

Aplicación de yeso agrícola y enmiendas orgánicas para la remediación de suelos salino-sódicos

Ivan Quispe Zenteno ¹; Edgar Gutiérrez Rodríguez ¹; Demis Andrade Foronda ²

¹ Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias - Universidad Mayor de San Simón
² Doctorante AI/ARES-UMSS

E mail: ivanqzenteno@gmail.com

Resumen. El objetivo de la investigación fue evaluar el efecto de la aplicación de yeso agrícola (Y), estiércol de bovino (EB) y gallinaza (GA) sobre las propiedades químicas (pH, conductividad eléctrica - CE, y porcentaje de sodio intercambiable - PSI) de un suelo salino-sódico; además de validar la remediación a través de un cultivo indicador. El estudio se llevó a cabo en la localidad de Santa Ana – Punata, Valle Alto de Cochabamba, a través de una parcela experimental en diseño BCA. Los tratamientos fueron: Control, EB, GA, EB+Y, GA+Y, Y, empleando la dosis de 1% (26 t/ha) para EB y GA, y 16 t/ha para yeso. El yeso solo y la gallinaza + yeso fueron más efectivos para reducir el pH; las enmiendas no fueron efectivas para reducir la CE; todos los tratamientos con enmiendas fueron igual de efectivos para reducir el PSI, y a su vez mejores que el control. Las enmiendas incrementaron los bicarbonatos y cloruros, y disminuyeron los sulfatos; con respecto al testigo. Según la validación con el cultivo indicador, los tratamientos con estiércol bovino fueron mejores para el desarrollo del cultivo; la gallinaza fue más efectiva en biomasa. Acorde con los resultados de remediación y el costo de las enmiendas, el yeso puede ser el tratamiento más recomendable.

Palabras clave: Degradación y remediación de suelos; Salinidad; Sodicidad; Estiércol bovino; Gallinaza

Summary: Application of agricultural gypsum and organic amendments for the remediation of saline-sodic soil. The objective of the research was to evaluate the effect of adding agricultural gypsum (AG), bovine manure (BM) and poultry manure (PM), on the chemical properties (pH, electrical conductivity - EC, and sodium exchangeable percentage – ESP) of a saline-sodic soil; in addition to validate the remediation through an indicator crop. The study was carried out in the locality of Santa Ana - Punata, High Valley of Cochabamba, through an experimental plot in CDR design. The treatments were: Control, BM, PM, BM+AG, PM+AG, AG, using the dose of 1% (26 t/ha) for BM and PM, and 16 t/ha for gypsum. Gypsum alone and poultry manure + gypsum were more effective to reduce the pH. The amendments were not effective to reduce the EC; all amendments treatments were equally effective in reducing ESP, and in turn better than the control. The amendments increased bicarbonates and chlorides, and decreased sulfates; with respect to the control. According to the validation through the indicator crop, the treatments with bovine manure were better for the development of the crop; the poultry manure was more effective in biomass. In accordance with the results of remediation and the cost of amendments, gypsum may be the most recommended treatment.

Keywords: Soil degradation and remediation; Salinity; Sodicity; Bovine manure; Chicken manure

Introducción

El suelo es un recurso natural indispensable para el crecimiento de las plantas, es también el mayor depósito de materiales contaminantes del planeta, proveniente de las diferentes actividades antrópicas, que necesita ser preservado y mejorado para lograr calidad y capacidad productiva agropecuaria, para ello se deben aplicar prácticas sostenibles que permitan la remediación de suelos degradados por un mal manejo, por ejemplo, la salinización (acumulación de sales perjudiciales en el suelo).

En las zonas áridas y semiáridas del Valle Alto y Valle Bajo de Cochabamba, y del Altiplano, las sales se acumulan con más frecuencia a causa de la aplicación del riego con agua salina, esto hace que el agua se evapore en la parte superficial del suelo, dejando las sales. La presente investigación esta propuesta para resolver esta problemática. En ese contexto, se plantea la siguiente pregunta de investigación: *¿El incremento de sales en el suelo degrada la capacidad productiva de este recurso natural?*

Richards (1984), remarca que las aguas cargadas de sales son procedentes de la meteorización de los minerales, de tal manera las sales se acumulan en los horizontes, esto ocasiona mantos freáticos salinos y en la superficie del suelo se puede observar charcos de agua, lagunas, etc.; esto debido a la deficiencia de drenaje natural, la intemperización de los suelos y a los factores climáticos (lluvia y temperatura), por lo tanto, la estructura del suelo es inestable porque el contenido de materia orgánica es pobre, debido a esto no son aptos para el uso general de la agricultura por que las sales ocasionan serios problemas, como la degradación

de suelos, el bajo rendimiento de cultivos, escasos de alimentos, etc.

Para amortiguar el problema del sodio en el suelo, es necesario realizar aplicaciones de mejoradores agrícolas que reemplacen el sodio en el complejo de intercambio por otro catión, por ejemplo las sales solubles como el sulfato de calcio. El yeso agrícola ($\text{Ca}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), ha demostrado ser un adecuado mejorador para suelos salino-sódicos y sus efectos son entre otros: la mejora en general de la estructura del suelo, participa en el proceso de floculación de las arcillas, baja el pH del suelo, además de mejorar la disponibilidad de nutrimentos esenciales para la planta (Núñez 2000).

También el uso de enmiendas orgánicas es factible para la corrección de los suelos salinos-sódicos, a través de la mejora de sus propiedades físicas. La descomposición de la materia orgánica permite la formación de humus, el cual que siendo un coloide orgánico, permite una buena estructura del suelo, además de producir ácidos húmicos y fúlvicos que solubilizan las sales.

El objetivo general de la presente investigación fue evaluar el efecto de la aplicación de yeso agrícola y enmiendas orgánicas (gallinaza y estiércol bovino), sobre las propiedades químicas (pH, CE, PSI y aniones) de un suelo salino-sódico en la localidad de Santa Ana (Punata, Cochabamba); además de identificar la enmienda individual y/o combinación de enmiendas más efectiva, para remediar el suelo.

El efecto de las enmiendas fue evaluado mediante análisis de los suelos, y a través de la biomasa de un cultivo indicador (en este caso triticale), sembrado posteriormente a la aplicación de las enmiendas.

Materiales y métodos

Ubicación de la zona del estudio

El trabajo de investigación se llevó a cabo en la localidad de Santa Ana, provincia Punata, en la región del Valle Alto de Cochabamba, a 50 km al Sudoeste de la ciudad. Geográficamente el lugar está localizado a 17°32'49" de latitud Sur y 65°50'12" de longitud Oeste, a una altitud de 2750 msnm.

Suelo

El suelo franco-limoso de la parcela experimental, al inicio del ensayo, presentó un pH de 8.53, CE de 13.1 dS/m, PSI de 80.2% y 1.88% de materia orgánica.

Enmiendas orgánicas

El estiércol bovino se obtuvo del establo de la FCAyP-UMSS y la gallinaza de la granja Avícola Rolón (de Tiquipaya, en Cochabamba). El yeso agrícola ($\text{Ca}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), se obtuvo de la empresa CALCO, ubicada en Sipe Sipe (Cochabamba).

Cultivo indicador

La semilla de triticale (*X. Triticosecale* Wittmack) variedad "Renacer", fue adquirida de la empresa Semillas Forrajeras SEFO-SAM, siendo semilla certificada con 85% de germinación.

Tratamientos evaluados

Y	Yeso agrícola
EB	Estiércol bovino
GA	Gallinaza
EB + Y	Yeso + Estiércol bovino
GA + Y	Yeso + Gallinaza
CO	Testigo: no se aplicó enmienda alguna

Metodología y procedimiento experimental

Identificación de la parcela experimental. Se identificó la parcela en base a los signos de salinización y la degradación con afloramiento de sales. Se realizaron los respectivos muestreos y análisis para verificar su condición de suelo salino-sódico, en el Laboratorio de Suelos y Aguas de la FCAyP-UMSS.

Preparación del terreno. Se preparó aprovechando la humedad del suelo, con el empleo de un tractor se realizó el arado y rastreado a una profundidad de 25 cm. Posteriormente se realizó el rotabateado y nivelado respectivo. En el ensayo, se realizaron drenajes para el arrastre de sales. Antes de la siembra, se removió el suelo de forma manual, a 10 a 15 cm de profundidad, empleando pala, picota y rastrillo para dejar el suelo suelto, con el fin de tener una buena germinación.

Trazado de bloques y unidades experimentales. La parcela se dividió en cuatro bloques en sentido perpendicular a la pendiente, para controlar la variabilidad, posteriormente, se sub dividieron en 24 sub parcelas de 2 m * 5 m, cada una, con sus respectivas calles (tipo camellones planos) con separación de 0.5 m. Se sembró en 4 surcos con 0.40 m de separación, y 5 m de largo, en cada sub parcela.

Dosificación y aplicación de enmiendas¹

Enmienda orgánica estiércol de bovino y gallinaza. Se calculó a una dosis de 1% (26 t/ha), equivalente a 26 kg por parcela de 10 m² (sub parcela).

¹ Al final del artículo se detallan las fórmulas utilizadas para estas estimaciones.

Enmienda química yeso agrícola. Se calculó a una dosis al 100% del requerimiento (16 t/ha), equivalente a 16 kg por parcela de 10 m² (sub parcela).

Las enmiendas se aplicaron de forma manual, al voleo, a una profundidad de 20 cm. Posteriormente se removió el terreno cada siete días, manualmente con picota, y se controló la humedad del suelo para activar la reacción química.

Saturación e incubación

Para la saturación se aprovecharon las lluvias de la época y se realizó controles de humedad del suelo, cada siete días, con un equipo portátil, definiéndose un 25% de humedad mínima, como requerimiento para diluir el yeso y así lograr el transporte de sales y desplazamiento del sodio. La incubación de las enmiendas duró dos meses (marzo y abril de 2019), para efectos de reacción con el suelo salino-sódico. Al cabo de estos dos meses, se realizó un muestreo con un barrenador, a una profundidad de 20 cm, para cada tratamiento. Las muestras se analizaron en el Laboratorio de Suelos y Aguas de la FCAyP-UMSS.

Siembra y evaluación del cultivo indicador (triticale)

La siembra del triticale (*X. Triticosecale* W.) se realizó en mayo de 2019. Se sembró, en surcos separados a 0.40 m, a una densidad de 125 kg/ha.

Se tomaron datos de cuatro metros lineales de los dos surcos centrales, en cada sub parcela, descartando los surcos externos por el efecto de bordura, tomando al azar cinco plantas de cada surco.

Además del manejo agronómico del ensayo (deshierbe, riego, tratamientos fito-

sanitarios), semanalmente se registró diferentes parámetros en el cultivo indicador, a manera de variables de respuesta para validar el efecto.

Variables de respuesta

Propiedades químicas del suelo. Los parámetros determinados en laboratorio, como respuesta al efecto de las enmiendas en el suelo, fueron:

- Reacción del suelo (pH).
- Conductividad eléctrica (CE).
- Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI).
- Aniones: Carbonatos (CO₃⁻), Bicarbonatos (HCO₃), Cloruros (Cl⁻) y Sulfatos (SO₄⁻).
- Cationes: Na⁺, Ca₂⁺, Mg₂⁺, K⁺ (estas variables fueron secundarias ya que sirvieron para calcular la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) y a partir de ésta, el PSI).

Propiedades biológicas del cultivo indicador. Se evaluaron las siguientes variables fenológicas y agronómicas:

- Germinación.
- Altura de planta.
- Diámetro de tallo.
- Longitud de espiga.
- Porcentaje de materia seca.

Evaluación estadística

Para la evaluación estadística de las variables de respuesta, el ensayo se estableció bajo un diseño de *Bloques Completos al Azar*; se empleó el análisis de varianza (ANVA) mediante la *Prueba de Fisher*; las medias se compararon con la *Prueba de Tukey* al 95% de probabilidad. Se utilizó el programa Minitab v. 18.1[®].

Resultados y discusión

Se obtuvo el ANVA para las principales variables de respuesta (pH, CE, PSI y % de materia seca en el cultivo indicador), con el fin de evaluar el efecto que tuvieron las enmiendas orgánicas y química, sobre el suelo, y la respuesta del cultivo indicador (*X. Triticosecale* W.).

El ANVA mostró diferencias significativas entre los tratamientos para el caso del pH y el PSI, no así para la CE. El cultivo indicador, también mostró diferencias significativas ($P < 0.05$) para los tratamientos, en el parámetro % de materia seca. Para los demás parámetros químicos del suelo (aniones) y variables agronómicas en el cultivo indicador, solo se realizaron comparaciones numéricas, siendo información referencial y complementaria para la investigación.

VARIABLES QUÍMICAS EN EL SUELO

Reacción del suelo (pH). El efecto de la aplicación de yeso agrícola (pH de 7.28) fue similar a la gallinaza + yeso (pH 7.58), representando una reducción de 14% y 11%, respectivamente, en relación al tratamiento testigo (Cuadro 1).

Raj (2016), menciona que el efecto de las enmiendas sobre el pH del suelo es variado, dependiendo principalmente del material utilizado como enmienda y de su composición química.

Cuando se aplica yeso agrícola ($\text{Ca}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en suelos salinos-sódicos, el Ca^{++} se disuelve reemplazando al Na^+ intercambiable, consecuentemente se elimina el exceso de sales y se reduce el pH.

Conductividad Eléctrica (CE) del suelo. El efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas y yeso, no difiere entre tratamientos, para la Conductividad Eléctrica (CE) del suelo (Cuadro 1).

Al margen del tratamiento con yeso agrícola (9.92 dS/m), los demás tratamientos incrementaron la CE con respecto al testigo (14.38 dS/m), posiblemente debido a la concentración de sales (cloruros) en las enmiendas orgánicas; el yeso redujo este parámetro por su contenido de sulfato de calcio. Al respecto Zúñiga *et al.* (2011), mencionan que la aplicación de yeso aumenta la permeabilidad de los suelos, floculando las partículas de arcilla, incrementando el % de poros medianos, y disminuyendo los microporos.

Porcentaje de Sodio intercambiable (PSI) del suelo. El efecto sobre el PSI generó diferencias significativas de todos los tratamientos (22.5% - 38.3%) por igual, en relación al testigo (Cuadro 1); no obstante, las reducciones implicaron una marcada disminución con respecto al control (89.11%) y al suelo inicial (80.2%).

Saifullah y Ravi (2018), indican que la enmienda orgánica puede disminuir el PSI directamente, a través de su contenido de Ca^{++} intercambiable, que reemplaza al Na^+ en los coloides del suelo.

Cuadro 1. Valores promedio para tres variables químicas del suelo como efecto de la aplicación de enmiendas para la remediación del suelo salino-sódico

Tratamientos	Reacción del suelo (pH)		Conductividad eléctrica (dS/m)		PSI	
	Promedio	DS	Promedio	DS	Promedio	DS
Testigo	8.49 a	0.35	14.38 a	2.54	89.11 a	2.19
Estiércol bovino	8.10 ab	0.48	17.20 a	10.32	30.80 b	23.44
Gallinaza	7.73 ab	0.40	26.48 a	16.13	33.90 b	25.25
Estiércol bovino + yeso	7.86 ab	0.43	29.88 a	6.43	38.31 b	14.06
Gallinaza + yeso	7.58 b	0.37	16.77 a	10.77	26.66 b	13.19
Yeso agrícola	7.28 b	0.25	9.92 a	5.12	22.48 b	17.68

Valores con letras distintas, dentro de cada columna, difieren estadísticamente según la Prueba de Tukey ($P < 0.05$). Confianza de 95%. DS: Desviación estándar.

Aniones del suelo

Bicarbonatos (HCO_3^-). El tratamiento sin enmiendas (testigo) presentó una concentración de 5.3 meq/l, siendo menor a los demás tratamientos (Cuadro 2); esto pudo deberse a que los bicarbonatos tienen una solubilidad elevada, dependiendo de la humedad, al igual que los carbonatos, y son responsables de los valores altos de PSI en el suelo. Por tanto, la presencia de HCO_3^- en el suelo, en cantidades relativamente elevadas, implica condiciones de alcalinidad con pH mayores a 9, debido a la formación de OH^- . El HCO_3^- al combinarse con el H^+ cambiante, forma el H_2CO_3 que neutraliza la alcalinidad. Rodrigues *et al.* (2008), señalan que los bicarbonatos causantes de la alcalinidad, se combinan con el Ca^{++} que contienen las enmiendas, formando así compuestos de baja solubilidad y ayudando a la reducción del pH.

Cloruros (Cl). El tratamiento sin enmiendas presentó 5.2 meq/l, y fue menor a los demás tratamientos que presentaron concentraciones de 55.0 a 148.8 meq/l (Cuadro 2); esta variación se debe probablemente a que las enmiendas orgánicas contienen alta concentración de cloruros, y que estos intercambian con los sulfatos, incrementándose en la solución edáfica. Kovda (1973), señala que los cloruros, junto con los sulfatos, son los compuestos responsables de la formación de suelos salinos.

Sulfatos (SO_4^{--}). El tratamiento sin enmiendas con 1232.3 meq/l, fue mayor en relación a los demás tratamientos, que presentaron concentraciones de 77.4 a 191.6 meq/l (Cuadro 2), esto se debe al intercambio de Ca^{++} por Na^+ , formando Na_2SO_4 , que es lixiviado; además, al descomponerse la materia orgánica, forma ácidos húmicos y fúlvicos, que neutralizan las sales del suelo. Opazo (1982), afirma que las cantidades de sulfatos solubles en los suelos, varían tanto con el tipo de suelos y según el perfil.

Cuadro 2. Valores promedio referenciales de aniones del suelo, como efecto de la aplicación de enmiendas para la remediación del suelo salino-sódico

Tratamientos	Carbonatos	Bicarbonatos	Cloruros	Sulfatos
	--- meq/l ---			
Testigo	0.0	5.3	5.2	1232.3
Estiércol bovino	0.0	13.6	55.7	114.2
Gallinaza	0.0	13.6	66.8	191.6
Estiércol bovino + yeso	0.0	17.4	148.8	98.6
Gallinaza + yeso	0.0	11.8	63.8	113.2
Yeso agrícola	0.0	12.9	55.0	77.4

VARIABLES FENOLÓGICAS Y AGRONÓMICAS DEL CULTIVO INDICADOR

El Cuadro 3 presenta los resultados promedio para cinco variables de respuesta, cuatro de ellas se determinaron de manera referencial, el ANVA y la prueba de Tukey se aplicó solamente para la variable % de materia seca del cultivo indicador.

Porcentaje de germinación. Existe una respuesta superior para los tratamientos estiércol bovino (83%) y yeso agrícola (80%), respecto al tratamiento sin enmiendas (testigo) que solo alcanzó 34% (Cuadro 3). Bradford (1995), menciona que la concentración de sales influye sobre la inhibición del agua, afectando la germinación de la semilla. Así mismo la disminución del potencial hídrico en la solución del suelo, provoca una demora progresiva en la germinación, el incremento en la variación de los tiempos de germinación entre semillas y la variación de la emergencia final de las semillas.

Altura de planta. Los tratamientos estiércol bovino más yeso agrícola (112 cm) y solo estiércol bovino (110 cm), tuvieron valores superiores en altura de planta, superando ampliamente al trata-

miento testigo (sin enmiendas) que solo alcanzó una altura de 75.0 cm (Cuadro 3). Robles (1990), señala que la altura de planta es un indicador de la producción de forraje, la misma se ha utilizado para especies forrajeras perennes y anuales para evaluar su producción.

Diámetro de tallo. Para esta variable, con los tratamientos estiércol bovino más yeso agrícola (5.5 mm) y solo estiércol bovino (5.25 mm), se tuvo una mayor respuesta, superando al testigo que solo llegó a 4.0 mm de diámetro (Cuadro 3).

Longitud de espiga. Los tratamientos con estiércol bovino (solo y con yeso agrícola), ambos con 13.75 cm, sobrepasaron al tratamiento testigo de 10 cm (Cuadro 3).

Materia seca en el cultivo indicador. El cultivo indicador (*X. Triticosecale* W.) con el tratamiento gallinaza obtuvo 75.85% de materia seca, siendo mejor en relación al resto de tratamientos, y estos a su vez mejores que el testigo (55.62%). Clark (2007), afirma que el mayor contenido de materia seca, se debe a la aplicación de enmiendas orgánicas, materiales ricos en Ca^{++} , en concentraciones que facilitan un desplazamiento considerable del sodio.

Cuadro 3. Valores promedio para cinco variables agronómicas en el cultivo indicador (triticale) como efecto de la aplicación de tratamientos de enmiendas para la remediación del suelo salino-sódico

Tratamientos	Germi-nación (%)	Altura de planta (cm)	Diámetro de tallo (mm)	Longitud de espiga (cm)	Materia seca (%)
Testigo	34	75	4.00	10.00	55.62 b (DS: 2.3)
Estiércol bovino	83	110	5.25	13.75	67.88 ab (DS: 2.7)
Gallinaza	60	76	5.00	11.50	75.85 a (DS: 10.2)
Estiércol bovino + yeso	73	112	5.50	13.75	66.69 ab (DS: 3.1)
Gallinaza + yeso	58	85	5.00	12.00	62.21 ab (DS: 8.2)
Yeso agrícola	80	80	4.63	11.75	68.06 ab (DS: 8.1)

Valores con letras distintas, para la última columna, difieren estadísticamente según la Prueba de Tukey ($P < 0.05$). Confianza 95%. DS: Desviación estándar.

COSTO DE LAS ENMIENDAS

A mayo de 2019, se tenían los siguientes costos comerciales promedio de las enmiendas evaluadas:

Yeso agrícola (Y):	16.000 Bs/ha
Estiércol bovino (EB):	20.800 Bs/ha
Gallinaza (GA):	22.100 Bs/ha
EB + Y:	36.800 Bs/ha
GA + Y:	38.100 Bs/ha

En función a los costos de las enmiendas y en concordancia con los resultados de la remediación, el tratamiento con yeso es el menos costoso. Las enmiendas combinadas son más efectivas, pero más costosas.

Conclusiones

- El yeso solo y la gallinaza + yeso fueron más efectivos para reducir el pH; las enmiendas no fueron efectivas

para la reducción de la CE; en cuanto al PSI, todos los tratamientos con enmiendas fueron efectivos en igual magnitud, y a su vez mejores que el control, para reducir dicho parámetro.

- En general, las enmiendas orgánicas y yeso agrícola, incrementaron los bicarbonatos y cloruros, y disminuyeron los sulfatos; con respecto al testigo.
- En la validación de la remediación del suelo a través del cultivo indicador, obtuvieron mejor resultado los tratamientos con estiércol bovino para el crecimiento del cultivo; para la biomasa, el tratamiento con gallinaza fue más efectivo reportando 75.8% de materia seca.
- Según los resultados de la remediación en el suelo y el costo de las enmiendas, se presume que el yeso agrícola solo, es el tratamiento más reco-

mendable, invirtiendo un monto de 16.000 Bs/ha. El bajo costo de la aplicación de yeso agrícola es relevante, ya que es una opción técnica importante y de gran interés para los agricultores de las zonas áridas con suelos salino-sódicos, en condiciones de campo.

Referencias citadas

- Bradford K. 1995. Water relations in seed germination. **In:** Jaime Kigel y Gad Gallili (ed.). *Seed Development and Germination*. Editorial Marcel Dekker, Inc. New York, USA. p. 351-396.
- Clark G. 2007. Changes in chemical and biological properties of a sodic clay sub soil with addition of organic amendments. *Soil Biology and Biochemistry*. 39(11): 2806-2817.
- Guerrero A. 1999. Cultivos herbáceos extensivos. Mundi-Prensa. Madrid. España. p. 317-322.
- Kovda V. 1973. Quality of irrigation water. **In:** *Irrigation, drainage and salinity. An international source book*. Chapter 7. FAO/UNESCO. Hutchinson. p. 177-205.
- Núñez J. 2000. Fundamentos de edafología. Tercera reimpresión de la segunda edición. Costa Rica, EUNED. 188 p.
- Opazo J. 1982. Disponibilidad de azufre en suelos de la región, Los Lagos. Tesis Magister Scientiae. Santiago, Pontificia Univ. Católica de Chile. Facultad de Agronomía. 139 p.
- Raj G., da Silva D., de Laceda F. 2016. Manejo da salinidade na agricultura: Estudos basicos y aplicados (2da. ed.). Fortaleza, Brasil.
- Richards L. 1984. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. 4 ed. Ed. Limusa. México. 270 p.
- Robles R. 1990. Producción de granos y forrajes. 5ta. edición. Ed. Limusa. México. p. 257-315.
- Rodrigues S., Oliveira R., Heck L., Rodrigues S. 2008. Gypsum-saturated water to reclaim alluvial saline sodic and sodic soils. *Scientia Agricola*, 65: 69-76.
- Saifullah S., Ravi. 2018. La aplicación del biochar para la remediación de suelos afectados por sales: desafíos y oportunidades. *Dammam - Arabia Saudita. Science of the total environment*. Vol. 625: 320-335.
- Zúñiga O., Osorio J., Cuero R., Peña J. 2011. Evaluación de tecnologías para la recuperación de suelos degradados por salinidad. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín* vol. 64, nro. 1. Medellín, Junio 2011. Colombia. *En línea*. Disponible en: www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v64n1/a03v64n01.pdf Consultado en junio de 2020.

Agradecimiento

Al Programa AI ARES Bélgica - UMSS, a CISTEL, al Laboratorio de Suelos (FCyP-UMSS) y a la empresa "Avícola Rolón"

INFORMACIÓN ADICIONAL SOBRE FÓRMULAS EMPLEADAS EN EL TRABAJO

Relación de adsorción de sodio (RAS):

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{1}{2}(Ca^{2+} + Mg^{2+})}}$$

La concentración de Na⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺ expresada en mili equivalentes por litro (meq l⁻¹) y la RAS expresada en mili moles por litro elevado a 0.5 (mmoles l⁻¹)^{0.5}.

Porcentaje de sodio intercambiable (PSI):

$$PSI = \frac{[100(-0.0126 + 0.01475 * RAS)]}{[1+(-0.0126 + 0.01475 * RAS)]}$$

Fuente: Shahid S., Zaman M., Heng L. 2018. Introduction to Soil Salinity, Sodicty and Diagnostics Techniques. **In:** Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques. Springer, Cham.

En línea. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3_1

Consultado el 31 de julio de 2020.

Estimaciones de cantidades de enmiendas orgánicas (estiércol bovino y gallinaza):

Las dosis de las enmiendas orgánicas se calcularon en base al peso del suelo y el contenido de materia orgánica del suelo.

Para ello, el peso del suelo se estimó en base a la siguiente ecuación:

$$\text{Peso suelo} = \text{Superficie} * \text{Profundidad} * \text{Densidad aparente}$$

$$\text{Peso suelo} = 10000 \text{ m}^2 * 0.2 \text{ m} * 1.30 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Peso suelo} = 2.600 \text{ t/ha} = 2.600.000 \text{ kg/ha} = \mathbf{260 \text{ kg/m}^2}$$

Para la estimación de la cantidad de las enmiendas orgánicas, se calculó asumiendo una adición de 1% de materia orgánica, tomando en cuenta el rango de adición en la zona del estudio; por tanto, la dosis de las enmiendas orgánicas (DEO) fue:

$$DEO = \left. \begin{array}{l} 260 \text{ kg/m}^2 \\ x \text{ kg/m}^2 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \longrightarrow 100\% \\ \longrightarrow 1\% \end{array} \quad x = \frac{(1 * 260)}{100} = \frac{260}{100} = \mathbf{2.6 \text{ kg/m}^2}$$

o **26 kg** para cada unidad experimental de 10 m² (5 m * 2 m)

Estimación de cantidad de enmienda química (yeso agrícola):

La dosis de yeso agrícola (**DY**), se estimó en base a la siguiente ecuación:

$$DY = 0.00086 * E * Prof. * DA * CIC * (PSI i - PSI f)$$

dónde:

DY = Dosis de yeso

E = Factor de eficiencia (1.10)

Prof. = Profundidad del suelo (20 cm)

DA = Densidad aparente del suelo (1.30 g/cm³)

CIC = Capacidad de Intercambio Catiónico (10.0 meq/100 g
-del análisis inicial de suelos-)

PSI i = Porcentaje de Sodio Intercambiable inicial (80.20%
-del análisis inicial de suelos-)

PSI f = Porcentaje de Sodio Intercambiable final (15.00%
-correspondiente al umbral de la clasificación del suelo sódico,
según el *US Salinity Lab.*-)

0.00086 = Peso molecular del yeso y equivalencias de las unidades

La dosis calculada de 16 t/ha, corresponde al 100% del requerimiento de yeso, para bajar -teóricamente- el PSI al 15%; es equivalente a los 16 kg aplicados por unidad experimental de 10 m² de superficie.

Fuente: Lebron I., Suarez D., Yoshida T. 2002. Gypsum Effect on the Aggregate Size and Geometry of Three Sodic Soils Under Reclamation. *Soil Science Society of America Journal*, 66(1), p. 92-98. *En línea*. Disponible en: https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/20360500/pdf_pubs/p1738.pdf
Consultado en junio de 2020.

Trabajo recibido el 13 de julio de 2020 - Trabajo aceptado el 26 de agosto de 2020