto sobre el pH de la capa superior del suelo trabajando con la misma especie. Kim *et al.* (2010) hallaron leves aumentos de pH en la solución de la rizosfera, después de la siembra de mostaza india (*Brassica juncea*), en suelos alcalinos contaminados por muchos años. Los ligeros descensos de pH aquí hallados están probablemente relacionados con los cambios en la PPNA (y la menor superficie de suelo desnudo) que se hallaron en las áreas con especies megatérmicas (Fig. 1a, b). Es probable que estos cambios de vegetación hayan promovido efectos rizosféricos, según lo descrito por varios autores (Qadir *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2012).

La disolución de la calcita (CO_3Ca) y la sustitución de Na^+ adsorbido por Ca^{2+} liberado de la calcita debido al aumento de la pCO_2 fue mencionada como posible mecanismo para generar descensos de pH (Semple *et al.*, 2003;

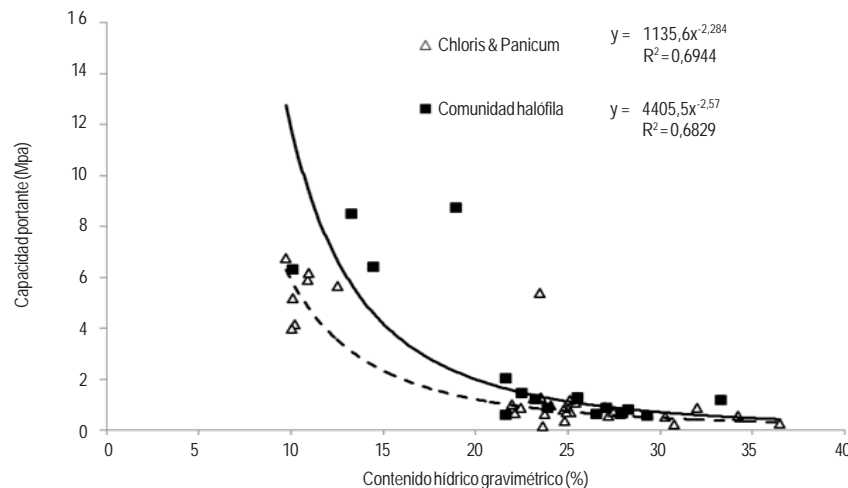


Figura 4. Relación entre la capacidad portante del suelo y el contenido hídrico gravimétrico del suelo en la comunidad halófila y en los tratamientos *Chloris* y *Panicum*.

Figure 4. Relationship between soil bearing capacity and gravimetric soil water content in the halophytic community and the *Chloris* and *Panicum* treatments.

Tabla 3. Coeficientes de correlación de Pearson entre variables de suelo relacionadas con el halomorfismo edáfico y la superficie de suelo desnudo, en los horizontes A y Bt1n. CE_{ES} es la conductividad eléctrica de extractos de saturación de suelo. RAS_{ES} es la relación de adsorción de sodio de extractos de saturación de suelo. "r", "p" y "n" son el coeficiente de correlación, el nivel de probabilidad del error y el número de repeticiones, respectivamente.

Table 3. Pearson correlation coefficients between soil variables related to soil halomorphism and bare soil surface. CE_{ES} is the electrical conductivity of saturation extracts. RAS_{ES} is the sodium adsorption ratio of saturation extracts. "r", "p" and "n" are correlation coefficient, error probability and number of replicates, respectively.

		Horizonte A		
		CE_{ES}	RAS_{ES}	Suelo desnudo
pH	r	0,754	0,695	-0,895
	p	<0,0001	<0,0001	<0,0001
	n	64	64	36
CE_{ES}	r		0,771	-0,543
	p		<0,0001	0,0299
	n		64	36
RAS_{ES}	r			-0,329
	p			0,2125
	n			36
		Horizonte Bt1n		
		CE_{ES}	RAS_{ES}	Suelo desnudo
pH	r	0,325	0,38	-0,637
	p	0,0096	0,0019	0,0079
	n	64	64	36
CE_{ES}	r		0,675	-0,156
	p		<0,0001	0,5621
	n		64	36
RAS_{ES}	r			0,167
	p			0,535
	n			36

Tabla 4. Coeficientes de correlación de Pearson entre variables de suelo relacionadas con las propiedades físicas del horizonte A y la superficie de suelo desnudo. Dap es la densidad aparente. CDMP es el cambio de diámetro medio de agregados entre tamizado en seco y en agua (índice de inestabilidad). TI es la tasa de infiltración. COS es el contenido de carbono del suelo. "r", "p" y "n" son el coeficiente de correlación, el nivel de probabilidad del error y el número de repeticiones, respectivamente.

Table 4. Pearson correlation coefficients between soil variables related to soil physical properties of the A horizon and bare soil surface. Dap is soil core bulk density. CDMP is the aggregate change in mean weight diameter (structural instability index). TI is soil infiltration rate. COS is soil organic carbon content. "r", "p" and "n" are correlation coefficient, error probability and number of replicates, respectively.

		CDMP	TI	COS	Suelo desnudo
Dap	r	0,195	-0,450	-0,657	0,698
	p	0,1226	0,0002	0,0056	0,0031
	n	64	64	16	16
CDMP	r		-0,088	-0,425	0,616
	p		0,4864	0,1004	0,011
	n		64	16	16
TI	r			0,487	-0,671
	p			0,0552	0,0044
	n			16	16
COS	r				-0,682
	p				0,0026
	n				16

Qadir *et al.*, 2007). Sin embargo, este mecanismo se descarta en el caso del suelo estudiado, dado que no posee calcita en los horizontes superiores. Estos efectos sobre el pH del suelo fueron menos evidentes en el horizonte

Bt1n (Fig. 2b), probablemente debido a la menor concentración de raíces en el subsuelo, lo que impidió que hubiera disminuciones de pH inducidas por las raíces (Robbins, 1986; Qadir & Oster, 2002).

Al igual que otros suelos sódicos de la Pampa Deprimida (INTA, 1990; INTA, 2011), el suelo estudiado era sólo ligeramente salino ($2-4 \text{ dS m}^{-1}$). El establecimiento de especies megatérmicas causó cambios muy leves y superficiales en la salinidad y cambios en la sodicidad. En un suelo sódico cercano al sitio estudiado, Vecchio *et al.* (2008) también encontraron descensos significativos de pH del suelo y de RAS_{ES} , como resultado de excluir el pastoreo durante varios años en una estepa nativa. Es posible que una mayor biomasa de raíces o períodos de recuperación más largos sean necesarios para disminuir los valores de RAS_{ES} , según lo sugerido por algunos autores (Qadir *et al.*, 1996; Akhter *et al.*, 2004; Mishra & Sharma, 2003). La mayoría de los estudios han demostrado que la cantidad de agua de lixiviación y de riego son un factor importante para lograr una recuperación exitosa (Qadir *et al.*, 1996; Qadir & Oster, 2002; Akhter *et al.*, 2004). Pudo haber sucedido que durante el presente estudio la precipitación acumulada haya sido insuficiente, limitando así la lixiviación de cationes Na sustituidos.

Los aumentos de carbono orgánico del suelo observado fueron similares a los hallados por otros autores en suelos con pobre contenido de materia orgánica (Mishra & Sharma, 2003; Akhter *et al.*, 2004; Wong *et al.*, 2010). Estos aumentos pueden ser atribuidos a la mayor PPNA bajo *Panicum* y *Chloris* (Fig. 1a), lo que aumentó la cobertura del suelo con biomasa viva y muerta. Estos aumentos del COS, aunque esperables en suelos salinos y sódicos (Helalia *et al.*, 1992; Qadir *et al.*, 2007; Wong *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2012), han sido rara vez observados cuando se sustituye la vegetación nativa (Taboada *et al.*, 1998).

Tal como lo demuestran los descensos de Dap, CDMP de agregados (Figs. 3a, b) y la disminución de CP con bajos CHG (Fig. 4), las especies megatérmicas afectaron significativamente las propiedades físicas del suelo. La labranza del suelo antes de la siembra de estas especies pudo también hacer disminuir la Dap del suelo por la creación de poros grandes inestables (Rengasamy & Olsson, 1991). Estas disminuciones de Dap fueron atribuidas a la formación de nuevos canales de raíces cuando el suelo fue poblado por las especies sembradas, lo que resulta en la creación de poros grandes ($> 100 \text{ mm}$ de diámetro cilíndrico equivalente) después de la muerte descomposición de las raíces (Murtaza *et al.*, 2009; Tan *et al.*, 2009; Singh *et al.*, 2012). Se observaron disminuciones similares de Dap después del establecimiento de: a) agropiro alargado en otros suelos sódicos de la región pampeana (Casas & Pittaluga, 1984;

Taboada *et al.*, 1998); b) *Leptochloa fusca* en Pakistán (Akhter *et al.*, 2004); y c) árboles de leguminosas en la India (Mishra & Sharma, 2003).

El CDMP de agregados, que expresa un índice de inestabilidad estructural (Burke *et al.*, 1986), puede disminuir cuando se establecen especies megatérmicas. Esta recuperación de la estabilidad estructural se explica por una mayor producción de biomasa y la menor superficie de suelo desnudo, en comparación con la estepa halófila (Fig. 1a, b). Varios autores han encontrado incrementos progresivos de estabilidad como resultado de los aumentos en las actividades microbiana y enzimática (Tan *et al.*, 2009; Singh *et al.*, 2012), el aumento de la biomasa y la densidad de raíces y la producción de exudados rizosféricos, polisacáridos e hifas de hongos asociados (Akhter *et al.*, 2004; Wong *et al.*, 2010).

A pesar de que las especies megatérmicas generaron una mayor cobertura del suelo, lo que impidió el sellado de la superficie y disminuyó la velocidad de la escorrentía (Mielke *et al.*, 1986), así como también disminuyó la Dap del suelo y aumentó el COS, lo que mejoró la estabilidad de agregados y poros y aumentó la proporción de poros estables al agua (Taboada *et al.*, 1998; Qadir *et al.*, 2007), sólo hubo una tendencia al aumento de la TI (Fig. 3c). Este resultado se diferencia de los aumentos de tasa de infiltración que muestran otros suelos sódicos sembrados con diferentes especies exóticas (Mishra & Sharma, 2003). Es probable que la falta de efectos significativos sea atribuible a la elevada variabilidad que mostraron las determinaciones de TI, por lo que hubiera sido necesario incrementar el número de repeticiones.

La mayor capacidad portante del suelo de la comunidad nativa con bajos valores de humedad edáfica podría ser causada por el aumento de la Dap (Fig. 3a). Ambas especies megatérmicas aflojaron el suelo durante el verano (Fig. 4), causando así un mejor ambiente de enraizamiento durante esa estación.

Los resultados de este estudio muestran mejoras físicas del suelo en la agregación y las propiedades hidráulicas, las cuales jugaron un papel clave como factores de fitoestabilización. Esto difiere de la recuperación de suelos sódicos lograda principalmente mediante la sustitución de Na^+ del complejo de intercambio catiónico, como resultado del aumento de la pCO_2 del suelo (Qadir *et al.*, 1996; Qadir & Oster, 2002; Qadir *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2010). Por lo tanto, y a diferencia de lo postulado, los cambios observados en el suelo después del

establecimiento de las especies megatérmicas no pueden atribuirse a procesos químicos clásicos, sino más bien a la recuperación física del suelo (Figs. 3 y 4). Estos cambios se basaron en una mayor producción de biomasa y a la cobertura del suelo por la vegetación viva y muerta (Fig. 1), lo cual promovió el secuestro de carbono en la superficie del suelo (Cuadro 1). Sólo hubieron pequeñas diferencias entre *Chloris* y *Panicum* en términos de su eficacia de fito-estabilización.

CONCLUSIONES

La sustitución de la estepa halófila nativa por especies megatérmicas incrementó la producción de biomasa y la cobertura del suelo en esta zona templada. Ello incrementó el stock de carbono orgánico y dio lugar a un mejor ambiente físico, pero no disminuyó el halomorfismo del suelo. Los cambios en las propiedades del suelo fueron principalmente físicos y no químicos como se había postulado, mostrando un camino diferente para fito-estabilización de suelos sódicos.

A pesar del pequeño cambio en la sodicidad del suelo, el establecimiento de especies megatérmicas permitirá a los productores aumentar simultáneamente el suministro de forraje del ganado y mejorar la reserva de carbono y las propiedades físicas de suelos sódicos de clima templado.

BIBLIOGRAFÍA

- Akhter, J; R Murray; K Mahmood; KA Malik & S Ahmed. 2004. Improvement of degraded physical properties of a saline-sodic soil by reclamation with Kallar grass (*Leptochloa fusca*). *Plant and Soil* 258: 207-216.
- Allison, LE. 1965. Organic carbon. In: Black CA (ed). *Methods of Soil Analysis (Part 2)*. Chemical and microbiological properties, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, 1367-1378 p.
- Burke, W; D Gabriels & J Bouma. 1986. *Soil Structure Assessment*. A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, 92 p.
- Casas, RR & A Pittaluga. 1984. Efecto de una pastura de Agropiro bajo clausura en la recuperación de suelos salinizados en el Partido de Carlos Tejedor. *ACINTACNIA* 1 N° 12. Castelar.
- Colabelli MR & DP Miñón. 1993. Métodos de intersembrado de *Lotus tenuis* y *Trifolium repens* en pastizales de la Pampa Deprimida bonaerense. *Rev. Arg. Prod. An.* 13: 225-233.
- Davidson, DT. 1965. Penetrometer measurements. In: Black CA (ed). *Methods of Soil Analysis (Part 2)*. Chemical and microbiological properties, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, 472-484 p.
- De Leenheer, P & M De Boodt. 1959. Determination of aggregate stability by the change of the mean weight diameter. *Proc.Int. Symp.Soil Struct. Ghent*, 290-300 p.
- Helalia, AM; S El-Amir; ST Aboud-Zeid & KF Zaghlood. 1992. Bio-reclamation of sodic soil by Amshot grass in Northern Egypt. *Soil Tillage Res.* 22: 109-115.
- Hidalgo, LG; MA Cahuépe & PO Rimoldi. 1989. Productividad primaria de una pastura de agropiro (*Elytrigia elongata*) y de una comunidad de pastizal natural, en condición similar de ambiente y manejo. *Rev. Arg. Prod. An. Supl.* 9: 39-40.
- INFOSTAT. 2007. InfoStat versión 2007. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- INTA. 1990. Atlas de Suelos de la República Argentina Tomo I, (INTA, Bs. As.), 731 p.
- INTA. 2011. Carta de suelos de la República Argentina 3557-20 Magdalena" (INTA, CIRN, Instituto de Suelos, ISSN 0327-781X) Disponible en: <http://www.inta.gov.ar/suelos/cartas/3557/Magddalena/3557-20-4.htm>.
- Kim, KR; G Owens & R Naidu. 2010. Effect of root-induced chemical changes on dynamics and plant uptake of heavy metals in rhizosphere soils. *Pedosphere* 20: 494-504.
- Maddaloni, J. 1986. Forage production on saline and alkaline soils in the humid region of Argentina. *Reclam. Reveg. Res.* 5: 1-16.
- Mielke, LN; JW Doran & KA Richards. 1986. Physical environment near the surface of ploughed and no-tilled soils. *Soil Tillage Res.* 7: 355-366.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. 2012. Producción, área sembrada y cosechada, cotizaciones nacionales e internacionales. Cereales, Oleaginosas, Cultivos Industriales, Frutos y Hortalizas. Sistema de Series Temporales (disponible en: <http://www.siiia.gov.ar/index.php/series-por-tema/agricultura>).
- Mishra, A & SD Sharma. 2003. Leguminous trees for the restoration of degraded sodic wasteland in the eastern Uttar Pradesh, India. *Land Degrad. Develop.* 14: 245-261.
- Murtaza, G; A Ghafoor; G Owens; M Quadir & UZ Khalon. 2009. Environmental and economic benefits of saline-sodic soil reclamation using low-quality water and soil amendments in conjunction with a rice-wheat cropping system. *J.Agron.Crop Sci.* 195: 124-136.
- Oesterheld, M & RJC León. 1987. El envejecimiento de las pasturas implantadas: su efecto sobre la productividad primaria. *Turrialba* 37: 29-35.
- Perelman, SB; RJC León & M Oesterheld. 2001. Cross-scale vegetation patterns of Flooding Pampa grasslands. *J. Ecology* 89: 562-577.
- Qadir, M & JD Oster. 2002. Vegetative bioremediation of calcareous sodium soils: history, mechanisms, and evaluation. *Irrig. Sci.* 21: 91-101.
- Qadir, M; RH Qureshi & N Ahmad. 1996. Reclamation of a saline-sodic soil by gypsum and *Leptochloa fusca*. *Geoderma* 74: 207-217.
- Qadir, M; JD Oster; S Schubert; AD Noble & KL Sahrawat. 2007. Phytoremediation of sodic and saline sodic soils. *Adv. Agro.* 96: 197-247.
- Rengasamy, P & KA Olsson. 1991. Sodicy and soil structure. *Australian Journal of Soil Res.* 29: 935-952.

- Rhoades, JD. 1982. Soluble salts. In: Page AL; RH Miller & DR Keeney (ed) *Methods of Soil Analysis, Part 2*. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, 161-179 p.
- Robbins, CW. 1986. Sodic calcareous soil reclamation as affected by different amendments and crops. *Agron. J.* 78: 916-920.
- Rodriguez, AM & EJ Jacobo. 2010. Glyphosate effects on floristic composition and species diversity in the Flooding Pampa grassland (Argentina). *Agric. Ecos. Enviro.* 138: 222-231.
- Semple, WS; IA Cole & TB Koen. 2003. Performance of some perennial grasses on severely salinized sites on the inland slopes of New South Wales. *Aus. J. Exptm. Agric.* 43: 357-371.
- Shukla, SK; K Singh; B Sing & NN Gautam. 2011. Biomass productivity and nutrient availability of *Cynodon dactylon* (L) Pers. growing on soils of different sodicity stress. *Biomass and Bioenergy* 35: 3440-3447.
- Singh, K; VC Pandey; B Singh & RR Singh. 2012. Ecological restoration of degraded sodic lands through afforestation and cropping. *Ecol. Eng.* 43: 70-80.
- Soil Survey Division Staff. 1993. Soil survey manual. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 18. (disponible en: http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/?cid=nrcs142p2_054262)
- Taboada, MA & RS Lavado. 1993. Influence of trampling on soil porosity under alternate dry and ponded conditions. *Soil Use Manage.* 9: 139-143.
- Taboada, MA; G Rubio & RS Lavado. 1998. The deterioration of tall wheatgrass pastures on saline sodic soils. *J. Range Manage.* 51: 239-244.
- Tan, JL & YH Kang. 2009. Changes in soil properties under the influences of cropping drip irrigation during the reclamation of severe salt-affected soils. *Agric. Sci. China* 8: 1228-1237.
- USDA. 1999. Soil Quality Test Kit Guide. USDA-ARS-SCS: Washington, DC. (disponible en: <http://soils.usda.gov/sqi/assessment/files/KitSpanish.pdf>)
- Vecchio, MC; RA Golluscio & MI Cordero. 2008. Cálculo de la receptividad ganadera a escala de potrero en pastizales de la Pampa Deprimida. *Ecología Austral* 18: 213- 222.
- Viglizzo, EF; LV Carreño; H Pereyra; F Ricard; J Clatt & D Pincén. 2010. Dinámica de la frontera agropecuaria y cambio tecnológico. En: E Viglizzo & E Jobbagy (ed). *Expansión de la Frontera Agropecuaria en Argentina y su Impacto Ecológico-Ambiental*. Ediciones Instituto de Tecnología Agropecuaria, Buenos Aires. 9-16 p.
- Wong, VN; RSB Greene; RC Dalal & BW Murphy. 2010. Soil carbon dynamics in saline and sodic soils: a review. *Soil Use Manage.* 26: 2-11.
- Yang, C; W Guo & D Shi. 2010. Physiological roles of organic acids in alkali-tolerance of the alkali-tolerant halophyte. *Agron. J.* 102: 1081-1089.