

Efecto de enmiendas orgánicas y azufre en propiedades químicas y biológicas de un suelo sódico

Effect of organic amendments and sulfur on chemical and biological properties of a sodic soil
Efeito de corretivos orgânicos e enxofre nas propriedades químicas e biológicas de um solo sódico

AUTORES

Simanca Fontalvo
R. M.^{1,®}
rsimancafotalvo@
gmail.com

Cuervo Andrade
J. L.²

® Corresponding Author

¹ Facultad de Ciencias Básicas, Universidad del Atlántico. Ciudadela Universitaria, Km 7, Vía Puerto Colombia. Barranquilla, Atlántico, Colombia.

² Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

Received: 07.03.2018 | Revised: 24.05.2018 | Accepted: 29.05.2018

RESUMEN

Los suelos salinos generan una elevada preocupación en los sistemas productivos de regiones áridas y semiáridas del planeta, ya que provocan un descenso en el rendimiento de los cultivos debido al efecto osmótico, al exceso de Na de cambio presente, que origina degradación de la estructura del suelo, y al efecto del ión específico (Na, Cl, B) que puede causar toxicidad y desequilibrios en la nutrición de las plantas. Es por esto que se deben buscar alternativas de manejo para mejorar la productividad de estos suelos. Con este fin, se evaluó el efecto de la aplicación de abono verde de *Prosopis juliflora* (GM), vermicompost de residuos de palma de aceite (VERM) y azufre mineral (S°) sobre las propiedades químicas y biológicas de un suelo sódico Typic Haplustept con cultivo de *Zea mays*, utilizando como tratamientos aplicaciones únicas o mezcladas de 3 t de materia orgánica ha⁻¹ de GM o VERM y 1,4 t ha⁻¹ de S°. Se determinaron las propiedades biológicas biomasa microbiana del suelo (BMS), respiración microbiana del suelo (RMS) y la actividad de las enzimas fosfatasas (alcalina y ácida), proteasa y actividad hidrolítica del suelo mediante la hidrólisis del diacetato de fluoresceína (FDA); además, se estudiaron algunas propiedades químicas del suelo asociadas a sodicidad. El efecto sobre las propiedades biológicas del suelo dependió del tipo de insumo utilizado y su composición, dadas las diferencias que se encontraron entre tratamientos. De forma general, la aplicación de enmiendas orgánicas afectó positivamente a la RMS, BMS y a la actividad hidrolítica del suelo, mientras que la aplicación de S° aumentó la BMS pero disminuyó la RMS y la actividad enzimática de fosfatasas, proteasas e hidrolasas. Las variables químicas estudiadas presentaron también diferencias significativas entre tratamientos, siendo aquellos tratamientos con presencia de S° los que presentaron diferencias significativas en el mayor número de variables. En conclusión, las aplicaciones de enmiendas orgánicas mezcladas con S° afectan de forma positiva a las propiedades biológicas y químicas de suelos sódicos de la región Caribe Colombiana, pues se estimula la BMS y se reduce la saturación de sodio.

ABSTRACT

*Saline soils cause concern in the productive systems of arid and semi-arid regions of the planet, since they cause a decrease in crop yield due to the osmotic effect, the presence of excess exchangeable Na which causes degradation of the soil structure, and the effect of the specific ion (Na, Cl, B) that can cause toxicity and imbalances in the nutrition of plants. Therefore, it is necessary to look for management alternatives to improve the productivity of these soils. To this end, we evaluated the effect of the application of *Prosopis juliflora* green manure (GM), palm oil residue vermicompost (VERM) and mineral sulfur (S°), on the chemical and biological properties of a Typic Haplustept sodium soil cultivated with *Zea mays*, using 3 t of organic matter ha⁻¹ of GM or VERM and 1.4 t ha⁻¹ of S° as unique treatments or mixed applications. The biological properties of soil microbial biomass (BMS), soil*

microbial respiration (RMS) and the activity of the enzymes phosphatases (alkaline and acid), protease and hydrolytic activity of the soil through the hydrolysis of fluorescein diacetate (FDA) were determined; as well as some chemical properties of the soil associated with sodicity. The effect on the biological properties of the soil depended on the type of amendment used and its composition, due to the differences found between treatments. In general, the application of organic amendments positively affected the RMS, BMS and the hydrolytic activity of the soil, while the application of S^o increased the BMS but decreased the RMS and the enzymatic activity of phosphatases, proteases and hydrolases. The chemical variables studied also showed significant differences between treatments, with the presence of S^o presenting significant differences in the greatest number of variables. In conclusion, applications of organic amendments mixed with S^o positively affect the biological and chemical properties of sodium soils of the Colombian Caribbean region, since BMS is stimulated and sodium saturation is reduced.

RESUMO

*Os solos salinos constituem elevada preocupação nos sistemas produtivos das regiões áridas e semi-áridas do planeta, já que levam a uma queda no rendimento das culturas devido ao efeito osmótico, ao excesso de Na de troca, que origina a degradação da estrutura do solo, e o efeito do íão específico (Na, Cl, B) que pode causar toxicidade e desequilíbrios na nutrição das plantas. Assim, é necessário procurar alternativas de gestão para melhorar a produtividade desses solos. Com este objetivo, foi avaliado o efeito da aplicação da adubação verde com *Prosopis juliflora* (GM)), vermicomposto de resíduos de óleo palma (VERM) e enxofre mineral (S^o), nas propriedades químicas e biológicas de um solo sódico Typic Haplustept com cultivo de *Zea mays*, usando como tratamentos aplicações únicas ou misturas de 3 t de matéria orgânica ha⁻¹ de GM ou VERM, e 1,4 t ha⁻¹ de S^o. Foram determinadas a biomassa microbiana do solo (BMS), a respiração microbiana (RMS) e a atividade das enzimas fosfatase (alcalina e ácida), protease e a atividade hidrolítica do solo através da hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA), bem como algumas propriedades químicas do solo associadas à sodicidade. Em função das diferenças entre os tratamentos, o efeito sobre as propriedades biológicas do solo dependeu do tipo e composição do corretivo utilizado. Em geral, a aplicação de aditivos orgânicos afetou positivamente o RMS, BMS e a atividade hidrolítica do solo, enquanto a aplicação do S^o aumentou o BMS mas diminuiu o RMS e a atividade enzimática das fosfatases, proteases e hidrolases. As variáveis químicas estudadas também mostraram diferenças significativas entre os tratamentos, sendo os tratamentos com presença de S aqueles que apresentaram diferenças significativas no maior número de variáveis. Em conclusão, as aplicações de corretivos orgânicos misturados com S^o afetam positivamente as propriedades biológicas e químicas dos solos sódicos da região do Caribe Colombiano, uma vez que a BMS é estimulada e a saturação em sódio é reduzida.*

1. Introducción

La salinización de los suelos es uno de los principales problemas de la agricultura en regiones áridas y semiáridas del planeta. El manejo inadecuado del riego y los suelos causa acumulación de sales en la superficie que provocan aumento del pH y de la conductividad eléctrica (CE) del suelo, deficiencias nutricionales y toxicidad por iones como el Na⁺ (Amini et al. 2015), por lo que en estos suelos la vegetación es escasa o nula. Se estima que cerca de 955 × 10⁶ ha de los suelos del planeta se encuentran afectados por algún grado de salinidad y sodicidad (Singh et al. 2013), siendo la superficie estimada para la región Caribe Colombiana de 3.506.033 ha, repartidos en los ocho departamentos administrativos del norte de Colombia que limitan con el océano Atlántico (Pulido 2000).

Los suelos sódicos se caracterizan por presentar propiedades hidráulicas pobres, altos potenciales osmóticos, deficiencias nutricionales y toxicidad por aniones y Na⁺ (Wong et al. 2010). Estas características ocasionan que, en regiones con porcentajes considerables

PALABRAS CLAVE
Vermicompost, *Prosopis juliflora*, maíz, PSI, biomassa microbiana, actividad enzimática.

KEYS WORDS
Vermicompost, *Prosopis juliflora*, corn, PSI, microbial biomass, enzymatic activity.

PALAVRAS-CHAVE
Vermicomposto, *Prosopis juliflora*, milho, PSI, biomassa microbiana, atividade enzimática.

de este tipo de suelos, la productividad agrícola sea baja y las necesidades básicas de los productores no sean satisfechas.

Dada la creciente demanda de fibras y combustibles en el mundo, varios países han desarrollado planes de remediación de suelos sódicos a través del uso de enmiendas minerales u orgánicas de bajo costo y disponibles localmente, junto con el cultivo de plantas fitorremediadoras (Singh et al. 2014; Srivastava et al. 2014). En la región Caribe Colombiana, el manejo y remediación de este tipo de suelos aún utiliza altas cantidades de agua y yeso. La escasez de agua apta para uso agrícola en la región y los altos costes del yeso, que se usa intensivamente en la industria, hacen que este manejo sea poco viable desde el punto de vista económico y de la sostenibilidad en esta región. En la región Caribe Colombiana se encuentra el 23% de las tierras cultivadas de Colombia, donde los cultivos de maíz tradicional y yuca ocupan el 30,5% de la superficie (Aguilera et al. 2013), cultivados comúnmente por pequeños productores que disponen de escasa innovación y pobre desarrollo agrícola (Garrido et al. 2017), lo que provoca que la productividad, rendimiento y rentabilidad de los cultivos sea baja.

En este contexto, el azufre elemental (S^0) procedente de la industria petroquímica desarrollada en la región Caribe Colombiana puede ser usado para el manejo de los suelos afectados por sales en la región debido a su disponibilidad y bajo coste. El potencial del S^0 se debe a que, al oxidarse a sulfato, contribuye a disminuir el pH del suelo y disolver sales de calcio, lo que facilita el desplazamiento del Na^+ y la productividad de los cultivos, al disminuir la conductividad eléctrica (CE), el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y la razón de adsorción de sodio (RAS) (Stamford et al. 2002). Por otro lado, el vermicompost (VERM), enmienda orgánica producida por la acción conjunta de lombrices de tierra y microorganismos sobre residuos orgánicos, por su fácil producción a cualquier escala, alta carga microbiana y carbono orgánico oxidable, ha sido utilizado en el manejo de suelos sódicos para reducir las condiciones de sodicidad de los mismos (Mogollón et al. 2011). Si el vermicompost es mezclado con enmiendas minerales o químicas reduce las cantidades requeridas de estas

últimas, lográndose un mayor efecto sobre las propiedades biológicas y fisicoquímicas de suelos afectados por sales (Hernandez-Araujo et al. 2013).

De igual categoría que el VERM, la enmienda verde producida a partir de *Prosopis juliflora* (GM), planta fabácea nativa de América que crece generalmente en zonas áridas, viene siendo utilizada en la rehabilitación de suelos sódicos (Singh et al. 2014), debido a que la hojarasca de este árbol mejora la fertilidad de estos suelos al estimular la actividad microbiana (Vallejo et al. 2012).

Generalmente, la remediación de los suelos sódicos se basa fundamentalmente en estudios de las propiedades químicas del suelo (Singh et al. 2013), obviando las propiedades biológicas, las cuales están íntimamente ligadas a la calidad de los suelos debido a su papel en la degradación de la materia orgánica y los ciclos biogeoquímicos (Singh 2016). Además, los microorganismos del suelo presentan una mayor sensibilidad a los cambios ambientales y del uso del suelo; por ejemplo, las enzimas fosfatasas (mineralización del fósforo), proteasa (mineralización del nitrógeno), esterasas y lipasas (hidrólisis de ésteres y lípidos) han demostrado ser sensibles a cambios de pH y CE del suelo (Caldwell 2005). A pesar de lo anterior, existe poca información referente al efecto de enmiendas orgánicas o S^0 sobre las propiedades biológicas de suelos sódicos, quizá debido a la existencia de estudios con resultados contradictorios referentes al efecto de la salinidad y sodicidad sobre la biomasa y la actividad microbiana (Singh et al. 2013; Celis et al. 2013). Aun así, algunos autores sugieren realizar estudios sobre la enzimología de suelos sódicos con el fin de entender mejor la ecología del sistema suelo en esas condiciones (Singh 2016).

En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de la aplicación de un abono verde, vermicompost y azufre elemental sobre las propiedades químicas y biológicas de un suelo sódico Typic Haplustept cultivado con maíz.

2. Material y Métodos

La investigación se desarrolló en la finca Mojibobos ubicada en el municipio de El Copey, César- Colombia (10°6'3.91"N; 74°0'17.67"O). El clima del lugar presenta una temperatura media de 27,8 °C, una tasa de evaporación de 4,66 mm día⁻¹ y una precipitación promedio anual de 1030 mm. Los datos pertenecen a una estación meteorológica situada a menos de 1 km de distancia de la finca. El suelo es del orden Inceptisoles clasificado taxonómicamente como Typic Haplustept según la clasificación del USDA (Soil Survey Staff 2014), con un relieve plano con pendientes entre el 0 y 1%, de longitud larga y forma rectilínea. Sus propiedades físico-químicas entre 0 y 32 cm de profundidad (Horizonte Ap) fueron: 48,3% arena, 32,4% limo, 19,3% arcilla, por lo que se clasifica como un suelo de textura franca; pH (1:5) 7,9; CE 2,4 dS m⁻¹; carbono orgánico total 0,72%; CICe 10,3 cmol₍₊₎ kg⁻¹; sodio intercambiable 2,3 cmol₍₊₎ kg⁻¹; sodio soluble 15,6 mmol₍₊₎ L⁻¹; RAS 9,87; PSI 17,1%; bicarbonatos en solución 22,6 mmol₍₋₎ L⁻¹ y baja reacción de CaCO₃ por el método cualitativo de reacción con ácido clorhídrico.

2.1. Diseño experimental

Los tratamientos a evaluar consistieron en aplicaciones únicas o mezcladas en la superficie de dos enmiendas orgánicas, VERM y GM, y S° (T3-T9), además de un tratamiento manejado netamente con fertilizantes NPK (T2) y un control sin ningún tipo de fertilizante o enmienda (T1). El suelo fue previamente arado con ayuda de cincel y discos a una profundidad de 20 cm, con el fin de tener condiciones óptimas para la incorporación de las enmiendas y el cultivo de maíz. Las enmiendas fueron pesadas y aplicadas manualmente de forma homogénea sobre la superficie para posteriormente ser incorporadas en el suelo a una profundidad de 5 cm con ayuda de un arado. Los tratamientos establecidos fueron los siguientes:

T1: Control; T2: NPK a dosis de 75-50-50 kg ha⁻¹; T3: GM a dosis de 3 t ha⁻¹ + NPK; T4: S° a dosis de 1,4 t ha⁻¹ + NPK; T5: VERM a dosis de 1,4 t ha⁻¹ + NPK; T6: GM a dosis de 3 t ha⁻¹ + S°

a dosis de 1,4 t ha⁻¹ + NPK; T7: GM a dosis de 3 t ha⁻¹ + VERM a dosis de 1,4 t ha⁻¹ + NPK; T8: S° a dosis de 1,4 t ha⁻¹ + VERM a dosis de 1,4 t ha⁻¹ + NPK; y T9: GM a dosis de 3 t ha⁻¹ + S° a dosis de 1,4 t ha⁻¹ + VERM a dosis de 1,4 t ha⁻¹ + NPK.

En total se utilizaron 27 unidades experimentales de tamaño 5 m x 2 m, distribuidas en bloques completos al azar de nueve tratamientos con tres repeticiones cada uno. Los tratamientos (T3-T9) fueron suplementados con fertilizante químico triple 15 y sulfato de amonio (21% N), utilizando la misma dosis que para el tratamiento T2, siguiendo lo recomendado para el cultivo de maíz por Guerrero (1990). La fertilización fue fraccionada en tres dosis a los 5, 20 y 35 días después de la siembra. La densidad de plantas utilizadas fue de 50.000 plantas ha⁻¹ de maíz variedad ICA V-109, dispuestas en 3 filas en todas las parcelas (Figura 1). Para todos los tratamientos las plantas fueron regadas por medio de un sistema de riego por aspersión tres veces a la semana, ajustando la humedad del suelo a capacidad de campo. Las enmiendas fueron aplicadas 15 días antes de la siembra del maíz.

Se utilizó S° micronizado con un contenido de azufre del 97% a una dosis correspondiente al 100% de la cantidad requerida de S° para poder reducir el PSI al 5% en 30 cm de profundidad. Se utilizó VERM producido a partir de residuos de palma de aceite manejados con *Eisenia foetida*, con pH (1:5) 6,9; 2,5% Ca total; 1,2% N total; 15,6% carbono orgánico oxidable total y relación C/N 11,3. Por último, el abono verde (GM) utilizado se obtuvo de la poda de plantas de *Prosopis juliflora* que crecían en la zona de estudio, cuyos contenidos foliares fueron: 4,8% N total, 0,98% Ca total, 0,3% P total y 1,8% K total.

2.2. Muestreo y análisis

Se tomaron 3 muestras de suelo de la zona rizosférica en torno al tallo de 5 plantas de maíz, las cuales fueron mezcladas y homogenizadas, para cada una de las 27 unidades experimentales, siguiendo un patrón en forma de "W" en un radio de 15 cm y a una profundidad de 0 a 10 cm en el perfil del suelo. Las muestras de suelo fueron almacenadas a -4 °C para la estimación de las variables biológicas, y otra parte fue secada

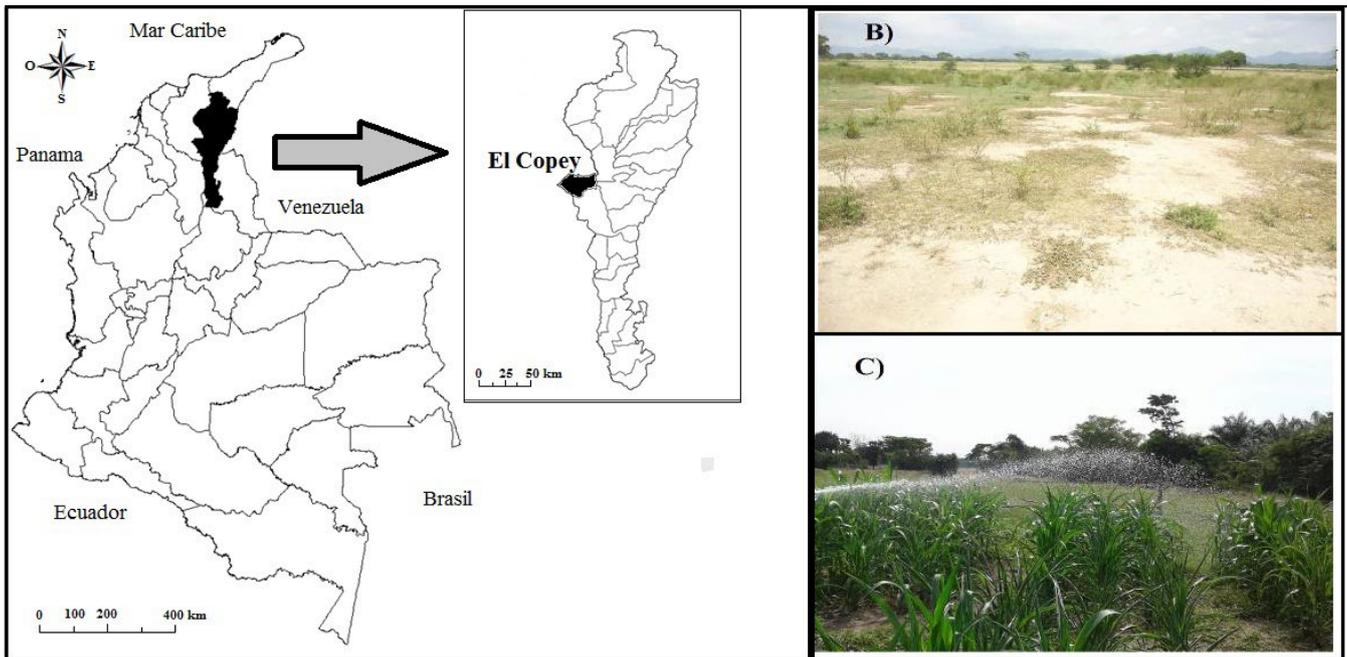


Figura 1. A) Ubicación del área de estudio, B) aspecto del terreno antes de la siembra, y C) cultivo de maíz desarrollado en el ensayo.

al aire para la determinación de las variables químicas. Las muestras fueron tomadas y analizadas en 4 periodos de muestreo equivalentes a los 15, 30, 50 y 75 días después de sembrado el maíz.

Las variables químicas evaluadas fueron: i) pH de suelo en relación 1:5 (p/v); ii) CE en extracto de pasta saturada; iii) bases solubles en agua medidas por espectrometría de absorción y emisión atómica (Ca^{+2} , Mg^{+2} y Na^{+1}); iv) carbono orgánico total determinado por el método de combustión húmeda Walkley-Black; v) PSI y capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe), determinados a los 75 días. Todas las variables químicas evaluadas fueron estimadas según los métodos propuestos por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2006).

Por último, los parámetros biológicos evaluados fueron: vi) actividad fosfatasa ácida y alcalina (EC 3.1.3.2 y 3.1.3.1) determinadas por el método de Eivazi & Tabatabai (1977); vii) actividad proteasa (EC 3.4.2.21-24) por el método de Ladd & Butler (1972) utilizando como sustrato caseína durante 2 h a 50 °C a pH 8,1; viii) actividad FDA por hidrólisis del diacetato de fluoresceína según el método de Adam & Duncan (2001) por determinación colorimétrica de la

fluoresceína; ix) carbono de la biomasa microbiana (BMS) por el método de fumigación-incubación de Joergensen (Alef & Nannipieri 1995); x) y respiración microbiana (RMS) estimada en sistema cerrado con solución de hidróxido de sodio 1 N según el método propuesto por Jäggi (Alef & Nannipieri 1995). De igual forma que las variables químicas, estos parámetros fueron determinados en 4 periodos de muestreo (15, 30, 50, 75 días después de la siembra).

Todos los análisis fueron realizados en los Laboratorios de Biología y Agua y Suelos de la Universidad Nacional de Colombia con sede en Bogotá.

2.3. Análisis estadístico

Previo al análisis de los supuestos de normalidad y homocedasticidad de varianzas se utilizó el tests de Shapiro-Wilk y Levene. La determinación de la presencia o ausencia de diferencias significativas entre los tratamientos se llevó a cabo por medio de una ANOVA y en algunos casos se aplicó la prueba de comparación de medias (HSD Tukey – $p < 0.05$). Los análisis estadísticos fueron realizados con el programa SPSS STATICS 17.0.

3. Resultados

3.1. Propiedades químicas

Se encontraron diferencias significativas en los valores de pH al final del periodo de estudio (75 días) en los tratamientos con S° (T4, T6, T8 y T9), ya que presentaron valores de pH por debajo de 5 con respecto al resto de los tratamientos orgánicos, que alcanzaron valores de pH entre 5,5 y 6,7 (**Tabla 1**). Del mismo modo, Zidan et al. (1990) encontraron niveles de pH entre 5 a 5,5 en la rizosfera de plantas de maíz que crecieron en soluciones salinas de NaCl y CaCl₂.

La conductividad eléctrica (CE) y la concentración de Ca⁺² y Mg⁺² solubles presentaron comportamientos inversos a lo encontrado para el pH a lo largo del experimento. En los tratamientos con S° se incrementó de forma significativa la salinidad y las concentraciones de Ca⁺² y Mg⁺², presentando valores mayores de 10 dS m⁻¹ de CE, de 50 mmol L⁻¹ de Ca⁺² y 80 mmol L⁻¹ de Mg⁺² (**Tabla 1**). Por el contrario, T3 y T5 no presentaron diferencias significativas con respecto al control y al abonado con fertilizantes químicos (T1, T2), a pesar de que aplicaciones de enmiendas orgánicas en suelos sódicos pueden aumentar la concentración de Ca⁺² y Mg⁺². Esto pudo estar sujeto a las cantidades de enmienda orgánica aplicada y a la concentración de Ca y Mg de las mismas (Oo et al. 2013). Sin embargo, la mezcla de VERM y GM (T7) presentó la mayor concentración de Ca⁺² y Mg⁺² entre los tratamientos orgánicos.

Todos los tratamientos mostraron tendencia a disminuir el sodio soluble en el tiempo (**Tabla 2**), lo cual corresponde a lo observado en suelos sódicos manejados con enmiendas orgánicas y/o plantas fitorremediadoras (Gharaibeh et al. 2011; Mahmoodabadi et al. 2012). Esta tendencia a disminuir se debe a los procesos de lixiviación y a la absorción del sodio por las plantas. Aun así, la concentración de Na⁺ mostró diferencias significativas (p < 0,05) entre tratamientos, siendo los tratamientos con S° los que alcanzaron valores más altos (> 8 mmol L⁻¹) a lo largo del experimento frente a los tratamientos orgánicos, que fueron los más bajos (**Tabla 2**).

La relación de absorción de sodio (RAS) disminuyó de igual manera que el Na⁺ (**Tabla 2**). El mayor porcentaje de reducción del RAS (> 49%) se produjo en aquellos tratamientos en donde se aplicó enmienda verde sola (T3) o mezclada (T6, T7 y T9) (**Tabla 2**), posiblemente debido a que la descomposición de la materia orgánica produce cargas negativas que atraen el exceso de iones sodio de la solución, disminuyendo de esta forma la RAS (Singh et al. 2013). Lo anterior coincide con lo observado por Yazdanpanah et al. (2012), los cuales utilizaron enmiendas orgánicas y minerales sobre suelos sódicos, encontrando que los mayores porcentajes de reducción de RAS ocurrieron en los tratamientos en los que se aplicaron residuos vegetales y mezclas órgano-minerales. Por otro lado, la presencia de azufre elemental también contribuyó a disminuir la RAS respecto al tratamiento control (T1) y al tratamiento mineral (T2) (**Tabla 2**), debido a que la formación de ácido sulfúrico contribuye a la disolución de minerales de calcio y magnesio, lo que aumenta la entrada de Ca⁺² y Mg⁺² en la solución del suelo, disminuyendo de esta forma la RAS (Yazdanpanah et al. 2012).

La aplicación de enmiendas orgánicas no originó efecto significativo en el porcentaje de carbono orgánico (CO) en ningún tratamiento (**Tabla 3**). Aun así, los tratamientos en los que se utilizó VERM mezclado con S° o GM presentaron los mayores valores de CO (**Tabla 3**). Esto se debe al efecto del sodio y el ácido sulfúrico sobre la solubilización de la materia orgánica, que al aumentar evita su acumulación en el suelo a corto plazo (Gupta et al. 1988; Wong et al. 2010), a menos que se realicen varias aplicaciones en el tiempo.

En cuanto a la CICe, se observó que los tratamientos de mezclas con S° y enmiendas orgánicas fueron los que presentaron diferencias significativas (p < 0,05) al finalizar el experimento, al presentar valores superiores a 50 cmol₍₊₎ kg⁻¹ de suelo (**Tabla 3**). Esto es debido a que la oxidación del S° contribuye al aumento de la concentración de cationes intercambiables; además, el efecto desnaturizador del ácido sulfúrico sobre la celulosa y la lignina puede aumentar la superficie de contacto de los materiales lignocelulolíticos y la capacidad de adsorción de metales divalentes de materiales celulolíticos como los provenientes de *Prosopis cineraria*, los cuales

Tabla 1. Efecto sobre las variables químicas pH, Conductividad eléctrica (CE), Calcio y Magnesio soluble de un suelo sódico cultivado con maíz debido al empleo de enmiendas orgánicas y azufre elemental

	pH				CE (dS m ⁻¹)				Calcio (mmol L ⁻¹)				Magnesio (mmol L ⁻¹)			
	15dds	30dds	50dds	75dds	15dds	30dds	50dds	75dds	15dds	30dds	50dds	75dds	15dds	30dds	50dds	75dds
T1	5,9± 0,28 ^{ab}	5,5± 0,82 ^a	5,86± 0,37 ^a	6,11± 0,18 ^a	1,12± 0,32 ^a	2,89± 1 ^{ab}	1,73± 0,48 ^a	1,42± 0,41 ^a	17,55± 14,9 ^a	15,83± 3,2 ^a	12,68± 3,3 ^a	10,83± 3,3 ^a	4,79± 4,5 ^a	6,73± 3,78 ^a	3,95± 1,9 ^a	3,18± 1,65 ^a
T2	6,45± 0,56 ^a	5,82± 0,5 ^a	5,39± 0,29 ^a	5,48± 0,27 ^a	1,89± 1,1 ^a	2,31± 0,65 ^{ab}	2,06± 0,87 ^a	2,92± 0,96 ^a	12,78± 5,92 ^a	16,17± 2,4 ^a	15,16± 3,3 ^a	17,5± 1,57 ^a	5,03± 2,96 ^{ab}	5,96± 1,91 ^a	5,34± 2,41 ^a	7,29± 2,42 ^a
T3	4,81± 0,83 ^{ab}	6,32± 0,22 ^a	5,25± 0,48 ^a	5,43± 0,57 ^a	2,84± 1,32 ^a	6,78± 2,45 ^{bc}	3,97± 0,75 ^a	2,16± 0,72 ^a	14,84± 2,64 ^a	16,4± 2,72 ^a	25,7± 2,63 ^a	15,7± 2,7 ^a	24,12± 3,9 ^b	22,33± 6,1 ^a	10,37± 6,58 ^a	6,55± 1,98 ^a
T4	3,75± 0,32 ^b	5,59± 0,16 ^a	2,66± 0,07 ^b	3,19± 0,46 ^b	3,81± 1,61 ^a	2± 0,33 ^{ab}	17,08± 1,72 ^b	13,58± 2,5 ^b	17,34± 2,29 ^a	16,02± 1,45 ^a	59,82± 0,7 ^b	55,8± 0,2 ^b	22,28± 2,8 ^{ab}	6,13± 1,23 ^a	123,68± 5,91 ^b	83,38± 36,44 ^b
T5	6,75± 0,69 ^a	5,93± 0,4 ^a	5,59± 0,25 ^a	6,18± 0,08 ^a	1,14± 0,29 ^a	1,68± 0,71 ^a	3,83± 1,21 ^a	1,88± 0,17 ^a	9,12± 2,79 ^a	14,58± 4,41 ^a	14,14± 2,2 ^a	13± 1,2 ^a	2,93± 1,51 ^a	17,14± 9,3 ^a	5,75± 1,42 ^a	5,21± 0,92 ^a
T6	6,2± 0,53 ^{ab}	2,91± 0,13 ^b	2,96± 0,29 ^b	2,78± 0,1 ^b	1,41± 0,16 ^a	10,06± 1,17 ^c	13,75± 2,44 ^b	14,62± 2,1 ^b	14,21± 2,29 ^a	14,75± 2,59 ^a	96,45± 0,3 ^b	50,33± 5,4 ^b	5,38± 0,37 ^{ab}	15,77± 12 ^a	138,72± 51,3 ^b	97,95± 18,04 ^b
T7	5,87± 0,06 ^{ab}	5,51± 0,17 ^a	5,43± 0,25 ^a	6,05± 0,23 ^a	1,97± 1,36 ^a	3,03± 0,22 ^{ab}	3,44± 1,29 ^a	2,17± 0,91 ^a	13,32± 5,19 ^a	17,34± 1,09 ^a	17,15± 2,84 ^a	17,15± 6,7 ^a	3,09± 0,55 ^{ab}	8,3± 1,14 ^a	11,16± 4,25 ^a	20,64± 4,29 ^{ab}
T8	3,78± 0,26 ^b	3,3± 0,5 ^b	2,84± 0,28 ^b	3,27± 0,61 ^b	4,38± 0,88 ^a	11,48± 0,83 ^c	18,27± 0,2 ^b	13,93± 1,1 ^b	18,66± 0,39 ^a	61,51± 8,7 ^b	82,3± 12,3 ^b	54,13± 3,1 ^b	15,24± 1,3 ^{ab}	94,07± 4,9 ^b	209,06± 8,25 ^b	105,25± 28,3 ^b
T9	6,16± 1,31 ^a	3,11± 0,1 ^b	2,71± 0,02 ^b	4,2± 0,89 ^b	4,75± 1,39 ^a	8,88± 0,23 ^c	14,6± 1,15 ^b	15,72± 2,0 ^b	18,73± 0,22 ^a	56,24± 0,1 ^b	74,42± 4,9 ^b	52,6± 2 ^b	5,21± 3,47 ^{ab}	71,04± 0,6 ^b	135,83± 14,6 ^b	97,49± 31,08 ^a

Los valores representan la media de n = 3 con su respectivo error estándar. Para cada muestreo y parámetro, valores con letras diferentes presentan diferencias estadísticamente significativas (p < 0,05) entre tratamientos, de acuerdo a la comparación de medias de Tukey.

Tabla 2. Sodio en solución y RAS de un suelo sódico cultivado con *Zea mays* tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de *Prosopis juliflora* y vermicompost) y azufre elemental. Los valores presentados corresponden a la media (\pm error estándar) de cada uno de los tratamientos en cada momento de muestreo

Tratamientos	Sodio (mmol L ⁻¹)				RAS (mmol L ⁻¹)			
	15dds	30dds	50dds	75dds	15dds	30dds	50dds	75dds
T1	7,84 \pm 1,37 ^a	8,55 \pm 0,49 ^a	7,5 \pm 0,93 ^{ab}	4,65 \pm 0,48 ^a	2,41 \pm 0,45 ^a	2,45 \pm 0,7 ^a	2,47 \pm 0,7 ^a	1,96 \pm 0,11 ^a
T2	5,92 \pm 0,49 ^a	2,71 \pm 0,18 ^b	4,61 \pm 0,58 ^b	5,04 \pm 0,38 ^a	2,08 \pm 1,06 ^a	0,75 \pm 0,13 ^b	1,35 \pm 0,26 ^b	1,5 \pm 0,09 ^b
T3	7,12 \pm 1,22 ^a	3,19 \pm 0,63 ^b	6,59 \pm 1,02 ^{ab}	2,54 \pm 0,2 ^b	1,41 \pm 0,09 ^a	0,71 \pm 0,24 ^b	0,98 \pm 0,13 ^b	0,74 \pm 0,05 ^{cd}
T4	8,03 \pm 0,75 ^a	4,24 \pm 0,62 ^{bd}	8,88 \pm 1,22 ^c	8,28 \pm 0,81 ^c	1,71 \pm 0,16 ^a	1,19 \pm 0,18 ^{ab}	0,89 \pm 0,16 ^b	1,03 \pm 0,24 ^c
T5	5,14 \pm 0,55 ^a	3,49 \pm 0,44 ^b	5,22 \pm 0,91 ^b	4,43 \pm 0,11 ^{ab}	2 \pm 0,54 ^a	0,87 \pm 0,4 ^b	1,52 \pm 0,26 ^b	1,48 \pm 0,12 ^b
T6	4,67 \pm 0,49 ^a	7,55 \pm 0,09 ^{ac}	12,96 \pm 1,15 ^{cd}	4,66 \pm 0,57 ^a	1,38 \pm 0,27 ^a	2,09 \pm 0,52 ^a	1,14 \pm 0,12 ^b	0,54 \pm 0,03 ^d
T7	5,2 \pm 0,78 ^a	6,18 \pm 0,1 ^c	5,6 \pm 0,56 ^{ab}	5,03 \pm 0,2 ^a	1,71 \pm 0,55 ^a	1,6 \pm 0,25 ^{ab}	1,4 \pm 0,2 ^b	1 \pm 0,02 ^c
T8	4,79 \pm 0,15 ^a	9,93 \pm 1,34 ^a	14,81 \pm 1 ^d	7,66 \pm 1,43 ^c	1,09 \pm 0,13 ^a	1,08 \pm 0,21 ^b	1,19 \pm 0,12 ^b	0,95 \pm 0,2 ^c
T9	5,5 \pm 0,57 ^a	5,72 \pm 0,27 ^{cd}	11,8 \pm 1,63 ^c	5,8 \pm 0,85 ^a	1,46 \pm 0,4 ^a	0,68 \pm 0,08 ^b	1,06 \pm 0,17 ^b	0,69 \pm 0,18 ^{cd}

Los valores representan la media de n = 3 con su respectivo error estándar. Para cada muestreo y parámetro, valores con letras diferentes presentan diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos, de acuerdo a la comparación de medias de Tukey.

poseen capacidad de absorción de metales a valores de pH ácidos (Sinha et al. 2013).

Con respecto al porcentaje de sodio intercambiable (PSI), todos los tratamientos, incluyendo el control, presentaron valores de PSI por debajo del inicial del suelo (< 15) (Tabla 3), lo cual podría deberse al efecto del cultivo de maíz sobre la concentración de sodio intercambiable

en el suelo, pues i) aumenta la concentración de H⁺, Ca⁺² y CO₂ en el suelo, que permite el reemplazo y lixiviación de Na⁺ de los sitios de intercambio del suelo (Wong et al. 2010), y ii) debido a que, para el cultivo de maíz, el terreno fue previamente arado y el riego se mantuvo periódicamente, esto permitió que la lixiviación del Na⁺ fuera mayor, dado que se mejora la porosidad del suelo y permite un mejor lavado de

Tabla 3. Carbono orgánico (CO), capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI) de un suelo sódico cultivado con *Zea mays* tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de *Prosopis juliflora* y vermicompost) y azufre elemental

Tratamientos	CO (%)	CICE (cmol _(c) kg ⁻¹)	PSI (%)
T1 (Control)	2,06 \pm 0,27 ^a	30,66 \pm 2,70 ^a	2,74 \pm 0,11 ^a
T2 (Químico)	1,96 \pm 0,34 ^a	32,14 \pm 8,48 ^a	1,51 \pm 0,26 ^{ab}
T3 (Enmienda verde)	1,67 \pm 0,44 ^a	30,56 \pm 2,68 ^a	1,28 \pm 0,25 ^{ab}
T4 (Azufre elemental)	2,01 \pm 0,46 ^a	34,36 \pm 4,93 ^a	0,96 \pm 0,48 ^b
T5 (Vermicompost)	2,04 \pm 0,22 ^a	30,24 \pm 2,31 ^a	2,80 \pm 0,08 ^a
T6 (E. verde+ Azufre)	1,92 \pm 0,03 ^a	82,05 \pm 16,91 ^b	0,56 \pm 0,03 ^b
T7 (E. verde + Vermi.)	2,58 \pm 0,20 ^a	37,82 \pm 2,32 ^a	1,21 \pm 0,27 ^{ab}
T8 (Vermi. + Azufre)	2,23 \pm 1,09 ^a	71,67 \pm 8,62 ^b	0,89 \pm 0,05 ^b
T9 (E. verde + Vermi + Azufre)	2,45 \pm 0,27 ^a	83,43 \pm 15,80 ^b	0,53 \pm 0,61 ^b

Los valores representan la media de n = 3 con su respectivo error estándar. Para cada parámetro, valores con letras diferentes presentan diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos, de acuerdo a la comparación de medias de Tukey.

las sales (Qadir & Oster 2002; Gutiérrez et al. 2016). De igual manera, los tratamientos con S° presentaron los menores valores de PSI (< 1%) (Tabla 3), lo cual podría indicar que en estos tratamientos ocurrió un mayor reemplazo y lixiviación de Na⁺ por la solubilización de minerales del suelo gracias a la formación de ácido sulfúrico.

3.2. Propiedades biológicas

Quince días después de sembradas las plantas de maíz, se encontró que todos los tratamientos presentaron mayor biomasa microbiana (BMS) con respecto a T1 (71,97 µg C g⁻¹ suelo seco) (Figura 2), siendo significativamente ($p < 0,05$) mayor para T5 y T7. Posteriormente, entre los 30 y 50 días, la mayoría de los tratamientos aumentó la BMS (Figura 2). A los 75 días, los tratamientos T3, T5 y T7 disminuyeron su BMS a valores menores de 150 µg C g⁻¹ suelo seco (Figura 2A), lo cual corresponde a lo también encontrado por Wong et al. (2009) en suelos sódicos enmendados con materia orgánica, donde a medida que disminuye la disponibilidad de sustrato por mineralización decae la BMS; mientras, en los tratamientos con S° se mantiene en valores significativamente mayores debido a mejores condiciones químicas del suelo, además de que el S° puede ser incorporado en la biomasa microbiana cuando es oxidado inicialmente a SO₄⁻² y, posteriormente, transformado

en formas orgánicas de S, transformación que es alta en suelos alcalinos y temperaturas mayores de 35 °C (Jaggi et al. 1999), parámetros parecidos a los presentados en el área de estudio.

En relación a la RMS, se observó que en los 15 y 30 días, ninguno de los tratamientos presentó diferencias significativas con respecto al control (Figura 2B), manteniendo valores alrededor de ± 86 µg C-CO₂ g⁻¹ suelo seco. En el día 50, la mayoría de los tratamientos tendieron a aumentar la RMS sobre 120 µg C-CO₂ g⁻¹ suelo seco, donde T4, T5 y T8 presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) con valores por debajo de 80 µg C-CO₂ g⁻¹ suelo seco (Figura 2B). En el día 75 se produjeron los mayores valores de RMS del experimento, en T3 y T5 con 329 y 263 µg C-CO₂ g⁻¹ suelo seco respectivamente, además del aumento de la RMS de forma general en todos los tratamientos (Figura 2B). Al final del experimento los tratamientos orgánicos presentaron tendencia al aumento de la RMS, lo cual puede ser debido al efecto dispersante del sodio sobre la materia orgánica, al aumentar la disolución y disponibilidad de esta para los microorganismos, por lo que dichas poblaciones aumentan su actividad (Wong et al. 2010).

En las Figuras 3A y 3B se presenta la evolución de la fosfatasa alcalina y ácida según tratamientos. La tendencia de la actividad fosfatasa alca-

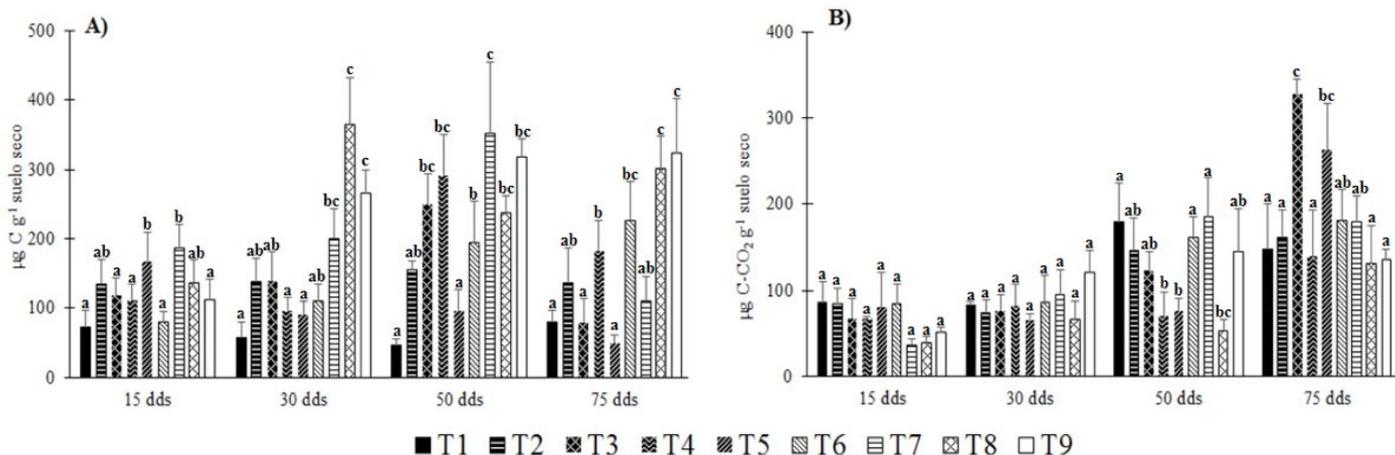


Figura 2. A) Biomasa microbiana del suelo (BMS), y B) Respiración microbiana del suelo (RMS) de un suelo sódico cultivado con *Zea mays* y tratado con abono verde de *Prosopis juliflora*, vermicompost y azufre elemental. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos $p < 0,05$ en cada momento de muestreo.

lina a disminuir en el tiempo, en todos los tratamientos (Figura 3A), corresponde a lo descrito por Singh et al. (2013) en suelos sódicos en procesos de restauración donde la actividad fosfatasa alcalina disminuyó en los suelos rehabilitados, que presentaron menores valores de pH y concentración de Na^+ , debido según los autores a que en suelos sódicos la principal fracción de P en el suelo está en forma orgánica; así pues la actividad fosfatasa es la principal fuente de P

disponible, pero a medida que el suelo disminuye su alcalinidad y sodicidad la disponibilidad de P en el suelo aumenta, por lo que la actividad fosfatasa disminuye. Los valores más bajos se encontraron en los tratamientos con S° ($< 50 \mu\text{g PNP g}^{-1}$ suelo seco) (Figura 3A), lo cual podría reflejar inhibición de las fosfatasas alcalinas por el efecto de las enmiendas utilizadas sobre el pH y la disponibilidad de fósforo, por disolución de minerales del suelo.

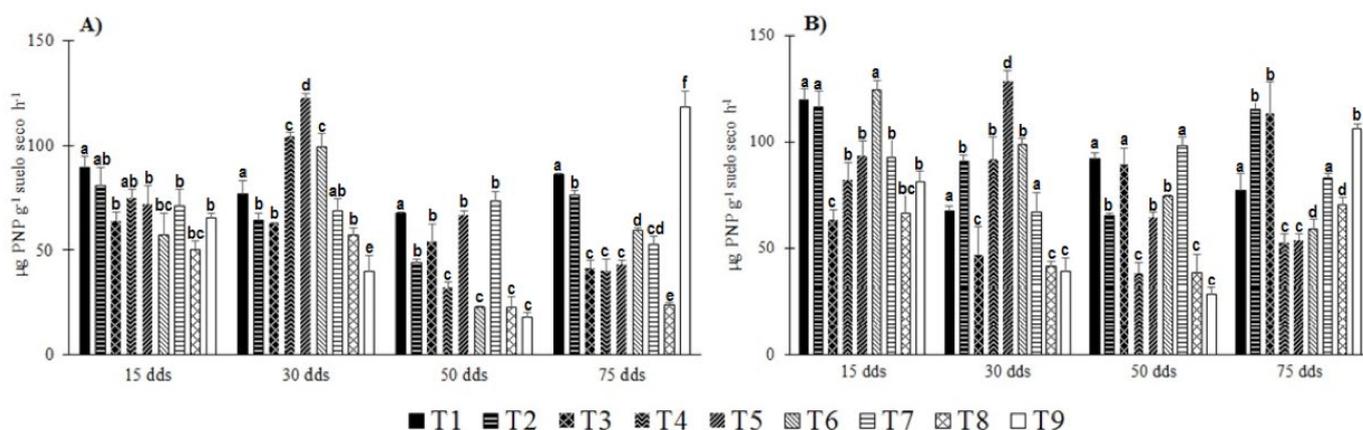


Figura 3. A) Fosfatasa alcalina y B) Fosfatasa ácida, de un suelo sódico cultivado con *Zea mays* y tratado con abono verde de *Prosopis juliflora*, vermicompost y azufre elemental. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$) en cada momento de muestreo. PNP: p-nitrofenol.

Los tratamientos orgánicos presentaron los mayores valores de actividad fosfatasa ácida ($> 100 \mu\text{g PNP g}^{-1}$ suelo seco) a lo largo del experimento (Figura 3B), lo cual concuerda con lo mencionado por Saha et al. (2008) acerca del efecto positivo de aplicaciones de enmiendas orgánicas sobre la actividad de la fosfatasa ácida. A pesar de lo anterior, se observó que en todos los tratamientos la actividad fosfatasa ácida tendió a disminuir hasta el día 50, lo cual puede deberse a que la producción de esta enzima por parte de las plantas está ligada al estado fenológico de las mismas, dado que depende de la actividad y de la tasa de crecimiento de las raíces (Marschner et al. 2007). Para los tratamientos en los que se utilizó S° los menores valores de actividad ($< 50 \mu\text{g PNP g}^{-1}$ suelo seco) (Figura 3B) pueden deberse al efecto inhibitorio del S° sobre ciertas comunidades de microorganismos (Gupta et al. 1988).

Debido a la incorporación de compuestos orgánicos nitrogenados, aplicaciones de enmiendas

orgánicas en el suelo presentan generalmente efectos positivos sobre la actividad proteasa de suelos áridos (Dinesh et al. 2004). No obstante, en el presente estudio los tratamientos con enmiendas orgánicas, a excepción de T7, presentaron la mayor parte del experimento baja actividad proteasa ($< 10 \mu\text{g}$ tirosina g^{-1} suelo seco 2 h^{-1}) (Figura 4A), donde la menor actividad para T3 puede relacionarse con lo reportado por Mukhopadhyay & Joy (2010) en suelos cultivados con *Acacia auriculiformis* y *Shorea robusta*, donde la alta concentración de fenoles, lignina, polifenoles y taninos disminuye la actividad proteolítica del suelo.

Por otro lado, en el VERM, al ser materia orgánica mineralizada por la acción de lombrices de tierra y microorganismos, la mayor parte del nitrógeno se encuentra en formas mineralizadas (Ali et al. 2015), lo cual también inhibe la actividad proteolítica. De igual manera, los tratamientos con S° presentaron tendencia a disminuir su actividad proteolítica después del día 30

(Figura 4A), lo cual puede estar relacionado con la reducción del pH de la rizosfera por debajo de 7, lo que conlleva a que disminuya la actividad, estabilidad y producción de las proteasas alcalinas (Ellaiah et al. 2002).

Se observó que T1 y T2 presentaron la mayor actividad hidrolítica en el tiempo al presentar valores mayores a $7 \mu\text{g}$ fluoresceína g^{-1} suelo seco $0,5 \text{ h}^{-1}$, contrario a en los que se aplicó S° , que presentaron tendencia a disminuir su actividad

hidrolítica después del día 30 a valores menores a $5 \mu\text{g}$ fluoresceína g^{-1} suelo seco $0,5 \text{ h}^{-1}$ (Figura 4B), mientras que los tratamientos orgánicos tienden a aumentar su actividad con el tiempo a valores cercanos a T1 y T2. La mayor actividad hidrolítica en T1 y T2 y menor en los tratamientos con S° probablemente se deba al pH ligeramente ácido presentado en la rizosfera de T1 y T2, mientras que los tratamientos con S° presentaron valores de pH cercanos a 5,5.

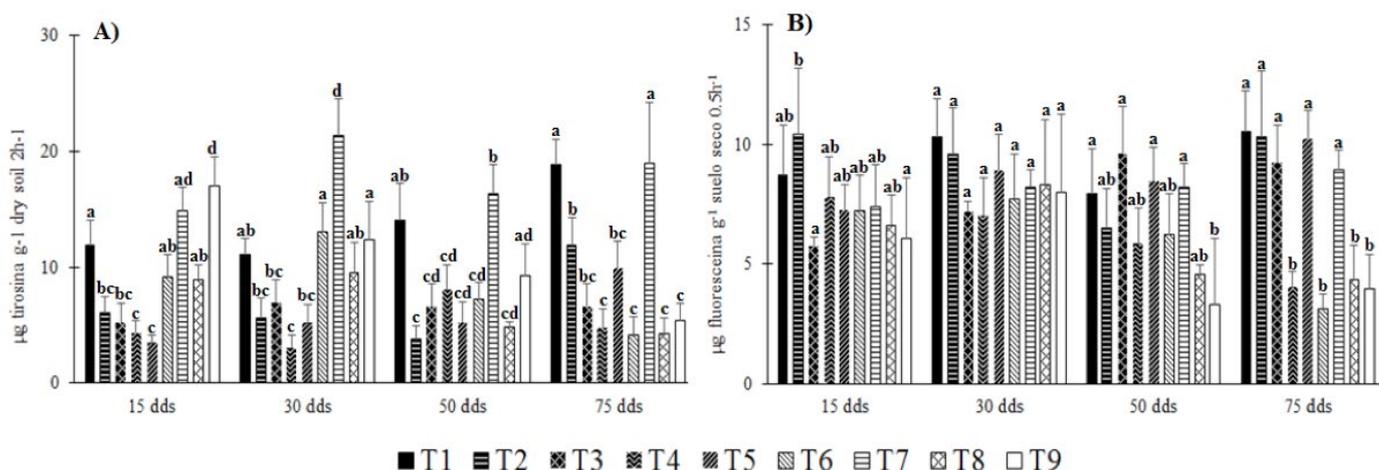


Figura 4. A) Actividad enzimática proteasa y B) Actividad FDA, de un suelo sódico cultivado con *Zea mays* y tratado con abono verde de *Prosopis juliflora*, vermicompost y azufre elemental. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$) en cada momento de muestreo.

3.3. Efecto de enmiendas orgánicas y azufre elemental sobre las variables de desarrollo del cultivo maíz

Todas las variables de desarrollo mostraron respuesta a los tratamientos, siendo las aplicaciones de S° mezclado con enmiendas orgánicas los que presentaron los mayores porcentajes de respuesta (Figura 5), hallándose que la variable longitud aumentó hasta un 42,3%, el peso fresco 46,8% y por último para el diámetro de tallo 13,4% con respecto al control.

Dado que en los suelos afectados por sales la alta concentración de iones tóxicos y el pH alcalino son los principales factores que dificultan el establecimiento y crecimiento de los cultivos en estos suelos (Fageria et al. 2011; Karimizarchi et al. 2014), generalmente se cultivan en estos suelos plantas resistentes a dichas condiciones. A pesar que el maíz es un cultivo moderadamente sensible al estrés por sales, este

presenta ciertas estrategias fisiológicas que le permiten crecer en condiciones sódicas a costa de reducir su desarrollo y producción, como son la producción de antioxidantes, regulación estomatal, ajustes osmóticos, exclusión vacuolar de los iones tóxicos (Dias et al. 2004; Farooq et al. 2015), las cuales demandan una alta inversión energética, por lo que la reducción de las condiciones sódicas del suelo, concentración de sodio y el pH del suelo en suelos cultivados con maíz han demostrado, al igual que en este estudio, que se aumenta el desarrollo y producción de las plantas debido a la reducción de las condiciones de estrés y aumento en la disponibilidad de nutrientes (Karimizarchi et al. 2014).

La mayor respuesta en el desarrollo de las plantas de maíz se presentó en los tratamientos (T6, T8 y T9) donde se mezcló el S° con materia orgánica (Figura 5), similar a lo observado por Karimizarchi et al. (2014) en plantas de maíz cultivadas en un suelo alcalino con varias do-

sis de S°, encontrando que aquellos tratamientos donde la oxidación del azufre fue mayor la biomasa seca de las plantas de maíz aumento hasta un 45,06%, acompañado además de aumento en la concentración de micronutrientes. Por otro lado, Oo et al. (2013) encontraron que, en suelos sódicos enmendados con enmiendas orgánicas y fertilizantes NPK, la biomasa seca de las plantas de maíz fue mayor en aquellos tratamientos que presentaron los mayores valores de BMS, cationes y menores valores de CE al final del experimento, de igual manera como fue observado en este estudio.

Los tratamientos basados solo en enmiendas orgánicas (T3, T5 y T7) no aumentaron de forma significativa ($p < 0,05$) los parámetros de creci-

miento del maíz (Figura 5), lo cual puede deberse a que en suelos sódicos, la interferencia del sodio en la absorción y transporte de cationes constituye el principal problema nutricional en el cultivo de maíz (Farooq et al. 2015), por lo que el aumento en la disponibilidad de cationes y la capacidad de intercambio catiónico del suelo contribuyen a disminuir el efecto toxico del sodio, lo cual se ve reflejado en mayor altura y ganancias de biomasa por parte de las plantas. Esto concuerda con lo observado por Oo et al. (2013) en plantas de maíz cultivadas en suelos salinos manejados con enmiendas orgánicas, donde los mayores valores de longitud de tallo y peso fresco de las plantas se encontraron en los tratamientos donde la CICE y la concentración de cationes aumentaron.

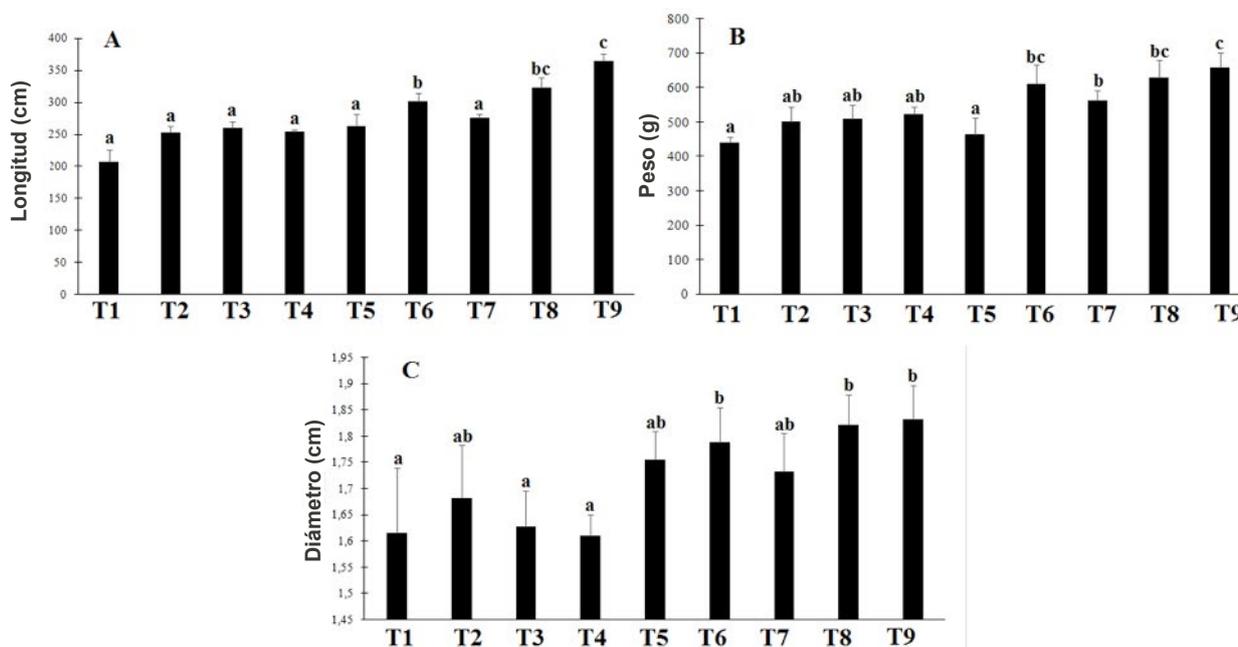


Figura 5. Variables de desarrollo del cultivo de *Zea mays* de un suelo sódico tratado con dos abonos orgánicos (abono verde de *Prosopis juliflora* y vermicompost) y azufre elemental. A) Longitud plantas, B) Peso plantas, y C) Diámetro tallo plantas. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

4. Discusión

4.1. Propiedades fisicoquímicas

La acidificación de la rizosfera en todos los tratamientos se debe a la capacidad de las raíces

de maíz de excretar ácidos orgánicos e hidrogeniones en condiciones salinas o sódicas (Zidan et al. 1990), lo cual conlleva que el pH rizosférico sea menor que el del suelo circundante. Aun así, los menores valores de pH rizosférico en los tratamientos con S° indican que gran parte del azufre fue oxidado a sulfato, donde dicha

oxidación fue más rápida cuando el S⁰ se mezcló con enmiendas orgánicas, en comparación a cuando fue aplicado solo. Por otro lado, si bien en la literatura se menciona que aplicaciones de enmiendas orgánicas pueden disminuir significativamente el pH de los suelos sódicos (Mogollon et al. 2011; Singh et al. 2014), esta capacidad de reducción pudo verse interferida por la presencia de carbonatos y bicarbonatos, dado que en suelos con altas concentraciones de carbonatos aplicaciones de materia orgánica no tuvieron efecto significativo sobre el pH del suelo en comparación a la aplicación de S⁰ (Hashemimajd et al. 2012).

Los mayores valores de CE, Ca⁺² y Mg⁺² en los tratamientos con S⁰ (Tabla 1) se deben al aumento de Ca⁺² y Mg⁺² por la disolución de minerales y el reemplazo del Na⁺ por cationes (Araujo et al. 2015), lo cual aumenta la concentración de cationes en la solución del suelo. No se encontraron diferencias significativas en los tratamientos en los que se aplicaron enmiendas orgánicas para la CE, lo que coincide con varios trabajos en donde se establece que aplicaciones de materias orgánicas contribuyen a disminuir o mantener la CE de los suelos sódicos o salinos, debido al aumento de la lixiviación de las sales (Oo et al. 2013).

Los mayores valores de CICE para los tratamientos de enmiendas orgánicas con S⁰ pudo deberse al efecto desnaturalizador del ácido sulfúrico sobre la celulosa y la lignina, lo cual mejora la capacidad de adsorción de metales divalentes de materiales lignocelulolíticos por aumento de la superficie de contacto de los grupos carboxílicos (Sinha et al. 2013).

4.2. Propiedades biológicas

El mantenimiento de los valores de RMS durante los primeros 30 días en todos los tratamientos puede deberse al efecto inhibitorio de la rizosfera del maíz sobre ciertas poblaciones de microorganismos de estrategia r, por la secreción de carbohidratos a concentraciones bajas y constantes con el fin de estimular el desarrollo de microorganismos especialistas (Fontaine et al. 2003), los cuales presentan baja tasa de RMS, pero mayor de BMS. El aumento en general de la RMS en todos los tratamientos después de 30

días puede deberse a la disminución del efecto modulador de la rizosfera sobre la microbiota del suelo, pues al ir envejeciendo las plantas disminuye la excreción de carbohidratos (Fu et al. 2002) y las raíces de estas pueden ser utilizadas por microorganismos descomponedores.

La tendencia a disminuir la actividad fosfatasa en todos los tratamientos pudo ocurrir como respuesta al aumento de la concentración de fósforo disponible debido a la inhibición competitiva de las fosfatasas por los iones fosfatos (Nannipieri et al. 2011). La menor actividad en los tratamientos con S⁰ puede deberse directamente a la capacidad del S⁰ de inhibir ciertas poblaciones de microorganismos (Gupta et al. 1988) o indirectamente debido a que la oxidación del S⁰ en suelos sódicos y alcalinos aumenta la concentración de fosfatos (Araujo et al. 2015). De igual manera, los tratamientos con GM presentaron bajos valores de actividad fosfatasa alcalina (Figura 3A), debido a la capacidad de este tipo de enmienda de bajar el pH del suelo y aumentar la concentración de fósforo soluble en suelos sódicos (Vallejo et al. 2012; Singh et al. 2014). Por otra parte, se observó que para T9 a los 75 días la actividad de las fosfatasas aumentó de forma significativa a pesar de contar con S⁰, indicando que en T9 ocurrió inmovilización del fósforo, probablemente en la biomasa microbiana (Saha et al. 2008), dado que para el mismo periodo se presentaron los mayores valores de BMS.

Dada la menor actividad proteolítica en los tratamientos orgánicos, es probable que, para los tratamientos con GM de plantas de *Prosopis juliflora* que crecían en suelo sódico, estas presentaran alto contenido de polifenoles y compuestos antioxidantes, con capacidad de disminuir la actividad enzimática de los suelos (Mukhopadhyay & Joy 2010). Incluso al ser sometidos a pH ácidos, como los tratamientos con S⁰, el contenido de fenoles y polifenoles pudo aumentar (Sarasvati et al. 2014) a niveles que pueden inhibir el crecimiento o funcionamiento de organismos descomponedores al formar complejos y enlaces con ciertas enzimas microbianas (Reyes-Reyes et al. 2003). Por otra parte, el control y T7 fueron los únicos tratamientos que presentaron tendencia a aumentar la actividad proteolítica en el tiempo (Figura 4A), lo cual puede deberse al aumento en la disponibilidad de sustrato orgánico, provenientes de raíces y material vegetal del

cultivo de maíz, además que T7 corresponde al tratamiento con mayor cantidad de C aplicado sin S°, por lo que la relación C/N pudo haber sido la más alta entre los tratamientos, lo que favorece la actividad proteolítica en suelos enmendados con enmiendas vegetales (Geisseler & Horwath 2009). La mayor actividad FDA en los tratamientos control y T2 es probable que se deba a que presentaron valores de pH rizosférico cercanos a la neutralidad, mientras que los tratamientos con S°, de menor actividad FDA, presentaron valores ácidos de pH que disminuyen el potencial de hidrolizar FDA de los suelos. Esto es debido a que, al igual que las proteasas, muchas enzimas hidrolíticas de suelos alcalinos presentan especificidad al pH, por lo que los grupos ionizables de las enzimas se ven afectados (Turner 2010). En la literatura también se ha descrito que aplicaciones de enmiendas orgánicas presentan aumentos significativos de la FDA (Silva et al. 2015), lo cual no fue observado en el transcurso del ensayo; lo anterior pudo deberse a que las enmiendas orgánicas utilizadas contuvieran baja concentración de sustratos orgánicos solubles, dado que el VERM corresponde a materia orgánica estabilizada con alto contenido de compuestos recalcitrantes, mientras que la GM puede poseer compuestos fenólicos que inhiben a corto plazo el crecimiento de ciertos grupos microbianos, por lo que la degradación de compuestos recalcitrantes, como ligninas y celulosas, aumenta la actividad heterotrófica en el suelo (Fontaine et al. 2003).

5. Conclusiones

La aplicación de S° mezclado con enmiendas orgánicas influyó de forma significativa en las propiedades biológicas y fisicoquímicas de un suelo sódico cultivado con maíz. En general, la aplicación de S° disminuyó la actividad enzimática del suelo y la RMS, lo cual podría atribuirse a la inhibición de ciertas comunidades de microorganismos descomponedores. Por el contrario, la aplicación de enmiendas orgánicas sin S° aumentó la RMS y la actividad hidrolítica, lo cual podría impedir la acumulación de carbono orgánico en el tiempo. Por otro lado, la aplicación

de S°, además de acidificar la rizosfera, tuvo un efecto positivo en la concentración de cationes solubles y la CICE del suelo, lo cual podría contribuir a la lixiviación y el reemplazo de iones sodio de los sitios de intercambio. Lo anterior sugiere que las aplicaciones orgánicominales con S° podrían ayudar a la reducción de las condiciones sódicas y al establecimiento de cultivos en suelos afectados por sodio.

6. Agradecimientos

Al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS) por la financiación de este proyecto a través del programa Jóvenes Investigadores 2016 y a la empresa Fertilizantes SAS por facilitar el lugar de muestreo, insumos y maquinaria necesaria para la realización del proyecto.

REFERENCIAS

- Adam G, Duncan H. 2001. Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils. *Soil Biol Biochem.* 33:943-951.
- Aguilera M, Reina Y, Orozco A, Yabrudy J, Barcos R. 2013. Composición de la economía de la región caribe de Colombia. *Ens Econ Reg-ESEER-* 53:1-66.
- Alef K, Nannipieri P. 1995. *Methods in applied soil microbiology and biochemistry.* London: Academic Press.
- Ali U, Sajid N, Khalid A, Riaz L, Rabbani M, Syed JH, Malik R. 2015. A review on vermicomposting of organic wastes. *Envir Prog Sust Energy* 34(4):1050-1062.
- Amini S, Ghadiri H, Chen C, Marschner P. 2015. Salt-affected soils, reclamation, carbon dynamics, and biochar: a review. *J Soils Sedim.* 16(3):939-953.

- Araujo JL, Severo P, Lucena F, Veriato R, Paiva K. 2015. Enxofre elemental ou sulfato de cálcio para remediação de solos salino-sódicos? *Pesq Agropec Trop.* 45(4):388-396.
- Caldwell B. 2005. Enzyme activities as a component of soil biodiversity: A review. *Pedobiologia* 49:637-644.
- Celis J, Sandoval M, Martínez B, Quezada C. 2013. Effect of organic and mineral amendments upon soil respiration and microbial biomass in a saline-sodic soil. *Cien Inv Agr.* 40(3):571-580.
- Dias A, Neto DA, Prisco JT, Enéas-filho J, Lacerda C. 2004. Effects of salt stress on plant growth, stomatal response and solute accumulation of different maize genotypes. *Braz J Plant Phys.* 16(1):31-38.
- Dinesh R, Suryanarayana M, Ghoshal S, Sheeja T. 2004. Long-term influence of leguminous cover crops on the biochemical properties of a sandy clay loam Fluventic Sulfaquent in a humid tropical region of India. *Soil Till Res.* 77(1):69-77.
- Eivazi F, Tabatabai M. 1977. Phosphatases in soils. *Soil Biol Bioch.* 9:167-172.
- Ellaiah P, Srinivasulu B, Adinarayana K. 2002. A review on microbial alkaline proteases. *J Sc Ind Res.* 61(9):690-704.
- Fageria NK, Gheyi HR, Moreira A. 2011. Nutrient bioavailability in salt affected soils. *J Plant Nutr.* 34(7):945-962.
- Farooq M, Hussain M, Wakeel A, Kadambot H, Farooq M, Hussain M, Wakeel A. 2015. Salt stress in maize: effects, resistance mechanisms, and management. A review. *Agron Sustain Dev.* 35(2):461-481.
- Fontaine S, Mariotti A, Abbadie L. 2003. The priming effect of organic matter: A question of microbial competition? *Soil Biol Bioch.* 35(6):837-843.
- Fu S, Cheng W, Susfalk R. 2002. Rhizosphere respiration varies with plant species and phenology: A greenhouse pot experiment. *Plant and Soil* 239(1):133-140.
- Garrido M, Martínez J, Martínez H, Granados R, Rendón R. 2017. Pequeños productores de maíz en el Caribe colombiano: Estudio de sus atributos y prácticas agrícolas. *Corpoica Cien Tecnol Agropec.* 18(1):7-23.
- Geisseler D, Horwath W. 2009. Relationship between carbon and nitrogen availability and extracellular enzyme activities in soil. *Pedobiologia* 53(1):87-98.
- Gharaibeh M, Eltaif N, Albalasmeh A. 2011. Reclamation of highly calcareous saline sodic soil using Atriplex Halimus and by product Gypsum. *Inter J Phytorem.* 13(9):873-883.
- Guerrero R. 1990. Fertilización de cultivos en clima medio. *Monómeros colombo venezolanos.* Bogotá D.C.: Monómeros Colombo Venezolanos.
- Gupta V, Lawrence J, Germida J. 1988. Impact of elemental sulfur fertilization on agricultural soils. I. Effects on microbial biomass and enzyme activities. *Can J Soil Sci.* 68:463-473.
- Gutiérrez C, Zúñiga O, Ospina-Salazar D. 2016. Effect of three biowastes on the productivity potential of a sodic soil. *Agro Colomb.* 34(2):250-259.
- Hashemimajd K, Farani T, Jamaati-e-Somarin S. 2012. Effect of elemental sulphur and compost on pH, electrical conductivity and phosphorus availability of one clay soil. *Afric J Biotech.* 11(6):1425-1432.
- Hernández-Araujo J, Gascó-Guerrero G, Mármol L, Bárcenas J, Polo V. 2013. Bioremediation of saline soils using organic materials. II. Leaching of salts. *Rev Fac Agr U Zulia* 30(4):481-503.
- Instituto Geografico Agustin Codazzi (IGAC). 2006. Métodos analíticos de laboratorio del suelo. Bogotá D.C.: IGAC.
- Jaggi R, Aulakh M, Sharma R. 1999. Temperature effects on soil organic sulphur mineralization and elemental sulphur oxidation in subtropical soils of varying pH. *Nutr Cyc Agr.* 54(2):175-182.
- Karimizarchi M, Aminuddin H, Khanif M, Radziah O. 2014. Elemental sulphur application effects on nutrient availability and sweet maize (*Zea mays* L.) response in a high pH soil of Malaysia. *Malay J Soil Sci.* 18:75-86.
- Ladd J, Butler J. 1972. Short-term assays of soil proteolytic enzyme activities using proteins and dipeptide derivatives as substrates. *Soil Biol Biochem.* 4:19-30.
- Mahmoodabadi M, Yazdanpanah N, Sinobas L, Pazira E, Neshat A. 2012. Reclamation of calcareous saline sodic soil with different amendments (I): Redistribution of soluble cations within the soil profile. *Agric Water Manag.* 120:30-38.
- Marschner P, Solaiman Z, Rengel Z. 2007. Brassica genotypes differ in growth, phosphorus uptake and rhizosphere properties under P-limiting conditions. *Soil Biol Bioch.* 39(1):87-98.
- Mogollón J, Tremont O, Rodríguez N. 2011. Efecto del uso de un vermicompost sobre las propiedades biológicas y químicas de suelos degradados por sales. *Venezuelos* 9(1-2):48-57.
- Mukhopadhyay S, Joy V. 2010. Influence of leaf litter types on microbial functions and nutrient status of soil: Ecological suitability of forest trees for afforestation in tropical laterite wastelands. *Soil Biol Bioch.* 42(12):2306-2315.
- Nannipieri P, Giagnoni L, Landi L, Renella G. 2011. Role of phosphatase enzymes in soil. In: Bünemann E, Oberson A, Frossard E, editors. *Phosphorus in action: biological processes in soil phosphorus cycling*, Volumen 26. Berlin: Springer. p. 215-244.

- Oo AN, Iwai CB, Saenjan P. 2013. Soil properties and maize growth in saline and nonsaline soils using cassava-industrial waste compost and vermicompost with or without earthworms. *Land Degr Dev.* 26(3):300-310.
- Pulido C. 2000. Distribución geográfica de sales solubles, sodio intercambiable y carbonato de calcio en la región del Caribe colombiano. *Suelos Ecuat.* 30(1):44-49.
- Qadir M, Oster JD. 2002. Vegetative bioremediation of calcareous sodic soils: History, mechanisms, and evaluation. *Irrig Sci.* 21:91-101.
- Reyes-Reyes B, Zamora-Villafranco E, Reyes-Reyes M, Trías-Hernández J, Olalde-Portugal V, Dendooven L. 2003. Decomposition of leaves of huisache (*Acacia tortuosa*) and mesquite (*Prosopis* spp.) in soil of the central highlands of Mexico. *Plant and Soil* 256:359-370.
- Saha S, Mina B, Gopinath K, Kundu S, Gupta H. 2008. Relative changes in phosphatase activities as influenced by source and application rate of organic composts in field crops. *Bior Tech.* 99(6):1750-1757.
- Sarasvati S, Sujata B, Amita S. 2014. Effects of fermentation on nutritional quality of *Prosopis juliflora* pods as alternative fish feed. *Res J Ani Vet Fish Sci.* 2(12):1-7.
- Silva N, Bitencourt A, Moura M, Costa V, Silva R, Rodrigues R, Ferreira A. 2015. Short-term effect of different green manure on soil chemical and biological properties. *Afric J Agric Res.* 10(43):4076-4081.
- Singh K. 2016. Microbial and enzyme activities of saline and sodic soils. *Land Degr Dev.* 27:706-718.
- Singh K, Singh B, Singh R. 2013. Effect of land rehabilitation on physicochemical and microbial properties of a sodic soil. *Catena* 109:49-57.
- Singh K, Trivedi P, Singh G, Singh B, Patra D. 2014. Effect of different leaf litters on carbon, nitrogen and microbial activities of sodic soils. *Land Degr Dev.* 27(4):1215-1226.
- Sinha R, Bhati M, Sumit M, Gupta V. 2013. Removal of Cr(VI) by *Prosopis cineraria* leaf powder-A green remediation. *Ind J Chem Tech.* 20(5):312-316.
- Soil Survey Staff. 2014. Keys to soil taxonomy. 12th edition. Washington DC: Natural Resources Conservation Service, USDA.
- Srivastava P, Gupta M, Singh N, Tewari S. 2014. Amelioration of sodic soil for wheat cultivation using bioaugmented organic soil amendment. *Land Degr Dev.* 27(4):1245-1254.
- Stamford N, Silva A, Freitas A, Araujo J. 2002. Effect of sulphur inoculated with *Thiobacillus* on soil salinity and growth of tropical tree legumes. *Bior Tech.* 81(1):53-59.
- Turner BL. 2010. Variation in pH optima of hydrolytic enzyme activities in tropical rain forest soils. *Appl Environ Microbiol.* 76:6485-6493.
- Vallejo V, Arbeli Z, Terán W, Lorenz N, Dick R, Roldán F. 2012. Effect of land management and *Prosopis juliflora* (Sw.) DC trees on soil microbial community and enzymatic activities in intensive silvopastoral systems of Colombia. *Agric Ecos Env.* 150:139-148.
- Wong V, Dalal R, Greene R. 2009. Carbon dynamics of sodic and saline soils following gypsum and organic material additions: A laboratory incubation. *App Soil Ecol.* 41(1):29-40.
- Wong V, Greene R, Dalal R, Murphy B. 2010. Soil carbon dynamics in saline and sodic soils: A review. *Soil Use and Manag.* 26(1):2-11.
- Yazdanpanah N, Pazira E, Neshat A, Mahmoodabadi M, Rodríguez L. 2012. Reclamation of calcareous saline sodic soil with different amendments (I): Redistribution of soluble cations within the soil profile. *Agric Wat Manag.* 120:30-38.
- Zidan I, Azaizeh H, Neumann P. 1990. Does salinity reduce growth in maize root epidermal-cells by inhibiting their capacity for cell-wall acidification. *Plant Phys.* 93:7-11.