

POTENCIAL USO DEL YESO SINTÉTICO (FDG) EN LA AGRICULTURA COMO ENMIENDA EN SUELOS CON PROBLEMAS DE SALINIDAD

USE OF SYNTHETIC GYPSUM (FDG) IN AGRICULTURE AS AN AMENDMENT OF SOILS WITH SALINITY PROBLEMS

Marco Sandoval^{1*}, Celerino Quezada¹, José Celis², José M. Recio³, y Juan Capulín⁴

¹ Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción, Vicente Méndez 595, Casilla 537, Chillán, Chile.

² Facultad de Ciencias Veterinarias, Universidad de Concepción, Casilla 535, Chillán, Chile.

³ Departamento de Botánica, Ecología y Fisiología Vegetal, Universidad de Córdoba, Ecología C-4, Campus Rabanales 1407, Córdoba, España.

⁴ Instituto de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Tulancingo s/n, Tulancingo, México.

* Autor para correspondencia E-mail: masandov@udec.cl

RESUMEN

La salinidad y sodicidad de los suelos es un problema que produce disminución en los potenciales de rendimiento de los cultivos y un desequilibrio en la matriz de suelo. El objetivo de este estudio fue evaluar el uso del yeso sintético (FDG) obtenido como subproducto del proceso de desulfuración de la generación de energía eléctrica en centrales termoeléctricas, y compararlo con yeso de origen mineral, aplicado en un suelo Sodic Haploxerert. El diseño experimental fue completamente al azar, con arreglo factorial 3 x 4. Los tratamientos aplicados fueron: T₀: control; T₁: yeso natural (1,9 t ha⁻¹); T₂: yeso sintético (1,9 t ha⁻¹). A cada tratamiento se le aplicó cuatro cargas de agua de 150 mm cada una, hasta alcanzar los 600 mm. El análisis químico del suelo mostró elevados niveles de conductividad eléctrica (CE = 2,5 dS m⁻¹), sodio (Na⁺ = 14 meq L⁻¹), y pH levemente alcalino (pH = 8,6). La relación de adsorción de sodio (RAS) resultó medio (RAS = 4,26), y el yeso sintético no mostró diferencias significativas (p < 0,05) con relación al yeso mineral en la extracción del sodio, presentando ambos valores de extracción de CE y Na⁺ superiores al tratamiento control. Los mejores resultados en la extracción de sodio se obtuvieron después de aplicar la primera carga de agua (150 mm), lo cual prueba que dadas las condiciones del ensayo, el yeso mineral puede ser remplazado por yeso sintético, resultando en un ahorro de agua en las propuestas de remediación de suelos.

Palabras clave: sulfato de calcio, suelo sódico, sodio, enmienda química

ABSTRACT

Salinity and sodicity of soils are problems that cause a decrease in crop yield potential and an imbalance in the soil matrix. The aim of this study was to evaluate the use of synthetic gypsum (FDG) derived from coal-fired power plants, and compare its performance against naturally mined gypsum in a Sodic Haploxerert. The experimental design was completely randomized factorial arrangement of three treatments with three replicates (3 x 4). The treatments were: T₀: control; T₁: natural gypsum (1.9 t ha⁻¹); T₂: synthetic gypsum (1.9 t ha⁻¹). Four irrigation applications of 150 mm each were used per treatment until reaching 600 mm. The soil analysis showed high levels of electrical conductivity (EC = 2.5 dS m⁻¹) and sodium (Na⁺ = 14 meq L⁻¹), and a slightly alkaline pH value (pH = 8.6). The sodium adsorption ratio (RAS) was medium (RAS = 4.26); synthetic gypsum did not show significant

differences ($p < 0.05$) in terms of sodium removal compared to natural gypsum, reaching EC and Na^+ values that were higher than those recorded in the control. The best results regarding sodium removal were obtained after the first irrigation application (150 mm). This indicates that, given the test conditions, natural gypsum can be replaced by synthetic gypsum, resulting in water savings in the proposed soil remediation.

Key words: calcium sulfate, sodic soil, sodium, chemical amendment

INTRODUCCIÓN

La salinidad es un problema que limita la productividad agrícola, incidiendo en el crecimiento de las plántulas y productividad (Kaya et al., 2012). Las sales de sodio en el suelo actúan como dispersantes y el suelo tiende a perder su estructura; por otro lado solubilizan la materia orgánica, aumenta el pH y favorecen el encostramiento superficial y sellado del suelo (Orsag y Flores, 2002). La salinidad de los suelos es uno de los estrés abióticos más importante que limita la producción de los cultivos, con efectos negativos en la tasa de infiltración de los suelos (Rasouli et al., 2013).

En suelos con un alto contenido de sales solubles, de sodio intercambiable, o ambos, aumenta la presión osmótica disminuyendo la disponibilidad de agua para la planta (Longo et al., 2005). La clasificación de los suelos salinos se establece con la relación entre la conductividad eléctrica y el porcentaje de sodio de intercambio (Sierra et al., 2001). Ambas características están relacionadas con los comportamientos hídricos propios del suelo.

Uno de los métodos utilizado para la corrección de suelos sódicos es el lavado de las sales con un alto volumen de agua, lo que permite la lixiviación de cationes en exceso; también se utiliza la labranza profunda y constante (Sadzawka et al., 2006), pero sin lugar a dudas el método más utilizado es la aplicación de enmiendas que contengan sulfato de calcio (yeso), dada su buena solubilidad (Delatorre, 2008; Quezada, 2008).

Este mineral actúa provocando un intercambio catiónico entre el calcio y el sodio, de tal manera que el sodio se libere a la solución de suelo y el calcio se adhiera a los coloides o partículas de arcilla. De esta forma al agregar yeso a un suelo sódico, el suelo se transformará en cálcico y el sodio formará sulfato de sodio. Luego debe efectuarse un proceso de lavado del suelo para lixiviar el sodio y las sales presentes en el suelo (Delatorre, 2008; Quezada, 2008)

En la actualidad las centrales termoeléctricas a carbón generan durante la combustión emisión de gases (CO_2 , SO_2 y NO_x), los cuales deben ser tratados para no generar contaminación (Dont-

sova et al., 2005), como lo establece la Norma Chilena Medioambiental (Decreto N° 13. 2011). El tratamiento de estos gases de combustión se realiza a través de equipos de desulfuración que produce desechos sólidos, como el yeso sintético, que es un subproducto de la combustión del carbón (Laperche and Bigham, 2002). La desulfuración puede realizarse con cal (CaO) o caliza (CaCO_3). En cualquiera de los dos casos se forma sulfito o sulfato de Ca. La mezcla se lleva a una torre lavadora donde se esparce en una fina ducha, de tal forma que el SO_2 se disuelva en pequeñas gotas (Dontsova et al., 2005; DeSutter and Cihacek, 2009). Con este método se consiguen rendimientos de 60% a 90% para carbones con un contenido de S de 0,3 a 5%, y se obtienen alrededor de 5,4 t de yeso a partir de 1 t de S contenido en el carbón (Gomis, 2013). El yeso sintético, considerado desecho por la industria energética, podría constituirse en un elemento que ayude a mitigar problemas relacionados con la salinidad de los suelos (Jeorges, 2013), que afectan a zonas áridas y semiáridas de nuestro país, provocando una disminución de la concentración de sodio en suelos salinos o sódicos, de la misma manera que lo haría el yeso mineral.

Los objetivos de la investigación fueron evaluar la aplicación de yeso sintético y mineral en un suelo Sodic Haploxerert con la finalidad de disminuir el contenido de sodio, y comparar la aplicación de yeso sintético y mineral ante distintas aplicaciones de cargas de agua en relación al desplazamiento de sodio de la matriz de suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestras y características del suelo

Las muestras de suelo fueron obtenidas de los primeros 20 cm de profundidad, de un suelo agrícola ubicado en la comuna de Lampa ($33^{\circ}20'40,65''$ S, $70^{\circ}51'57,35''$ O), Región Metropolitana, Chile. El suelo corresponde a un Sodic Haploxerert, de origen lacustre, estratificado, profundo, que presenta características vérticas en sus primeros horizontes; textura superficial arcillo limosa y de color pardo en el matiz 10YR; en profundidad la textura es franco arcillo arenosa, de color pardo amarillento oscuro en el matiz 10YR (Serie Batuco) (CIREN, 1996).

Caracterización general de clima

Esta comuna presenta un clima templado semiárido y el régimen térmico se caracteriza por temperaturas que varían en promedio entre una máxima de 28,2°C en enero y una mínima de 4,4°C en julio. Presenta un promedio de 11,67 heladas anuales, con temperaturas de -10°C a 0°C. Registra 1147 horas frío y precipitación media anual de 419 mm. Los veranos son calurosos y secos, inviernos fríos, con un régimen hídrico de 4 meses. La evapotranspiración potencial anual es de 1200 mm, y el índice de aridez es de 0,34 (Sepúlveda, 2003).

Determinación de las propiedades físicas del suelo

Para caracterizar físicamente el suelo, se determinó la textura mediante el método del hidrómetro (Gee and Bauder, 1986). La densidad aparente se obtuvo mediante el método del cilindro (Sandoval et al., 2012) y fue utilizada para calcular la dosis de yeso a utilizar.

Determinación de las propiedades químicas del suelo

Los análisis químicos se realizaron en el Laboratorio de Análisis Químico del Departamento de Suelos y Recursos Naturales de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Concepción. Se determinó pH por el método de suspensión y determinación potenciométrica, conductividad eléctrica (CE) realizada en extracto saturado, por el método de conductometría, y sodio (Na^+) en extracto saturado por el método espectrofotometría de absorción y emisión atómica con Lantano. Los bicarbonatos (BIC) fueron determinados en el extracto de saturación por el método de conductometría, los cloruros se determinaron en extracto de saturación y determinación por titulación manual con nitrato de plata, y los carbonatos en el extracto de saturación por determinación potenciométrica con ácido (Sadzawka et al., 2006).

Descripción de los ensayos

Para evaluar la disminución de la cantidad de sodio se efectuó un ensayo de laboratorio que simuló las cargas de agua de 150, 300, 450 y 600 mm. Además de las aplicaciones de dosis de yeso mineral y sintético de acuerdo con el contenido de sodio intercambiable que presenta la muestra de suelo, se utilizó la relación de desplazamiento del sodio (1 meq Ca^{2+} contenido en el yeso ($\text{Ca SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) desplaza 1 meq de Na^+) según (Delatorre, 2008; Quezada et al., 2008). El análisis químico determinó una cantidad de Na^+ igual a 1,15 meq g^{-1} ; de acuerdo a los cálculos se obtuvo una dosis de 1453 kg yeso ha^{-1} ; dado que la eficiencia del yeso es de un 75%, la dosis corregida fue de

1937,8 kg yeso ha^{-1} .

Los tratamientos definidos para el experimento fueron: T_0 = control, solo suelo + (goteo controlado de 150 mm de agua); T_1 = suelo con 1,9 t yeso natural ha^{-1} + (goteo controlado de 150 mm de agua); T_2 = suelo con 1,9 t yeso sintético ha^{-1} + (goteo controlado de 150 mm de agua). Se aplicaron cuatro cargas de agua en forma secuencial; cada carga de agua equivalentes a 150 mm (260,25 cm^3 , se considera la altura de agua aplicada 15 cm y el área del cilindro utilizado 17,35 Fig. 1). Carga de agua N° 1: 150 mm (260,25 cm^3); N° 2: 300 mm (525 cm^3); N° 3: 450 mm (780,75 cm^3); N° 4: 600 mm (1041 cm^3).

La preparación de las mezclas enmienda/suelo se realizó con suelo seco al aire y tamizado (2 mm) (Sandoval et al., 2012); una vez preparadas las mezclas enmienda/suelo se humedecieron a capacidad de campo, y se incubaron a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ por un periodo de 14 días previo a la aplicación de las cargas de agua, para establecer la relación de intercambio de Ca^{2+} y Na^+ , en relación a las aplicaciones de las distintas cargas de agua (150, 300, 450 y 600 mm). Las cargas de agua se aplicaron por goteo controlado, utilizando un dispositivo dosificador. El suelo con y sin enmiendas de yeso se ubicó en los tubos de PVC (17,35 $\text{cm}^2 \times 22$ cm), a los cuales se les instaló una malla de tela en la base, simulando un filtro, para permitir el flujo del agua y evitar la pérdida del suelo. Los tubos fueron llenados con suelo hasta los 20 cm y suspendidos con un sistema de anclaje sobre un segundo tubo de mayor diámetro para permitir el libre flujo; el lixiviado fue captado dentro del tubo de mayor diámetro el cual posee una base sellada (Sandoval et al., 2013). Este lixiviado se analizó químicamente para los analitos: pH, conductividad eléctrica (CE), relación de adsorción de sodio (RAS), cloruro, sulfatos y bicarbonatos.

Diseño y análisis experimental

El diseño experimental fue completamente al azar, con arreglo factorial de 3×4 (enmiendas \times cargas de agua). Los resultados de los lixiviados para cada uno de los parámetros evaluados y para cada tratamiento obtenido fueron sometidos a análisis de varianza (ANDEVA), y las medias se analizaron con el test DMS a un 95% de confianza (SAS Institute, 1999). Los datos fueron sometidos al supuesto de normalidad con el test de Shapiro-Wilks.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los análisis químicos realizados mostraron un alto contenido de sodio, pH ligeramente alcalino y una CE de 2,5 dS m^{-1} (Tabla 1), los cuales afectan negativamente el desarrollo normal de

las especies vegetales (Quezada et al., 2008). Los valores de Na^+ en extracto de saturación del suelo entre 5 y 30 meq L^{-1} implican problemas severos para el desarrollo de hortalizas, praderas y frutales (Sierra et al., 2001).

Ensayo de enmiendas con yeso mineral, sintético y control.

Los resultados obtenidos en los diferentes parámetros evaluados indican diferencia significativa ($P \leq 0,05$) para ion sulfato en todas las cargas de

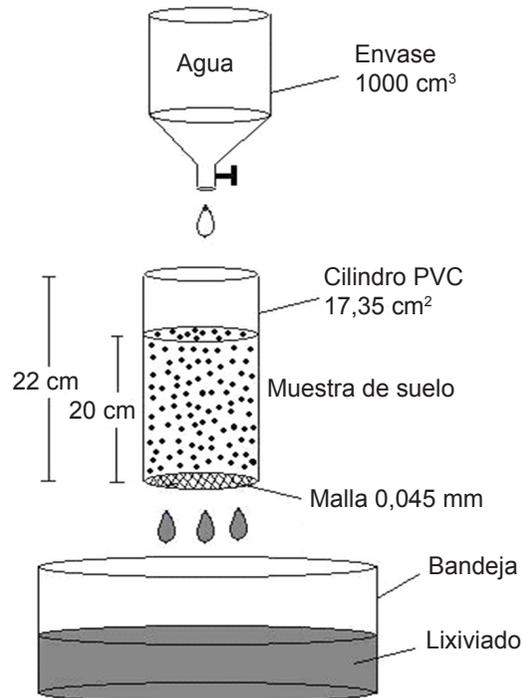


Fig.1. Diagrama del dispositivo experimental usado en laboratorio para colectar los lixiviados. Fuente: Sandoval et al., 2013.

Fig.1. Diagram of the experimental laboratory device used to collect leachate. Source: Sandoval et al., 2013.

Tabla 1. Resultados del análisis químico del extracto saturado del suelo Sodic Haploxerert (profundidad 0–20 cm).

Table 1. Results of the chemical analysis of the saturation extract of Sodic Haploxerert soil (depth 0–20 cm).

Parámetros	Resultados
pH	8,6
CE, dS m^{-1}	2,5
RAS	4,26
Ca, mg L^{-1}	366,00
Mg, mg L^{-1}	45,00
K, mg L^{-1}	35,20
Na^+ , meq L^{-1}	14,00
Cl, meq L^{-1}	9,60
SO_4 , meq L^{-1}	0,25
NaHCO_3 , meq L^{-1}	0,35

CE: conductividad eléctrica; RAS: relación de adsorción de sodio.

agua aplicadas (Tabla 2). Sin embargo, el Na^+ no presentó diferencias significativas ($P \geq 0,05$) para la aplicación de 300 mL de agua. La CE mostró diferencias significativas ($P \leq 0,05$) con aplicaciones de 150 mm de carga de agua y los bicarbonatos a los 450 mm. Los cloruros no presentaron diferencias significativas.

En relación al análisis químico realizado a los lixiviados de los distintos tratamientos (Tabla 3), y luego de aplicada la primera carga de agua (150 mL), se verificó que el pH no se modificó para ninguno de los tratamientos evaluados (T_0 , T_1 y T_2), manteniéndose un valor promedio de pH 6,9. En relación al ion sulfato (S-SO_4^{2-}) se obtuvo una diferencia de 178 veces más de extracción en los tratamientos con yeso mineral y sintético (T_1 y T_2), en comparación al tratamiento control (T_0). Los cloruros y los bicarbonatos no presentaron diferencias ($P > 0,05$) entre los tratamientos, pero la extracción de Na^+ fue significativa ($P \leq 0,05$) en los tratamientos con enmiendas de yesos (T_1 y T_2) en relación al control. Esto supone una mayor eficiencia en el desplazamiento del sodio desde la matriz del suelo y permite verificar que tanto el yeso mineral como el yeso sintético se comportaron en forma similar, lo que indica la posibilidad concreta de utilización de este residuo (yeso sintético) proveniente del proceso de mitigación de gases de las termoeléctricas (Rasouli et al.,

2013; Chi et al., 2012). Estos resultados se ratifican al observar los valores de CE de los lixiviados, que se vieron incrementados significativamente ($P \leq 0,05$) en los tratamientos con aplicaciones de yeso mineral y sintético; el aumento de la CE se debió al incremento de la concentración de sodio en los lixiviados recogidos.

Para la segunda carga de agua aplicada, los resultados no presentaron diferencias significativas ($P \geq 0,05$), en los parámetros pH, cloruros, bicarbonatos y conductibilidad eléctrica, sin embargo, el yeso sintético extrajo más del doble de SO_4^{2-} que el tratamiento con aplicación de yeso mineral (T_1), resultando la extracción de SO_4^{2-} significativamente superior ($P \leq 0,05$) que T_1 y T_0 . En relación al Na^+ , la cantidad lixiviada disminuyó considerablemente con respecto a la primera aplicación de agua (150 mm) para todos los tratamientos, sin embargo, el tratamiento control superó significativamente ($P \leq 0,05$) a los tratamientos con enmiendas de yeso sintético y mineral. Esto se puede deber a que la carga de agua previa (150 mm) extrajo gran parte del sodio intercambiable en T_1 y T_2 . La carga que suma en total la aplicación de 450 mm presentó una situación similar a la ocurrida con 300 mm de carga de agua, lo que significa que en la primera carga de agua aplicada (150 mm) los tratamientos con yeso mineral y sintético (T_1 y T_2) extrajeron la mayor cantidad de

Tabla 2. Cuadrados medios para los parámetros químicos evaluados en los lixiviados de las enmiendas aplicadas a un suelo Sodic Haploxerert.

Table 2. Mean squares for chemical parameters measured in the leachate of the amendments applied to Sodic Haploxerert soil.

Cargas de agua	FV	GL	pH	----- meq L ⁻¹ -----			Na ⁺ mg L ⁻¹	CE dS m ⁻¹
				S-SO ₄ ²⁻	Cl	BIC		
150 mm	T	2	0,10	297618,48 **	1665,43	0,15	13185,25 **	0,48 *
	Error	4	0,06	6204,60	673,77	0,12	566,58	0,04
	CV		3,42	7,30	8,73	15,44	6,32	7,33
300 mm	T	2	0,01	3387,23 **	0,24	0,50	439,72	0,02
	Error	4	0,02	8,48	0,18	0,28	72,89	0,01
	CV		1,66	7,34	22,26	16,44	15,42	29,82
450 mm	T	2	0,01	4642,26 **	0,17	0,43*	673,01 **	0,01
	Error	4	0,09	93,96	0,18	0,03	31,06	0,00
	CV		3,70	25,58	25,71	5,62	14,37	19,67
600 mm	T	2	0,06	349,53 **	0,15	0,08	162,94 *	0,00
	Error	4	0,02	7,35	0,04	0,03	9,69	0,00
	CV		1,64	12,51	15,40	9,03	16,10	12,24

FV: fuente de variación; GL: grados de libertad; BIC: bicarbonatos; T: tratamiento; CV: coeficiente de variación; *: Valor significativo ($P \leq 0,05$); **: Valor altamente significativo ($P \leq 0,01$).

Tabla 3. Características químicas de los lixiviados para los distintos tratamientos y carga de agua en un suelo Sodic Haploxerert.**Table 3. Chemical characteristics of the leachate for the different treatments and irrigation applications in a Sodic Haploxerert soil.**

Carga de agua	T	pH	S-SO ₄ ²⁻	Cl	BIC	Na ⁺	CE
			----- meq L ⁻¹ -----			mg L ⁻¹	dS m ⁻¹
150 mL	T ₀	6,79 a	7,10 b	279,61 a	2,45.a	300,50 b	2,27 b
	T ₁	7,12 a	1270,87 a	288,23 a	2,01 a	420,00 a	2,93 a
	T ₂	6,82 a	1238,99 a	324,04 a	2,22 a	410,00 a	2,99 a
	CV	3,42	7,34	8,73	15,44	6,32	7,33
	DMS	0,54	178,57	58,84	0,78	53,96	0,45
300 mL	T ₀	7,85 a	9,34 c	2,19 a	3,37 a	69,33 a	0,24 a
	T ₁	7,79 a	33,85 b	1,88 a	3,38 a	48,18 b	0,38 a
	T ₂	7,89 a	75,79 a	1,63 a	2,87 a	48,57 b	0,34 a
	CV	1,66	7,34	22,26	16,44	15,42	29,82
	DMS	0,30	6,60	0,96	1,19	19,35	0,22
450 mL	T ₀	7,99 a	3,29 a	1,80 a	3,23 a	55,83 a	0,22 a
	T ₁	8,02 a	29,72 b	1,76 a	3,57 a	32,73 b	0,32 a
	T ₂	7,92 a	80,68 c	1,37 a	2,81 a	27,77 b	0,31 a
	CV	3,70	25,58	25,71	5,62	14,37	19,67
	DMS	0,67	21,98	0,96	0,41	12,64	0,12
600 mL	T ₀	8,08 a	14,13 a	1,28 a	1,75 a	26,83 a	0,14 a
	T ₁	7,83 a	16,85 a	1,62 a	2,09 a	19,10 b	0,17 a
	T ₂	8,07 a	34,04 b	1,20 a	1,95 a	12,10 b	0,17 a
	CV	1,64	12,51	15,00	9,03	16,10	12,24
	DMS	0,30	6,15	0,48	0,40	7,06	0,04

T: tratamientos; T₀: suelo + (precipitación); T₁: suelo con 1,9 t yeso natural ha⁻¹ + (precipitación); T₂: suelo con 1,9 t yeso sintético ha⁻¹ + (precipitación); CV: coeficiente de variación; DMS: Diferencia mínima significativa. Letras distintas en la misma columna por carga de agua aplicada indican diferencias significativas (p ≤ 0,05).

Na⁺ disponible, por lo cual la cantidad de sodio acumulado en la matriz del suelo disminuyó considerablemente. Esto explicaría que en las cargas posteriores de agua aplicadas (300 y 450 mm), disminuyera drásticamente la presencia del sodio en su lixiviado en ambos tratamientos.

Para la carga de 600 mm de agua acumulada, los tratamiento evaluados no presentaron diferencias significativas (P ≥ 0,05) en relación a la CE, pH, cloruros y bicarbonatos. Sin embargo, la determinación del sodio reportó una mayor extracción (P ≤ 0,05) en el tratamiento control con respecto a los tratamientos con yesos (T₁ y T₂), lo que puede ser explicado por la menor eficiencia en la extracción con respecto a los sulfatos de calcio usados. El arrastre de SO₄²⁻ resultó significativamente (P ≤ 0,05) mayor con el uso de yeso sintético al comparar con el yeso mineral y el tratamiento control. En consecuencia el uso de

yeso mineral y sintético no mostró diferencia en la extracción del sodio y ambos fueron superiores al control. Esto probaría que en las condiciones del ensayo, el yeso mineral puede ser remplazado por yeso sintético con la finalidad de desplazar los excesos de sodio en el suelo.

Una vez finalizada la aplicación de cargas de agua, para cada tratamiento se analizó químicamente la condición final del suelo, cuyos resultados de cuadrados medios se observan en la Tabla 4. Estos valores fueron significativos (P ≤ 0,01) para todos los parámetros evaluados, exceptuando el pH y los cloruros que no presentaron cambios durante el periodo del ensayo. Esto puede deberse a que los tratamientos aplicados (T₀, T₁ y T₂) no tuvieron mayor incidencia en estos parámetros, sin embargo, el resto de elementos evaluados presentaron cambios a lo largo de todo el ensayo, demostrando que las

aplicaciones de enmiendas con yeso mineral y/o sintético modifican la composición química de los suelos (Amezqueta et al., 2005; Quezada et al., 2008), disminuyendo la concentración de los elementos evaluados.

Esto se verifica al analizar los valores de los parámetros químicos, en los análisis de los tratamientos aplicados con la muestra de suelo inicial (Tabla 5), cuyos resultados mostraron que el pH no presentó diferencia significativas ($P > 0,05$). Sin embargo, los parámetros CE, RAS, Ca, Mg, Na^+ y sulfato, presentaron diferencia significativas ($P \leq 0,05$), con una disminución de estos en el suelo al aplicar yesos y cargas de aguas al compararse con la muestra inicial de suelo, lo que pone en evidencia la efectividad del yeso en la recuperación de suelos sódicos (Rasouli et al., 2013). Sin embargo, se debe considerar que si bien el agua por sí misma al final del ensayo logra similar resultado que los tipos de yeso, son estos

últimos quienes alcanzan un desplazamiento significativo con la primera descarga de agua, lo que demuestra que la combinación agua y yeso mejora la eficiencia del proceso (Chi et al., 2012).

Además de utilizar una menor cantidad de agua, la cual es un elemento escaso en la zona de donde proviene el suelo del ensayo, también debe señalarse que en rigor una experiencia de campo debe considerar el efecto de la salinidad del agua de riego (Peinemann et al., 1998). Sin embargo, este estudio está orientado a incorporar el yeso sintético al suelo y aprovechar las aguas que son aportadas por precipitación. Es importante señalar que el yeso mineral probablemente incrementó significativamente ($P \leq 0,05$) la concentración de cloruros con respecto al suelo inicial, esto puede deberse a las impurezas que trae el yeso mineral dependiendo de las características del yacimiento. Esto no ocurrió con el yeso sintético.

En relación a los sulfatos se encontró que existió

Tabla 4. Cuadrados medios para los parámetros evaluados después de aplicadas todas las cargas de agua a un suelo Sodic Haploxerert.

Table 4. Square means of the parameters evaluated after all the irrigation applications used in a Sodic Haploxerert soil.

FV	pH	CE	RAS	Ca	Mg	Na^+	Cl	S-SO_4^{2-}	BIC
		dS m^{-1}		mg L^{-1}				meq L^{-1}	
T	0,01	4,31**	8,69**	168,56**	38,75**	143,54**	6,02	3657,17**	13,51**
E	0,01	0,02	0,01	0,40	0,43	0,02	2,05	162,94	0,24
CV	1,38	15,00	6,46	10,04	20,40	3,05	9,89	39,74	10,26

FV: fuente de variación; CE: conductividad eléctrica; RAS: relación de absorción de sodio; BIC: bicarbonatos; T: tratamiento; E: Error; CV: coeficiente de variación; *: Valor significativo ($P \leq 0,05$); **: Valor altamente significativo ($P \leq 0,01$).

Tabla 5. Comparación química de la muestra de suelo inicial y los distintos tratamientos después de aplicada la última carga de agua, para cada uno de los parámetros evaluados en un suelo Sodic Haploxerert.

Table 5. Chemical comparison of the initial soil sample and the different treatments after the last irrigation application for each of the parameters evaluated in a Sodic Haploxerert soil.

T	pH	CE	RAS	Ca	Mg	Na^+	Cl	S-SO_4^{2-}
		dS m^{-1}		mg L^{-1}				meq L^{-1}
M inicial	8,20 a	2,78 a	4,00 a	17,50 a	8,53 a	14,70 a	13,50 ab	14,30 a
T_0 final	8,30 a	0,27 b	0,75 b	1,87 b	0,95 b	0,90 b	13,23 b	11,16 a
T_1 final	8,18 a	0,34 b	0,6 bc	2,72 b	1,15 b	0,84 b	16,31 a	18,74 a
T_2 final	8,15 a	0,57 b	0,44 c	3,02 b	2,15 b	0,81 b	14,89 ab	84,29 b
CV	1,38	15,09	6,46	10,04	20,41	3,05	9,89	39,74
DMS	0,23	0,30	0,19	1,26	1,30	0,26	2,86	25,50

T: Tratamientos; M inicial: muestra de suelo de Lampa; T_0 final: suelo + (600 mm); T_1 final: suelo con 1,9 t yeso natural ha^{-1} + (600 mm); T_2 final: suelo con 1,9 t yeso sintético ha^{-1} + (600 mm); CV: coeficiente de variación; DMS: Diferencia mínima significativa. Letras distintas en la misma columna por carga de agua aplicada indican diferencias significativas ($P \leq 0,05$).

un incremento significativo ($P \leq 0,05$) en favor del tratamiento con yeso sintético, al comparar con los otros tratamientos; este resultado puede ser consecuencia del mayor aporte de sulfato que hace el yeso sintético, cuya disponibilidad depende de la pureza. Según Jeorges (2013) esto se debería que el yeso sintético presenta una granulometría más homogénea que el yeso mineral, no obstante que el yeso mineral presenta una granulometría fina, pero tiene más de un 60% retenido en tamiz de 2 mm en comparación al yeso sintético, lo que significa un tamaño de partícula mayor para el yeso mineral. Además el análisis de microscopía electrónica, para un aumento de 150 y 20 μm , ratifica una irregularidad de partículas para el yeso mineral y uniformidad en el yeso sintético.

CONCLUSIONES

El uso de yeso sintético no mostró diferencias significativas respecto al yeso mineral en relación a la extracción del sodio, siendo ambos superiores al control. Los mejores resultados en la extracción de sodio se obtuvieron después de aplicar la primera carga de agua (150 mm), esto prueba que dadas las condiciones del ensayo, el yeso mineral puede ser remplazado por yeso sintético. En relación al gasto de agua, los mejores resultados con relación a la eliminación del sodio desde la matriz del suelo se obtuvieron con las aplicaciones de yeso sintético (FDG) y la menor altura de agua aplicada, esto significa un ahorro de agua en las propuestas de remediación de suelo.

LITERATURA CITADA

- Amezketeta, E., R. Aragüés, and R. Gazol. 2005. Efficiency of sulfuric acid, mined gypsum, and two gypsum by-products in soil crusting prevention and sodic soil reclamation. *Agron. J.* 97(3):983-989.
- Chi, C.M., C.W. Zhao, X.J. Sun, and Z.C. Wang. 2012. Reclamation of saline-sodic soil properties and improvement of rice (*Oriza sativa* L.) growth and yield using desulfurized gypsum in the west of Songnen Plain, northeast China. *Geoderma* 187-188:24-30.
- CIREN. 1996. Descripciones de suelo, materiales y símbolos. Estudio agrológico Región Metropolitana. Publicación CIREN N° 115. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), Santiago, Chile.
- Decreto N° 13. 2011. Establece norma de emisión para centrales termoeléctricas. 23 junio 2011. Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile.
- Delatorre, J. 2008. El manejo de la fertilidad en suelos de zonas áridas. p. 31-46. En C. Quezada, M. Sandoval y E. Zagal (eds.). Manejo de suelos en zonas áridas. Publicaciones del Departamento de Suelos y Recursos Naturales N° 3. Universidad de Concepción, Chillán, Chile.
- DeSutter, T.M., and L.J. Cihacek. 2009. Potential agricultural uses of flue gas desulfurization gypsum in the Northern Great Plains. *Agron. J.* 101(4):817-825.
- Dontsova, K., Y.B. Lee, B.K. Slater, and J.M. Bigham. 2005. Gypsum for agricultural use in Ohio sources and quality of available products [on line]. The Ohio State University, USA. Available at <<http://ohioline.osu.edu/anr-fact/0020.html>> [Accessed 18 August 2013].
- Gee, G.W., and J.W. Bauder. 1986. Particle-size analysis. p. 383-411. In A. Klute (ed.). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods.* (2nd. ed.). American Society Agronomy. Soil Society of America, Madison, Wisconsin, USA.
- Gomis, V. 2013. El yeso como materia prima [en línea]. Universitat d'Alicante, España. Disponible en <<http://iq.ua.es/Yeso/>> [Consulta 20 noviembre 2013].
- Jeorges, L.A. 2013. Potencial del yeso sintético como enmienda y fertilizante en suelo agrícola. Tesis Magíster en Ciencias Agronómicas, con mención en Suelos. Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, Chillán, Chile.
- Kaya, M.D., S. Day, Y. Cikili, and N. Arslan. 2012. Classification of some linseed (*Linum usitatissimum* L.) genotypes for salinity tolerance using germination, seedling growth, and ion content. *Chilean J. Agric. Res.* 72(1):27-32.
- Laperche, V., and J.M. Bigham. 2002. Quantitative, chemical and mineralogical characterization of flue gas desulfurization by-products. *J. Environ. Qual.* 31(3):979-988.
- Longo, A., J. Ferratto, M.C. Mondino, y R. Grasso. 2005. Incorporación de azufre y yeso en suelo salino-sódico: su efecto sobre el rendimiento y calidad de lechuga bajo invernadero. *FAVE Secc. Cienc. Agrar.* 4(1-2):31-36.
- Orsag, V., y M. Flores. 2002. Principios del origen, formación y clasificación de los suelos salinos y sódicos. p. 59-61. En D. Hervé, R. Ledezma y V. Orsag (eds.). *Limitantes y manejos de los suelos salinos y/o sódicos en el altiplano boliviano.* Institut de Recherche pour le Développement, La Paz, Bolivia.
- Peinemann, N., M. Diaz-Zorita, M.B. Villamil, H. Lusarreta, y D. Grunewald. 1998. Consecuencias del riego complementario sobre propiedades edáficas en la llanura pampeana

- na. *Cienc. Suelo (Argentina)* 16(1):39-42.
- Quezada, C. 2008. Estrategias para el manejo de suelos salinos. p. 77-90. En C. Quezada, M. Sandoval y E. Zagal (eds.). *Manejo de suelos en zonas áridas*. Publicaciones del Departamento de Suelos y Recursos Naturales N° 3. Universidad de Concepción, Chillán, Chile.
- Rasouli, F., A. Kiani Pouya, and N. Karimian. 2013. Wheat yield and physico-chemical properties of a sodic soil from semi-arid area of Iran as affected by applied gypsum. *Geoderma* 193-194:246-255.
- Sadzawka, A., M.A. Carrasco, R. Grez, M.L. Mora, H. Flores, y A. Neaman. 2006. *Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile*. Serie Actas N° 34. INIA La Platina, Santiago, Chile.
- Sandoval, M., J. Dörner, O. Seguel, J. Cuevas, y D. Rivera. 2012. *Métodos de análisis físicos de suelos*. Publicaciones del Departamento de Suelos y Recursos Naturales N° 5. Universidad de Concepción, Chillán, Chile.
- Sandoval, M., J. Celis, L. Pedreros, and J. Capulín. 2013. Chemical remediation of an agricultural soil: a case study of the tsunami-affected area of Chile. *Water, Air, and Soil Pollut.* 224(6):1590 [on line].
- SAS Institute. 1999. *The SAS system for Windows* [cd-rom]. Ver. 8. Cary, North Caroline, USA.
- Sepúlveda, O. 2003. Sectorización climático-habitacional de las regiones de Valparaíso y Metropolitana. *Boletín INVI* 18(46):35-39.
- Sierra, C., R. Céspedes, y A. Osorio. 2001. Caracterización de la salinidad de los suelos y aguas del valle del Río Copiapó. *Boletín INIA* N° 70. INIA Intihuasi, Copiapó, Chile.