

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**CARACTERIZACIÓN ECOPEDEOLÓGICA EN VERTISOLES BAJO
CUATRO SISTEMAS DE USO DE SUELO**

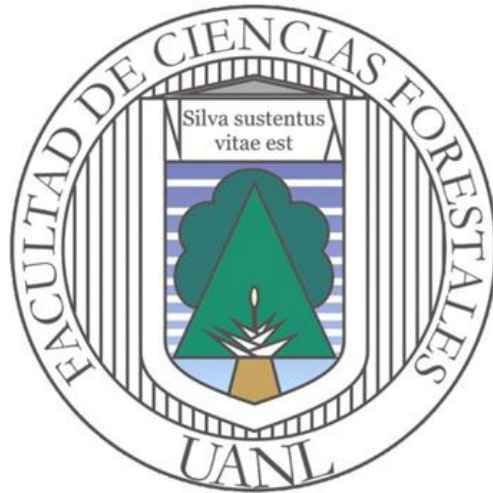
POR

M.C. MARÍA INÉS YÁÑEZ DÍAZ

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE
RECURSOS NATURALES**

DICIEMBRE, 2017

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO**



TESIS

**CARACTERIZACIÓN ECOPEDEOLÓGICA EN VERTISOLES BAJO
CUATRO SISTEMAS DE USO DE SUELO**

POR

M.C. MARÍA INÉS YÁÑEZ DÍAZ

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE
RECURSOS NATURALES**

LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO

DICIEMBRE, 2017

CARACTERIZACIÓN ECOPEDOLOGICA EN VERTISOLES BAJO CUATRO SISTEMAS DE USO DE SUELO

Aprobación de Tesis



Dr. Israel Cantú Silva
Director



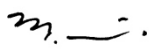
Dr. Humberto González Rodríguez
Co-director



Dr. José Guadalupe Marmolejo Monciváis
Asesor



Dr. Enrique Jurado
Asesor



Dr. Marco Vinicio Gómez Meza
Asesor Externo

Diciembre, 2017

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado. Al Centro de Investigación en Producción Agropecuaria (CIPA), UANL por las facilidades otorgadas para el desarrollo de esta investigación en las áreas agrícola y pastizal.

A la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, que por medio de su personal académico me han transmitido sus conocimientos durante mi preparación profesional desde que inicie mi carrera como Ingeniero Forestal.

Al Dr. Israel Cantú Silva, por su apoyo siempre y todos los consejos compartidos, su motivación, confianza y ser una parte fundamental para alcanzar mis metas, gracias Doc!

Al Dr. Humberto González Rodríguez, por su apoyo y sus valiosas aportaciones, sugerencias y la dedicación para buen término de la presente investigación.

Al Dr. José G. Marmolejo Monciváis, por su contribución, disponibilidad y apoyo en el trabajo que hemos realizado y en lo que aún nos falta por terminar.

Al Dr. Enrique Jurado, por formar parte de mi comité, su apoyo y motivación siempre.

Al Dr. Marco Vinicio Gómez Meza, por formar parte de esta investigación, por compartir sus conocimientos estadísticos y el tiempo dedicado a la misma.

A todos mis compañeros trabajadores de la Facultad de Ciencias Forestales, con quienes comparto el día a día, en esta nuestra segunda casa.

A todos mis amigos y compañeros del laboratorio de suelos, en donde compartimos no solo análisis y conocimientos, sino también las conversaciones en el café. Especialmente a Rodolfo Mtz por hacer esta tesis como su tesis y estar codo a codo siempre conmigo y por su sincera amistad. Gracias Rudy eres una persona valiosa.

Y a todos los que siempre estaban dispuestos a ayudarme en mis muestreos, a mis amigos; Gris, Jezz, Alonso, Rebeca, Silvia, Karla, Yahaira y demás que sin querer se me pasan, muchas gracias por no abandonarme en el camino.

DEDICATORIA

Con todo mi amor para lo más valioso que tengo

Mi Familia

Mi esposo, Cristóbal Mtz por su gran amor, comprensión y fuerza para superar los obstáculos juntos

Mis hijos, Cristóbal Noé y Oscar Alejandro que son mi mayor impulso cada día

Juntos formamos una familia única, cada uno viviendo la vida sin ser perfectos pero perfectos para nosotros.

*"Volaré como el viento...
sin dejar una señal,
y cuando el día comience...
volveré a volar"*

Megan Maxwell

ÍNDICE

ÍNDICE.....	i
ÍNDICE DE TABLAS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
RESUMEN.....	ix
SUMMARY.....	xi
INTRODUCCIÓN	1
JUSTIFICACIÓN.....	3
HIPÓTESIS.....	4
OBJETIVO.....	4
Objetivo general	4
Objetivos particulares.....	4
ESTRUCTURA DE TESIS	5
CAPÍTULO I. RESPIRACIÓN DEL SUELO EN CUATRO SISTEMAS DE USO DE LA TIERRA	6
Resumen.....	7
Summary.....	8
1. Introducción.....	9
2. Materiales y métodos	11
2.1 Área de estudio.....	11
2.2 Parcelas experimentales.....	13
2.3 Mediciones del flujo del CO ₂ , temperatura y humedad del suelo.....	14
2.4 Condiciones ambientales.....	16

2.5 Análisis estadísticos.....	17
3. Resultados	18
3.1 Respiración de suelo	18
3.2 Relaciones entre la Rs y variables ambientales	22
4. Discusión.....	27
CAPÍTULO II. EFECTO DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DE UN VERTISOL.....	30
Resumen	30
Summary	32
1. Introducción.....	34
2. Materiales y métodos	38
2.1 Área de estudio.....	38
2.2 Sistemas de uso del suelo	38
2.3 Muestreo.....	39
2.4 Caracterización de suelo	40
2.5 Análisis estadísticos.....	43
3. Resultados	44
3.1 Efectos en las variables químicas por cambio de uso de suelo.....	44
3.2 Correlación de las variables químicas	54
4. Discusión.....	57
CAPÍTULO III. PROPIEDADES HIDROEDÁFICAS EN VERTISOL BAJO DIFERENTES SISTEMAS DE USO DE SUELO	61
Resumen.....	61
Summary.....	63
1. Introducción.....	64

2. Materiales y métodos	67
2.1 Área de estudio.....	67
2.2 Sistemas de uso de suelo.....	67
2.3 Muestreo de suelo y análisis.....	68
2.4 Análisis estadísticos.....	75
3. Resultados	77
3.1 Efectos sobre las propiedades físicas e hidroedáficas	77
3.2 Efectos sobre la textura y agua disponible	85
3.3 Correlación de las propiedades hidroedáficas	88
4. Discusión.....	89
CONCLUSIONES	93
BIBLIOGRAFÍA.....	96

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I

Tabla 1. Propiedades químicas y físicas de los vertisoles (0-30 cm) para cada sistema de uso de suelo.	11
Tabla 2. Análisis de varianza para la respiración, humedad y temperatura del suelo para el modelo con dos criterios de clasificación (Uso de suelo y hora de muestreo) y el contraste de Levene. Valores entre paréntesis muestra el valor p ($p \leq 0.05$).	18
Tabla 3. ANOVA de la respiración del suelo por uso de suelo (U), hora de muestreo (H) y su interacción por fecha de muestreo.	21
Tabla 4. Coeficiente de correlación Spearman, valores de Rho entre la respiración de suelo de los diferentes usos de suelo en muestreos de mañana y tarde en relación a las variables ambientales (n=52).	23

CAPÍTULO II

Tabla 1. Análisis de varianza para las variables de pH, materia orgánica (MO), carbono orgánico del suelo (COS), nitrógeno total (Nt), fósforo (P), potasio (K), magnesio (Mg), sodio (Na), hierro (Fe), manganeso (Mn) y zinc (Zn).	44
Tabla 2. Pruebas de comparación de medias de propiedades químicas en los usos de suelo estudiados para la profundidad 0-5 cm.	46
Tabla 3. Pruebas de comparación de medias de propiedades químicas en los usos de suelo estudiados para la profundidad 5-30 cm.	47
Tabla 4. Valoración de variables analizadas, para los cuatro sitios de estudio y en las dos profundidades.	50
Tabla 5. Pérdidas de COS y Nt (%) en las profundidades de 0-5 y 5-30 cm por efecto del cambio de uso del suelo con relación al Matorral.	51
Tabla 6. Valores medios \pm desviación estándar para CE, calcio (Ca), cobre (Cu) y capacidad de intercambio catiónico (CIC).	53

Tabla 7. Valores de H de Kruskal-Wallis para las variables de conductividad eléctrica (CE), calcio (Ca), cobre (Cu) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) para las dos profundidades estudiadas..... 53

Tabla 8. Coeficientes de correlación de Spearman para las variables estudiadas (n=16) para la profundidad 0-5 cm. Valores en negritas indican significancia de p bilateral (ˆ) $p \leq 0.05$ y (**) $p \leq 0.01$ 55

Tabla 9. Coeficientes de correlación de Spearman para las variables estudiadas (n=16) para la profundidad 5-30 cm. Valores en negritas indican significancia de p bilateral (ˆ) $p \leq 0.05$ y (**) $p \leq 0.01$ 56

CAPÍTULO III

Tabla 1. Resultados del análisis de varianza para el modelo con dos criterios de clasificación (uso de suelo ^a y estación ^b) y contracte de Levene^c..... 77

Tabla 2. Valores medios de infiltración (I) y contenido de humedad del suelo (θ) durante las pruebas de I para los cuatro sistemas de uso de suelo en cada estación estudiada. 83

Tabla 3. Valores medios del agua disponible y textura para las dos profundidades de estudio (0-5 y 5-30 cm) en los cuatro sistemas de uso de suelo. 86

Tabla 4. Coeficientes de correlación de Spearman (Rho) para las propiedades hidroedáficas estudiadas. 88

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1. Ubicación del área de estudio.....	12
Figura 2. Sistemas de uso de suelo; a) Matorral Espinoso Tamaulipeco, b) pastizal, c) área agrícola y d) plantación de <i>Eucalyptus</i> spp.	13
Figura 3. Analizador portable EGM-4.....	15
Figura 4. Cámara SCR-1 y sensor de temperatura STP-1 (izquierda), Medición de la respiración del suelo (derecha).....	15
Figura 5. Colecta de muestras de suelo para determinación de humedad por el método gravimétrico (izquierda), secado de muestras a 105°C en estufa (derecha).	16
Figura 6. Diagrama climático con valores mensuales de temperatura ambiente del aire (°C) y precipitación (mm) para el sitio de estudio, de marzo 2015 a marzo 2016.....	16
Figura 7. Valores medios (n=52) de respiración de suelo ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) para mañana y tarde en los cuatro usos de suelo con barras de error estándar. Barras con letra diferentes en una misma hora de muestreo, difieren significativamente a $p \leq 0.05$	19
Figura 8. Flujo de CO_2 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) para muestreo de mañana durante el periodo de estudio para los cuatro usos de suelo.....	20
Figura 9. Flujo de CO_2 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) para muestreo de tarde, durante el periodo de estudio para los cuatro usos de suelo.....	20
Figura 10. Temperatura del suelo (°C) para muestreo de mañana (a) y tarde (b), durante el periodo de estudio para los cuatro usos de suelo.....	24
Figura 11. Contenido de agua del suelo (%) para muestreo de mañana (a) y tarde (b), durante el periodo de estudio para los cuatro usos de suelo.	25
Figura 12. Distribución de la precipitación y flujos de CO_2 promedio de los cuatro usos de suelo durante el periodo de estudio.	26

CAPÍTULO II

Figura 1. Localización del área de estudio.....	40
Figura 2. Preparación de extractos para medición de fósforo (izquierda) colorimetría en equipo de espectrofotómetro ultravioleta.	42
Figura 3. Espectrofotómetro de Absorción Atómica (EAA) para medición de macros y micronutrientes y la capacidad de intercambio catiónico.....	43
Figura 4. Valores medios del contenido de materia orgánica del suelo (%) en las profundidades 0-5 y 5-30 cm para los cuatro uso de suelo. Medias con distinta letra en una misma profundidad son estadísticamente diferentes (Tukey $p\leq 0.05$).....	48
Figura 5. Valores medios del contenido de carbono orgánico del suelo (%) en las profundidades 0-5 y 5-30 cm para los cuatro usos de suelo. Medias con distinta letra en una misma profundidad son estadísticamente diferentes (Tukey $p\leq 0.05$).....	48
Figura 6. Valores medios del contenido de Nitrógeno total del suelo (%) en las profundidades 0-5 y 5-30 cm para los cuatro usos de suelo. Medias con distinta letra en una misma profundidad son estadísticamente diferentes (Tukey $p\leq 0.05$).....	49
Figura 7. Valores medios de la relación C/N en las profundidades 0-5 y 5-30 cm para los cuatro usos de suelo. Medias con distinta letra en una misma profundidad son estadísticamente diferentes (Tukey $p\leq 0.05$).	51

CAPÍTULO III

Figura 1. Localización del área de estudio.....	68
Figura 2. Ollas de presión para la obtención de muestras a diferentes presiones.	71
Figura 3. Colecta de muestras inalteradas para medición de permeabilidad....	72
Figura 4. Muestras a saturación (izquierda) y medición de la diferencia del tiempo de permeabilidad (derecha).	72

Figura 5. Esquematización del proceso de medición de permeabilidad (Sánchez, 2015).....	72
Figura 6. Colecta de muestra para densidad aparente por el método del cilindro	73
Figura 7. Penetrómetro tipo Yamanaka	74
Figura 8. Infiltrómetro de doble anillo.....	75
Figura 9. Valores medios de conductividad hidráulica (K_s) por estación para los cuatro usos de suelo. Medias con letras diferentes en la misma estación son diferentes estadísticamente (Tukey $p \leq 0.05$).	78
Figura 10. Valores medios de densidad aparente (DA) para cada sistema de uso de suelo ($n=12$). Medias con letras diferentes indican diferencias estadísticas (Tukey $p \leq 0.05$).	79
Figura 11. Valores medios de porosidad total (P) para cada sistema de uso de suelo ($n=12$). Medias con letras diferentes indican diferencias estadísticas (Tukey $p \leq 0.05$).	80
Figura 12. Valores medios de resistencia mecánica a la penetración (RMP) para cada sistema de uso de suelo ($n=12$). Medias con letras diferentes indican diferencias estadísticas (Tukey $p \leq 0.05$).	81
Figura 13. Curvas de infiltración promedio para los cuatro sistemas de uso de suelo en la estación de verano.	83
Figura 14. Curvas de infiltración promedio para los cuatro sistemas de uso de suelo en la estación de otoño.	84
Figura 15. Curvas de infiltración promedio para los cuatro sistemas de uso de suelo en la estación de invierno.....	84
Figura 16. Curvas de infiltración promedio para los cuatro sistemas de uso de suelo en la estación de primavera.	85
Figura 17. Curva de retención de humedad para los cuatro sistemas de uso de suelo en la profundidad 0-5 cm (a) y 5-30 cm (b).	87

RESUMEN

El suelo es un importante compartimiento dentro del ciclo global del carbono, que puede actuar como fuente o reservorio de carbono hacia la atmósfera, dependiendo del uso que se le asigne. Los cambios en el uso del suelo pueden provocar variaciones en las características físicas, químicas y biológicas del mismo, de esta manera con la finalidad de estudiar la función ecológica de un mismo tipo de suelo bajo distintos sistemas de uso, se realizaron mediciones del flujo del CO₂, y se analizaron las propiedades físico, químicas e hidroedáficas bajo cuatro sistemas de uso; Matorral espinoso tamaulipeco considerado como la vegetación natural y sistemas de pastizal, cultivo agrícola y una plantación de *Eucalyptus* spp. La investigación se llevó a cabo dentro del campus de la Facultad de Ciencias Forestales y del Centro de Investigación en Producción Agropecuaria, de la UANL, donde predominan los suelos vertisoles. Las variables analizadas para las propiedades químicas fueron pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO), carbono orgánico del suelo (COS), nitrógeno total (Nt), macronutrientes (N, P, K, Mg, Ca, Na), micronutrientes (Fe, Mn, Cu, Zn) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC). Dentro de las propiedades físicas se determinó la textura, densidad aparente (DA), porosidad y la resistencia mecánica a la penetración (RMP). Mientras que la evaluación hidroedáficas consistió en mediciones de infiltración, conductividad hidráulica (Ks) y la curva de retención de humedad (CRH). La finalidad de la caracterización eco pedológica de vertisoles es evaluar si los cambios de uso de suelo modifican la respiración del suelo y provocar cambios que conlleven a una degradación del mismo. Los vertisoles son considerados los suelos más productivos del país, los cuales son modificados para el sostenimiento de actividades necesarias para el desarrollo económico regional. Los resultados demostraron una disminución de la respiración del suelo (RS) en muestreo de mañana de 6.71 a 3.21 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en el orden matorral>pastizal>plantación>agrícola, incrementando los valores durante la tarde. En relación a los contenidos de COS y Nt, se encontró una misma

relación a los valores de RS, siendo mayores en el matorral. Los nutrientes presentaron diferencias entre los sistemas de uso de suelo excepto para P y K, mejorando estos contenidos para el pastizal. Sin embargo, en las propiedades hidroedáficas, el pastizal presentó valores mayores para DA, Ks y RMP, presentando una compactación debido al pisoteo del ganado que hace que el vertisol disminuya su tasa de infiltración, mientras que el área agrícola mejoró estas propiedades debido a la labranza mínima y aplicación de residuos de cosecha. Por lo que los vertisoles aun a su fertilidad inherente, al realizar cambios en el uso de suelo, se modifica las propiedades fisicoquímicas, hidroedáficas y de actividad biológica.

SUMMARY

Soil is an important compartment within the global carbon cycle, which can act as a source or reservoir of carbon into the atmosphere, depending on its use. Changes in soil use can lead to variations in the physical, chemical and biological characteristics of the soil. In order to study the ecological function of the same type of soil under different systems of land use, measurements of soil CO₂ efflux, physical, chemical and hydro-edaphic properties of a vertisol under four land use; thornscrub considered as natural vegetation, grassland, agriculture crop and a plantation of *Eucalyptus* spp. The research was carried out inside the campus of the Faculty of Forestry Sciences and the Center for Research in Agricultural Production, UANL, where vertisols soils predominate. The variables analyzed for chemical properties were pH, organic conductivity (EC), soil organic matter (SOM), soil organic carbon (SOC), total nitrogen (Nt) macronutrients (N, P, K, Mg, Ca, Na), micronutrients (Fe, Mn, Cu, Zn) and the cation exchange capacity (CEC). Within the physical properties were determined the texture, bulk density (BD), porosity and mechanical resistance to penetration (MRP). While the hydroedaphic evaluation consisted of measurements of infiltration capacity, hydraulic conductivity (Ks) and moisture retention curve (CRH). The purpose of the ecopedological characterization of vertisols is to evaluate if changes in land use modify soil respiration and cause changes that lead to soil degradation. Vertisols are considered the most productive soils of the country, which are modified to support activities necessary for regional economic development. Our results showed an average reduction of soil respiration (RS) in morning sampling from 6.71 to 3.21 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ in the order of the thornscrub > grassland > plantation > agriculture, increasing the values in the afternoon. In relation to the contents of SOC and Nt, were found one same relation to values of RS, being greater in the thornscrub. The nutrients presented differences between the systems of use of soil except for P and K, improving these contents for the grassland. However, in the hydroedaphic properties, the grassland showed higher BD, Ks and MRP contents, presenting a compaction due to trampling of the cattle that causes the vertisol to decrease

their rate of infiltration, while the agricultural area improved these properties due to the tillage minimum and application of crop residues. As far as the vertisols even to their inherent fertility, when making changes in the use of soil, modifies the physicochemical, hydroedaphic and biological activity properties.

INTRODUCCIÓN

Los suelos son productos de la interacción de factores siendo el material original, clima, topografía, tiempo y organismos, quienes interactúan de manera interdependientes. El suelo es el elemento fundamental y definitorio de los ecosistemas terrestres (de la Peña, 2009), considerados pieza clave en el soporte de todos los ecosistemas terrestres, siendo determinado por su funcionamiento y productividad (Cotler, 2003).

La ecología del suelo es el estudio de las interacciones entre organismos del suelo y los aspectos bióticos y abióticos del ambiente del suelo (Coleman, 2014). La función ecológica del suelo en los ecosistemas o ecopedología incluye no solo las propiedades fisicoquímicas y biológicas dentro del suelo, sino que además involucra los procesos que ocurren en el ambiente externo, se habla de una visión ecológica del sistema-suelo en vez de simplemente suelo, a la hora de referirse a algo que se cultiva, se pastorea o se utiliza de otras manera (de la Rosa, 2008).

El suelo es considerado un reservorio importante de carbono, que funciona como fuente y sumidero del CO₂ atmosférico jugando un papel fundamental en el cambio climático global (Llorente, 2004). Ordoñez & Masera (2001) mencionan que el dióxido de carbono (CO₂) es uno de los gases de efecto de invernadero (GEI) más importantes y que su emisión a la atmósfera por el cambio en el uso del suelo ocupa el segundo lugar a nivel mundial. La mayoría del carbono ingresa a los ecosistemas vía fotosíntesis. El carbono almacenado en los suelos es casi tres veces mayor que en la biomasa aérea y aproximadamente el doble que en la atmósfera (Eswaran, Van Den Berg, & Reich, 1993).

El flujo del CO₂ es un importante componente del ciclo del carbono y es considerado el segundo mayor flujo de carbono entre la tierra y la atmósfera (Cantú, González, & Gómez, 2010; Srivastava, Sharma, & Kudrat, 2012). Su producción es resultado de procesos biológicos como la respiración de raíces y

de los organismos del suelo, así como la descomposición de la materia orgánica (Millard, Midwood, Hunt, Whitehead, & Boutton, 2008) y en menor medida, de la oxidación química de los compuestos de carbono (Lloyd & Taylor, 1994).

El cambio de uso de suelo puede alterar radicalmente la cubierta vegetal aún en lapsos de tiempo breves, provocando alteraciones en las propiedades físicas, químicas y microbianas del suelo, los aportes continuos de materia orgánica en forma de mantillo reducen la densidad aparente y la erosión, incrementa la fertilidad, la tasa de infiltración y retención de agua, manteniendo la biomasa vegetal (Huang et al., 2006; Jia, Shao, Wei, Horton, & Li, 2011).

De acuerdo con el INEGI, México posee 26 de los 32 grupos de suelos reconocidos por el Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo, donde el suelo vertisol engloba el 8.6% de la superficie nacional (SEMARNAT, 2016). Los vertisoles son de gran importancia en la zona del noreste de México y particularmente en la región de Linares, N.L., ya que ocupan la mayor parte de la superficie sujeta a actividades productivas agrícolas o pecuarias, y sustentan la mayor parte de la vegetación nativa de importancia económica regional (Llorente, 2004). El nombre vertisoles (del latín *vertere*, dar vuelta) se refiere al reciclado interno constante del material de suelo (IUSS, 2007), son suelos arcillosos, profundos, de color oscuro, (Woerner, 1991). Contienen una gran cantidad de minerales expansivos de arcillas que causa expansión, contracción y pegajosidad, presentando una baja conductividad hidráulica y estructura pobre, presentan grietas de corte profundo en estado seco y pegajoso en estado húmedo, aunque su uso es limitado debido a estas características, es utilizado en la agricultura debido a su alta fertilidad de nutrientes naturales (Lu, Sun, & Zong, 2014).

Desde el punto de vista de la ecopedología, este trabajo de investigación pretende determinar la dinámica del flujo del CO₂ y relacionarlo con las propiedades físico-químicas y biológicas en un mismo tipo de suelo (vertisol) bajo cuatro sistemas de usos de suelo.

JUSTIFICACIÓN

El suelo es una parte fundamental del funcionamiento de los ecosistemas, en las últimas décadas, el cambio de uso de suelo ha alterado procesos y ciclos naturales que pueden llevar a problemas ambientales a escales locales y globales. Aun así, los cambios de uso de suelo son esenciales para el desarrollo económico y social. La degradación del suelo conlleva a una pérdida de la calidad de los servicios ambientales como captación de agua, biodiversidad, pérdida de la función productiva, disminución de la fertilidad y pérdidas de carbono almacenado en el suelo, resultando en una emisión de gases de efecto de invernadero a la atmósfera. La degradación de los suelos es ocasionada por actividades humanas de diversa índole, siendo las más importantes los cambios de uso de suelo asociadas a la agricultura mecanizada, sobrepastoreo y el desarrollo urbano e industrial (SEMARNAT, 2016). Las emisiones de carbono derivadas de los cambios de uso de suelo representan la segunda mayor fuente antropogénica de carbono a la atmósfera y conduce a una pérdida de carbono en el suelos, además de que estudios mencionan que los cambios en el uso del suelo provocan variaciones en las características físicas y químicas del mismo. Por lo que esta investigación va referida a evaluar bajo diferentes sistemas de uso de suelo, el flujo de CO₂ del suelo a la atmósfera en suelo vertisol y evaluar si están determinadas por los cambios producidos en las características físicas, químicas y biológicas debido a cambios de uso de suelo.

HIPÓTESIS

El Matorral Espinoso Tamaulipeco presenta diferencias en las características ecopedológicas en relación con distintos sistemas de uso en un suelo vertisol.

OBJETIVO

Objetivo general

Evaluar los parámetros físico-químicos, biológicos e hidroedafológicos de un vertisol bajo cuatro formas de uso de suelo, haciendo énfasis en el flujo del CO₂.

Objetivos particulares

1. Evaluar las emisiones de CO₂ en los cuatro usos del suelo, mediante la respiración de suelo.
2. Caracterizar químicamente un suelo vertisol sometido a cuatro sistemas de uso de suelo.
3. Evaluar las características físicas e hidroedafológicas del vertisol en cada sistema de uso del suelo.

ESTRUCTURA DE TESIS

La presente investigación se encuentra estructurada en capítulos para cumplir con cada uno de los objetivos planteados. Esta investigación inicia con una introducción general sobre vertisoles, la importancia y problemática por cambios de uso de suelo, así como las características ecopedológicas planteadas en los objetivos del presente trabajo. El capítulo 1, evalúa el flujo de CO₂ en los diferentes sistemas de uso de suelo analizados, tomando mediciones a lo largo de un año, en dos horarios considerados como mañana y tarde; las diferencias se realizan mediante un ANOVA y se correlacionan con las variables de temperatura del suelo, humedad del suelo y variables ambientales. Este capítulo se encuentra publicado en la Revista Mexicana de Ciencias Forestales del INIFAP. En el capítulo 2, se analizan las propiedades químicas de los vertisoles, a dos profundidades (0-5 cm y 5-30 cm); para comparar cada variable entre sistemas se realizaron transformaciones para cumplir con los supuestos estadísticos para las variables que lo requirieron, considerando al matorral espinoso tamaulipeco como la vegetación natural. El capítulo 3, incluye propiedades físicas e hidroedáficas, para comparar la relación suelo-agua por efecto de cambios de uso de suelo. Se realizaron análisis de varianza para evaluar los efectos por cambios de uso de suelo y estacional, así como la interacción de estos dos factores. Por último, se presenta una conclusión general de los resultados obtenidos en los capítulos presentados.

CAPÍTULO I. RESPIRACIÓN DEL SUELO EN CUATRO SISTEMAS DE USO DE LA TIERRA



Fotografía del sistema de uso de suelo agrícola, donde se observa la cámara de suelo SCR-1 del analizador portable EGM-4, para medir la respiración de suelo y la sonda STP-1 para medir la temperatura del suelo.

Este capítulo fue publicado según la descripción dada a continuación:

Yáñez, M. I., Cantú, I., González, H., Jurado, E., Marmolejo, J. G., & Gómez, M. V. (2017). Respiración del suelo en cuatro sistemas de uso de la tierra. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(42): 123–149.

<http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/editorial/index.php/Forestales/article/view/4317>.

Resumen

La respiración del suelo (R_s) o emisión del dióxido de carbono (CO_2) es considerada como el segundo flujo de carbono más importante por su magnitud en los ecosistemas terrestres. El cambio de uso de suelo ha alterado el ciclo global del carbono, lo que puede agudizar el calentamiento global. El objetivo del estudio fue evaluar las variaciones diurnas y estacionales en el flujo de CO_2 en vertisoles bajo cuatro sistemas de uso de suelo en el noreste de México; matorral, pastizal, agrícola y plantación de *Eucalyptus* spp. Se realizaron mediciones semanales durante un año, en muestreo de mañana y tarde, utilizando un analizador portátil EGM-4, y se midieron la temperatura del suelo y humedad del suelo. La R_s por la mañana fueron de $3.21 \mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (agrícola), $3.86 \mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (plantación), $4.61 \mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (pastizal) y $6.17 \mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (matorral), incrementando los valores con la misma tendencia para la R_s de la tarde. Se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en los usos de suelo y hora de muestreo. La temperatura del suelo osciló de 12°C a 35.4°C y la humedad del suelo en valores de 6.9% a 47%. En vertisoles, las emisiones de CO_2 varían según su uso, siendo más altos en la tarde y correlacionado con la humedad. Los sistemas de matorral y pastizal presentaron los valores más altos en la R_s , los cuales son más comunes en el noreste de México.

Palabras clave: Flujo de CO_2 , respiración de suelo, sistemas de uso de suelo, vertisol.

Summary

Soil respiration (Sr) or emissions of carbon dioxide (CO₂) are considered as the second largest important factor in the flux of carbon. Land use change has altered the global carbon cycle, which can have a positive effect on global warming. The objective was to evaluate CO₂ efflux variation in a daily and seasonal bases in vertisol under four land uses systems; thornscrub, grassland, agricultural and *Eucalyptus* spp. plantation, through measuring weekly during one year in morning and afternoon sampling, by a portable system EGM and measurements of soil temperature and soil moisture. The Sr for morning was 3.21 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (agricultural), 3.86 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (plantation), 4.61 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (grassland) and 6.17 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (thornscrub), increasing the values for all land use system for afternoon. Sr Significant differences ($P \leq 0.05$) were found in the land use and sampling time. Soil temperature oscillates between 12°C to 35.4°C and soil moisture was 6.9% to 47%. Vertisol, CO₂ efflux varies according its use, being higher in afternoon and correlated with moisture, scrubs and grassland system showed highest values in Rs, which are more common in the northeast Mexico.

Key words: CO₂ efflux, land use systems, soil respiration, vertisol.

1. Introducción

La respiración del suelo (R_s) o flujo del CO_2 , es un importante componente del ciclo del carbono y es considerado el segundo mayor flujo de carbono entre la tierra y la atmósfera (Cantú et al., 2010; Srivastava et al., 2012). La producción de CO_2 del suelo es resultado de procesos biológicos (Moitinho et al., 2015), tales como la respiración de raíces y de los organismos del suelo, así como la descomposición de la materia orgánica (Millard et al., 2008) y en menor medida, de la oxidación química de los compuestos de carbono (Lloyd & Taylor, 1994).

La velocidad a la que el carbono del suelo es emitido en forma de CO_2 , determina el flujo neto entre el suelo y la atmósfera (Scharlemann, Tanner, Hiederer, & Kapos, 2014). Pequeños cambios en la respiración del suelo afectan la dinámica global de carbono (Wei et al., 2014)

Los suelos son el mayor reservorio de carbono (1500 PgC) (Lal, 2008), ya que almacenan 80% del carbono terrestre global (Nielsen, Ayres, Wall, & Bardgett, 2011) y pueden actuar como fuente o sumidero del CO_2 atmosférico e influir en los procesos del cambio climático global (Godde, Thorburn, Biggs, & Meier, 2016). Un componente importante del carbono es el almacenado en los suelos ya que contiene más C que la atmósfera y biósfera (Mishra et al., 2009). La tasa global de flujo de carbón de los ecosistemas a la atmósfera es aproximadamente de 75 a 100 PgC año⁻¹, siendo 10 veces más que la cantidad por combustibles fósiles (Buczko, Bachmann, Gropp, Jurasinski, & Glatzel, 2015).

Los principales factores que regulan la respiración del suelo son la temperatura y la humedad del suelo (Davidson, Belk, & Boone, 1998); la precipitación (Hussain et al., 2011) y el tipo de vegetación (Scholze, Knorr, & Heimann, 2003), siendo de interés debido a su efecto en los incrementos de la respiración del suelo por el incierto escenario de cambio climático global. Las emisiones de carbono derivadas de los cambios de uso de suelo representan la segunda mayor fuente antropogénica de carbono a la atmósfera y es el componente con

mayor incertidumbre en el ciclo global del carbono (Scharlemann et al., 2014), debido a que conduce a una pérdida de carbono en el suelos (Smith et al., 2016)

Los suelos vertisoles ocupan el 8.3% del territorio nacional, considerados los suelos más productivos del país (Torres, Gutiérrez, Ortiz, & Gutiérrez, 2016). En el noreste de México, los vertisoles sostienen en su superficie actividades productivas agrícolas o pecuarias y sustentan la vegetación nativa de importancia económica regional (Llorente, 2004). Su nombre proviene del latín *verteré* (dar vuelta), refiriéndose al reciclado interno constante del material de suelo (IUSS, 2007), son suelos arcillosos, que tienen a aglomerarse fácilmente al mojarse y se compactan fácilmente (Ghosh et al., 2011).

Los objetivos del presente estudio fueron evaluar las variaciones diurna y estacional del flujo de CO₂ en un vertisol bajo cuatro sistemas de uso de suelo en el noreste de México y su relación con las variables ambientales, con el fin de comparar la emisión de CO₂ del suelo por los diferentes sistemas de uso.

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

El estudio se realizó en el municipio de Linares, Nuevo León, noreste de México, en el campus de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, la cual se localiza en las coordenadas geográficas 24° 47' 51.22'' N y 99° 32' 29.71'' W, con una elevación 380 msnm (Figura 1). El clima es subtropical y semiárido con verano cálido, con temperatura promedio mensual de 14.7°C en enero a 22.3°C en agosto. La precipitación promedio anual es de 805 mm con una distribución bimodal (González, Ramírez, Cantú, Gómez, & Uvalle, 2010). El tipo de suelo que predomina es vertisol, el cual se caracteriza por ser profundo, de coloración gris-oscuro, clase textural fina arcillo-limoso con alto contenido de montmorillonita que se contraen y se expanden notablemente en respuesta a los cambios en el contenido de humedad del suelo (Woerner, 1991). En la Tabla 1, se presentan algunas características físicas y químicas del vertisol para la profundidad 0-30 cm en cada uno de los sistemas de uso de suelo.

Tabla 1. Propiedades químicas y físicas de los vertisoles (0-30 cm) para cada sistema de uso de suelo.

Propiedades del suelo	Sistemas de uso de suelo			
	Matorral	Pastizal	Plantación	Agrícola
pH	7.60	7.61	7.64	7.72
Densidad aparente (g cm ⁻³)	0.90	1.30	1.10	1.10
Arena (%)	17.80	16.20	18.80	9.40
Limo (%)	41.20	38.90	40.20	40.90
Arcilla (%)	41.00	44.90	41.00	49.70
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	0.14	0.14	0.10	0.09
Materia orgánica (%)	6.10	4.60	3.50	2.30
Capacidad de intercambio catiónico (cmol Kg ⁻¹)	46.70	44.90	38.10	36.10

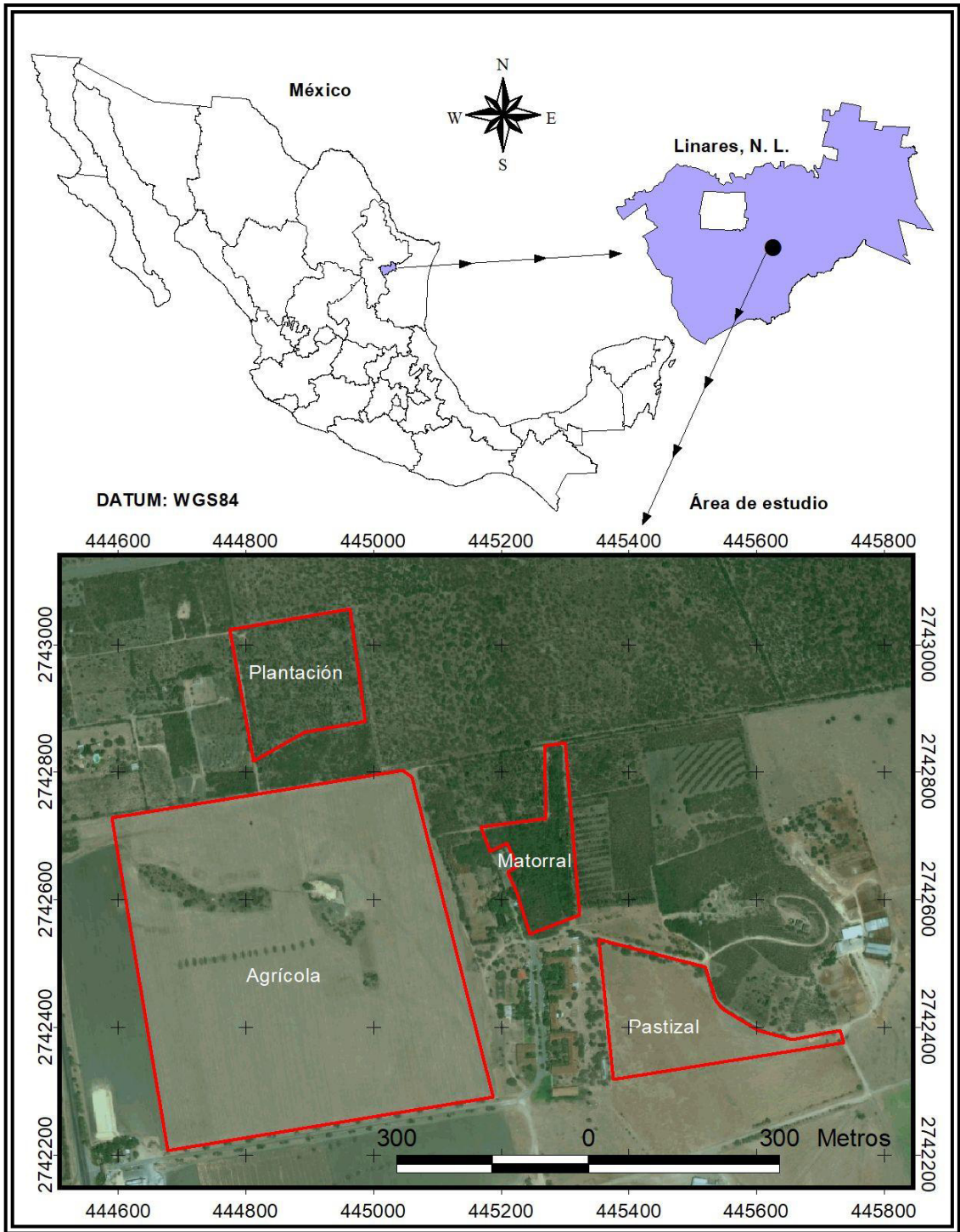


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

2.2 Parcelas experimentales

Se ubicaron cuatro sistemas de uso de suelo:

a) Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET), es la vegetación arbórea nativa, constituida por la dominancia de especies espinosas, donde predominan *Celtis pallida*, *Acacia rigidula*, *Randia aculeata*, *Condalia lycioides*, *C. obovata*, *Bernardia myricaefolia*, *Forestiera angustifolia*, *Karwinskia humboldtiana*, entre otras (INEGI, 2009). b) Área de pastizal, constituido por un sistema de ganadería intensiva y rotación de potreros con *Dichanthium annulatum*. c) Área agrícola, campo de rotación de cultivos donde se siembra *Sorghum bicolor* y *Triticum spp.* bajo un sistema de labranza cero con criterios de producción sostenible. d) Plantación de Eucaliptos con especies de *Eucalyptus camaldulensis* y *E. microteca*; esta plantación fue realizada en 1983 con fines de investigación, plantada inicialmente bajo un sistema Taungya (Cantú et al., 2010) (Figura 2).



Figura 2. Sistemas de uso de suelo; a) Matorral Espinoso Tamaulipeco, b) pastizal, c) área agrícola y d) plantación de *Eucalyptus* spp.

2.3 Mediciones del flujo del CO₂, temperatura y humedad del suelo

La respiración del suelo se determinó *in situ* mediante el uso del método de la cámara dinámica cerrada Parkinson (1981) con un sistema portátil EGM-4 (Figura 3). Este sistema está equipado con un gas infrarrojo no dispersivo (IRGA) y una cámara de suelo (SCR-1) para medir el flujo de CO₂ (EGM-4 PP Systems, Massachusetts, USA) (Figura 4).

Las mediciones se realizaron del 13 de marzo del 2015 al 07 de marzo del 2016, semanalmente, dos veces al día (8:00 y 14:00 h, denominadas mañana y tarde). En cada muestreo se realizaron mediciones con cuatro repeticiones al azar a una distancia mínima de 5 m entre ellas, esto para los sistemas de pastizal, matorral y plantación, mientras que para el área agrícola se realizaron entre filas de plantas, teniendo un total de 32 mediciones por fecha. La cámara fue colocada directamente sobre el suelo y el tiempo de las mediciones fueron de aproximadamente 120 segundos dependiendo de la tasa del incremento de las concentraciones de CO₂ en la cámara.

La cámara de respiración cilíndrica SRC-1 tiene un diámetro de 10 cm y una altura de 15 cm, este sistema hace “cero automático” para adaptarse a las condiciones ambientales y proporcionar una estabilidad de la señal de CO₂. La respiración es calculada por la asimilación del tipo de cambio de CO₂ (flujo de CO₂/unidad de área/unidad de tiempo)(Fórmula 1).

$$R = \frac{(cn-co)}{Tn} * \frac{V}{A} \quad (1)$$

Dónde: R = rango de asimilación (Flujo de CO₂/unidad de área/unidad de tiempo), co = concentración CO₂ en $T=0$, cn = concentración en un tiempo Tn después, A = área del suelo expuesto, V = Volumen del sistema total.

El flujo de CO₂ fue calculado en micromoles de dióxido de carbono por metro cuadrado por segundo ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), para esto se multiplica por el factor de 6.312 para convertir de $\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ a $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (PP-Systems, 2012).

La temperatura del suelo se midió en conjunto con la respiración mediante un sensor (STP-1) instalado al analizador portable (Figura 4). El contenido de humedad del suelo se determinó mediante gravimetría con el método AS-05 NOM-021 REC/NAT-2000 (SEMARNAT, 2002) a una profundidad de 0 a 15 cm (Figura 5).



Figura 3. Analizador portable EGM-4



Figura 4. Cámara SCR-1 y sensor de temperatura STP-1 (izquierda), Medición de la respiración del suelo (derecha).



Figura 5. Colecta de muestras de suelo para determinación de humedad por el método gravimétrico (izquierda), secado de muestras a 105°C en estufa (derecha).

2.4 Condiciones ambientales

Se registró diariamente la precipitación (mm) y temperatura del aire (°C) mediante una estación meteorológica portátil, EMP, Precision Weather Station DAVIS VANTAGE PRO2 PLUS ubicada a 100 m del área de estudio (Figura 6). Durante el periodo experimental se presentó una precipitación total de 695 mm y la temperatura media mensual fluctuó entre 6.6°C (enero 2016) a 36.5°C (agosto 2015).

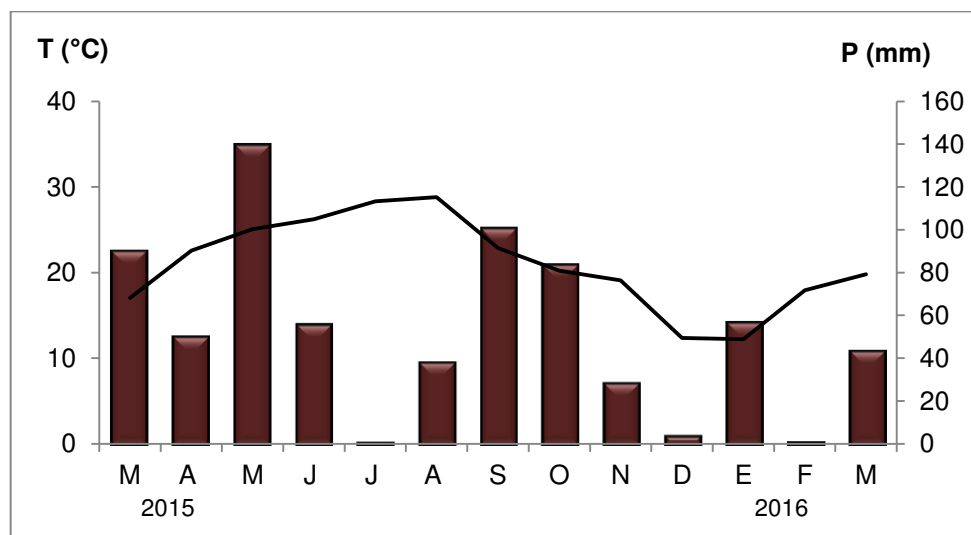


Figura 6. Diagrama climático con valores mensuales de temperatura ambiente del aire (°C) y precipitación (mm) para el sitio de estudio, de marzo 2015 a marzo 2016.

2.5 Análisis estadísticos

El análisis de varianza se utilizó para evaluar el efecto en los flujos de CO₂ por uso de suelo (factor U) y hora de muestreo (factor H), así como su interacción (U*H) para cada fecha de muestreo y para el total de las observaciones. Los datos de flujo de CO₂ fueron sometidos a transformación logarítmica para cumplir con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas.

Se realizó una prueba de Tukey para establecer las diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) de la respiración entre los sistemas de uso de suelo para mañana y tarde. El análisis de correlación Spearman se utilizó para relacionar la respiración del suelo con las variables ambientales, las cuales no cumplieron los supuestos de normalidad.

Todos los análisis estadísticos fueron realizados mediante el Paquete Estadístico para las Ciencias Sociales (por sus siglas en inglés, SPSS) versión estándar 13.0 para Windows (SPSS Inc., Chicago, IL.)

3. Resultados

3.1 Respiración de suelo

El rango del flujo de CO₂ total varió entre 0.06 y 48.7 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹. De acuerdo al análisis de varianza se encontró diferencias ($p \leq 0.05$) en la respiración de suelo, temperatura y humedad de suelo para el factor uso de suelo (FU), para el factor hora de muestreo (FH) no mostró diferencias en la humedad del suelo, mientras que para la interacción FU*FH, no mostró diferencias significativas en ninguna de las variables estudiadas (Tabla 2).

La Rs es mayor en el matorral (6.17 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) y diferente a los demás usos de suelo, seguido por el pastizal (4.61 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) y por último, plantación (3.86 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) y agrícola (3.21 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) para los muestreos de mañana, aumentando los valores en las mediciones de tarde a 4.23, 4.33, 5.93 y 8.40 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹, respectivamente, presentando un comportamiento para mañana y tarde de matorral > pastizal > plantación > agrícola.

Tabla 2. Análisis de varianza para la respiración, humedad y temperatura del suelo para el modelo con dos criterios de clasificación (Uso de suelo y hora de muestreo) y el contraste de Levene. Valores entre paréntesis muestra el valor p ($p \leq 0.05$).

Variable	Modelo F _(7, 1656)	FU ^(a) F _(3,1656)	FH ^(b) F _(1, 1656)	FU*FH F _(3, 1656)	Prueba de Levene ^(c) F _(7, 1656)	R ² _{ajus}
Respiración de suelo	19.381 (.000)	38.716 (.000)	19.257 (.000)	0.086 (.968)	1.178 (.312)	0.072
Humedad de suelo	19.116 (.000)	42.443 (.000)	1.619 (.203)	1.621 (.183)	17.160 (.000)	0.071
Temperatura de suelo	19.681 (.000)	19.554 (.000)	34.804 (.000)	0.768 (.512)	2.434 (.018)	0.051

(a) FU = Uso del suelo, (b) FH = Hora de muestreo, (c) Para contrastar la hipótesis nula de homogeneidad de varianzas.

La prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) mostró diferencias estadísticamente significativas en la R_s ($p \leq 0.05$) para los muestreos de mañana y tarde en los diferentes sistemas de uso de suelo (Figura 7). No se encontraron diferencias entre matorral y plantación en ambas horas de muestreo, por lo que si bien el sistema agrícola es el de menor emisión de CO_2 , no es diferente estadísticamente a las emisiones de la plantación de Eucalipto.

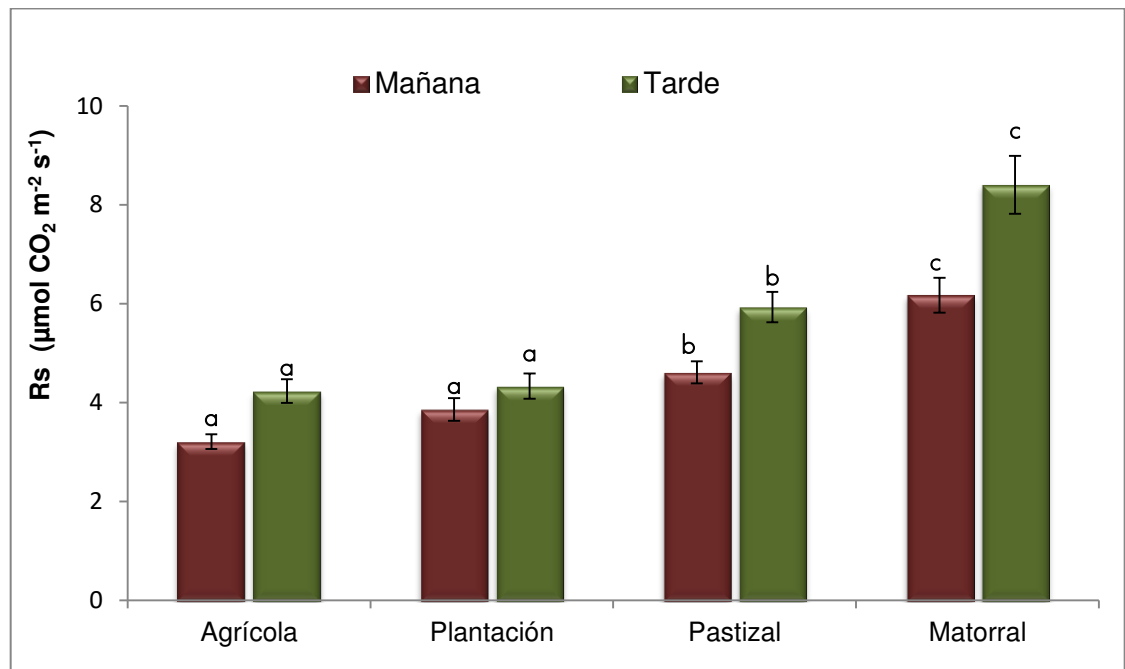


Figura 7. Valores medios ($n=52$) de respiración de suelo ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) para mañana y tarde en los cuatro usos de suelo con barras de error estándar. Barras con letra diferentes en una misma hora de muestreo, difieren significativamente a $p \leq 0.05$.

Se observó que los valores de la R_s son mayores en mediciones realizadas en los meses de abril y mayo, así como de septiembre a octubre, donde el matorral alcanza el máximo valor con $37 \mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en el muestreo del 18 de mayo 2015, a diferencia de los meses de julio-agosto y diciembre-febrero, donde la respiración fue menor a $10 \mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, estos resultados muestran la variabilidad de la R_s a lo largo de un año (Figuras 8 y 9), lo que indica que en un mismo tipo de suelo, distintos usos del mismo reflejan diferencias en emisiones de CO_2 y en la que influyen la interacción de la humedad del suelo.

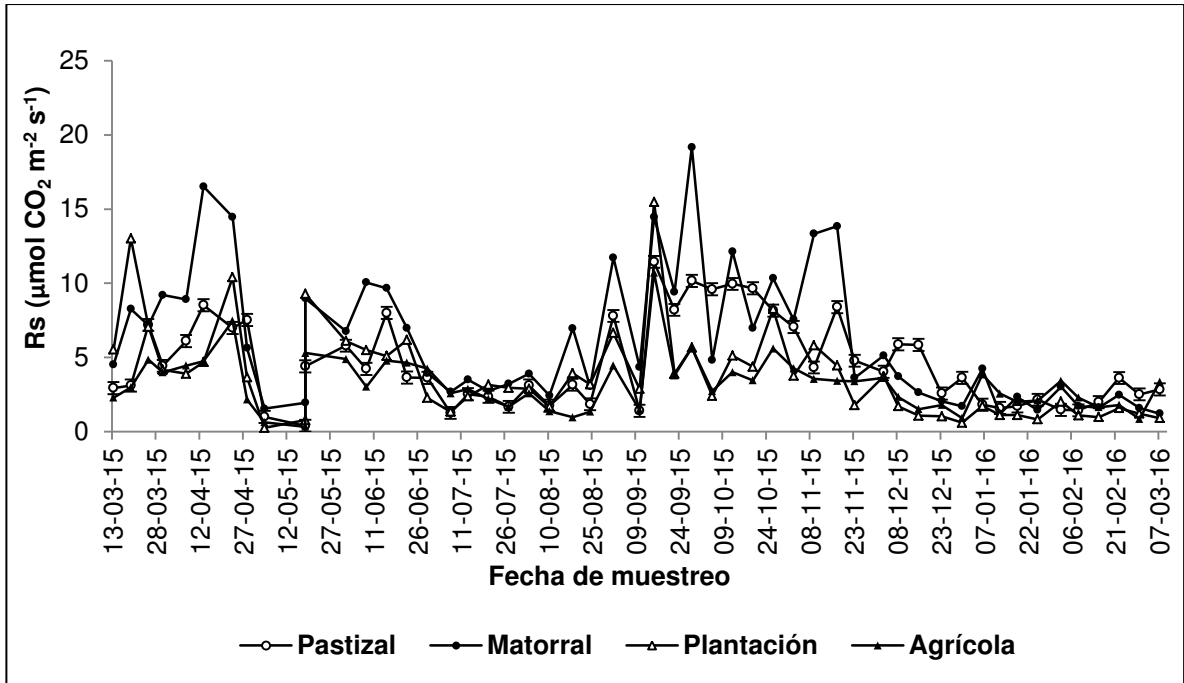


Figura 8. Flujo de CO₂ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) para muestreo de mañana durante el periodo de estudio para los cuatro usos de suelo.

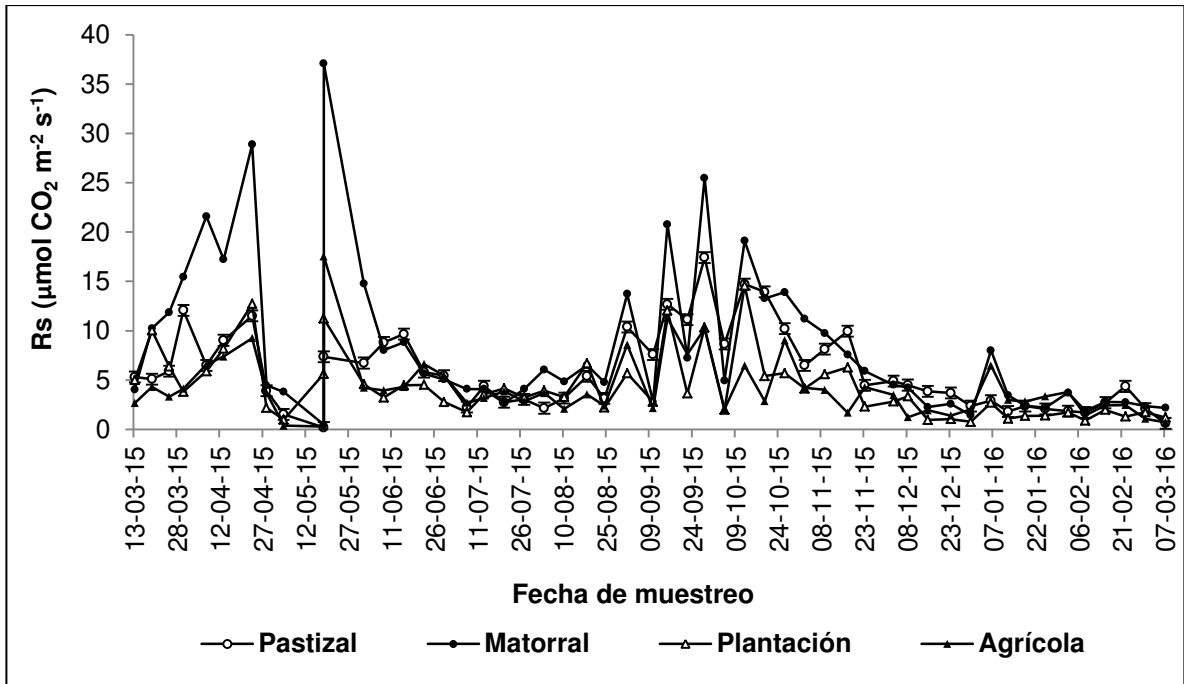


Figura 9. Flujo de CO₂ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) para muestreo de tarde, durante el periodo de estudio para los cuatro usos de suelo.

En la Tabla 3, se muestra los resultados del análisis de varianza de dos vías para la Rs por fecha de muestreo para los factores uso de suelo (FU), hora de muestreo (FH) y la interacción (FU*FH). De los 52 muestreos realizados, se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en la respiración del suelo en 41 fechas para uso de suelo, en 18 fechas se encontraron diferencias ($p \leq 0.05$) entre Rs de mañana y tarde. En la interacción entre FU*FH se presentaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en 13 de las 52 fechas de muestreo.

Tabla 3. ANOVA de la respiración del suelo por uso de suelo (U), hora de muestreo (H) y su interacción por fecha de muestreo.

Fecha de muestreo	Uso de suelo (FU)		Hora de muestreo (FH)		Interacción (FU*FH)		R ² Ajustada
	Valor F	Valor P	Valor F	Valor P	Valor F	Valor P	
13-Mzo-15	6.53	0.002	0.69	0.412	2.31	0.101	0.395
19-Mzo-15	23.50	0.237	1.83	0.188	1.51	0.237	0.693
25-Mzo-15	9.59	< 0.001	0.03	0.844	3.30	0.037	0.506
30-Mzo-15	33.22	< 0.001	18.02	< 0.001	7.91	0.001	0.813
07-Abr-15	15.65	< 0.001	8.75	0.007	1.91	0.154	0.637
13-Abr-15	25.58	< 0.001	8.42	0.008	1.67	0.199	0.729
23-Abr-15	12.60	< 0.001	12.32	0.002	1.17	0.342	0.601
28-Abr-15	4.09	0.018	3.11	0.090	0.64	0.596	0.250
04-May-15	12.29	< 0.001	6.20	0.020	3.33	0.036	0.598
18-May-15	12.26	< 0.001	0.05	0.823	6.17	0.003	0.609
25-May-15	15.24	< 0.001	45.57	< 0.001	6.39	0.002	0.769
01-Jun-15	8.41	0.001	1.31	0.263	5.14	0.007	0.530
08-Jun-15	13.37	< 0.001	0.21	0.645	5.57	0.005	0.618
15-Jun-15	11.50	< 0.001	0.31	0.582	0.65	0.587	0.490
22-Jun-15	1.04	0.392	0.38	0.540	1.54	0.229	0.036
29-Jun-15	8.57	< 0.001	7.31	0.012	0.17	0.912	0.461
07-Jul-15	4.68	0.010	1.68	0.206	0.73	0.539	0.261
13-Jul-15	0.76	0.525	2.13	0.157	0.09	0.964	0.080
20-Jul-15	0.75	0.533	1.50	0.232	0.99	0.414	- 0.009
27-Jul-15	2.76	0.064	2.99	0.096	0.14	0.935	0.132
03-Ago-15	1.95	0.147	0.68	0.416	0.99	0.412	0.076
10-Ago-15	3.53	0.030	11.76	0.002	0.02	0.995	0.333
18-Ago-15	5.70	0.004	4.79	0.039	2.15	0.120	0.408
24-Ago-15	2.39	0.093	1.74	0.199	1.29	0.300	0.157
01-Sep-15	8.79	< 0.001	4.64	0.041	2.01	0.139	0.492
10-Sep-15	3.28	0.038	2.76	0.110	5.53	0.005	0.417
15-Sep-15	6.90	0.002	1.07	0.311	2.77	0.063	0.427
22-Sep-15	6.63	0.002	0.80	0.378	2.59	0.076	0.409
28-Sep-15	10.01	< 0.001	9.52	0.005	0.45	0.717	0.523
05-Oct-15	34.65	< 0.001	1.68	0.207	0.31	0.812	0.763
12-Oct-15	18.93	< 0.001	26.72	< 0.001	1.56	0.224	0.724

19-Oct-15	43.31	< 0.001	8.50	0.008	3.55	0.029	0.821
26-Oct-15	3.50	0.031	1.41	0.246	2.16	0.118	0.269
02-Nov-15	12.86	< 0.001	0.48	0.494	0.79	0.510	0.526
09-Nov-15	12.51	< 0.001	0.41	0.526	3.11	0.045	0.565
17-Nov-15	22.39	< 0.001	1.24	0.275	2.31	0.102	0.688
23-Nov-15	9.52	< 0.001	2.61	0.119	1.11	0.364	0.470
03-Dic-15	1.73	0.186	0.04	0.838	0.54	0.655	- 0.003
08-Dic-15	11.20	< 0.001	0.03	0.855	2.24	0.109	0.518
15-Dic-15	23.11	< 0.001	0.87	0.358	1.05	0.385	0.682
23-Dic-15	13.62	< 0.001	0.50	0.482	1.15	0.349	0.550
30-Dic-15	29.44	< 0.001	0.70	0.411	4.83	0.009	0.757
06-Ene-16	39.40	< 0.001	37.09	< 0.001	0.26	0.850	0.828
12-Ene-16	11.35	< 0.001	7.36	0.012	4.61	0.011	0.609
18-Ene-16	5.93	0.004	3.43	0.076	0.08	0.966	0.319
25-Ene-16	7.62	0.001	7.36	0.012	1.41	0.263	0.470
02-Feb-16	10.01	< 0.001	1.05	0.314	0.63	0.598	0.456
08-Feb-16	1.92	0.153	1.20	0.283	1.23	0.319	0.106
15-Feb-16	2.40	0.092	13.25	0.001	0.49	0.690	0.326
22-Feb-16	5.88	0.004	0.47	0.499	0.54	0.657	0.292
29-Feb-16	6.42	0.002	2.04	0.165	0.56	0.646	0.341
07-Mzo-16	1.77	0.178	4.89	0.037	6.43	0.002	0.421

3.2 Relaciones entre la Rs y variables ambientales

Mediante la correlación de Spearman ($p \leq 0.05$) se analizó la relación de la Rs de la mañana y tarde con las variables ambientales de temperatura del suelo, humedad del suelo, humedad relativa del aire, temperatura máxima y mínima del aire y la precipitación mensual, para cada sistema de uso de suelo (Tabla 4). Se observa que la temperatura del suelo no se correlacionó con la Rs en los sistemas de pastizal y agrícola para los muestreos de mañana, y en el sistema agrícola para los muestreos de tarde.

El rango de temperatura del suelo osciló entre 12.3 °C (matorral) a 33.1 °C (plantación) para las mediciones realizadas durante la mañana y de 13.7 °C (matorral) a 35.4 °C (plantación) para los muestreos de tarde (Figura 10). Existe poca variación de temperatura entre los sistemas de uso que indique una tendencia clara sobre la Rs.

En la variable humedad del suelo se encontró una correlación alta y positiva para todos los sistemas en las mediciones de mañana y tarde. El contenido de humedad del suelo presentó en promedio para los muestreos de mañana porcentajes de 18.9, 21.1, 21.5 y 23.7 % para plantación, pastizal, matorral y agrícola, respectivamente; mientras que para la tarde los valores medios obtenidos fueron de 18.7, 20.9, 21,6 y 22.6 % para plantación, matorral, pastizal y agrícola, respectivamente (Figura 11).

Tabla 4. Coeficiente de correlación Spearman, valores de Rho entre la respiración de suelo de los diferentes usos de suelo en muestreos de mañana y tarde en relación a las variables ambientales (n=52).

Variables ambientales	USO DE SUELO			
	Pastizal	Matorral	Plantación	Agrícola
Respiración del suelo mañana				
Temperatura suelo	0.104	0.281*	0.297*	0.047
Contenido de humedad del suelo	0.344*	0.574**	0.606**	0.538**
Temperatura del aire	0.068	0.127	0.104	0.007
Humedad relativa	0.346*	0.293	0.363*	0.157
Temperatura máxima del aire	0.021	0.083	0.097	0.090
Temperatura mínima del aire	0.049	0.201	0.253	0.015
Precipitación mensual	0.282*	0.254	0.229	0.118
Respiración del suelo tarde				
Temperatura suelo	0.302*	0.273*	0.365**	0.171
Contenido de humedad del suelo	0.304*	0.588**	0.499**	0.414**
Temperatura del aire	0.080	0.025	0.057	0.116
Humedad relativa	0.468**	0.467**	0.635**	0.384*
Temperatura máxima del aire	0.158	0.132	0.207	0.089
Temperatura mínima del aire	0.169	0.212	0.363**	0.128
Precipitación mensual	0.254	0.163	0.226	0.184

* Indica que hay correlación significativa ($p \leq 0.05$) entre las variables.

* * Indica que hay correlación significativa ($p \leq 0.01$) entre las variables.

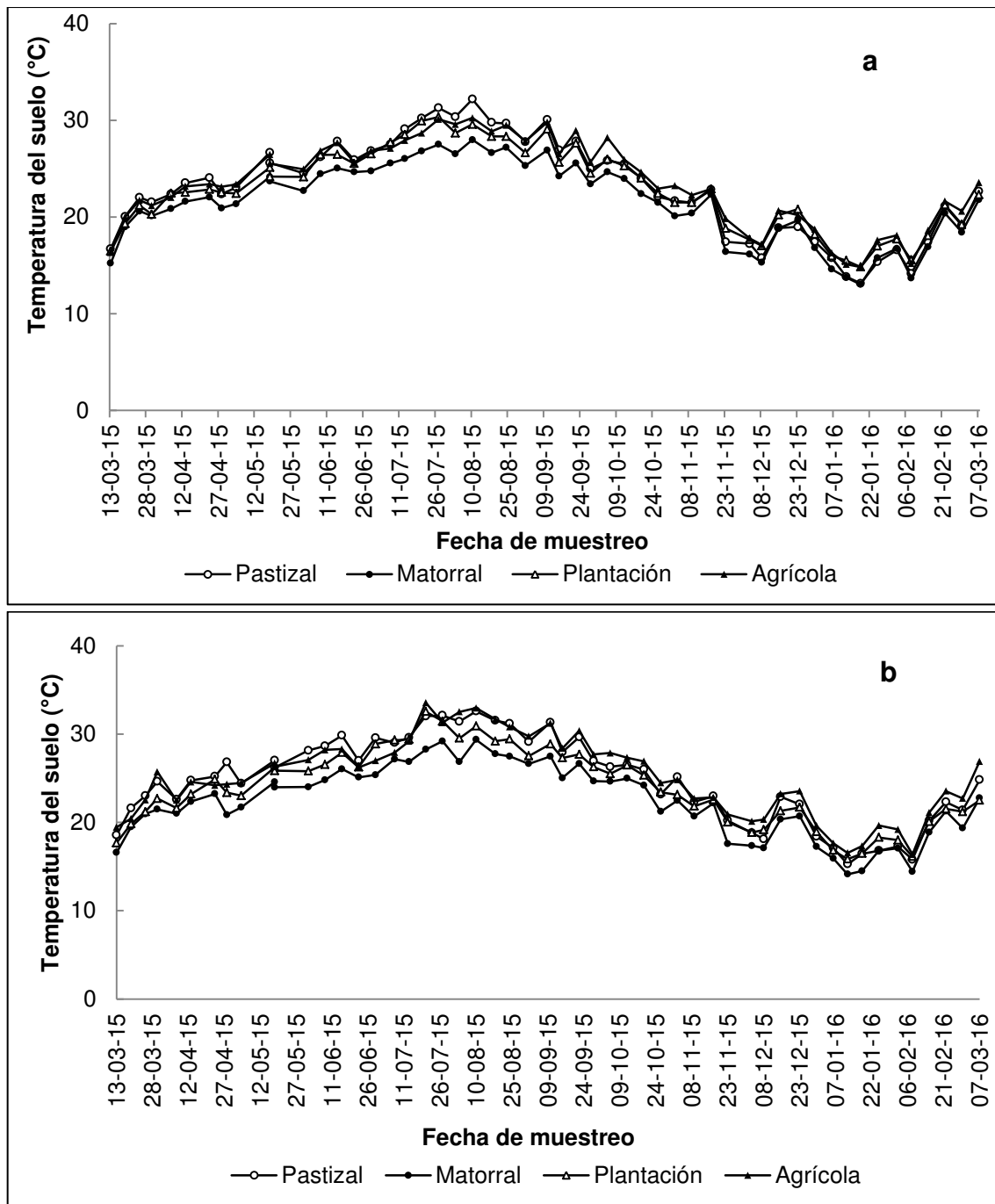


Figura 10. Temperatura del suelo (°C) para muestreo de mañana (a) y tarde (b), durante el periodo de estudio para los cuatro usos de suelo.

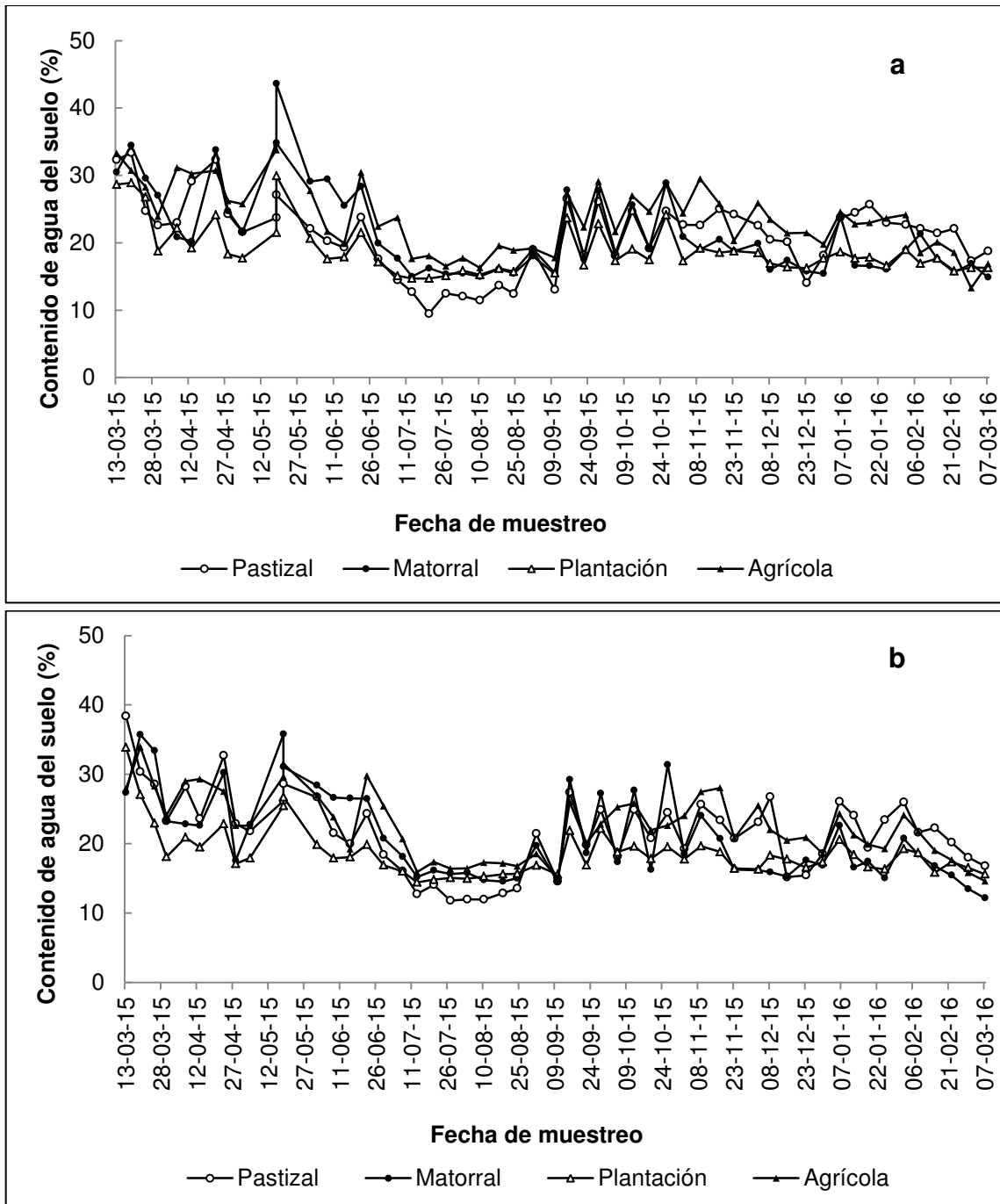


Figura 11. Contenido de agua del suelo (%) para muestreo de mañana (a) y tarde (b), durante el periodo de estudio para los cuatro usos de suelo.

En cuanto a la precipitación, se correlacionó la Rs con datos de lluvia al momento de las mediciones, se encontró correlación con la Rs de la mañana en pastizal, sin embargo, este factor es de importancia, dada la variación en las precipitaciones que se pronostican por las proyecciones del cambio climático (IPCC, 2007). Estudios han demostrado que la dinámica de la precipitación y la disponibilidad de agua en los suelos afectará el balance global del carbono (Hussain et al., 2011). La Figura 12, muestra una tendencia de aumento de la respiración después de eventos de lluvias tanto para mañana y tarde, estos aumentos de respiración después de humectación se deben a un fenómeno conocido como efecto Birch (Johnson et al., 2013).

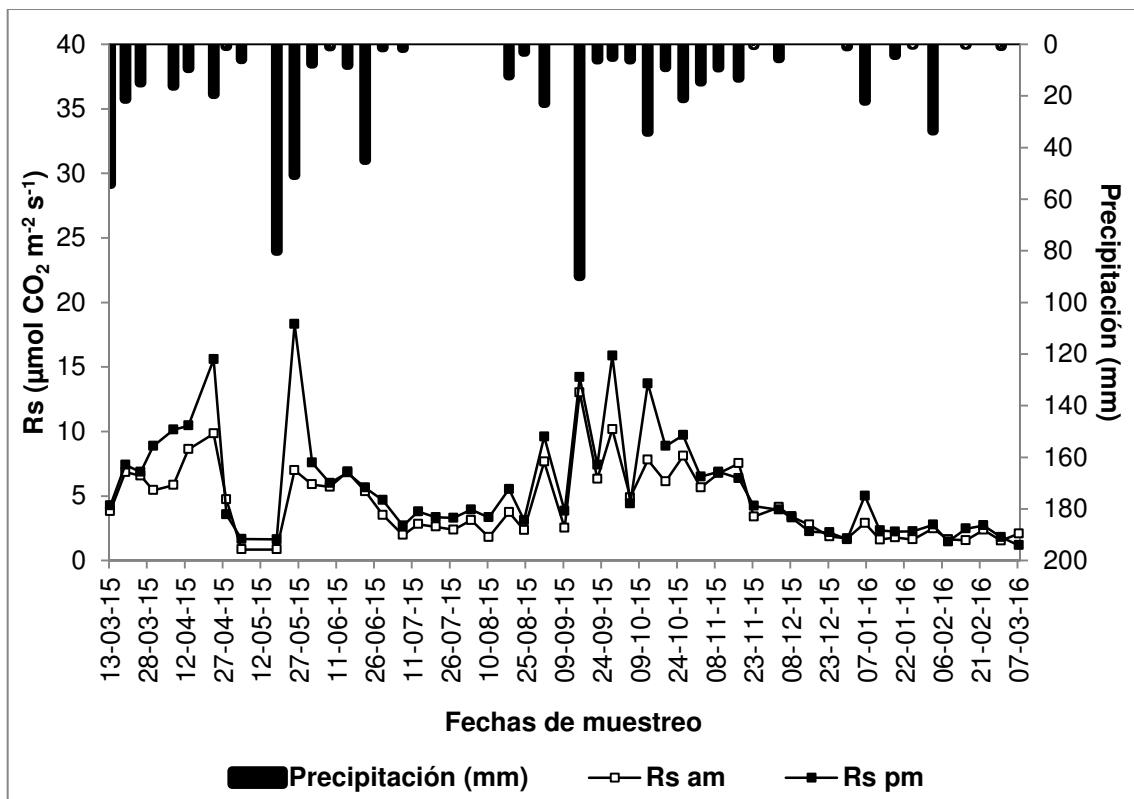


Figura 12. Distribución de la precipitación y flujos de CO₂ promedio de los cuatro usos de suelo durante el periodo de estudio.

4. Discusión

De acuerdo a los resultados obtenidos, el sistema agrícola presentó las menores emisiones de CO₂ a la atmósfera y fue estadísticamente igual al flujo de CO₂ de la plantación de eucalipto, mientras que el matorral fue el sistema con un mayor flujo, seguido del pastizal. De acuerdo con Schwendenmann, Pendall, & Potvin, (2007) no encontraron diferencias en la Rs entre un bosque y pastizal donde los valores fueron 5.7 y 5.2 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente, atribuyendo al pastizal la alta producción de biomasa subterránea.

Vallejo, Díaz, y de la Rosa (2005) mencionan que los cambios de uso de suelo y su manejo indican cambios en contenidos de carbono. Esto concuerda con los contenidos de materia orgánica reportados en este estudio para los usos de suelo, donde se observa una misma tendencia en el aumento de la materia orgánica y la respiración del suelo en los distintos usos.

Vásques, Macías, y Menjivar (2013) indican que bajos contenidos de materia orgánica refleja una baja actividad microbiana, lo que resulta en una menor emisión del CO₂. Por su parte, Scharlemann et al. (2014) demuestran pérdidas de carbono orgánico entre 25-50% debido a perturbaciones que alteran las características fisicoquímicas de los suelos, modificando las reservas de carbono (Weissert, Salmond, & Schwendenmann, 2016).

Cantú et al. (2010) evaluaron los flujos en CO₂ en 2001 en condiciones similares en 5 sistemas de uso de suelo en vertisol. La tasa de Rs en la mañana varió desde 0.7 a 8.4 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y en la tarde con un rango entre 0.6 a 14.4 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Estos resultados concuerdan en que el área agrícola es la que menor flujo de CO₂ presentó (1.9 y 2.5 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para mañana y tarde, respectivamente). Aunque contrastan en que el área de pastizal fue la de mayor emisión (3.5 y 5 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para mañana y tarde, respectivamente).

Entre las condiciones de humedad del suelo, la cobertura vegetal modera las condiciones de microclima, manteniendo la humedad del suelo (Gomes et al., 2016). Estudios demuestran que la temperatura es un factor importante dado su efecto sobre la biota del suelo (Briones, Garnett, & Ineson, 2010).

Millard et al. (2008) encontraron que en sitios con contenidos de humedad de 5-12 %, se limita la tasa global de respiración, mientras que Rosík, Fabiánek, y Marková (2013) mencionan que el umbral de humedad de suelo cuando el CO₂ empieza a disociarse de los cambios de temperatura oscila entre 12 y 19 %. Así mismo, Cantú et al. (2010) señalan que es importante investigar el flujo de CO₂ para vertisol con contenidos gravimétricos menores del 15% debido a las grietas que presenta la estructura de los vertisoles, causando errores en la medición. Al respecto, se observó como la Rs disminuye notablemente a valores menores de 5 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, cuando el contenido de humedad es menor al 15 %. Srivastava et al. (2012) ponen en evidencia que los factores que mayor influencia tienen en las emisiones de CO₂ son la humedad y temperatura del suelo.

En este estudio se encontró que la humedad del suelo es la variable que mayor correlación presenta con los flujos de CO₂ tanto para los muestreos de mañana y tarde, ya que a mayor contenido de humedad se observa un aumento en la respiración del suelo, como una respuesta de la actividad microbiana del suelo (Davidson, Janssens, & Lou, 2006).

Así mismo, los cambios de cobertura en los diferentes sistemas de uso regulan la temperatura y humedad del suelo, cambios en la vegetación tienen un impacto en el intercambio de CO₂ (Scholze et al., 2003). En especial en regiones secas, donde la humedad es el factor más limitante para la actividad de los organismos desérticos (Bowling, Grote, & Belnap, 2011). Riveros-Iregui et al., (2007) mencionan que el contenido de humedad es el factor que controla la respiración de suelo, dado que inhibe la difusión del CO₂.

Campos (2014), menciona que el calentamiento global podría tener un efecto negativo sobre la disponibilidad de agua del suelo, lo que resulta en la disminución de la respiración del suelo. Esta tendencia de aumento de la R_s con el aumento de la precipitación es debido a que la cantidad de agua que ingresa al espacio poroso del suelo, elimina el CO_2 del suelo (Moitinho et al., 2015).

CAPÍTULO II. EFECTO DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DE UN VERTISOL

Resumen

Las propiedades químicas son indicadoras de la calidad del suelo, estas reservas nutritivas pueden modificarse debido a las actividades antropogénicas. Para evaluar el efecto sobre las propiedades químicas de un mismo tipo de suelo vertisol, se analizaron el contenido de carbono, nitrógeno y nutrientes bajo cuatro sistemas de uso de suelo: matorral espinoso tamaulipeco, pastizal, cultivo agrícola y una plantación de eucaliptos, ubicados en el noreste del estado de Nuevo León, México. Se colectaron cuatro muestras compuestas por sitio a dos profundidades (0-5 cm y 5-30 cm) y se analizaron las variables de pH, conductividad eléctrica (CE), carbono orgánico del suelo (COS), nitrógeno total (Nt), capacidad de intercambio catiónico (CIC), macronutrientes (K, Ca, Mg y Na) y micronutrientes (Cu, Mn, Fe y Zn), bajo la metodología de Woerner (1989) y la Norma oficial Mexicana NOM-021-RECNAT 2000. Los resultados demostraron que las pérdidas de COS y Nt por los cambios de uso del suelo de matorral a otro sistema de uso fluctuaron de 2.4% hasta 66%. El COS se redujo principalmente en la profundidad de suelo 0-5 cm, mientras que el Nt presentó las mayores reducciones en la profundidad de 5-30 cm, siendo el sistema agrícola el de mayor pérdida de COS y Nt en ambas profundidades. Diferencias significativas ($p \leq 0.05$) fueron encontradas entre los sistemas de uso para pH, Mg, Fe y Cu en las dos profundidades. La CE, Zn y CIC, presentaron diferencias en la profundidad 0-5 cm, mientras que Ca, Na y Mn para la profundidad 5-30 cm. Los nutrientes P y K no presentaron diferencias entre los sistemas en las dos profundidades. Se realizó una correlación de Spearman entre las variables, siendo pH la variable que presentó una relación con la mayoría de los nutrientes, debido a la competencia entre cationes y el efecto de la disponibilidad de los micronutrientes. En los sistemas, agrícola y plantación

de eucalipto se presentó una disminución en K, Fe, Mn, Zn y CIC, mientras que en el pastizal los contenidos de P y K aumentaron a diferencia del matorral que representa la vegetación natural. Los vertisoles debido a su alto contenido en arcillas presentan por inherencia una alta fertilidad potencial, que puede llegar a ser modificada por el cambio de uso de suelo. Los resultados indicaron que los cambios de uso de suelo ocasionaron una disminución en la fertilidad del suelo, lo que se reflejó en el sistema agrícola, donde los valores de C y Nt fueron más bajos respecto a lo encontrado con la vegetación de Matorral.

Palabras clave: Vertisol, carbono orgánico del suelo, nitrógeno, macronutrientes, micronutrientes, sistema de uso de suelo.

Summary

Chemical properties are indicative of soil quality, these nutrient reserves can be modified due to anthropogenic activities. To evaluate the effect on the chemical properties of the same type of vertisol soil, carbon, nitrogen content and the nutrients were analyzed under four land use systems: Tamaulipan thornscrub, grassland, agricultural crop and eucalyptus plantation, located in northeastern Nuevo Leon, Mexico. Four soil samples composed were collected per site at two depths (0-5 cm and 5-30 cm) and the variables pH, electrical conductivity (EC), the soil organic carbon content (SOC), total nitrogen (Nt), cation exchange capacity (CEC), macronutrients (K, Ca, Mg and Na) and micronutrients (Cu, Mn, Fe and Zn), were analyzed, using the Woerner (1989) methodology and the official standard Mexican NOM-021-RECNAT-2000. The results demonstrated that COS and Nt losses due to changes in the use of Thornscrub land to another land use system fluctuated between 2.4% to 66%. The COS decreased mainly at soil depth 0-5 cm, while Nt value decreased most at soil depth of 5-30 cm. The agricultural system experienced the greatest loss of COS and Nt, at both depths. Differences ($p \leq 0.05$) were found between system use for pH, Mg, Fe and Cu in the two depths. CE, Zn and CEC, showed differences in depth 0-5 cm, while Ca, Na and Mn for depth 5-30 cm. The nutrients P and K did not show differences between systems at the two depths. A Spearman correlation analysis was made between variables, being pH the variable presented a relation with the majority of the nutrients, due to the competition between cations and the effect of the availability of micronutrients. In the agricultural systems and eucalyptus plantation, there was decrease in K, Fe, Mn, Zn and CEC, whereas in the grassland the contents of P and K increased in contrast to thornscrub that represents the natural vegetation. Vertisols due to their high content of clays inherently have a high potential fertility, which can be modified by the change of land use. The results indicated that changes in land use caused a decrease in soil fertility, which was reflected in the agricultural system, where the values of C and Nt were lower than those found with the Thornscrub vegetation.

Key words: Vertisol, Soil organic carbon, nitrogen, macronutrients, micronutrients, land use system.

1. Introducción

Los suelos son productos de la interacción de factores siendo el material original, clima, topografía, tiempo y organismos, quienes interactúan de manera interdependientes. Las actividades antropogénicas han alterado su formación al manipularlo físicamente para obtener beneficios. Los cambios de uso de suelo son esenciales para el desarrollo económico y progreso social, que no viene sin costo (Wu, 2008), siendo la degradación del suelo uno de los principales problemas adjunto.

El uso del suelo, es referido en su sentido más amplio, a las diferentes formas en que se emplea un terreno y su cubierta vegetal (Trucíos, Rivera, Estrada, & Cerano, 2013). En México, el 24% de los suelos se encuentran altamente degradados, principalmente como resultado de la deforestación y cambio de uso de suelo (Sanchez, Kubota, & Cantú, 2014). La dinámica de los ecosistemas terrestres depende de la interacción entre una serie de ciclos biogeoquímicos, particularmente nutrientes e hidrológicos, los cuales pueden ser modificados por acciones humanas (Gol, 2009).

La calidad del suelo está relacionada con la habilidad de este para sostener la productividad biológica, su funcionalidad ecosistémica, así como mantener un balance ambiental biofísico (Navarrete, Vela, Lopez, & Rodriguez, 2011). Las propiedades físicas y químicas confieren al suelo la calidad necesaria para albergar la vida y mantener la capacidad productiva (Fernández, Acevedo, Villanueva, & Uribe, 2016), reservas nutritivas de carbono, nitrógeno, fósforo y potasio tienen a presentar una pérdida debido a las actividades antropogénicas (Wang et al., 2015). Estudios han documentado que los indicadores químicos del suelo son similares para los suelos agrícolas y forestales, aunque existen diferencias significativas entre ellos en cuanto su uso y evaluación (Schoenholtz, Miegroet, & Burger, 2000).

Las propiedades químicas son indicadores de la calidad del suelo. El pH, conductividad eléctrica, la materia orgánica, la capacidad de intercambio

catiónico, así como contenido de macro y micronutrientes son algunas de las propiedades químicas indicadoras en las relaciones de suelo y plantas que indican el efecto por el cambio de uso de suelo.

Algunos estudios han demostrado que cantidades de nitrógeno y fósforo disponible tienden a decrecer conforme los sistemas naturales se modifican a sistemas manejados (Huerta et al., 2008). Aunque existen diferentes formas en que los nutrientes pueden presentar cambios, ya que estos en la solución del suelo pueden ser absorbidos por plantas, lixiviados, perdidos en la atmósfera o transformados en formas no lábil (Rosolem & Calonego, 2013). Smith et al., (2016) mencionan que cambios de uso, aun lo que no dan lugar a cambios en vegetación, tales como un aumento en la intensidad de pastoreo o intensificación agrícola pueden conducir a pérdidas de carbono y nutrientes, dependiendo de las características de las prácticas de manejo.

La materia orgánica está conformada por compuestos ricos en carbono, nitrógeno, fósforo y agua, principalmente, por lo que representa una fuente de nutrimentos y energía que los microorganismos requieren para propiciar su desarrollo y metabolismo (Ferrera & Alarcón, 2001). El carbono desempeña un papel central en el control de la tasa de ciclaje del nitrógeno. Suelos en los que el suministro de carbono coincide estrechamente con el ingreso de nitrógeno vía ciclaje, hacen que se mantenga el nitrógeno dentro del sistema. Sin embargo, cuando los suelos son saturados de nitrógeno pero deficientes en carbono, son más propensos a perder nitrógeno hacia el ambiente (Goulding et al., 2001).

El nitrógeno es un elemento esencial requerido para el crecimiento microbiano y la degradación de la materia orgánica. Cuando la materia orgánica tiene alto contenido de nitrógeno, los microorganismos tienen suficiente sustrato para inducir mayor velocidad de mineralización, ya que satisface plenamente sus necesidades de N, por lo que no es un factor limitante para ellos (Ferrera & Alarcón, 2001).

El nitrógeno es asimilado en una cantidad determinada por la biomasa microbiana dependiendo de la relación C/N. Más específicamente, la cantidad de N requerida por los microorganismos es 20 veces menor que la de C. Si hay una concentración baja de compuestos de C fácilmente degradables y una cantidad de N mayor con respecto a la requerida por la biomasa microbiana, habrá una mineralización neta de N con liberación de N inorgánico disponible para las plantas (Diacono & Montemurro, 2010). Asimismo, la relación C/N es un parámetro usado para indicar que la degradación de la materia orgánica se ha estabilizado (Isaza, Pérez, Laines, & Castañón, 2009).

Entre los cambios de uso de suelo, el uso de especies forestales exóticas es una de las causas principales de reducción de la cobertura vegetal nativa, en especial en los matorrales del noreste de México (Foroughbakhch, Háuad, Céspedes, Ponce, & González, 2001). Los eucaliptos son una de las especies de plantas leñosas de más rápido crecimiento que presenta una alta productividad y buena adaptabilidad y ha sido utilizada ampliamente en muchos países (Temesgen, Gonzalo, & Turrion, 2016).

Los vertisoles ocupan el 8.3% del territorio nacional y son considerados los suelos más productivos del país (Torres et al., 2016), son de gran importancia en la zona del noreste de México, ya que ocupan parte de la superficie en actividades productivas agrícolas o pecuarias. El nombre vertisol proviene del latín *vertere*, que se significa dar vuelta, refiriéndose al reciclado interno constante del material de suelo (IUSS, 2007), son suelos arcillosos, profundos, de color oscuro, con una estructura prismática, resultado de la acción de las arcillas expandibles (Woerner, 1991), son estructuralmente inestables, tienden a aglomerarse fácilmente en respuesta a los cambios de humedad y se compactan fácilmente (Ghosh et al., 2011). A pesar de las limitaciones de manejo, los vertisoles se cultivan extensamente debido a su alta fertilidad química y son susceptibles a la degradación con cambios de uso de suelo (Bravo, Bryan, & Voroney, 2009).

En vista de lo anterior, el objetivo del presente capítulo es evaluar las propiedades químicas de un vertisol bajo cuatro sistemas de uso de suelo, bajo la hipótesis que cambios de uso de suelo modifican las propiedades químicas en un mismo tipo de suelo.

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

El área de estudio se localiza en el campus de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, en las coordenadas geográficas 24° 47' 51'' N y 99° 32' 29'' O, con una altitud de 350 m. y se ubica a 8 km al sur del Municipio de Linares, en el Estado de Nuevo León, México (Figura 1). El clima es subtropical y semiárido con verano cálido. La temperatura media mensual del aire oscila entre 14.7 °C en enero y 22.3 °C en agosto, altas temperaturas diarias de 45 °C son comunes durante el verano. La precipitación media anual es de 805 mm con una distribución bimodal. Los meses de mayor precipitación son mayo, junio y septiembre (González, Cantú, Gómez, & Ramírez, 2004).

2.2 Sistemas de uso del suelo

En el sitio de investigación se seleccionaron cuatro parcelas experimentales con diferentes usos del suelo: El primer uso del suelo corresponde a la parcela de Matorral Espinoso Tamaulipeco; es una vegetación nativa dominada por arbustos diversos, densos y espinosos, los cuales se caracterizan por una amplia gama de patrones de crecimiento, diversas formas de vida de las hojas, texturas y dinámicas de crecimiento con contrastantes desarrollos taxonómicos y fenológicos. En términos de productividad del matorral, se ha estimado que la biomasa promedio aérea y la producción anual de la misma, en peso seco es de 22 Mg ha⁻¹ y de 3.2 Mg ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente (Villalón, 1989). El segundo uso del suelo; corresponde a la plantación de *Eucalyptus globulus* y *E. camaldulensis*; estas especies fueron plantadas en marco real (3m x 3m) hace 33 años con fines de investigación. El tercer uso del suelo; se trata de una parcela con Pastizal; corresponde a un sistema de producción con ganadería intensiva y rotación de potreros. La especie de pasto perenne establecida es *Dichanthium annulatum* (Bluestem), que forma un macollo de hasta 60 cm. El cuarto uso de suelo; es un cultivo de *Sorghum bicolor* en un campo bajo

condiciones de temporal con implementación de prácticas de agricultura de conservación, que debido a la capa protectora de residuos de cada cosecha se logran varios beneficios ambientales para el manejo del suelo, tales como la estabilización de la temperatura y los niveles de humedad del suelo.

El tipo de suelo en los cuatro sistemas de uso del suelo investigados es vertisol mázico pélico, el cual es profundo de coloración gris oscuro, clase textural arcillo-limoso con altos contenidos de montmorillonita que se contraen y expanden notablemente en respuesta a cambios en el contenido de humedad del suelo (Woerner, 1991).

2.3 Muestreo

En abril de 2016 se colectaron cuatro muestras compuestas de suelo, con cuatro submuestras cada una, hasta obtener aproximadamente 1 kg de suelo. El muestreo fue aleatorio en cada uno de los cuatro sistemas de uso de suelo: Matorral Espinoso Tamaulipeco, plantación de *Eucalyptus globulus* y *E. camaldulensis*, área de pastizal (*Dichanthium annulatum*) y área agrícola bajo sistema de temporal con *Sorghum bicolor*, tomados a profundidades de 0-5 cm y 5-30 cm. Las muestras (n=32) se llevaron al laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Forestales, UANL, donde se secaron a la sombra, se cribaron con malla 0.2 mm y se prepararon para su caracterización siguiendo las metodologías establecidas en el manual de “Métodos químicos para el análisis de suelos calizos de zonas áridas y semiáridas” de Woerner, (1989) y la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

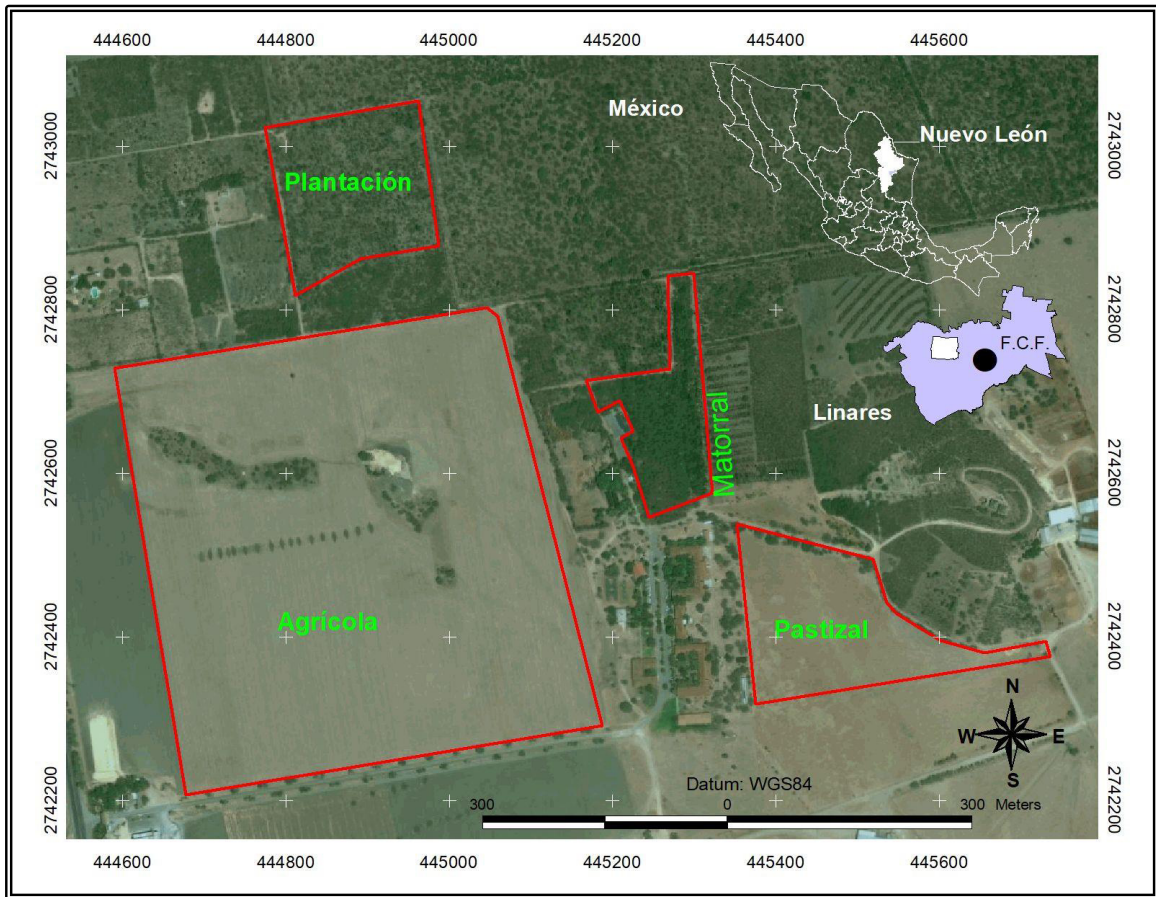


Figura 1. Localización del área de estudio

2.4 Caracterización de suelo

La caracterización del suelo se basó en las siguientes mediciones:

- ❖ Reacción del suelo (pH) por el método AS-23 de la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002), mediante la suspensión suelo: CaCl_2 0.01 M a una relación 1:2, medido a través de un electrodo de vidrio (Orion, Thermo Scientific).
- ❖ La conductividad eléctrica (CE) se realizó por determinación rápida en suspensión suelo-agua 1:5 (Woerner, 1989). Tanto el pH como la CE se midieron en un pH/conductivímetro marca Corning, modelo 542.

- ❖ La materia orgánica del suelo (MOS) se determinó usando el método Walkley/Black modificado (Woerner, 1989). Se realizó una digestión húmeda con ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) y oxidación del carbono con dicromato de potasio 0.07M ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), agregando a 0.5 gr de suelo, 25 ml de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ y 25 ml H_2SO_4 y titulación del exceso de dicromato con sulfato ferroso 0.2M ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). Mediante este procedimiento, se obtuvo el contenido de materia orgánica y carbono orgánico del suelo (COS) bajo el supuesto de que la materia orgánica contiene un 58% de carbono (Castellano, Uvalle, & Aguilar, 2000).

- ❖ El nitrógeno total (Nt) fue determinado por el método semi-micro Kjeldahl (Woerner, 1989) utilizando un Micro Kjeldahl modelo RapidStill, en el que se realizó una digestión por medio de ebullición de 0.1 gr de suelo con 12 ml H_2SO_4 y 0.3 gr de mezcla de catalizador de sulfato de potasio y óxido de mercurio, destilación en medio alcalino (NaOH) y recolección con ácido bórico con indicador y medición del Nt a través de titulación con HCl a 0.02N. La relación C/N se estimó con los datos obtenidos previamente de COS y Nt.

- ❖ El fósforo (P) aprovechable por el método AS-10, mediante el procedimiento de Olsen y colaboradores (NOM-021-RECNAT-2000). El P es extraído del suelo con una solución de bicarbonato de sodio (NaHCO_3 0.5 M); se utilizó una solución reductora con ácido ascórbico y mediante el uso de un espectrofotómetro ultravioleta (Perkin-Elmer Lambda 1A, modelo C632-0002) se analizó por colorimetría a 882 nm, junto a una curva de calibración con solución patrón 5 mg L^{-1} (Figura 2).



Figura 2. Preparación de extractos para medición de fósforo (izquierda) colorimetría en equipo de espectrofotómetro ultravioleta.

- ❖ Los Macronutrientes (Ca, Mg, K y Na) se analizaron por extracción con acetato de amonio pH=7.0 modificado (Woerner, 1989); se prepararon curvas para cada elemento con solución supresora de cloruro de lantano (LaCl_3) 50 000 mg L^{-1} para Mg, cloruro de potasio (KCl) 50 000 mg L^{-1} para Ca y Na, y cloruro de cesio (CsCl) 50 000 mg L^{-1} para K. las muestras se diluyeron en relación 1:10 o la requerida al momento de leer en un espectrofotómetro de absorción atómica (EAA) marca VARIAN, modelo SpectrAA-200 (Figura 3).
- ❖ Los Micronutrientes (Fe, Mn, Cu y Zn) por extracción con DTPA-TEA- CaCl_2 pH=7.3 según Lindsay/Norvell (Woerner, 1989); se prepararon curvas de calibración para cada elemento con estándares de 25 mg L^{-1} ; las muestras se leyeron en concentrado en un EAA.
- ❖ La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se determinó mediante el intercambio con acetato de sodio pH=8.2 / acetato de amonio pH=7.0 según Richards modificado (Woerner, 1989).



Figura 3. Espectrofotómetro de Absorción Atómica (EAA) para medición de macros y micronutrientes y la capacidad de intercambio catiónico.

2.5 Análisis estadísticos

Para probar los supuestos de normalidad y homocedasticidad de varianzas, las variables químicas del suelo fueron sometidas a pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk y prueba de Levene, cumpliendo estos supuestos las variables de pH, P y K. Las variables que no cumplieron estos supuestos se transformaron para inducir la distribución normal; los valores de Mn se transformó a raíz cuadrada de la proporción; a las variables MO, CO, C/N, Nt, Na, Mg, Fe y Zn, se les aplicó una transformación de $1/x$ (Sokal & Rohlf, 2003). El análisis de varianza se utilizó para evaluar el efecto de las variables químicas por usos de suelo (Factor A) y profundidad (Factor B), así como su interacción (A*B) para las variables transformadas, y se realizó una comparación de medias con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Las variables CE, Ca, Cu y CIC, no cumplieron con los supuestos de normalidad de datos, por lo que se sometieron a un análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis (Sokal & Rohlf, 2003). Se realizó una correlación de Spearman para conocer la relación entre las variables. Todos los procedimientos estadísticos fueron realizados utilizando el Paquete Estadístico para las Ciencias Sociales (por su siglas en inglés, SPSS) versión estándar 17.0 para Windows (SPSS, 2009).

3. Resultados

3.1 Efectos en las variables químicas por cambio de uso de suelo

Los cambios de uso de suelo afectaron significativamente algunas de las variables químicas en las dos profundidades del vertisol estudiado. El análisis de varianza mostró diferencias en el factor uso de suelo (FA) para pH, MO, COS, Nt, relación C/N y en las concentraciones de potasio (K), magnesio (Mg), sodio (Na), hierro (Fe), manganeso (Mn) y zinc (Zn), siendo el fósforo el único nutriente que no presentó diferencias entre los usos de suelo, mientras que para el factor de profundidad (FB) no se encontró diferencias para los nutrientes de Na y Mn. La interacción de los dos factores (A*B) fue significativo solo para Zn, pH y la relación C/N (Tabla 1).

Tabla 1. Análisis de varianza para las variables de pH, materia orgánica (MO), carbono orgánico del suelo (COS), nitrógeno total (Nt), fósforo (P), potasio (K), magnesio (Mg), sodio (Na), hierro (Fe), manganeso (Mn) y zinc (Zn).

Variables	Unidad	FA ^a (3, 24)	FB ^b (1, 24)	Interacción (FA* FB) (3, 24)	Prueba de Levene ^c (7, 24)	R ² ajustada
pH		18.75**	14.48**	3.87*	0.010	0.70
MO	%	13.19**	24.07**	1.58 ^{NS}	0.003	0.66
COS	%	23.74**	18.92**	1.56 ^{NS}	0.003	0.66
Nt	%	33.78**	26.85**	1.75 ^{NS}	0.101	0.80
C/N		6.38**	4.15 ^{NS}	5.32**	0.000	0.51
P	mg Kg ⁻¹	2.70 ^{NS}	4.52*	1.76 ^{NS}	0.103	0.26
K	cmol ⁽⁺⁾ Kg ⁻¹	6.32*	10.93**	0.69 ^{NS}	0.265	0.44
Mg	cmol ⁽⁺⁾ Kg ⁻¹	9.04**	5.55*	1.32 ^{NS}	0.333	0.48
Na	cmol ⁽⁺⁾ Kg ⁻¹	3.54*	3.93 ^{NS}	1.66 ^{NS}	0.012	0.26
Fe	mg L ⁻¹	22.67**	16.48**	1.12 ^{NS}	0.026	0.72
Mn	mg L ⁻¹	7.99**	4.12 ^{NS}	0.40 ^{NS}	0.153	0.41
Zn	mg L ⁻¹	3.69*	4.51*	5.32**	0.044	0.44

Factor uso de suelo (FA)^a, profundidad (FB)^b e interacción uso por profundidad (FA*FB). Prueba para contrastar la hipótesis nula de homogeneidad de varianza^c. **Diferencias altamente significativas ($p \leq 0.01$) *Diferencias significativas ($p \leq 0.05$), ^{NS}No significativo.

Con el fin de caracterizar la condición nutricional para los cuatro sitios de estudio, se presentan las pruebas de comparación de medias para la profundidad 0-5 cm (Tabla 2) y 5-30 cm (Tabla 3).

La reacción del suelo (pH) presentó promedios de 7.58 a 7.74, clasificándose como medianamente alcalino. En general, suelos con pH en un intervalo de 5.8 a 7.5, son considerados como deseables o menos problemáticos para la mayoría de los cultivos (Rodríguez & Rodríguez, 2002), en el caso de los suelos del área de estudio son ligeramente alcalinos debido a su material original donde predominan los carbonatos (Woerner, 1991).

El P no presentó diferencias entre los sistemas; para la profundidad de 0-5 cm los valores fluctuaron entre 6.71 mg Kg⁻¹ (matorral) y 13.90 mg Kg⁻¹ (pastizal). Para la profundidad 5-30 cm, el matorral presentó nuevamente los contenidos más bajos de P entre los sistemas. Esto difiere con lo reportado por Huerta et al. (2008), quienes mencionan que el contenido de P tiende a decrecer al pasar de ecosistemas naturales a cultivados. Por otro lado, el alto contenido para el sistema agrícola es debido probablemente al retorno de P en los residuos de cultivos, lo que mejora la fertilidad del suelo. Al contrario del matorral, donde el bajo contenido en el suelo indica la re-translocación desde el tejido, quedando secuestrado en hojas, ramas, tallos u otras estructuras vegetales (González et al., 2004). La valoración de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000, corresponden de bajo (matorral 5-30 cm) a valoración alto (pastizal 0-5 cm), presentándose en los demás sitios como valoración mediana (Tabla 4).

El K presentó diferencias entre los usos de suelos ($p \leq 0.05$); los contenidos oscilaron de 0.78 cmol⁽⁺⁾ Kg⁻¹ a 1.97 cmol⁽⁺⁾ Kg⁻¹, correspondiendo a una valoración de contenido alto para todos los sistemas de uso de suelo. Sin embargo, la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) fue más estricta ya que no detectó diferencias estadísticas en los cuatro usos de suelo para ninguna de las profundidades. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Aghasi, Jalalian, & Honarjoo, (2010), quienes no encontraron variaciones en K y P en suelo de pastizales convertidos a agrícola. El Mg presentó diferencias entre los

sistemas de uso ($p \leq 0.05$); los contenidos oscilaron de 1.69 a 3.08 $\text{cmol}^{(+)} \text{Kg}^{-1}$. El sistema de matorral presentó una valoración alta para la profundidad 0-5 cm, a diferencia del pastizal que fue mayor en P pero con bajos contenidos de Mg. El contenido de Na presentó valores de 0.11 $\text{cmol}^{(+)} \text{Kg}^{-1}$ para los sitios de pastizal 0-5 cm y matorral en ambas profundidades, siendo el área agrícola el de mayor contenido. Se encontraron diferencias entre los sistemas de uso solo para la profundidad 5-30 cm.

En cuanto a los micronutrientes (Fe, Mn y Zn), son requeridos en menor cantidad, en promedio los contenidos fluctuaron en valores de 7.32, 6.91 y 1.56 mg L^{-1} para Fe, Mn y Zn, para la profundidad 0-5 cm, mientras que la profundidad 5-30 cm disminuyeron a valores de 3.41, 5.36 y 0.66 mg L^{-1} , respectivamente. El sistema de pastizal presentó los mayores contenidos de Fe, mientras que el matorral fue mayor en contenidos de Mn y Zn para la profundidad 0-5 cm. Entre los sistemas de uso de suelo, el Fe presentó diferencias ($p \leq 0.05$) en las dos profundidades, mientras que Mn y Zn solo presentaron diferencias en la profundidad 0-5 cm. La valoración fue variada, con contenidos adecuados para Mn en los cuatro sistemas, a bajos contenidos de Fe y Zn en los sistemas de plantación y agrícola. Herencia, Ruiz, Melero, Garcia Galavís, & Maqueda, (2008) mencionan que, en suelos calcáreos, con pH alto, el complejo con enmiendas orgánicas promueve el mantenimiento de Mn en forma disuelta, aumentando la disponibilidad en el suelo.

Tabla 2. Pruebas de comparación de medias de propiedades químicas en los usos de suelo estudiados para la profundidad 0-5 cm.

Uso de suelo	pH	P mg Kg^{-1}	K -----	Mg $\text{cmol}^{(+)} \text{Kg}^{-1}$	Na -----	Fe -----	Mn mg L^{-1}	Zn -----
Pastizal	7.58 a	13.90 a	1.97 a	1.69 b	0.11 a	19.25 a	7.35 ab	2.49 a
Matorral	7.61 ab	6.71 a	1.86 a	3.08 a	0.14 a	4.25 b	10.10 b	2.64 ab
Plantación	7.59 a	6.95 a	1.62 a	2.45 ab	0.11 a	2.95 c	5.86 ab	0.61 b
Agrícola	7.71 b	6.99 a	1.06 a	2.14 ab	0.15 a	2.84 c	4.34 a	0.51 b

Letras distintas por columna indican diferencias significativas (Tukey $p \leq 0.05$). Valores medios (n=16) de P = fósforo, K = potasio, Mg = magnesio, Na = sodio, Fe = hierro, Mn = manganeso, Zn = zinc.

Tabla 3. Pruebas de comparación de medias de propiedades químicas en los usos de suelo estudiados para la profundidad 5-30 cm.

Uso de suelo	pH	P mg Kg ⁻¹	K ----- cmol ⁽⁺⁾ Kg ⁻¹ -----	Mg ----- cmol ⁽⁺⁾ Kg ⁻¹ -----	Na -----	Fe ----- mg L ⁻¹ -----	Mn -----	Zn -----
Pastizal	7.66 b	6.47 a	1.37 a	1.85 ab	0.16 ab	6.05 a	5.82 a	0.53 a
Matorral	7.60 a	3.99 a	1.56 a	2.74 a	0.11 b	3.17 ab	7.32 a	0.73 a
Plantación	7.69 b	5.78 a	0.82 a	1.91 ab	0.16 ab	2.02 b	4.54 a	0.92 a
Agrícola	7.74 c	7.82 a	0.78 a	1.62 b	0.23 a	2.41 b	3.74 a	0.47 a

Letras distintas por columna indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$) Valores medios (n=16) de P = fósforo, K = potasio, Mg = magnesio, Na = sodio, Fe = hierro, Mn = manganeso, Zn = zinc.

Las variables MOS y COS mostró únicamente diferencias para la profundidad 0-5 cm, siendo el matorral y el pastizal los sistemas con mayor contenido de MOS y COS, siguiendo en orden decreciente la plantación y presentando los valores más bajos el sistema agrícola (Figura 4 y 5). Llorente, (2004) encontró en un vertisol bajo tres usos del suelo (Matorral, agrícola y vegetación secundaria), que el COS fue diferente entre los usos únicamente para los primeros 20 cm de profundidad, pero igual para los subsecuentes 5 profundidades hasta 70 cm. Igualmente sus resultados concuerdan en que el matorral fue el sistema con mayor contenido de COS y el agrícola con el menor contenido.

Mendham, O 'connell, & Grove, (2003) documentaron que el cambio de uso del suelo de vegetación nativa a pastizal o de pastizal a plantaciones en el suroeste de Australia; no afectó significativamente el contenido promedio de carbono total en el horizonte superficial (0-5 cm) ni a profundidades mayores de 20 cm. Sin embargo, Vela, López, & Gamiño, (2012) encontraron resultados similares a la presente investigación, señalando que los bosques naturales de oyamel contienen más COS (145.6 Mg ha⁻¹) que las áreas reforestadas con pinos (119.4 Mg ha⁻¹), y éstos a su vez más que los pastizales (90.0 Mg ha⁻¹) y las tierras de cultivo (46.1 Mg ha⁻¹).

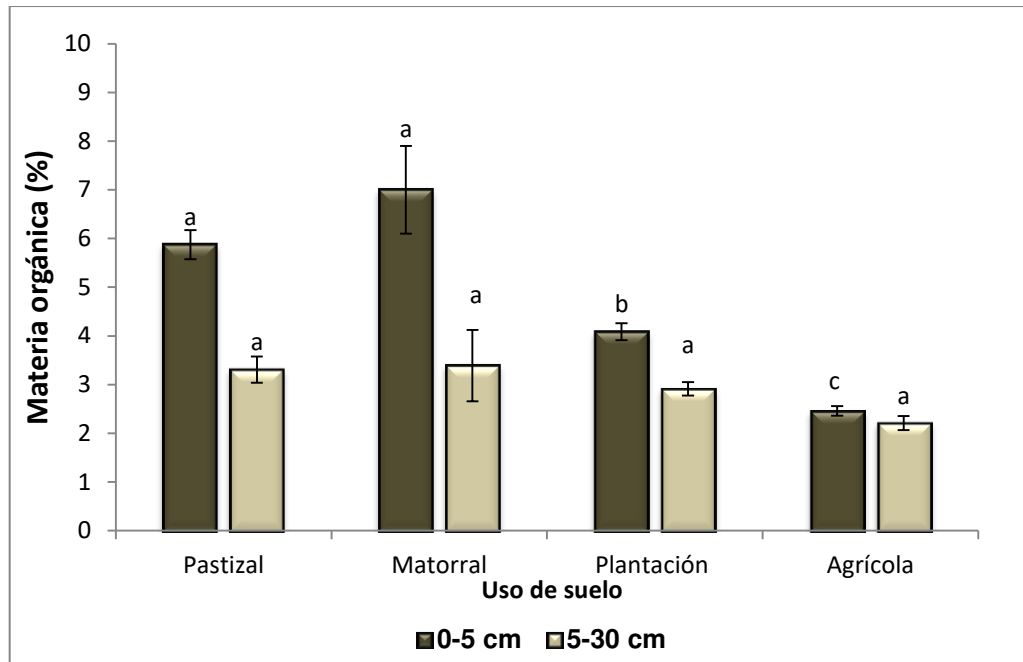


Figura 4. Valores medios del contenido de materia orgánica del suelo (%) en las profundidades 0-5 y 5-30 cm para los cuatro uso de suelo. Medias con distinta letra en una misma profundidad son estadísticamente diferentes (Tukey $p \leq 0.05$).

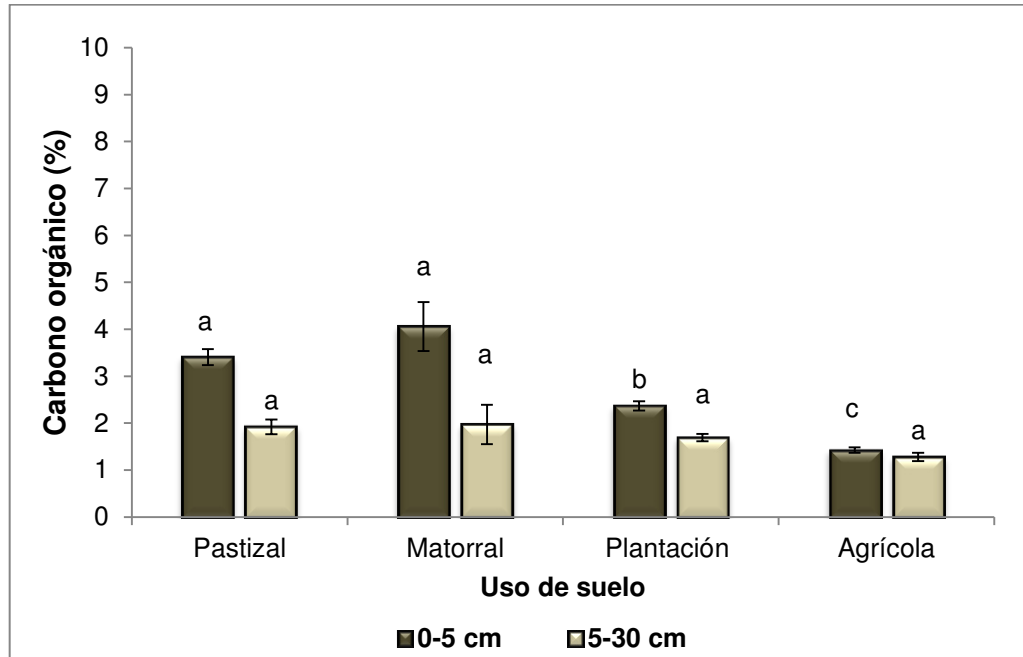


Figura 5. Valores medios del contenido de carbono orgánico del suelo (%) en las profundidades 0-5 y 5-30 cm para los cuatro usos de suelo. Medias con distinta letra en una misma profundidad son estadísticamente diferentes (Tukey $p \leq 0.05$).

Los resultados para Nt mostraron diferencias para los usos del suelo en las dos profundidades bajo estudio. Para la profundidad 0-5 cm, el matorral y el pastizal presentaron los valores más altos de 0.43 y 0.33%, respectivamente, siendo el sistema agrícola el de más bajo contenido (0.14%). Para la profundidad 5-30 cm, el matorral fue el que mostró de nuevo el contenido más alto (0.42%), mientras que el pastizal, plantación y sistema agrícola mostraron contenidos menores e iguales estadísticamente (Figura 6). Estos resultados concuerdan con Carvajal, (2008) quien encontró que el carbono y el nitrógeno fluctúan entre las profundidades del suelo, con usos del terreno como pastizal el cual almacenaba la mayor cantidad de estos elementos en la capa superficial (0-10 cm), mientras que un cafetal variedad Colombia los distribuía a través de la totalidad del perfil. El sitio de matorral presentó la clasificación de muy alto contenido, tanto de materia orgánica como de nitrógeno, mientras que la valoración del área agrícola fue de contenido mediano para materia orgánica y adecuada en nitrógeno (Tabla 4).

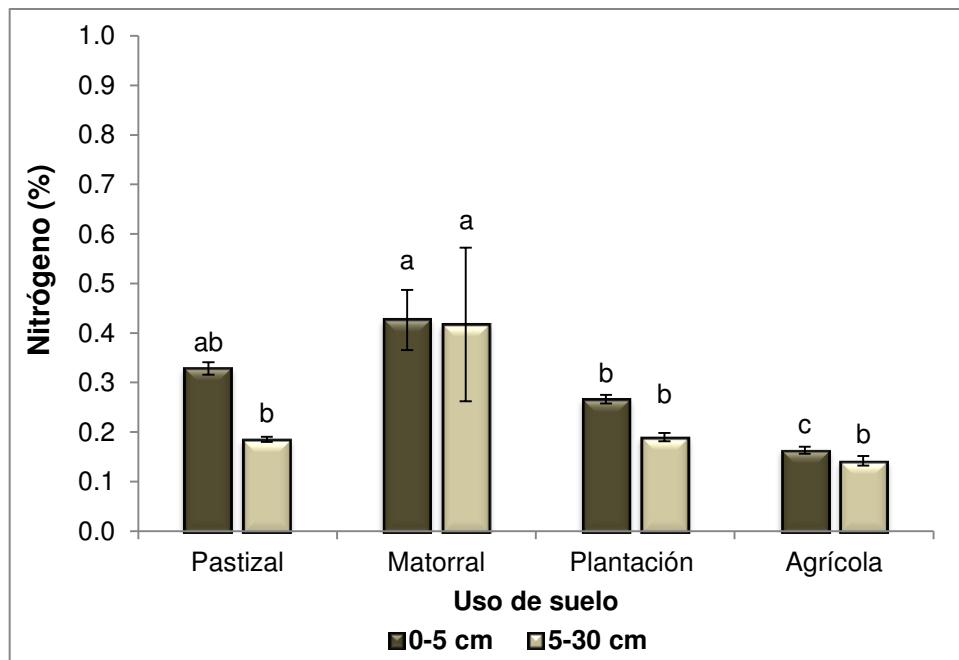


Figura 6. Valores medios del contenido de Nitrógeno total del suelo (%) en las profundidades 0-5 y 5-30 cm para los cuatro usos de suelo. Medias con distinta letra en una misma profundidad son estadísticamente diferentes (Tukey $p \leq 0.05$).

Tabla 4. Valoración de variables analizadas, para los cuatro sitios de estudio y en las dos profundidades.

Variables	Unidad	Pastizal		Matorral		Plantación		Agrícola	
		0 - 5	5 - 30	0 - 5	5 - 30	0 - 5	5 - 30	0 - 5	5 - 30
MO ^a	%	MA	M	MA	M	A	M	M	M
Nt ^a	%	A	AD	MA	MA	A	AD	AD	AD
P ^c	mg Kg ⁻¹	A	M	M	B	M	M	M	M
K ^c	cmol ⁽⁺⁾ Kg ⁻¹	A	A	A	A	A	A	A	A
Mg ^c	cmol ⁽⁺⁾ Kg ⁻¹	M	M	A	M	M	M	M	M
Ca ^c	cmol ⁽⁺⁾ Kg ⁻¹	A	A	A	A	A	A	A	A
CIC ^c	cmol ⁽⁺⁾ Kg ⁻¹	MA	MA	MA	MA	A	A	A	A
Mn ^b		AD	AD	AD	AD	AD	AD	AD	AD
Cu ^b		AD	AD	B	B	B	B	B	B
Fe ^b		AD	AD	AD	Ma	Ma	Ma	Ma	Ma
Zn ^b		AD	B	AD	B	B	B	B	B

^{a)} Clasificación de Woerner (1989) para MO y Nt: MA= muy alto, A= alto, AD= adecuado, M= mediano. ^{b)} Clasificación de Woerner (1989) para micronutrientes: AD = adecuado, Ma = marginal, B= bajo. ^{c)} Clasificación de la NOM-021-RECNAT-2000 clasificación: MA= muy alto, A= alto, M= mediano, B= bajo.

Las pérdidas de COS y Nt atribuibles al cambio de uso del suelo de matorral a otro sistema variaron de 2.4% hasta 66%. La MOS se redujo principalmente en la profundidad 0-5 cm, mientras que el Nt presentó las mayores reducciones en la profundidad de 5-30 cm, siendo el sistema agrícola el de mayor pérdida. (Tabla 5). Resultados similares presenta Llorente, (2004) quien encontró que un Matorral Submontano en vertisoles convertido a sistema agrícola, mostró una pérdida de COS de 37% en los primeros 20 cm de profundidad y que el matorral fue el sistema de uso que presentó los mayores contenidos de Nt. Igualmente, Vasques & Macías, (2017) encontraron en promedio una pérdida de 26% del carbón total en suelos con cultivos, en comparación con los suelos de bosques.

Tabla 5. Pérdidas de COS y Nt (%) en las profundidades de 0-5 y 5-30 cm por efecto del cambio de uso del suelo con relación al Matorral.

Uso del Suelo	COS (%)		Nt (%)	
	0-5 cm	5-30 cm	0-5 cm	5-30 cm
Pastizal	16	2.5	23	55
Plantación	42	14	37	55
Agrícola	65	35	63	66

La relación C/N en general fue baja para todos los sistemas de uso del suelo, variando de 5.6 (matorral) a 10.3 (pastizal) lo que se considera una buena proporción para la mineralización de la MOS. La prueba de Tukey mostró significancia para las dos profundidades. En la profundidad 0-5 cm el uso agrícola presentó la mejor relación C/N (8.7), igual al de la plantación y el matorral, pero diferente a la del pastizal (10.3). Por el contrario, en la profundidad de 5-30 cm, el matorral presentó la mejor relación C/N (5.6) diferente al pastizal y al uso agrícola, 10.3 y 9.1, respectivamente (Figura 7).

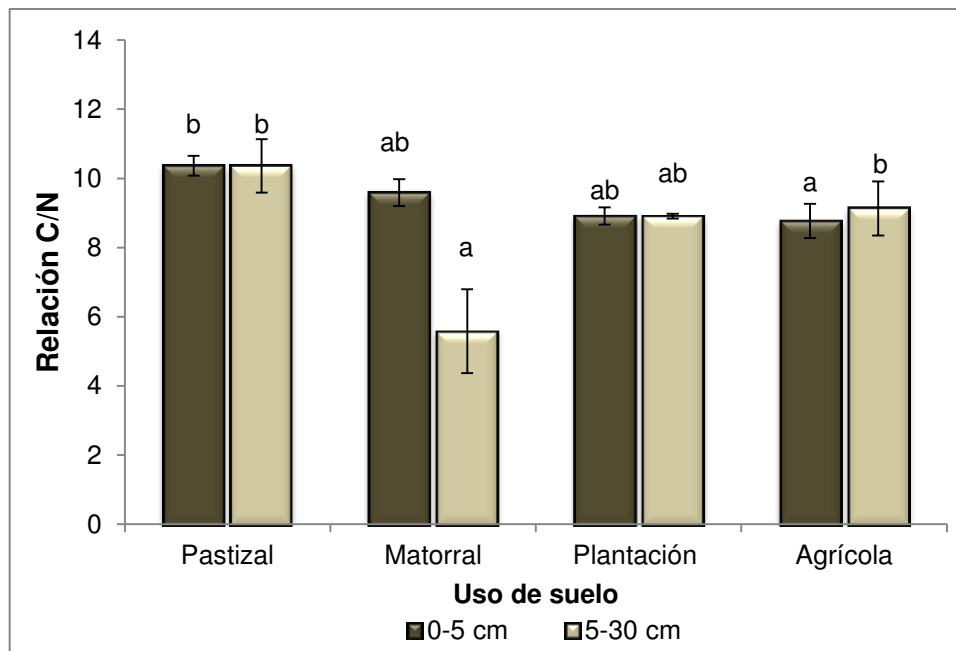


Figura 7. Valores medios de la relación C/N en las profundidades 0-5 y 5-30 cm para los cuatro usos de suelo. Medias con distinta letra en una misma profundidad son estadísticamente diferentes (Tukey $p \leq 0.05$).

En el Tabla 6, se muestran los valores medios (\pm desviación estándar) para las variables de conductividad eléctrica (CE), calcio (Ca), cobre (Cu) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC), a las cuales, se les realizó un análisis no paramétrico mediante el estadístico Kruskal Wallis (Tabla 7).

La CE es otra variable edáfica de suma importancia, ya que se relaciona con la absorción de nutrientes (Pérez et al., 2014). La CE osciló en valores de 0.09 dS m⁻¹ a 0.16 dS m⁻¹. Se encontraron diferencias ($p \leq 0.01$) solo para la profundidad 0-5 cm. Sin embargo, los datos de todos los usos del suelo presentaron una clasificación de efectos despreciables de la salinidad, indicando que no existe restricción en cuanto a cultivos, no hay presencia de sales que presenten un impacto negativo a la productividad.

El macronutriente Ca, fue significativo solo en la profundidad 5-30 cm, los valores fluctuaron de 57.65 a 64.83 cmol⁽⁺⁾ Kg⁻¹, presentando una clasificación alta para todas los sistemas. Los altos valores del Ca corresponden a los altos contenidos de CaCO₃ producto de la roca madre para los suelos vertisoles del área (Woerner, 1991).

Por su parte, el Cu fue significativo ($p \leq 0.01$) en ambas profundidades, presentaron un orden en su contenido de pastizal > matorral > agrícola > plantación. Con valores que fluctuaron de 0.28 mg L⁻¹ a 1.01 mg L⁻¹. La clasificación fue adecuada solo para el sitio de pastizal y bajo en los demás sitios. El Cu es un microelemento en el que su movilidad y retención depende en gran medida del pH y contenidos de materia orgánica, quedando atrapado en las moléculas de las estructuras del mantillo (Delgado & Serey, 2002).

La CIC presentó valores bajos en el área de agrícola, siendo el área de matorral (0-5 cm) el de mayor CIC (50.08 cmol⁽⁺⁾ kg⁻¹); en general la valoración correspondió a categorías alta (plantación y agrícola) y muy alta (pastizal y matorral). Las diferencias estadísticas fueron encontradas solo para la profundidad 0-5 cm. En vertisoles, los altos contenidos de arcillas están relacionados con la CIC.

Tabla 6. Valores medios \pm desviación estándar para CE, calcio (Ca), cobre (Cu) y capacidad de intercambio catiónico (CIC).

Uso de suelo	CE dS m ⁻¹	Cu mg L ⁻¹	Ca ----- cmol kg ⁻¹ -----	CIC
0-5 cm				
Pastizal	0.16 \pm 0.03	1.01 \pm 0.21	59.16 \pm 8.52	46.19 \pm 5.23
Matorral	0.15 \pm 0.02	0.37 \pm 0.05	60.26 \pm 3.15	50.08 \pm 9.05
Plantación	0.10 \pm 0.01	0.28 \pm 0.02	63.22 \pm 1.69	39.07 \pm 3.46
Agrícola	0.10 \pm 0.01	0.33 \pm 0.04	62.77 \pm 0.91	35.05 \pm 2.06
5-30 cm				
Pastizal	0.11 \pm 0.01	0.61 \pm 0.13	62.33 \pm 3.00	45.07 \pm 6.38
Matorral	0.13 \pm 0.05	0.36 \pm 0.02	57.65 \pm 3.44	43.27 \pm 6.86
Plantación	0.10 \pm 0.01	0.29 \pm 0.02	64.83 \pm 0.70	37.23 \pm 1.24
Agrícola	0.09 \pm 0.01	0.34 \pm 0.02	62.28 \pm 1.00	37.15 \pm 4.87

Tabla 7. Valores de H de Kruskal-Wallis para las variables de conductividad eléctrica (CE), calcio (Ca), cobre (Cu) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) para las dos profundidades estudiadas.

Profundidad cm	CE dS m ⁻¹	Ca cmol ⁽⁺⁾ Kg ⁻¹	Cu mg L ⁻¹	CIC Cmol ⁽⁺⁾ Kg ⁻¹
0 - 5	12.28**	2.31 ^{NS}	12.26**	9.55*
5 - 30	6.94 ^{NS}	10.47*	13.25**	5.36 ^{NS}

Valores medios (n=16) ** Diferencias altamente significativas, * Diferencias significativas, ^{NS} No significativo.

3.2 Correlación de las variables químicas

Se realizaron pruebas de correlación de Spearman para todas las variables estudiadas, en las dos profundidades (Tabla 8 y 9). El pH presentó una relación inversa con la mayoría de las variables exceptuando Na, siendo significativa la asociación del pH con CE, MO, Nt, K, Fe y CIC para las dos profundidades, con Fe en la profundidad 0-5 cm y Mg, Na y Mn para la profundidad 5-30 cm. Orden, Mandolesi, Kiessling, & Ron, (2011) encontraron una asociación negativa de pH con Ca, Mg y Fe, relacionándolo con la competencia entre los cationes por los sitios de cambio y el efecto del pH sobre la disponibilidad del microelemento.

Por su parte, la CE tuvo una correlación alta con el K, MO y Nt para ambas profundidades, mientras que en la profundidad 0-5 cm fue altamente correlacionada con todos los micronutrientes. Para la profundidad 5-30 cm solo se correlacionó con Na y Mn. La CE es frecuentemente utilizada para estimar la variabilidad de las propiedades de suelo y nutrientes ya que presenta fuertes asociaciones (Simon, Peralta, & Costa, 2013). La MO presentó una alta correlación con Nt, K, y Mn para las dos profundidades, con C/N, CIC, Fe y Zn para la profundidad 0-5 cm, mientras que de manera negativa con Na para la profundidad 5-30 cm. Los macronutrientes P, Mg y Ca no presentaron correlación con las demás variables para la profundidad 0-5 cm, mientras que Na solo se correlacionó con K. Para la profundidad 5-30 cm; los nutrientes de P, Ca y Zn no se correlacionaron con ninguna otra variable.

Tabla 8. Coeficientes de correlación de Spearman para las variables estudiadas (n=16) para la profundidad 0-5 cm. Valores en negritas indican significancia de p bilateral (ˆ) $p \leq 0.05$ y (**) $p \leq 0.01$.

	pH	CE	MO	Nt	C/N	P	K	Mg	Na	Ca	CIC	Fe	Mn	Cu	Zn
pH															
CE	-0.697**														
MO	-0.708**	0.906**													
Nt	-0.627**	0.857**	0.950**												
C/N	-0.462	0.629**	0.656**	0.452											
P	-0.139	0.295	0.085	-0.080	0.426										
K	-0.552*	0.721**	0.794**	0.775**	0.476	0.135									
Mg	-0.027	0.018	0.288	0.365	-0.144	-0.376	0.344								
Na	0.165	-0.447	-0.341	-0.275	-0.338	-0.340	-0.544**	-0.021							
Ca	-0.065	-0.157	-0.239	-0.347	-0.150	0.129	-0.229	-0.207	0.029						
CIC	-0.648**	0.797**	0.818**	0.757**	-0.518*	0.150	0.506*	0.171	-0.347	-0.168					
Fe	-0.542*	0.876**	0.753**	0.719**	0.709**	0.393	0.647**	-0.200	-0.362	-0.343	0.594*				
Mn	-0.406	0.671**	0.688**	0.661**	0.400	0.200	0.512*	0.385	-0.318	-0.068	0.685**	0.550*			
Cu	-0.366	0.712**	0.494	0.449	0.582*	0.352	0.250	-0.462	-0.068	-0.075	0.403	0.844**	0.303		
Zn	-0.359	0.744**	0.662**	0.664**	0.491	0.423	0.488	-0.132	-0.485	-0.221	0.621*	0.703**	0.362	0.556*	

CE = conductividad eléctrica, MO = materia orgánica, Nt = nitrógeno total, P = fósforo, K = potasio, Mg = magnesio, Na = sodio, Ca = calcio, Fe = hierro, Mn = manganeso, Cu= cobre, Zn = zinc, CIC = capacidad de intercambio catiónico.

Tabla 9. Coeficientes de correlación de Spearman para las variables estudiadas (n=16) para la profundidad 5-30 cm. Valores en negritas indican significancia de p bilateral (ˆ) $p \leq 0.05$ y (ˆˆ) $p \leq 0.01$.

	pH	CE	MO	Nt	C/N	P	K	Mg	Na	Ca	CIC	Fe	Mn	Cu	Zn
pH															
CE	-0.689ˆˆ														
MO	-0.566ˆ	0.759ˆˆ													
Nt	-0.831ˆˆ	0.776ˆˆ	0.570ˆ												
C/N	0.342	-0.132	0.194	-0.493											
P	0.355	-0.052	0.118	-0.378	0.321										
K	-0.765ˆˆ	0.765ˆˆ	0.503*	0.701ˆˆ	-0.224	-0.103									
Mg	-0.518ˆ	0.412	0.365	0.696ˆˆ	-0.529ˆ	-0.119	0.488								
Na	0.617ˆ	-0.515ˆ	-0.559ˆ	-0.681ˆˆ	0.162	0.168	-0.271	-0.421							
Ca	0.414	0.012	0.159	-0.174	0.600ˆ	0.278	-0.309	-0.218	0.085						
CIC	-0.499ˆ	0.465	0.494	0.402	0.076	-0.031	0.309	0.132	-0.456	0.097					
Fe	-0.416	0.197	0.218	0.087	0.082	0.118	0.418	-0.059	-0.118	-0.215	0.532ˆ				
Mn	-0.630ˆˆ	0.579ˆ	0.700ˆˆ	0.505ˆ	-0.012	0.071	0.721ˆˆ	0.459	-0.324	-0.041	0.397	0.559ˆ			
Cu	-0.476	0.371	0.306	0.125	0.153	0.137	0.600ˆ	-0.050	-0.038	-0.353	0.406	0.841ˆˆ	0.529ˆ		
Zn	-0.190	0.097	0.162	0.430	-0.191	0.166	0.088	0.465	-0.447	0.332	0.009	-0.121	0.274	-0.303	

CE = conductividad eléctrica, MO = materia orgánica, Nt = nitrógeno total, P = fósforo, K = potasio, Mg = magnesio, Na = sodio, Ca = calcio, Fe = hierro, Mn = manganeso, Cu= cobre, Zn = zinc, CIC = capacidad de intercambio catiónico.

4. Discusión

Los vertisoles son suelos con contenidos mayor de 30 % de arcillas, lo que indica una alta fertilidad potencial (Woerner, 1991), explicando con esto los altos contenidos para algunas de las variables analizadas. La CIC aun cuando presentó diferencias en la profundidad 0-5 cm, los contenidos no demuestran una pérdida de su fertilidad. De acuerdo a los resultados presentados y considerando el área del matorral como la vegetación testigo, se presentó un mayor contenido de Mg, Mn y Zn a diferencias de los demás usos de suelo para la profundidad 0-5 cm. No se encontraron diferencias entre los sistemas de uso del suelo para P y K en las dos profundidades. Rosolem & Calonego, (2013), mencionan que considerando las entradas y salidas de P y K en sistemas suelo - planta, las pérdidas de nutrientes se produjeron en los sistemas bajo manejo.

El secuestro de carbono en los suelos ha sido bien documentado, así como la influencia de las prácticas de manejo (Nair, Mehta, & Sharma, 2015). El COS, a través de los efectos en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo ha resultado ser el principal determinante de su productividad (Martínez, Fuentes, & Acevedo, 2008). Los resultados del COS en matorral y pastizal contrastan con lo observado por (Campo, García, Navarrete, & Siebe, 2016) quienes analizaron que la transformación del bosque a pastizal parece incrementar el almacenamiento de C en suelos del trópico seco en México. Sin embargo, Ross, Tate, Scott, & Feltham, (1999) encontraron en suelos de Nueva Zelanda que los cambios en el contenido total de C fueron pequeños tras la conversión de pastizal a bosque de pinos.

Por otra parte, se ha estimado que los suelos contienen el doble de carbono de la atmósfera, y que la cantidad de carbono almacenado en el suelo depende del equilibrio entre la entrada de C por la hojarasca y detritos de la raíz y la salida de C por respiración del suelo (Sofi et al., 2016). De este modo, el flujo de CO₂ representa una manera indirecta de determinar una respuesta sensible de la actividad microbiana, la cual representa una medición integrada de la

respiración de raíces, fauna y microorganismos del suelo y la mineralización del carbono desde diferentes fracciones de la materia orgánica (Acuña et al., 2006). En este sentido, estudios realizados en las mismas áreas de sistemas de uso en Linares, N.L., han reportado un decremento en las emisiones de CO₂ en el sistema agrícola a diferencias de los sistemas de pastizal y matorral (Cantú et al., 2010; Yáñez et al., 2017).

En Matorral parece ser el sistema de uso que redistribuye el Nt en ambas profundidades del suelo, debido probablemente a la presencia de especies de la familia Fabaceae, las cuales aportan nitrógeno vía hojarasca y que han sido registradas en el matorral constituyendo el 25% del total de especies (González et al., 2011). Además, las especies de las Fabaceas están asociadas a la capacidad del potencial de fijación del nitrógeno simbiótico (Zitzer, Archer, & Boutton, 1996). Igualmente, Lawal, Ogunwole, & Uyovbisere, (2009) encontraron en un Alfisol de Nigeria que el Nt disminuía al cambiar la vegetación nativa por una plantación de eucalipto, pero que aumentaba al cambiarlo a un sistema agrícola, mencionando que esto se debía al efecto de los fertilizantes usados en la agricultura.

Entre los usos bajo estudio, el pastizal mejoró considerablemente en variables como P, K y Fe. Jiménez, Mezquida, Benito, & Rubio, (2008) encontraron en suelos de pastizales una mejor fertilidad, comparado con suelo del bosque, atribuyéndolo al aporte de nutrientes en el estiércol y orina del ganado y a la excesiva producción de raíces finas de los pastizales. Sin embargo, lo anterior no aplica para todas las variables, en cuanto a los nutrientes Mg y K, se encontraron contenidos similares a lo reportado en este estudio en el trabajo de Martínez, Cotler, Etchevers, Ordaz, & de León, (2008) quienes mencionan que existe una mayor cantidad en bosques caducifolios que en pastizales. Estos dos elementos están relacionados, ya que altas concentraciones de K inducen un desbalance nutricional en suelos bajos en Mg (Molina, 2001), sin embargo, el pH observado en los sistemas de uso no afecta la absorción de estos elementos. Por otra parte, Ramos, Sánchez, & Gama, (2016) mencionan que en

suelos vertisoles y gleysoles, el pastizal es una buena opción de manejo debido a un aumento en nutrientes de P, K, y Fe a diferencia del matorral.

Para el sistema de uso agrícola, nutrientes como K, Mn, Fe y CIC, presentaron los valores más bajos en ambas profundidades, Fe para la profundidad 0-5 cm y Mg en la profundidad 5-30 cm. Mientras que, Dengiz, Sağlam, Sarioğlu, Saygin, & Atasoy, (2012) realizaron una investigación de las características morfológicas y analíticas de vertisoles en Turquía, encontrando resultados similares en las variables Ca, K y CIC y mencionan que la fertilidad química es comparativamente buena y en la agricultura se pueden alcanzar rendimientos óptimos si se establecen las técnicas de manejo adecuadas y eficientes para estos suelos. En este sentido, el área agrícola presenta un sistema de labranza mínima, que ayuda a disminuir las diferencias para algunas variables con respecto a los otros sistemas de uso. Buschiazzo, Panigatti, & Unger, (1998) reportan que, a través de diferentes años de implementación de labranza de conservación a diferencia de la labranza convencional, se mejoraron las propiedades físicas, químicas y biológicas, al incorporar los residuos vegetales en regiones subhúmedas y semiáridas en las Pampas, Argentina.

Castillo & Wright, (2008), evaluaron la distribución y disponibilidad de fósforo para suelos histosol, cultivados y bajo transformación de uso de suelo, al sur de Florida, USA, reportando mayor contenido en el sitio de pasto que los cultivados; indicando que la mayoría del P aplicado se secuestró en las fracciones estables, lo que disminuye la disponibilidad de P a los cultivos. Así mismo, mencionan que debido a las prácticas agrícolas y régimen de labranza actual, promueve una redistribución de Ca del subsuelo a la superficie, lo que conduce a una mayor retención de P en la fracción ligada al Ca.

En cuanto al área de plantación de eucaliptos, no hubo un aumento en las concentraciones de las variables analizadas, excepto para Zn en la profundidad 5-30 cm, donde presentó una diferencia de 0.2 mg L^{-1} con respecto al matorral. Temesgen et al., (2016), concluyen que las plantaciones de eucalipto degradan el funcionamiento del ecosistema del suelo y la sostenibilidad en comparación

de praderas, esto para plantaciones de *Eucalyptus* en Etiopia. Sin embargo, Mishra, Sharma, & Khan, (2003) mencionan que la reforestación con especies de *Eucalyptus tereticornis* pueden mejorar las propiedades físicas y químicas en suelos sódicos. Chen et al., (2013) sugiere que la conversión forestal de plantaciones nativas a plantaciones exóticas de eucaliptos altera la estructura y función de la comunidad microbiana del suelo, impulsada por cambios en la cobertura del sotobosque y la disponibilidad de recursos del suelo. Además, de que existe una baja descomposición de la hojarasca de eucalipto debido a su alto contenido de polifenoles, la tasas de descomposición, composición química y retorno de nutrientes es menor que en el bosque (Cizungu et al., 2014). Por otra parte, la producción de ácidos orgánicos generados por la descomposición de la materia orgánica, presentan un mayor potencial de lixiviación de cationes básicos (Dijkstra, Geibe, Holmstrom, Lundstrom, & Van Breemen, 2001).

CAPÍTULO III. PROPIEDADES HIDROEDÁFICAS EN VERTISOL BAJO DIFERENTES SISTEMAS DE USO DE SUELO

Resumen

El impacto del uso de los recursos naturales asociados con las actividades antropogénica ha aumentado evidentemente. Las propiedades hidroedáficas son esenciales en la relación suelo-agua y en diversos propósitos tal como es el manejo del riego. Los cambios en el uso del suelo pueden alterar estas propiedades por lo que el objetivo de este estudio fue evaluar algunas propiedades físicas del suelo en cuatro sistemas de uso de suelo en el noreste de México. El análisis de estas propiedades fue realizado en las 4 estaciones del año en un suelo vertisol, sometido a diferentes usos: pastizal, agrícola, plantación de eucaliptos y matorral espinoso tamaulipeco. Se tomaron muestras inalteradas para conductividad hidráulica (cm s^{-1}) y densidad aparente (g cm^{-3}). En cada sitio de muestreo se midió la resistencia mecánica a la penetración (kg cm^{-2}) e infiltración. También se colectaron cuatro muestras de suelo compuestas en dos profundidades (0-5 y 5-30 cm) para la determinación de textura y la curva de retención de humedad. Los resultados presentaron mayor contenido de las fracciones de arcilla y limo, siendo característico de suelos vertisoles. Se encontraron diferencias significativas entre el sistema de uso del suelo y por estación climática para la conductividad hidráulica y la infiltración. Por estación, no se encontraron diferencias en la resistencia mecánica a la penetración, densidad aparente y porosidad. La relación entre las propiedades fueron analizadas mediante una correlación de Spearman, la conductividad hidráulica presentó una asociación negativa con densidad aparente ($Rho = -.490$) y resistencia mecánica a la penetración ($Rho = -.579$) y una asociación positiva con porosidad ($Rho = .488$) e infiltración ($Rho = .523$). La infiltración fue la variable que presentó asociación con la mayoría de las demás propiedades exceptuando al contenido de limo. Los resultados demuestran que en vertisoles, cambios de uso de suelo modifican las propiedades físicas, así mismo cambios

estacionales durante el año pueden afectar procesos relacionados a la disponibilidad de agua en el suelo, como la permeabilidad e infiltración.

Palabras clave: Densidad aparente, Infiltración, curva de retención de humedad, dureza, permeabilidad.

Summary

The impact of use of natural resources associated with anthropogenic activities has increased evidently. Hydro-edaphic properties are essential in the soil-water relationship, in various purposes such as irrigation management. Land use changes can alter these properties, so the objective of this study was to evaluate some physical properties in four land use systems in northeast Mexico. The analysis of these properties was carried out in the 4 seasons in a vertisol soil, subjected to different uses: grassland, agricultural, *Eucalyptus* plantation and thornscrub. Unaltered samples were taken for hydraulic conductivity (cm s^{-1}) and bulk density (g cm^{-3}). Mechanical resistance to penetration (kg cm^2) and infiltration were measured at each sampling site. Also were collected four soil samples in two depths (0-5 and 5-30 cm) for texture and moisture retention curve. The results presented higher content of clay and silt fractions, being characteristic of vertisol soils. Significant differences were found between soil use system and climatic season for hydraulic conductivity and infiltration. By season, no differences were found in the mechanical resistance to penetration, bulk density and porosity. The properties were analyzed by Spearman's correlation, hydraulic conductivity showed a negative association with apparent density ($Rho = -.490$) and mechanical resistance to penetration ($Rho = -.579$) and a positive association with porosity ($Rho = .488$) and infiltration ($Rho = .523$). Infiltration was the variable that showed association with most other properties except silt content. The results shows that in vertisols, land use change modify physical properties, as well as seasonal changes can affect processes related to availability of water in the soil, such as permeability and infiltration.

Key words: Bulk density, infiltration, moisture retention curves, soil hardness, permeability.

1. Introducción

Los cambios de uso de suelo son una de las actividades humanas más importantes que afectan la función del ecosistema e impactan en la calidad de suelo (Vinhal-Freitas, Corrêa, Wendling, Bobuľská, & Ferreira, 2017). Cambios de uso de suelo son considerados como problemas ambientales locales y/o globales, permitiendo la disponibilidad de los recursos y debilitando la capacidad de los ecosistemas (Foley, 2005).

Las propiedades físicas del suelo son fundamentales para el estudio de la interacción suelo-agua. Una gestión eficaz del agua y del suelo, a menudo requiere de conocer las propiedades hidroedáficas tales como la conductividad hidráulica y funciones de retención de agua (Wassar, Gandolfi, Rienzner, Chiaradia, & Bernardoni, 2016). La conductividad hidráulica denotada como K_s permite describir y predecir los movimientos del agua y de los solutos a través de los suelos (Karuku et al., 2012; Nasri, Fouché, & Torri, 2015), es considerada como una propiedad altamente dinámica del suelo (Lin, Wheeler, Bell, & Wilding, 2005) y es un parámetro fundamental del suelo que controla los procesos hidrológicos como la infiltración y el escurrimiento superficial (Bagarello, Di Prima, & Iovino, 2017).

La humedad del suelo juega un papel clave en la predicción y comprensión de diversos procesos hidrológicos (Yao, Zhao, Zhang, & Liu, 2013). La cantidad de agua con respecto al nivel de energía para mantener el agua en el suelo se conoce como curva característica del agua del suelo (SWCC) o la curva de retención de humedad, se utiliza para predecir el almacenamiento de humedad, la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente, y que son útiles para usarse para fines de riego (Susha, Singh, & Shojaei, 2014).

El agua disponible para las plantas es el agua del suelo que puede ser absorbida por las raíces de las plantas y se obtiene restando el punto de marchitamiento permanente de la capacidad de campo. Diversos factores influyen en la cantidad de humedad contenida en el suelo, tales como la

distribución de tamaño de partícula, estructura, porosidad, área superficial específica, profundidad, entre otros (Susha et al., 2014).

La densidad aparente se define como la masa de una cantidad de partículas de un material dividida por el volumen total que ocupan (Barros, Thiers, & Torres, 2016). La densidad aparente es una característica importante que afecta a las funciones clave del suelo, como la capacidad de retención de agua, la infiltración, y aireación (Mora & Lázaro, 2014). Diferentes factores como profundidad, contenido de materia orgánica o la compactación influyen en los valores de densidad aparente (Martín, Reyes, & Taguas, 2017). La compactación del suelo es un proceso de densificación relacionado con el colapso de los poros causado por el peso o la presión mecánica que sobrepasa la resistencia del suelo (Osuna et al., 2006).

La infiltración es la velocidad máxima a la que el agua empapa o es absorbido a través de la superficie del suelo (Alaoui, Lipiec, & Gerke, 2011), es considerada un indicador clave de la calidad de suelo (Martínez et al., 2015). La infiltración del agua en el suelo está influenciada por varios factores, como la labranza y cubierta vegetal, la rugosidad superficial, la porosidad y densidad del suelo, así como también el contenido de carbono orgánico, los agregados y el contenido de agua en el suelo (de Almeida et al., 2018) pueden modificar la tasa de infiltración.

Los vertisoles ocupan el 8.3% de México y son considerados suelos productivos (Torres et al., 2016). El nombre vertisol proviene de latín *vertere*, que significa voltear, refiriéndose al constante reciclaje interno del suelo mineral (IUSS, 2007). Los vertisoles tiene características muy particulares, muestran alternancia de sus estados estructurales, presentan restricciones físicas, debido a ciclos de expansión-contracción, relacionados con el tipo de arcilla (Cerana et al., 2004), por lo que son estructuralmente inestables, tienden a aglomerarse fácilmente en respuesta a los cambios de humedad, siendo un suelo que tiene fácilmente a compactarse (Ghosh et al., 2011). El cambio en el uso de suelo y su manejo, disturbios y/o ciclos naturales, tales como cambios diurnos y

estacionales, pueden afectar las propiedades hidráulicas del suelo (Zhou, Lin, & White, 2008).

En este capítulo, se ilustran las propiedades hidroedáficas del vertisol bajo diferentes sistemas de uso de suelo y la variabilidad estacional en el año, para evaluar el efecto en la relación suelo-agua en suelos con altos contenidos de arcillas.

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

El presente estudio se realizó en el campus de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, a 8 km al sur de la ciudad de Linares, Nuevo León, al noreste de México (24° 47' 51" N, 99° 32' 29" O) con una altitud de 350 m. (Figura 1). La región es subtropical y semiárida con verano cálido. La temperatura media mensual de la zona oscila entre 14.7 °C en enero y 22.3 °C en agosto, con temperaturas diarias de 45 °C durante el verano. La precipitación media anual es de 805 mm con una distribución bimodal (González et al., 2004). El tipo de suelo que predomina es el vertisol pélico, son suelos profundos de coloración gris oscuro, clase textural arcillo limosa con alto contenido de montmorillonita, que permite que se contrae y se expanda significativamente en respuesta a los cambios en la humedad del suelo (Woerner, 1991).

2.2 Sistemas de uso de suelo

Se seleccionaron cuatro sistemas de uso de suelo:

a) Matorral espinoso tamaulipeco; considerada como la vegetación nativa, se encuentra constituida por la dominancia de especies espinosas, donde predominan *Celtis pallida*, *Acacia rigidula*, *Randia aculeata*, *Condalia lycioides*, *C. obovata*, *Bernardia myricaefolia*, *Forestiera angustifolia*, *Karwinskia humboldtiana*, entre otras.

b) Pastizal, consiste en un sistema de ganadería intensiva y rotación de pastizales con la especie *Dichanthium annulatum*.

c) Área agrícola; campo de rotación de cultivos de *Sorghum bicolor* y *Triticum* spp. bajo un sistema de labranza cero con criterios de producción sostenible.

d) Plantación de eucaliptos; área con especies de *Eucalyptus camaldulensis* y *E. microteca*. Esta plantación se realizó en 1983 con fines de investigación, inicialmente en un sistema Taungya (Cantú et al., 2010).

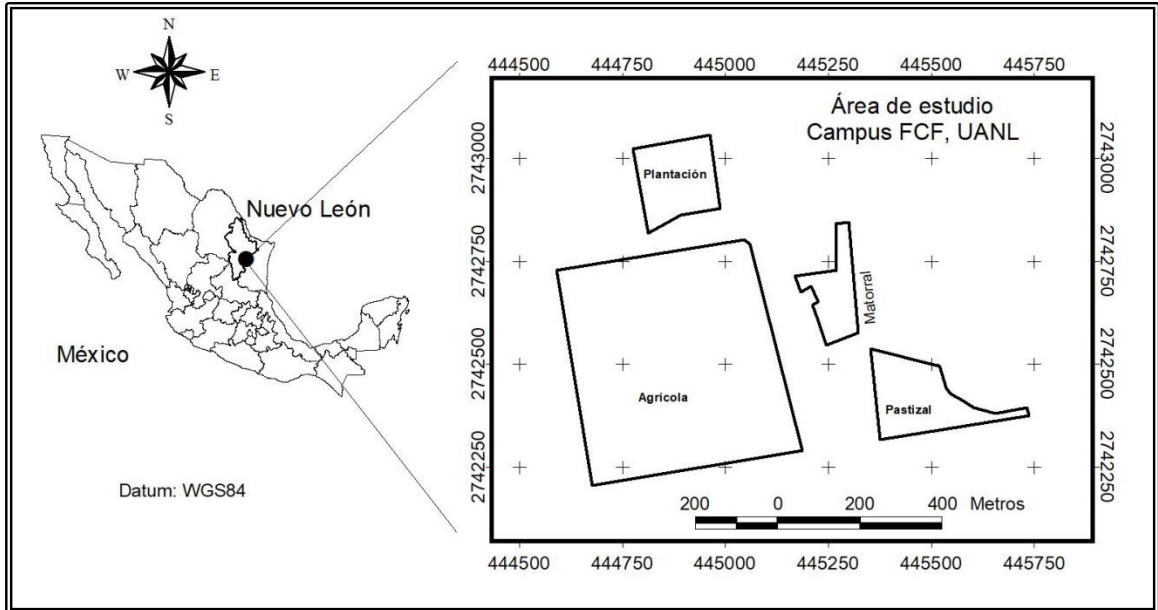


Figura 1. Localización del área de estudio.

2.3 Muestreo de suelo y análisis

En cada sistema de uso de la tierra se colectaron cuatro muestras de suelo compuestas por cuatro sub-muestras, a dos profundidades (0-5 y 5-30 cm). Las muestras de suelo colectadas ($n= 32$) fueron llevadas al laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Forestales, UANL, donde se secaron al aire, se trituraron y tamizaron a través de un tamiz con malla de 2 mm para análisis de textura y retención de humedad.

Las demás propiedades físicas se llevaron a cabo por estación en fechas de: verano (junio, 2015), otoño (octubre, 2015), invierno (enero, 2016) y primavera (abril, 2016). Para la conductividad hidráulica y la densidad aparente se obtuvieron tres muestras de suelo no perturbadas en cada estación del año para cada sistema de uso de suelo. Mientras que para la resistencia mecánica a

la penetración y la infiltración se realizaron *in situ* para cada sistema de uso de suelo.

2.3.1 Textura

La determinación de la textura del suelo se realizó por el procedimiento de Bouyoucos a través del método AS-09 de la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). Las fracciones del suelo corresponden al contenido de arena, limo y arcillas, la determinación mediante el método del hidrómetro de Bouyoucos (Gee & Bauder, 1986) se basa en la proporción diferencial de asentamiento de las partículas del suelo en el agua, basado en la ley de Stokes, que indica que la velocidad de caída de las partículas es directamente proporcional al cuadrado del radio de las partículas, supuestamente esféricas (Porta, López, & Poch, 2011).

Las muestras de suelos fueron sometidas a eliminación de la agregación de materia orgánica y la floculación debido a los cationes calcio y magnesio. Se tomaron lecturas a los 40 segundos para la separación de partículas mayores de 0.05 mm (arena) y de 2 horas para partículas de diámetros mayores de 0.02 mm (limo y arena) y mediante el triángulo de texturas establecido por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos se determinó la clasificación correspondiente (SEMARNAT, 2002).

Las lecturas del hidrómetro fueron corregidas agregando 0.36 por cada grado Celsius arriba de 19.5°C, restando la misma cantidad por cada grado debajo de dicha temperatura; los porcentajes de arena, arcilla y limo se determinaron mediante las fórmulas 1, 2 y 3.

$$\% \text{ Arena} = 100 - (\text{lectura 1} \times 2^*) \quad (1)$$

$$\% \text{ Arcilla} = \text{lectura 2} \times 2^* \quad (2)$$

$$\% \text{ Limo} = 100 - (\% \text{ Arena} + \% \text{ Arcilla}) \quad (3)$$

Dónde: lectura 1= lectura del hidrómetro a los 40 segundos \pm temperatura corregida, lectura 2 = lectura del hidrómetro a las 2 horas \pm temperatura corregida, 2* = utilizando 50 gramos de suelo, ya que el hidrómetro esta calibrado en porcentajes considerando 100 g de suelo.

2.3.2 Curva de retención de humedad

La curva de retención de la humedad del suelo se determinó mediante el método de la placa y la membrana de presión. Las muestras de suelo se sometieron a 0.33, 0.5, 1.5, 5, 10 y 15 atmósferas de presión utilizando extractores de placa (Soil Moisture Equipment Corp., Santa Barbara, CA). Para determinar el agua disponible se estimó mediante la diferencia entre los datos de capacidad de campo (0.33 bar) y el punto de marchitez permanente (15 bar) (Klute & Dirksen, 1986) (Figura 2).

Para la medición de la humedad del suelo, se realizó por la técnica termogravimétrica (secado en horno). Las muestras de suelo húmedas (después de aplicar presión) se someten a secado en estufa durante 24 h, a 105 °C, y posteriormente se registró el peso del suelo seco, mediante la fórmula 4 del método AS-05 para determinación del contenido de humedad del suelo por gravimetría NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002), se obtuvo el porcentaje de humedad en cada muestra sometida a las diferentes presiones.

$$\theta g = \frac{(PB+Psh)-(PB+Pss)}{(PB+Pss)-(PB)} \times 100 \quad (4)$$

Dónde: θg = Contenido de humedad gravimétrica expresado en porcentaje (%), PB = Peso del bote con tapa (g), Psh = Peso del suelo húmedo (g), $PB + Psh$ = Peso del bote más peso del suelo húmedo (g) y $PB + Pss$ = Peso del bote más peso del suelo seco (g).



Figura 2. Ollas de presión para la obtención de muestras a diferentes presiones.

2.3.3 Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica saturada (K_s) fue medida mediante el método de análisis de la permeabilidad de suelo especificado por el JIS (Das, 2002). Comúnmente se mide en términos de la tasa de flujo de agua a través del suelo en un periodo de tiempo determinado (Sánchez, 2015). El procedimiento consistió en la utilización de dos cilindros de igual tamaño y volumen. Se colectaron muestra inalteradas mediante cilindros (Figura 3), y se sometieron a saturación 24 horas, posteriormente se midió el tiempo en que una columna de agua atraviesa la columna de suelo saturado (Figura 4); el contenido de la permeabilidad del suelo se determinó mediante la fórmula 5.

$$k_s = 2.3 \frac{\alpha \cdot L}{A(t_1 - t_2)} \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \quad (5)$$

Dónde: k_s = conductividad hidráulica saturada (cm s^{-1}), $h_1/h_2 = 2$, $\alpha = A$, $L = 5$ cm y $t_1 - t_2 = \Delta t$; A = área de la sección transversal de los cilindros superior e inferior; t_2 = hora final (seg); t_1 = hora inicial (seg) (Figura 5) (Sánchez, 2015). La ecuación queda simplificada como (Fórmula 6):

$$k_s = \frac{3.46}{\Delta t} \quad (6)$$



Figura 3. Colecta de muestras inalteradas para medición de permeabilidad.



Figura 4. Muestras a saturación (izquierda) y medición de la diferencia del tiempo de permeabilidad (derecha).

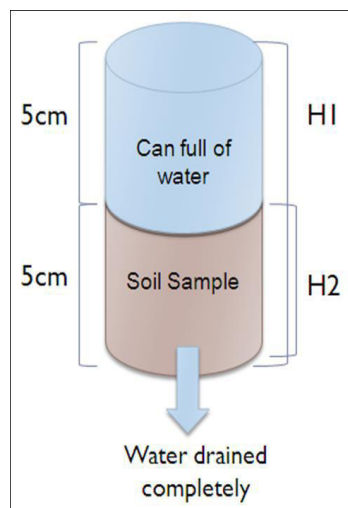


Figura 5. Esquematación del proceso de medición de permeabilidad (Sánchez, 2015).

2.3.4 Densidad aparente

La densidad aparente (DA) se determinó por el método del cilindro (Woerner, 1989), colectando muestras inalteradas mediante cilindros metálicos de 5 cm de diámetro por 5 cm de longitud. Las muestras colectadas se colocaron de 24 a 48 horas a 105°C en estufas de aire forzado. La DA se determinó con la fórmula 7 (Figura 6).

$$DA (g\ cm^{-3}) = \frac{\text{peso seco de la muestra (g)}}{\text{volumen del cilindro (cm}^3)} \quad (7)$$

Del mismo modo, se calculó la porosidad total (P) a partir de los valores obtenidos de DA y asumiendo una densidad de partícula de 2.65 g cm⁻³ (Lu, Malik, Chen, & Wu, 2014; McPhee, Aird, Hardie, & Corkrey, 2015) (Fórmula 8)

$$\% P = \left(1 - \frac{\text{densidad aparente (DA)}}{\text{densidad de partículas (DP)}}\right) 100 \quad (8)$$



Figura 6. Colecta de muestra para densidad aparente por el método del cilindro.

2.3.5 Resistencia mecánica a la penetración

La medición de la resistencia mecánica a la penetración (kg cm⁻²) se midió con un medidor de dureza del suelo llamado penetrómetro tipo Yamanaka (Figura 7). El penetrómetro de cono es un dispositivo de medición que proporciona un método uniforme estándar que caracteriza la resistencia a la penetración de los

suelos, consiste en un cono circular de acero inoxidable de 30 grados con un eje de accionamiento (Alexandrou, Stinner, & Reza, 2004). El penetrómetro se introduce verticalmente en el suelo, la compresión del resorte leída desde la escala, muestra la resistencia causada por la dureza del suelo en kg cm^{-2} o mm (Tada, 1987).



Figura 7. Penetrómetro tipo Yamanaka.

2.3.6 Infiltración

Se midió la infiltración con un infiltrómetro de anillo doble (Figura 8), con tres repeticiones en cada sistema de uso de la tierra. Los infiltrómetros se colocaron en la superficie del suelo y se introdujeron a 5 cm de profundidad usando un martillo de goma, para medir el proceso de infiltración se añadió agua a los dos anillos, teniendo cuidado de que el nivel de agua fuera igual en ambos, se tomaron mediciones durante tres horas anotando la cantidad de agua infiltrada por tiempo de lectura. La tasa de infiltración se calculó con la fórmula 9 (Zhang et al., 2017) y la capacidad de infiltración (mm h^{-1}) se definió como la tasa de infiltración promedio de las últimas 5 lecturas hasta la medición de 120 min.

$$i = \frac{\Delta I}{\Delta t} * 600 \quad (9)$$

Dónde: i es la tasa de infiltración (mm h^{-1}), ΔI es la lectura de infiltración acumulada, Δt es el tiempo durante el periodo de infiltración (mm), y 600 es un coeficiente de conversión a horas.



Figura 8. Infiltrómetro de doble anillo.

2.4 Análisis estadísticos

Para probar los supuestos de normalidad y homoscedasticidad de las propiedades hidroedáficas se realizaron pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, cumpliendo estos supuestos las propiedades de densidad aparente e infiltración. Las variables que no cumplían estos supuestos se transformaron para inducir una distribución normal; conductividad hidráulica, arena, arcilla, limo, agua disponible y porosidad se transformaron a raíz cuadrada de la proporción (\sqrt{x}). Los valores de resistencia mecánica a la penetración se les aplicó una transformación logarítmica ($\ln X$) (Sokal & Rohlf, 2003). Los datos se analizaron mediante análisis de varianza de dos vías (ANOVA), para evaluar el efecto del sistema de uso de la tierra (factor A) y los cambios de estación o profundidad (factor B), así como su interacción ($A * B$) y una comparación de medias con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Así mismo, se realizó una correlación

de Spearman para conocer la relación entre las variables. Para los datos de infiltración se realizó una correlación de Pearson con los datos de humedad del suelo correspondientes a cada una de las mediciones. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando la versión 13.0 del software SPSS (SPSS Inc., Chicago, IL), con un nivel de confianza de $p \leq 0.05$.

3. Resultados

3.1 Efectos sobre las propiedades físicas e hidroedáficas

Cambios de uso de suelo afectaron significativamente algunas propiedades hidroedáficas en las estaciones estudiadas. El análisis de varianza mostró diferencias en el factor uso de suelo (FA) para conductividad hidráulica (K_s), densidad aparente (DA), porosidad (P), resistencia mecánica a la penetración (RMP) e infiltración (I). Para el factor estación (FB), solo se mostraron diferencias en K_s e I , mientras que DA y RMP , no se encontraron diferencias. La interacción de los dos factores (A*B) se comportó de manera similar, siendo solo significativo para K_s e I (Tabla 1).

Tabla 1. Resultados del análisis de varianza para el modelo con dos criterios de clasificación (uso de suelo ^a y estación ^b) y contracte de Levene^c.

Variable	FA ^(a) F _(3, 31)	FB ^(b) F _(3, 31)	FA*FB F _(9, 31)	Prueba de Levene ^(c) F _(15, 31)	R² _{ajustada}
K_s (cm s ⁻¹)	28.549**	9.765**	3.962**	6.054**	0.74
DA (g cm ⁻³)	12.573**	0.214 ^{NS}	0.994 ^{NS}	1.039 ^{NS}	0.40
P (%)	12.693**	0.186 ^{NS}	0.989 ^{NS}	1.169 ^{NS}	0.40
RMP (kg cm ⁻²)	54.445**	0.564 ^{NS}	1.396 ^{NS}	2.515**	0.77
I (mm h ⁻¹)	23.427**	3.360*	3.562**	3.974**	0.67

**Diferencias altamente significativas ($p \leq 0.01$); *diferencias significativas ($p \leq 0.05$); ^{NS}No significativo. K_s = conductividad hidráulica, DA = densidad aparente, P = porosidad, RMP = resistencia mecánica a la penetración, I = infiltración.

3.1.1 Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica saturada (K_s) del suelo cambia significativamente en los cuatro sistemas de uso de suelo y por estación (Tabla 1). Los valores medios K_s oscilan de $0.8 \times 10^{-5} \text{ cm s}^{-1}$ en el pastizal a 0.02 cm s^{-1} para los demás sitios. En la estación de primavera, los valores de K_s fueron más altos con valores de 0.05 cm s^{-1} (plantación), 0.048 cm s^{-1} (agricultura) y 0.046 cm s^{-1} (matorral).

En general, para todas las estaciones, el pastizal presentó los valores más bajos entre los sitios. En la estación de invierno no se detectó diferencias entre los usos de la tierra según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) (Figura 9). Estos resultados indican que en el vertisol, los cambios en el uso de la tierra y los efectos estacionales tienen mayores efectos sobre la conductividad hidráulica saturada en la capa superior del suelo.

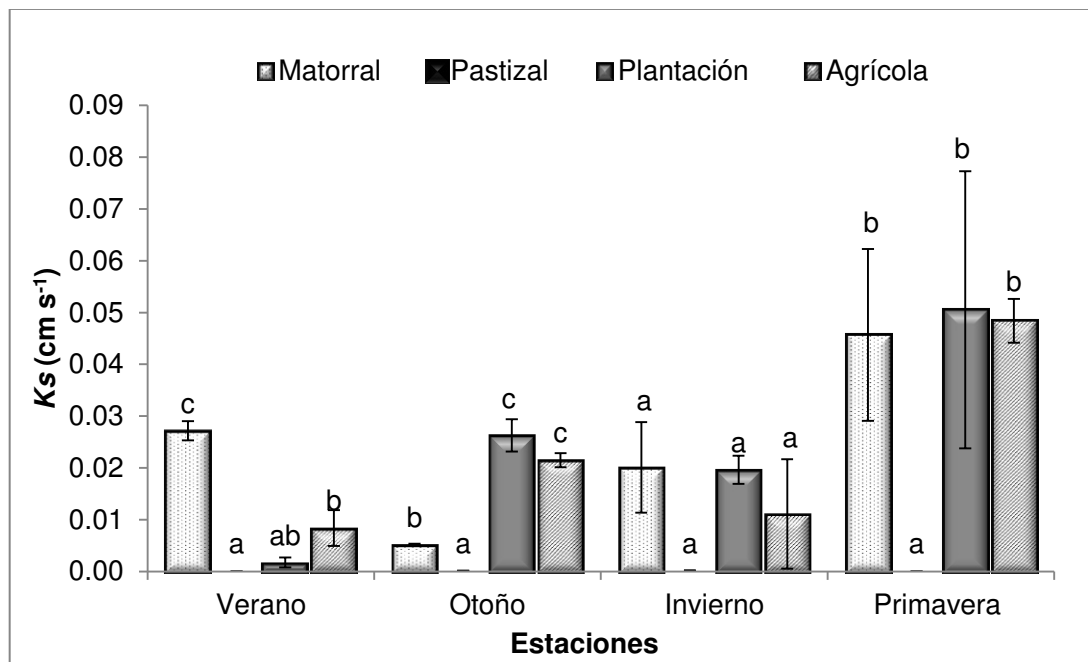


Figura 9. Valores medios de conductividad hidráulica (K_s) por estación para los cuatro usos de suelo. Medias con letras diferentes en la misma estación son diferentes estadísticamente (Tukey $p \leq 0.05$).

3.1.2 Densidad aparente y porosidad

La densidad aparente (DA) y la porosidad total (P) presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) entre los sistemas de uso de suelo. La densidad aparente aumentó y la porosidad disminuyó en los diferentes usos en comparación con el matorral.

Los valores medios de la densidad aparente fueron de 1.01 g cm^{-3} para el matorral, 1.05 g cm^{-3} para plantación, 1.14 g cm^{-3} en el área agrícola y 1.24 g cm^{-3} en el pastizal (Figura 10). Estos valores corresponden a una densidad baja de acuerdo a la valoración de Woerner (1989) y son considerado como ideal para el desarrollo de raíces en suelos arcillosos de acuerdo a la valoración por el Soil Survey Staff (Burt, 2009).

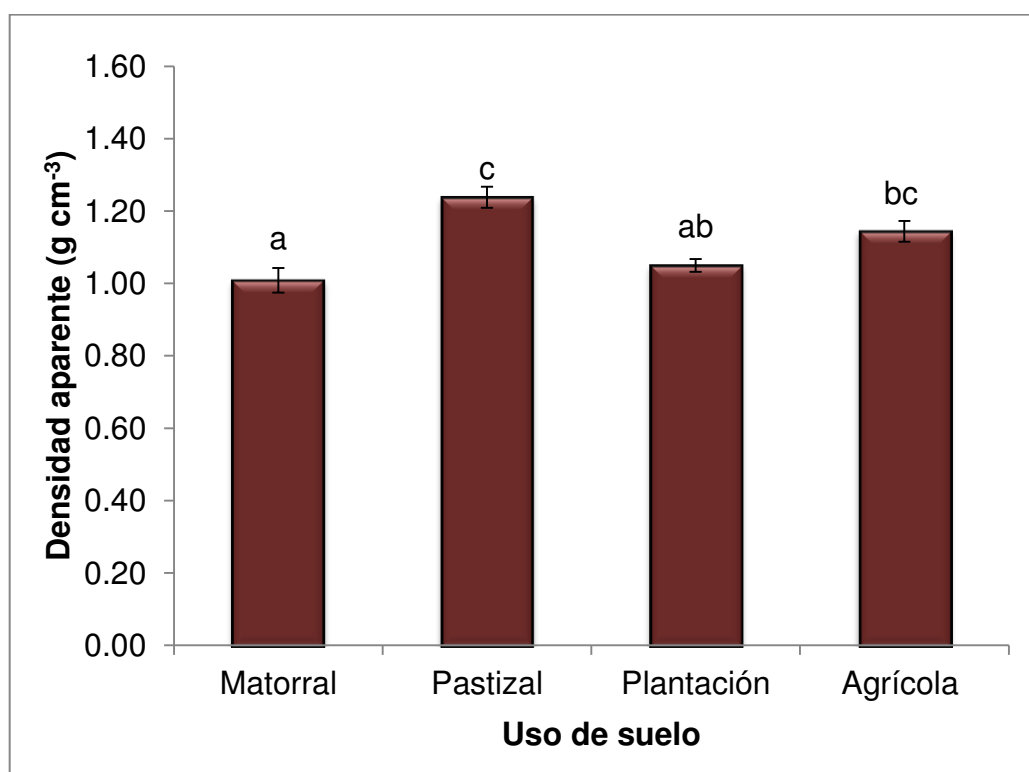


Figura 10. Valores medios de densidad aparente (DA) para cada sistema de uso de suelo (n=12). Medias con letras diferentes indican diferencias estadísticas (Tukey $p \leq 0.05$).

La porosidad disminuyó de valores de 61.9% (matorral) a 60.4% (plantación), 56.8% (agrícola) y 53.3% (pastizal), encontrándose diferencias entre todos los usos de la suelo (Figura 11). Los valores más altos de densidad aparente y la menor porosidad fueron los pastizales, mientras que el matorral fue lo opuesto.

Los valores de densidad aparente y porosidad no parecen diferir significativamente con la estación, aun cuando la densidad aparente es altamente dependiente de las condiciones del suelo al momento del muestreo, especialmente a cambios en los contenidos de agua (Burt, 2009).

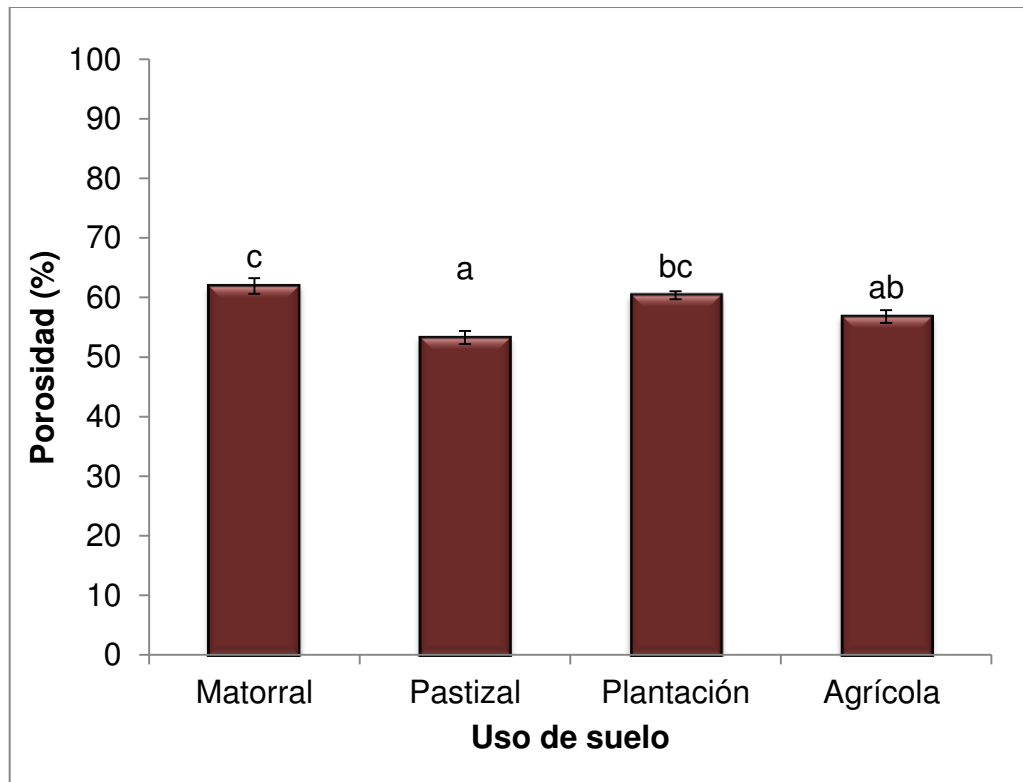


Figura 11. Valores medios de porosidad total (P) para cada sistema de uso de suelo ($n=12$). Medias con letras diferentes indican diferencias estadísticas (Tukey $p \leq 0.05$).

3.1.3 Resistencia mecánica a la penetración

La Figura 12 muestra el comportamiento de la resistencia mecánica a la penetración (RMP), es decir la dureza del suelo. En el sistema de pastizal se presentaron los valores de dureza con mayor valor (5.3 kg cm^{-2}), mientras que el sitio agrícola fue el más bajo (0.4 kg cm^{-2}). Para los sitios de matorral y plantación los valores fueron similares (1.6 y 1.3 kg cm^{-2} , respectivamente) y no se encontraron diferencias entre estos dos sitios. Del mismo modo, la RMP no parece diferir significativamente a lo largo de las estaciones estudiadas.

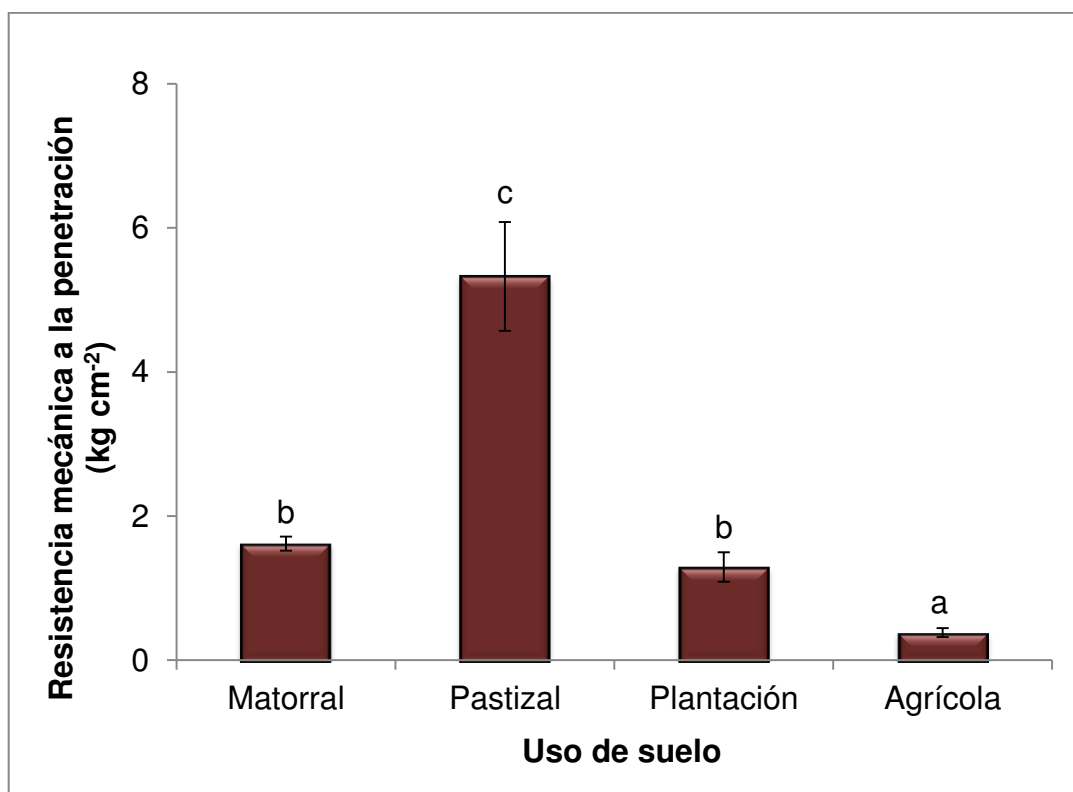


Figura 12. Valores medios de resistencia mecánica a la penetración (RMP) para cada sistema de uso de suelo (n=12). Medias con letras diferentes indican diferencias estadísticas (Tukey $p \leq 0.05$).

3.1.4 Infiltración

Los cambios de uso de suelo junto a las estaciones presentaron diferencias significativas sobre las tasas de infiltración, excepto para pastizales, sitio donde no hubo diferencias entre las estaciones del año estudiadas. El rango de valores de I calculado a 120 min correspondió en promedio a 54.4 mm h^{-1} que se presentó en invierno para el sistema de pastizal, hasta un valor de 569.4 mm h^{-1} en verano para uso agrícola (Tabla 2).

Entre los sistemas de uso de suelo, el sistema agrícola presentó los mayores valores de infiltración promedio ($n=12$) con 359.3 mm h^{-1} , seguido por el sistema de plantación con una media de 275.5 mm h^{-1} , matorral espinoso tamaulipeco presentó un valor de 233.3 mm h^{-1} y con menor infiltración el área de pastizal con 59.2 mm h^{-1} .

El comportamiento de la infiltración por estación se presenta en las Figuras 13 al 16, donde se observa el promedio de las tres mediciones realizadas para cada sistema de uso de suelo en un total de 3 horas cada uno. En general se observa que a partir del minuto 50 para las estaciones de primavera e invierno empieza a presentar una estabilidad de la tasa de infiltración, mientras que para verano y otoño la tasa de infiltración se estabiliza después del minuto 90.

El estado del contenido de humedad del suelo durante las pruebas de infiltración se presenta en la Tabla 2. La humedad del suelo fue menor en la plantación (17.2%) y mayor en el sistema agrícola (22%), sin embargo, de acuerdo con la correlación de las pruebas de Pearson realizadas entre los valores I y θ , no se encontró asociación entre estos datos ($R= 0.035$, $p=0.813$). Por lo que el contenido de humedad presente al realizar estas pruebas no fue un factor clave en las diferencias obtenidas de infiltración.

Tabla 2. Valores medios de infiltración (I) y contenido de humedad del suelo (θ) durante las pruebas de I para los cuatro sistemas de uso de suelo en cada estación estudiada.

Sistemas de uso de suelo	Verano		Otoño		Inverno		Primavera	
	I mm h ⁻¹	θ (%)	I mm h ⁻¹	θ (%)	I mm h ⁻¹	θ (%)	I mm h ⁻¹	θ (%)
Matorral	251.2 ^{ab}	23.7	215.5 ^a	19.1	313.0 ^b	19.6	153.4 ^b	18.0
Pastizal	61.5 ^a	21.6	55.9 ^a	19.0	54.4 ^a	22.1	65.0 ^a	19.0
Plantación	346.9 ^{ab}	17.3	243.9 ^a	17.6	332.6 ^b	17.1	178.6 ^b	17.2
Agrícola	415.3 ^b	20.4	569.4 ^b	24.9	191.6 ^{ab}	21.6	279.6 ^c	20.5

Letras diferentes para la columna de I indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

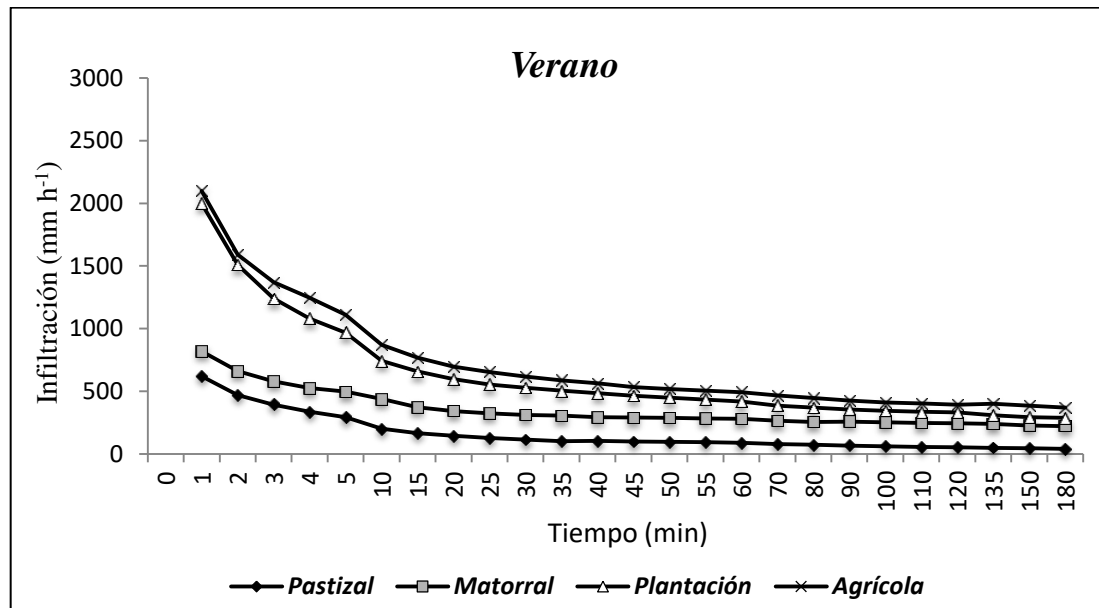


Figura 13. Curvas de infiltración promedio para los cuatro sistemas de uso de suelo en la estación de verano.

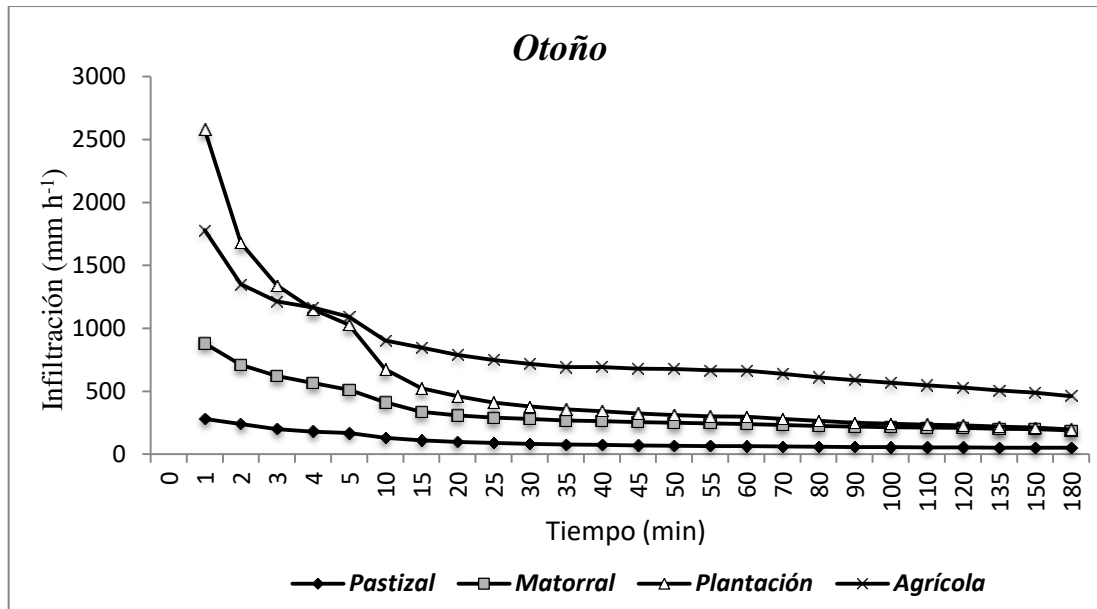


Figura 14. Curvas de infiltración promedio para los cuatro sistemas de uso de suelo en la estación de otoño.

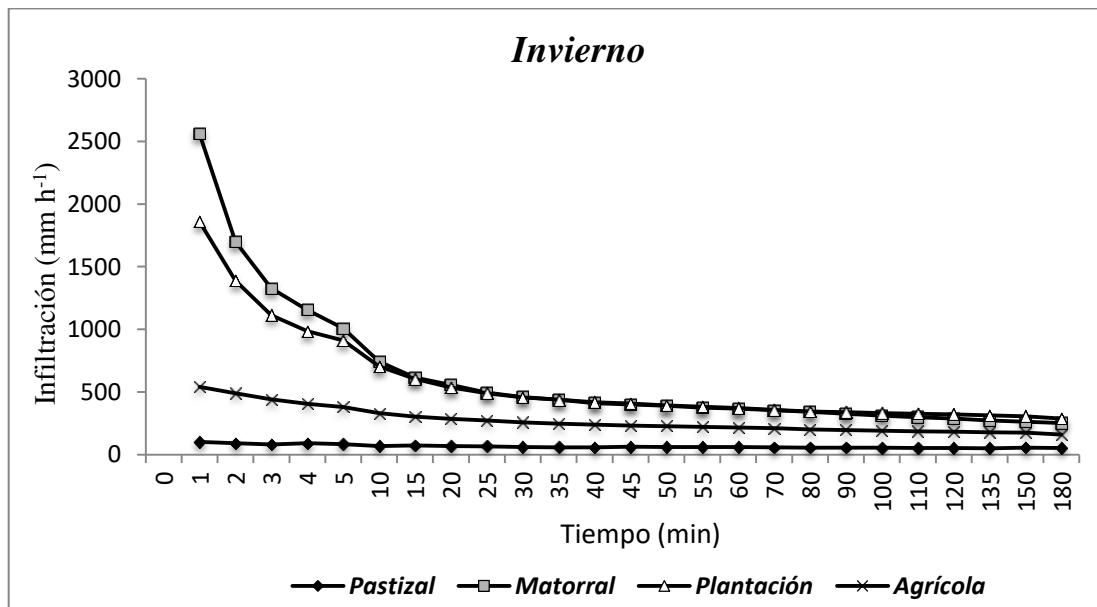


Figura 15. Curvas de infiltración promedio para los cuatro sistemas de uso de suelo en la estación de invierno.

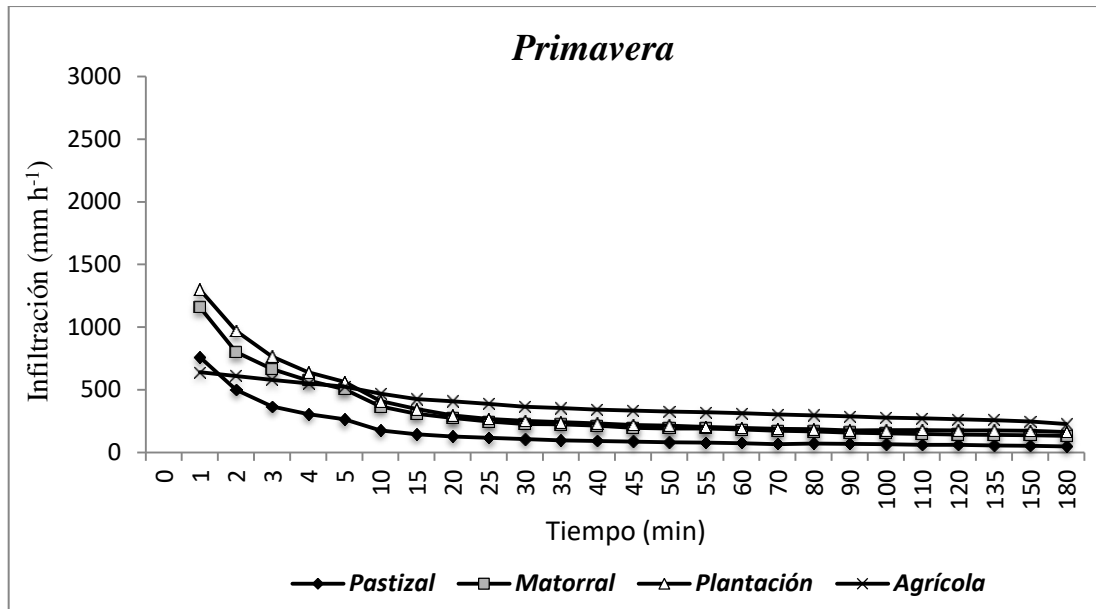


Figura 16. Curvas de infiltración promedio para los cuatro sistemas de uso de suelo en la estación de primavera.

3.2 Efectos sobre la textura y agua disponible

Los vertisoles se caracterizan por su alto contenido de arcillas, los cambios de uso de suelo estudiados presentaron diferencias en algunas de las fracciones del suelo de acuerdo a las pruebas realizadas (Tabla 3). Para las dos profundidades (0-5 y 5-30 cm) se presentaron diferencias en los contenidos de arcilla y arena, mientras que para el contenido de limo sólo presento diferencias significativas en la profundidad de 5-30 cm. El contenido de arcilla fue de 37.7 a 49.9% sin diferencias en pastizales y plantación. El contenido de limo fluctuó de 26 a 44.4%, mientras que el contenido de arena fueron bajos en valores de 9.3 a 21.6%, debido a la naturaleza de los vertisoles, que presentan bajo contenido de arena. La valoración de textura para la profundidad 0-5 cm correspondió a las clasificaciones de franco arcillosa (matorral), franco arcillo limosa (plantación) y arcillo limosa (pastizal y agrícola) mientras que para la profundidad 5-30 cm correspondió a arcillo limosa (matorral y agrícola) y arcillosa (pastizal y plantación).

Los cambios en el uso de suelo mostraron diferencias en el contenido de agua disponible solo para la profundidad de 0-5 cm. El suelo agrícola presentó una

mayor cantidad de agua disponible a diferencia de los otros sitios para las dos profundidades, lo cual es consistente con el contenido de arcilla. Los suelos de pastizal y de plantación no presentaron diferencias en el contenido de arcillas, y la cantidad de agua disponible varió entre 13.6 y 10.4% (pastizal) y 11.8 y 12.4% (plantación), para las dos profundidades, respectivamente. El matorral presentó un menor contenido de agua disponible de 9.3% en la profundidad 0-5 cm, aumentando solamente a 10.5% en la profundidad 5-30 cm. Sussha et al., (2014) mencionan que suelos arcillosos retienen una mayor cantidad de humedad en comparación a suelo arenosos debido a su mayor área superficial.

La curva de retención de humedad se presenta en la Figura 17. Se observa para la profundidad 0-5 cm como los valores de capacidad de campo oscilaron en valores entre 38 a 40% de contenido de humedad. Los cambios en el uso de suelo mostraron un comportamiento diferente para los valores de punto de marchitez permanente con contenidos de 30% (matorral), 27% (plantación), 26.2% (pastizal) y 22.8% (agrícola) para la profundidad 0-5 cm. Mientras que para 5-30 cm estos valores fueron similares oscilando entre 36% para capacidad de campo a 24% para el punto de marchitez permanente.

Tabla 3. Valores medios del agua disponible y textura para las dos profundidades de estudio (0-5 y 5-30 cm) en los cuatro sistemas de uso de suelo.

Sistema de uso de suelo	Agua disponible [‡] (%)	Textura [‡] (%)			Valoración ^{**}
		Arcilla	Limo	Arena	
0 – 5 cm					
Matorral	9.3 ± 2.25 ^a	37.7 ± 5.05 ^a	40.7 ± 3.73 ^a	21.6 ± 2.98 ^c	Cr
Pastizal	13.6 ± 0.90 ^{bc}	42.9 ± 3.14 ^{ab}	41.3 ± 2.36 ^a	15.8 ± 1.06 ^b	RI
Plantación	11.8 ± 1.69 ^{ab}	38.6 ± 1.00 ^a	44.4 ± 0.00 ^a	17.0 ± 1.00 ^b	CrI
Agrícola	16.4 ± 2.13 ^c	49.5 ± 2.18 ^b	41.2 ± 2.69 ^a	9.3 ± 0.52 ^a	RI
5 – 30 cm					
Matorral	10.5 ± 2.81 ^a	44.3 ± 1.14 ^a	41.8 ± 3.72 ^b	13.9 ± 2.98 ^b	RI
Pastizal	10.4 ± 1.62 ^a	46.9 ± 3.23 ^{ab}	36.8 ± 3.61 ^{ab}	16.3 ± 1.12 ^{bc}	R
Plantación	12.4 ± 0.86 ^a	43.4 ± 1.63 ^a	26.0 ± 1.63 ^a	20.6 ± 0.00 ^c	R
Agrícola	13.2 ± 1.00 ^a	49.9 ± 1.19 ^c	40.5 ± 1.93 ^{ab}	9.6 ± 2.91 ^a	RI

[‡] Valores medios ± desviación estándar. Valores seguidos por la misma letra en la misma columna indica que no son diferentes estadísticamente de acuerdo a la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). ^{**} Cr = franco arcillosa, CrI= franco arcillo limosa, RI = arcillo limosa, R = arcillosa.

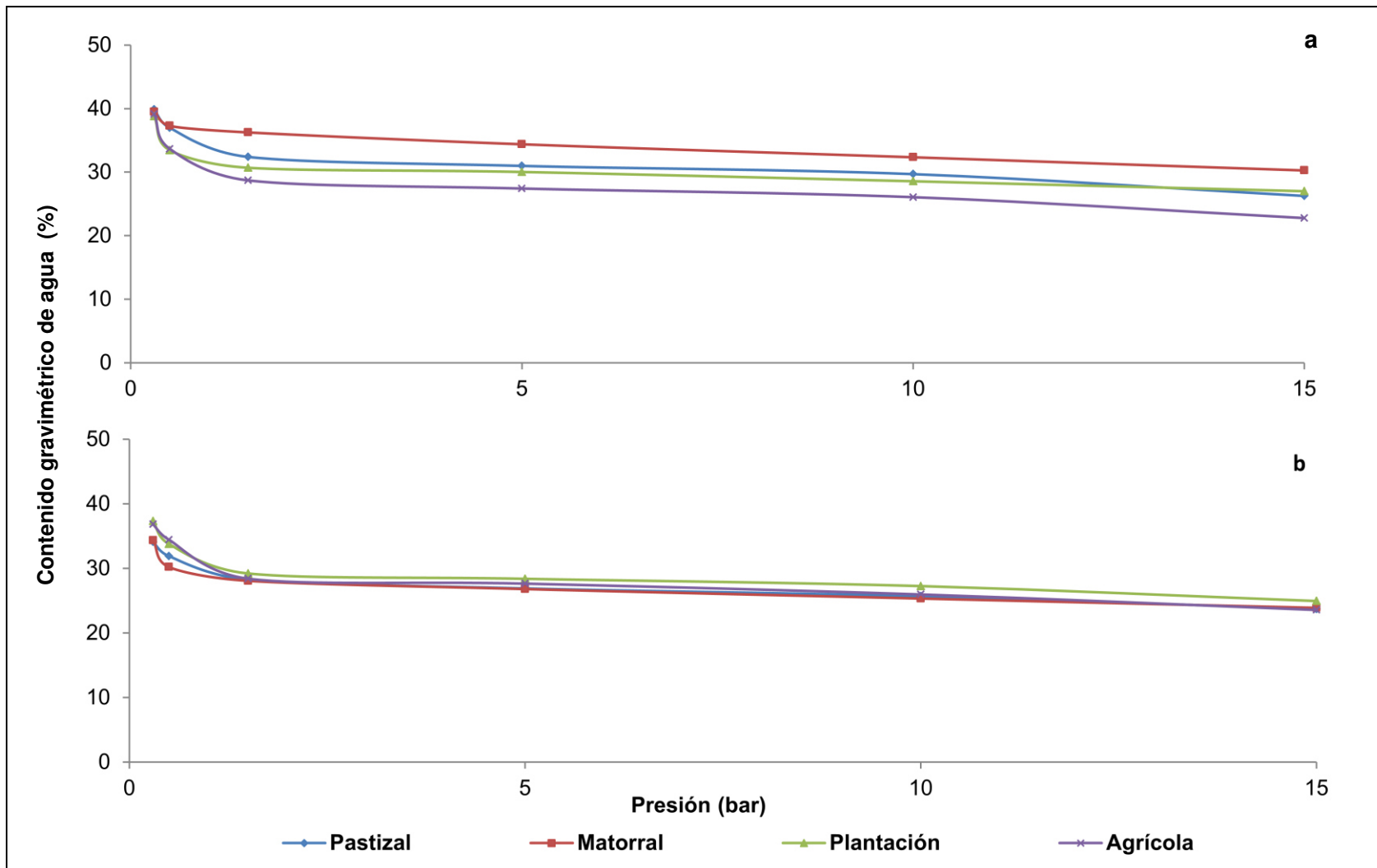


Figura 17. Curva de retención de humedad para los cuatro sistemas de uso de suelo en la profundidad 0-5 cm (a) y 5-30 cm (b).

3.3 Correlación de las propiedades hidroedáficas

Las propiedades hidroedáficas evaluadas fueron relacionadas mediante la prueba de correlación de Spearman (Tabla 4). La conductividad hidráulica mostró correlación con la densidad aparente, porosidad, resistencia mecánica a la penetración e infiltración. La densidad aparente se correlacionó con la conductividad hidráulica, porosidad, infiltración y el contenido de agua disponible. En este sentido, Salamanca & Siavosh, (2005) correlacionaron contenidos de DA con algunas propiedades del suelo, en zona cafetera colombiana, encontrando una alta correlación con los contenidos de humedad y la materia orgánica. Mencionan que la DA depende en gran parte a las condiciones de humedad del suelo y su retención de agua aprovechable. Las fracciones de textura fueron las que no presentaron correlación con las demás propiedades, excepto con la *RMP* para los contenidos de arena y arcilla.

Tabla 4. Coeficientes de correlación de Spearman (Rho) para las propiedades hidroedáficas estudiadas.

	<i>Ks</i>	<i>DA</i>	<i>P</i>	<i>RMP</i>	<i>I</i>	<i>Ad</i>	<i>arena</i>	<i>arcilla</i>	<i>limo</i>
<i>Ks</i>	1	<.001	<.001	<.001	<.001	.665	.364	.083	.328
<i>DA</i>	-.490	1	<.001	.110	.026	.002	.471	.763	.486
<i>P</i>	.488	-1.00	1	.110	.026	.002	.466	.761	.481
<i>RMP</i>	-.579	.233	-.234	1	<.001	.045	.010	.002	.681
<i>I</i>	.523	-.325	.325	-.623	1	.096	.057	.058	.613
<i>Ad</i>	-.081	.532	-.533	-.362	.310	1	.382	.106	.923
<i>arena</i>	-.166	.132	-.134	.446	-.345	-.163	1	<.001	.078
<i>arcilla</i>	.311	.055	-.056	-.533	.344	.296	-.680	1	.022
<i>limo</i>	-.178	-.128	.129	.076	.094	.018	-.316	-.404	1

Valores de Rho en la triangulación inferior, P valores en la triangulación superior ($p \leq 0.05$). *Ks* = conductividad hidráulica, *DA* = densidad aparente, *P* = porosidad total, *RMP* = Resistencia mecánica a la penetración, *I* = infiltración, *Ad* = agua disponible.

4. Discusión

Diferencias significativas fueron encontradas en las propiedades hidroedáficas entre los sistemas de uso de suelo evaluados. Estos sistemas de uso de suelo presentan una característica en particular, siendo su establecimiento sobre un mismo tipo de suelo, vertisol. Los vertisoles son característicos por su alta cantidad de arcillas que permite que presenten cambios de expansión y contracción, así mismo, en épocas secas tienden a agrietarse y en estado húmedo son estructuralmente inestables (Ghosh et al., 2011), por lo cual, los vertisoles son considerados suelos susceptibles a la degradación por cambios de uso de suelo (Bravo et al., 2009).

Las propiedades hidroedáficas son importantes para evaluar la condición física de los suelos. La compactación es uno de los parámetros de mayor importancia que presenta un efecto sobre el sistema que soporta, principalmente en vertisoles dada sus características mencionadas. La compactación del suelo afecta las propiedades hidráulicas, por lo tanto, pueden conducir a la degradación del suelo, cambia la capacidad del suelo para retener el agua, disminuye la tasa de infiltración y conductividad hidráulica saturada y aumenta la resistencia a la penetración (Ingelmo, Molina, de Paz, & Visconti, 2011).

No se encontraron diferencias por estación para las propiedades de densidad aparente, porosidad y resistencia mecánica a la penetración. Los resultados solo mostraron diferencias estacionales para la conductividad hidráulica y la infiltración entre los usos de suelo. En general, la estación humedad de primavera presentaron los mayores valores de K_s y una fuerte correlación con las variables analizadas, exceptuando textura y agua disponible.

Los valores obtenidos de infiltración presentaron una variación estacional y fue más heterogénea espacialmente, presentó al igual una correlación con las demás variables estudiadas. Navar & Synnott, (2000), evaluaron la tasa de infiltración en vertisoles bajo mismos sistemas de uso de suelo del presente estudio. Los autores reportan que los sistemas de uso de suelo fueron mayores

y variables a diferencia del área de matorral, atribuyendo a la dinámica diferencial de las grietas de desecación en la infiltración del suelo entre los usos de suelos. En este sentido, Landini et al., (2007) mencionan que las diferencias en tasas de infiltración se atribuyen más allá de una clasificación del suelo, a otros factores como es el uso del suelo y la influencia de la carga animal.

El matorral espinoso tamaulipeco considerado como la vegetación natural, presentó bajo contenido de densidad aparente y una mayor porosidad total, seguida por el sistema de plantación de eucaliptos, que aunque presentó diferencias estadísticas con respecto al sistema de matorral, sus valores no fueron considerados como relevantes.

Las actividades agrícolas, tales como labranza y el tráfico de equipos como el uso de tractor, pueden causar compactación del suelo. Los resultados del presente estudio mostraron para el sistema de uso agrícola que presenta una alteración en las propiedades físicas del suelo, con respecto al área natural; esta área, presenta un sistema de incorporación de residuos de cosecha, lo que explica el mejoramiento en las propiedades estudiadas.

Gülser, Minkina, Sushkova, & Kızılkaya, (2017) mencionan que la aplicación de desechos orgánicos a los suelos reduce la densidad aparente y aumenta el espacio total de los poros. En este sentido, se mejoró la capacidad de la infiltración, la cual fue mayor (359.3 mm h^{-1}) a diferencia del área nativa del matorral (233.3 mm h^{-1}). Al respecto, Olson, Gulliver, Nieber, & Kayhanian, (2013), analizaron parcelas con labranza y labranza con adición de composta, con el fin de evaluar la efectividad de remediación de suelos. Ellos concluyen que la labranza junto a la adición de composta mejora la capacidad de infiltración. Además, otros estudios han demostrado beneficios por uso de labranza, ya que la preparación del suelo antes de la siembra puede revertir la compactación del suelo mejorando su calidad inicial (Pulido, Helwig, Timm, Gabriels, & Cornelis, 2017), mientras que Alexandrou et al. (2004), no encontraron diferencias en áreas agrícolas con y sin control mecánico de

maleza, indicando que las operaciones adicionales no aumentan la resistencia a la penetración de los suelos.

Por otra parte, de Almeida et al. (2018), mencionan que la infiltración está influenciada por la cobertura vegetal, dependiendo del tipo de uso de suelo más que por el sistema de labranza. Haruna, Anderson, Nkongolo, & Zaibon, (2017) evaluaron la influencia de la labranza sobre propiedades hidráulicas en un suelo limoso. Ellos reportan una disminución del 13% de la densidad aparente en la capa superior cuando se labró el suelo. Así mismo, mencionan que algunas propiedades hidráulicas se mejoran con una combinación de prácticas de manejo de cultivo como labranza y cultivos de cobertura.

El sistema de pastizal fue el sitio que presentó un comportamiento diferente en comparación a los demás sistemas, debido al efecto que produce el pisoteo del ganado. Denoia, Sosa, Zerpa, & Martin, (2000) mencionan que el efecto del pisoteo del ganado es mayor en sitios con ausencia de vegetación. Bajos valores de permeabilidad y altos valores de densidad nos indica la presencia de un suelo compactado. Mentges, Reichert, Rodrigues, Awe, & Mentges, (2016), mencionan que la compactación del suelo aumenta la densidad aparente y disminuye la porosidad, particularmente la macroporosidad, lo que reduce la proporción de huecos y el espacio lleno de aire. La baja conductividad hidráulica del suelo puede afectar el crecimiento y rendimiento de los cultivos, así mismo, aunado a la alta densificación superficial, se presenta una reducción significativa de las tasa de infiltración.

Bodhinayake & Si, (2004), mencionan que las praderas aumentan la agregación del suelo, derivada del crecimiento extensivo de raíces, aumentando la porosidad inter-agregada. En este sentido, el área estudiada presenta un sistema de pastoreo rotacional y un buen manejo de la pradera que permite minimizar los impactos negativos. Al respecto, el pastizal no presentó diferencias en los contenidos del agua disponible ni en los contenidos de arcilla. En contraste, Hebb et al. (2017), evaluaron pastizales nativos, pastizales introducidos y cultivos anuales, donde encontraron que los pastos introducidos

aumentaron del 9 al 12% en los poros de tamaño medio a diferencias de las tierras de cultivo, así mismo, mencionan que los pastizales nativos mejoraron la calidad del suelo en comparación a los otros usos de suelo en cuanto a la disponibilidad y contenido de agua volumétrico saturado.

CONCLUSIONES

El vertisol investigado bajo cuatro sistemas de uso de suelo presentó diferencias en la respiración del suelo. El matorral fue el sistema que presentó una mayor emisión de CO₂ seguido por el pastizal, los cuales son los usos de suelo más comunes en el noreste de México. El área agrícola y la plantación de *Eucalyptus* fueron los sistemas con menor emisión de CO₂. Se encontró una correlación positiva entre la respiración del suelo (Rs) y la humedad del suelo en todos los sistemas de uso, mientras que la temperatura del suelo no estuvo relacionada con la Rs en los sistemas agrícola y pastizal. Asimismo, la respiración del suelo varió considerablemente a escalas diarias y estacionales, siendo mayor en mediciones de tarde y durante el otoño y primavera cuando se presentó la mayor cantidad de precipitación. Los flujos de CO₂ se presentaron en el siguiente orden: matorral>pastizal>plantación>agrícola. Las regiones semiáridas son sensibles a la variabilidad de la precipitación, así que un incremento en la emisión de CO₂ en suelos vertisoles en respuesta a cambios ambientales, podría tener implicaciones en el balance global del carbono.

Los vertisoles presentan una alta fertilidad inherente a sus altos contenidos de arcillas, sin embargo, de acuerdo a los resultados obtenidos, los sistemas de uso de suelo estudiados presentaron diferencias para algunas propiedades químicas evaluadas. De acuerdo a los resultados presentados y considerando el área del matorral como la vegetación natural testigo, se presentó un aumento en los contenidos de magnesio (Mg), manganeso (Mn) y zinc (Zn) a diferencias de los demás usos de suelo para la profundidad 0-5 cm. Los cambios perceptibles en la fertilidad del vertisol como resultado de las prácticas de uso del suelo revelaron un contenido de materia orgánica del suelo (MOS) de mediano (agrícola) a muy alto (matorral y pastizal), mientras que para el nitrógeno total (Nt) varió de adecuado (agrícola) a muy alto (matorral). La relación C/N en general fue baja para todos los sistemas de uso del suelo, variando de 5.6 (matorral) a 10.3 (pastizal), considerándose como una proporción buena para la humificación y mineralización de la MOS. Las

pérdidas de MOS y Nt por los cambios de uso del suelo del matorral a otro sistema de uso variaron desde 2.4% hasta 66%. No se encontraron diferencias entre los sistemas de uso del suelo para fósforo (P) y potasio (K) en las dos profundidades. Para sodio (Na) y calcio (Ca), solo presentaron diferencias en la profundidad 0-5 cm, mientras que para la profundidad 5-30 cm no se observaron diferencias en los usos del suelo para las variables de conductividad eléctrica (CE), Mn, Zn y la capacidad de intercambio catiónico (CIC). El pastizal presentó los valores más altos de contenido de P, K y Fe, mientras que el área agrícola solo aumentó los valores de P para la profundidad 5-30 cm. La plantación de eucaliptos mejoró el contenido de Zn en la profundidad 5-30 cm. El pH y CE presentaron diferencias estadísticas entre los sistemas, sin embargo, de acuerdo a la valoración correspondiente no hubo diferencia entre ellos. Entre los sistemas de usos de suelo que presentaron una disminución en las variables K, Fe, Mn, Zn y CIC, fueron los sistemas agrícolas y la plantación de eucaliptos, siendo estos sistemas los que presentaron un menor contenido de carbono almacenado y por ende un menor flujo de CO₂ por lo que se puede concluir que cambios en el uso del suelo disminuyen la fertilidad.

En cuanto a los cambios físicos e hidroedáficas en el vertisol estudiado, se encontraron diferencias estadísticas entre los usos de suelo, siendo el área agrícola y pastizal los que presentaron un mayor efecto en las propiedades evaluadas. Los pastizales presentaron una mayor densidad aparente y resistencia mecánica a la penetración, mientras que disminuyó la porosidad y la infiltración. Por el contrario, el área agrícola presentó una mayor infiltración y una menor densidad aparente, probablemente debido al sistema de labranza mínima e incorporación de residuos. En cuanto a la plantación de eucaliptos, aunque los resultados difirieron estadísticamente, estos no fueron relevantes a diferencia del área de matorral considerado como la vegetación natural. Con relación a la variación estacional, solo se encontraron diferencias en la conductividad hidráulica e infiltración, siendo mayor la conductividad hidráulica en primavera, mientras que la infiltración presentó una variabilidad en los datos

a lo largo de las estaciones estudiadas. Por lo cual, cambios en el uso de suelo en vertisoles modifican las propiedades hidroedáficas, afectando procesos de importancia en las relaciones suelo-agua como la permeabilidad, la compactación y la infiltración.

Finalmente se puede concluir que si bien el factor edáfico está dominado por las características de la interacción de factores al momento de su formación, las actividades antropogénica determinarán el funcionamiento del sistema-suelo, contribuyendo a cambios que modifican las propiedades físicas, químicas y/o biológicas, afectando la estabilidad ecológica y la continuidad económica.

BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, O., Peña, W., Serrano, E., Pocasangre, L., Rosales, F., Delgado, E., ... Segura, A. (2006). La importancia de los microorganismos en la calidad y salud de suelos. In *XVII Reuniao Internacional da Associação para a Cooperação em Pesquisas de Bananas no Caribe e na América Tropical* (pp. 222–233). Santa Catarina, Brasil.
- Aghasi, B., Jalalian, A., & Honarjoo, N. (2010). The comparison of some soil quality indexes in different land uses of Ghareh Aghaj Watershed of Semirom, Isfahan, Iran. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 71(11), 167–171.
- Alaoui, A., Lipiec, J., & Gerke, H. H. (2011). A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective. *Soil and Tillage Research*, 115–116, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.06.002>
- Alexandrou, A., Stinner, D., & Reza, M. M. (2004). A comparison of penetration resistance of transitional organic and conventional soils. *ASAE/CSAE*, 41108, 10. <https://doi.org/10.13031/2013.17652>
- Bagarello, V., Di Prima, S., & Iovino, M. (2017). Estimating saturated soil hydraulic conductivity by the near steady-state phase of a Beerkan infiltration test. *Geoderma*, 303, 70–77. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.030>
- Barros, J. L., Thiers, O., & Torres, F. (2016). Feasibility study of estimating the porosity of soils from sound absorption measurements. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 77, 213–221. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.09.014>
- Bodhinayake, W., & Si, B. C. (2004). Near-saturated surface soil hydraulic properties under different land uses in the St Denis National Wildlife Area, Saskatchewan, Canada. *Hydrological Processes*, 18(15), 2835–2850. <https://doi.org/10.1002/hyp.1497>
- Bowling, D. R., Grote, E. E., & Belnap, J. (2011). Rain pulse response of soil CO₂ exchange by biological soil crusts and grasslands of the semiarid Colorado Plateau, United States. *Journal of Geophysical Research:*

- Biogeosciences*, 116(3), 1–17. <https://doi.org/10.1029/2011JG001643>
- Bravo, M. R., Bryan, R. B., & Voroney, P. (2009). Influence of wetting and drying cycles and maize residue addition on the formation of water stable aggregates in Vertisols. *Geoderma*, 151(3–4), 150–156. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.03.022>
- Briones, M. J. I., Garnett, M. H., & Ineson, P. (2010). Soil biology and warming play a key role in the release of “old C” from organic soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(6), 960–967. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.02.013>
- Buczko, U., Bachmann, S., Gropp, M., Jurasinski, G., & Glatzel, S. (2015). Spatial variability at different scales and sampling requirements for in situ soil CO₂ efflux measurements on an arable soil. *Catena*, 131, 46–55. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.03.015>
- Burt, R. (2009). *Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual* (Soil Surve). Nebraska: Department of Agriculture (USDA), Nacional Resource Conservation Service (NRCS), National Soil Survey Center (NSSC).
- Buschiazzo, D. E., Panigatti, J. L., & Unger, P. W. (1998). Tillage effects on soil properties and crop production in the subhumid and semiarid Argentinean Pampas. *Soil and Tillage Research*, 49(1–2), 105–116. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(98\)00160-3](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00160-3)
- Campo, J., García, F., Navarrete, A., & Siebe, C. (2016). Almacenes y dinámica del carbono orgánico en ecosistemas forestales tropicales de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 31–38.
- Campos, A. (2014). Trends in soil respiration on the eastern slope of the Cofre de Perote Volcano (México): Environmental contributions. *Catena*, 114, 59–66. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.10.010>
- Cantú, I., González, H., & Gómez, M. V. (2010). CO₂ efflux in vertisol under different land use systems. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 12, 389–403.
- Carvajal, A. (2008). *Relación del carbono y nitrógeno del suelo con usos y coberturas del terreno en Alcalá, Valle del Cauca*. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.

- Castellano, J. Z., Uvalle, J. X., & Aguilar, S. A. (2000). *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas* (2a edición). México.
- Castillo, M. S., & Wright, A. L. (2008). Soil phosphorus pools for Histosols under sugarcane and pasture in the Everglades, USA. *Geoderma*, *145*(1–2), 130–135. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.03.006>
- Cerana, J., Rivarola, S., Banchemo, A. C., Sione, S., Wilson, M., Pozzolo, O., & De Battista, J. J. (2004). Determinación de las condiciones físicas de los vertisoles, orientadas al manejo sustentable con la siembra directa, 109–121.
- Chen, F., Zheng, H., Zhang, K., Ouyang, Z., Lan, J., Li, H., & Shi, Q. (2013). Changes in soil microbial community structure and metabolic activity following conversion from native *Pinus massoniana* plantations to exotic *Eucalyptus* plantations. *Forest Ecology and Management*, *291*, 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.11.016>
- Cizungu, L., Staelens, J., Huygens, D., Walangululu, J., Muhindo, D., Van-Cleemput, O., & Boeckx, P. (2014). Litterfall and leaf litter decomposition in a central African tropical mountain forest and *Eucalyptus* plantation. *Forest Ecology and Management*, *326*, 109–116.
- Coleman, D. C. (2014). Soil ecology. *Access Science*. <https://doi.org/10.1036/1097-8542.631825>
- Cotler, H. (2003). El uso de la información edáfica en los estudios ambientales. *Gaceta Ecológica*, *68*, 33–42. Retrieved from www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/servicios/
- Das, B. (2002). *Soil Mechanics Laboratory Manual* (Sixth). New York: Oxford University Press.
- Davidson, E. A., Belk, E., & Boone, R. D. (1998). Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biology*, *4*(2), 217–227. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1998.00128.x>
- Davidson, E., Janssens, I., & Lou, Y. (2006). On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: Moving beyond Q10. *Global Change Biology*, *12*(2),

- 154–164. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01065.x>
- de Almeida, W. S., Panachuki, E., Tarso, P., da Silva, R., Alves, T., & Fonseca, D. (2018). Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration. *Soil and Tillage Research*, *175*, 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.009>
- de la Peña, E. (2009). Efectos de la biota edáfica en las interacciones planta-insecto a nivel foliar. *Revista Ecosistemas*, *18*(2). <https://doi.org/10.7818/RE.2014.18-2.00>
- de la Rosa, D. (2008). *Evaluación agro-ecológica de suelos, para un desarrollo rural sostenible* (Ediciones). Madrid.
- Delgado, L., & Serey, I. (2002). Distribución del cobre en ecosistemas forestales de tipo Mediterraneo. *Revista Chilena de Historia Natural*, *75*(3), 557–565. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2002000300007>
- Dengiz, O., Sağlam, M., Sarioğlu, F. E., Saygin, F., & Atasoy, Ç. (2012). Morphological and physico-chemical characteristics and classification of vertisol developed on Deltaic Plain. *Open Journal of Soil Science*, *2*, 20–27. <https://doi.org/10.4236/ojss.2012.21004>
- Denoia, J., Sosa, O., Zerpa, G., & Martin, B. (2000). Efecto del pisoteo animal sobre la velocidad de infiltracion y sobre otras propiedades físicas del suelo. *Pastos*, *30*(1), 129–141.
- Diacono, M., & Montemurro, F. (2010). Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *30*, 401–422.
- Dijkstra, F. A., Geibe, C., Holmstrom, S., Lundstrom, U. S., & Van Breemen, N. (2001). The effect of organic acids on base cation leaching from the forest floor under six North American tree species. *European Journal of Soil Science*, *52*(2), 205–214. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2001.00369.x>
- Eswaran, H., Van Den Berg, E., & Reich, P. (1993). Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci. Soc. Am.*, *57*, 1–3. <https://doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700010034x>
- Fernández, P. R., Acevedo, D. C., Villanueva, A., & Uribe, M. (2016). Estado de

- los elementos químicos esenciales en suelos de los sistemas natural , agroforestal y monocultivo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(35), 65–77.
- Ferrera, R., & Alarcón, A. (2001). La microbiología del suelo en la agricultura sostenible. *Ciencia Ergo Sum*, 8, 175–183.
- Foley, J. A. (2005). Global Consequences of Land Use. *Science*, 309(5734), 570–574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>
- Foroughbakhch, F., Háuad, L. A., Cespedes, A. E., Ponce, E. E., & González, N. (2001). Evaluation of 15 indigenous and introduced species for reforestation and agroforestry in northeastern Mexico. *Agroforestry Systems*, 51(3), 213–221. <https://doi.org/10.1023/A:1010702510914>
- Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle size analysis. In A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. ASA and SSSA (pp. 383–411). Madison.
- Ghosh, S., Lockwood, P., Daniel, H., Hulugalle, N., King, K., & Kristiansen, P. (2011). Changes in Vertisol properties as affected by organic amendments application rates. *Soil Use and Management*, 27(2), 195–204. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00333.x>
- Godde, C. M., Thorburn, P. J., Biggs, J. S., & Meier, E. A. (2016). Understanding the Impacts of Soil, Climate, and Farming Practices on Soil Organic Carbon Sequestration : A Simulation Study in Australia. *Frontiers in Plant Science*, 7(May), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00661>
- Gol, C. (2009). The effects of land use change on soil properties and organic carbon at Dagdami river catchment in Turkey. *Journal of Environmental Biology*, 30(5 SUPPL.), 825–830.
- Gomes, L. de C., Cardoso, I. M., Mendonça, E. de S., Fernandes, R. B. A., Lopes, V. S., & Oliveira, T. S. (2016). Trees modify the dynamics of soil CO₂ efflux in coffee agroforestry systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 224, 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.05.001>
- González, H., Cantú, I., Gómez, M. V., & Ramírez, R. G. (2004). Plant water relations of thornscrub shrub species, northeastern Mexico. *J. Arid Environ*,

58, 483–503.

- González, H., Domínguez, T. G., Cantú, I., Gómez, M. V., Ramírez, R. G., Pando, M., & Fernández, C. J. (2011). Litterfall deposition and leaf litter nutrient return in different locations at Northeastern Mexico. *Plant Ecology*, *212*(10), 1747–1757. <https://doi.org/10.1007/s11258-011-9952-9>
- González, H., Ramírez, R. G., Cantú, I., Gómez, M. V., & Uvalle, J. I. (2010). Composición y estructura de la vegetación en tres sitios del estado de Nuevo León, México. *Polibotánica*, *29*, 91–106.
- Goulding, K., Murphy, D., Macdonald, A., Stockdale, E., Gaunt, J., Blake, L., ... Brookes, P. (2001). The role of soil organic matter and manures in sustainable nutrient cycling. In R. Rees, B. Ball, C. Campbell, & C. Watson (Eds.), *Sustainable management of soil organic matter* (pp. 221–342). CAB International.
- Gülser, C., Minkina, T., Sushkova, S., & Kızılkaya, R. (2017). Changes of soil hydraulic properties during the decomposition of organic waste in a coarse textured soil. *Journal of Geochemical Exploration*, *174*, 66–69. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.05.014>
- Haruna, S. I., Anderson, S. H., Nkongolo, N. V., & Zaibon, S. (2017). Soil Hydraulic Properties: Influence of Tillage and Cover Crops. *Pedosphere*, *160*. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60387-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60387-4)
- Hebb, C., Schoderbek, D., Hernandez-Ramirez, G., Hewins, D., Carlyle, C. N., & Bork, E. (2017). Soil physical quality varies among contrasting land uses in Northern Prairie regions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *240*, 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.008>
- Herencia, J. F., Ruiz, J. C., Melero, S., Garcia Galavís, P. a., & Maqueda, C. (2008). A short-term comparison of organic v. conventional agriculture in a silty loam soil using two organic amendments. *The Journal of Agricultural Science*, *146*(6), 677. <https://doi.org/10.1017/S0021859608008071>
- Huang, Z. L., Chen, L. D., Fu, B. J., Lu, Y. H., Huang, Y. L., & Gong, J. (2006). The relative efficiency of four representative cropland conversions in reducing water erosion: evidence from long-term plots in the Loess hilly

- area, China. *Land Degradation & Development*, 17(6), 615–627. <https://doi.org/10.1002/ldr.739>
- Huerta-Lwanga, E., Rodríguez-olán, J., Evia-castillo, I., Montejo-Meneses, E., de la Cruz-Mondragón, M., & García-Hernandez, R. (2008). Relación entre la feertilidad del suelo y du población de macroinvertebrados. *Terra Latinoamericana*, 26, 171–181.
- Hussain, M. Z., Grunwald, T., Tenhunen, J. D., Li, Y. L., Mirzae, H., Bernhofer, C., ... Owen, K. (2011). Summer drought influence on CO₂ and water fluxes of extensively managed grassland in Germany. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 141(1–2), 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.02.013>
- INEGI. (2009). Guia para la interpretación de cartografía uso del suelo y vegetación : Escala 1:250 000 : Serie III. *Instituto Nacional de Estadística Y Geografía*, 77. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Ingelmo, F., Molina, M. J., de Paz, J. M., & Visconti, F. (2011). Soil saturated hydraulic conductivity assessment from expert evaluation of field characteristics using an ordered logistic regression model. *Soil and Tillage Research*, 115–116, 27–38. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.06.004>
- IPCC. (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Nature* (Vol. 446). <https://doi.org/10.1038/446727a>
- Isaza-arias, G. C., Pérez, M. A., Laines, J. R., & Castañón, G. (2009). Comparison of two ventilation techniques in the decomposition of organic matter. *Ecosistemas Y Recursos Agropecuarios*, 25(3), 233–243.
- IUSS. (2007). *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Grupo de Trabajo WRB* (Vol. primera ac). Roma.
- Jia, X., Shao, M., Wei, X., Horton, R., & Li, X. (2011). Estimating total net primary productivity of managed grasslands by a state-space approach in a small catchment on the Loess Plateau, China. *Geoderma*, 160(3–4), 281–291. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.09.016>

- Jiménez, L. S., Mezquida, E. T., Benito, M., & Rubio, A. (2008). Fertilidad del suelo de bosques tropicales y pastizales de uso ganadero en el sur del Ecuador. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.*, *25*, 241–245.
- Johnson, M. S., Couto, E. G., Pinto, O. B., Milesi, J., Santos Amorim, R. S., Messias, I. A. M., & Biudes, M. S. (2013). Soil CO₂ dynamics in a tree island soil of the pantanal: The role of soil water potential. *PLoS ONE*, *8*(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0064874>
- Karuku, G. N., Gachene, C. K. K., Karanja, N., Cornelis, W., Verplancke, H., & Kironchi, G. (2012). Soil hydraulic properties of a nitisol in Kabete, Kenya. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, *15*, 595–609.
- Klute, A., & Dirksen, C. (1986). Hydraulic conductivity and diffusivity. Laboratory methods. In A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. ASA and SSSA (pp. 123–131). Madison.
- Lal, R. (2008). Carbon sequestration. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, *363*(1492), 815–830. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2185>
- Landini, A. M., Martínez, D., Días, H., Soza, E., Agnes, D., & Sainato, C. (2007). Modelos de infiltración y funciones de pedotransferencia aplicados a suelos de distinta textura. *Ciencia Del Suelo*, *25*(2), 123–131.
- Lawal, H. M., Ogunwole, J. O., & Uyovbisere, E. O. (2009). Changes in soil aggregate stability and carbon sequestration mediated by land use practices in a degraded dry savanna alfisol. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, *10*, 423–429.
- Lin, H., Wheeler, D., Bell, J., & Wilding, L. (2005). Assessment of soil spatial variability at multiple scales. *Ecological Modelling*, *182*(3–4), 271–290. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.04.006>
- Llorente, M. (2004). *Caracterización física y química de vertisoles del Noreste de México sometidos a distintas formas de manejo*. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. <http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020150225.PDF>
- Lloyd, J., & Taylor, J. A. (1994). On the Temperature Dependence of Soil Respiration. *Functional Ecology*, *8*(3), 315. <https://doi.org/10.2307/2389824>

- Lu, S. G., Malik, Z., Chen, D. P., & Wu, C. F. (2014). Porosity and pore size distribution of Ultisols and correlations to soil iron oxides. *Catena*, *123*, 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.07.010>
- Lu, S. G., Sun, F. F., & Zong, Y. T. (2014). Effect of rice husk biochar and coal fly ash on some physical properties of expansive clayey soil (Vertisol). *CATENA*, *114*(114), 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.10.014>
- Martín, M. Á., Reyes, M., & Taguas, F. J. (2017). Estimating soil bulk density with information metrics of soil texture. *Geoderma*, *287*, 66–70. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.09.008>
- Martínez, E., Fuentes, J. P., & Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de La Ciencia Del Suelo Y Nutrición Vegetal*, *8*(1), 68–96. <https://doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>
- Martínez, J. J., Vaca, V. M., Esteller, M. V., Huerta, A. G., Arriaga, R., & Rodríguez, F. G. (2015). Mean infiltration speed in a vertisol under different tillage systems. *Terra Latinoamericana*, *33*(1), 95–99.
- Martínez, S., Cotler, H., Etchevers, J. D., Ordaz, V. M., & de León, F. (2008). Efecto del manejo en la agregación del suelo en un ecosistema tropical seco. *Terra Latinoamericana*, *26*(4), 299–307.
- McPhee, J. E., Aird, P. L., Hardie, M. A., & Corkrey, S. R. (2015). The effect of controlled traffic on soil physical properties and tillage requirements for vegetable production. *Soil and Tillage Research*, *149*, 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.12.018>
- Mendham, D. S., O'Connell, A. M., & Grove, T. S. (2003). Change in soil carbon after land clearing or afforestation in highly weathered lateritic and sandy soils of south-western Australia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *95*, 143–156.
- Mentges, M. I., Reichert, J. M., Rodrigues, M. F., Awe, G. O., & Mentges, L. R. (2016). Capacity and intensity soil aeration properties affected by granulometry, moisture, and structure in no-tillage soils. *Geoderma*, *263*, 47–59. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.042>
- Millard, P., Midwood, A. J., Hunt, J. E., Whitehead, D., & Boutton, T. W. (2008).

- Partitioning soil surface CO₂ efflux into autotrophic and heterotrophic components, using natural gradients in soil δ¹³C in an undisturbed savannah soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(7), 1575–1582. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.01.011>
- Mishra, A., Sharma, S. D., & Khan, G. H. (2003). Improvement in physical and chemical properties of sodic soil by 3, 6 and 9 years old plantation of *Eucalyptus tereticornis* biorejuvenation of sodic soil. *Forest Ecology and Management*, 184(1–3), 115–124. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(03\)00213-5](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00213-5)
- Mishra, U., Lal, R., Slater, B., Calhoun, F., Liu, D., & Van Meirvenne, M. (2009). Predicting soil organic carbon stock using profile depth distribution functions and ordinary kriging. *Soil Science Society of America Journal*, 73(2), 614. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0410>
- Moitinho, M. R., Padovan, M. P., Panosso, A. R., Teixeira, D. D. B., Ferraudo, A. S., & La Scala Jr, N. (2015). On the spatial and temporal dependence of CO₂ emission on soil properties in sugarcane (*Saccharum* spp.) production. *Soil and Tillage Research*, 148, 127–132. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.12.012>
- Molina, E. (2001). Manejo de suelos y fertilización de café. In G. Meléndez & E. Molina (Eds.), *Fertilidad de suelos y manejo de la nutrición de cultivos en Costa Rica. Memoria* (pp. 76–86). Costa Rica.
- Mora, J. L., & Lázaro, R. (2014). Seasonal changes in bulk density under semiarid patchy vegetation: The soil beats. *Geoderma*, 235–236, 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.06.022>
- Nair, R., Mehta, C. R., & Sharma, S. (2015). Carbon sequestration in soils-A Review. *Agricultural Reviews*, 36(2), 81. <https://doi.org/10.5958/0976-0741.2015.00011.2>
- Nasri, B., Fouché, O., & Torri, D. (2015). Coupling published pedotransfer functions for the estimation of bulk density and saturated hydraulic conductivity in stony soils. *Catena*, 131, 99–108. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.03.018>

- Navar, J., & Synnott, T. imothy J. (2000). Soil infiltration and land use in Linares, N.L., México. *Terra Latinoamericana*, 18(3), 255–262.
- Navarrete, A., Vela, G., Lopez, J., & Rodriguez, M. D. L. (2011). Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo. *ContactoS*, 80, 29–37.
- Nielsen, U. N., Ayres, E., Wall, D. H., & Bardgett, R. D. (2011). Soil biodiversity and carbon cycling: A review and synthesis of studies examining diversity-function relationships. *European Journal of Soil Science*, 62(1), 105–116. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01314.x>
- Olson, N. C., Gulliver, J. S., Nieber, J. L., & Kayhanian, M. (2013). Remediation to improve infiltration into compact soils. *Journal of Environmental Management*, 117, 85–95. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.10.057>
- Orden, L., Mandolesi, M. E., Kiessling, R. J., & Ron, M. M. (2011). Variabilidad espacial de fertilidad química del suelo en un diseño de bloques. *Spanish Journal of Soil Science*, 1(1), 54–69. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2011.V1.N1.04>
- Ordoñez, J. A. B., & Maser, O. (2001). Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques*, 7(1), 3–12.
- Osuna-Ceja, E., Figueroa-Sandoval, B., Oleschko, K., Flores-Delgadillo, M. de L., Martínez-Menes, M. R., & González-Cossío, F. V. (2006). Effect of soil structure on corn root development. *Agrociencia*, 40, 27–38.
- Pérez, E. S., Luisa, A., Pinedo, Y., Cruz, R. G., Francisco, J., Nátera, Z., ... Hernández, R. S. (2014). Nutritional foliar sobre el crecimiento de teca effect of the edaphic properties and foliar content of nutrients on the growth of teak trees. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(24), 80–90.
- Porta, J., López, M., & Poch, R. (2011). *Introducción a la edafología. Uso y protección de suelos*. (Mundi-Prensa, Ed.) (2nd ed.). Madrid, España.
- PP-SYSTEMS. (2012) . SCR-1/CPY-2/CPY-4 Closed System Chambers for use with all EGM's (1/2/3/4) and CIRAS-1. Operator's manual Version 3.34 Amesbury, MA 01913 USA.
- Pulido, M., Helwig, L., Timm, L. C., Gabriels, D., & Cornelis, W. M. (2017). Visual examination of changes in soil structural quality due to land use. *Soil*

- and Tillage Research*, 173, 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.08.011>
- Ramos, R., Sánchez, R., & Gama, L. M. (2016). Análisis de cambios de uso del suelo en el municipio costero de Comalcalco, Tabasco, México. *Ecosistemas Y Recursos Agropecuarios*, 3(8), 151–160.
- Riveros-Iregui, D. A., Emanuel, R. E., Muth, D. J., McGlynn, B. L., Epstein, H. E., Welsch, D. L., ... Wraith, J. M. (2007). Diurnal hysteresis between soil CO₂ and soil temperature is controlled by soil water content. *Geophysical Research Letters*, 34(17), 1–5. <https://doi.org/10.1029/2007GL030938>
- Rodríguez, H., & Rodríguez, J. (2002). *Métodos de análisis de suelos y plantas. Criterios de interpretación*. (Trillas).
- Rosík, J., Fabiánek, T., & Marková, I. (2013). Soil CO₂ efflux in young norway spruce stands with different silviculture practices. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelanae Brunensis*, LXI(6), 1845–1851. <https://doi.org/dx.doi.org/10.11118/actaun201361061845>
- Rosolem, C. A., & Calonego, J. C. (2013). Phosphorus and potassium budget in the soil-plant system in crop rotations under no-till. *Soil and Tillage Research*, 126, 127–133. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.08.003>
- Ross, D. J., Tate, K. R., Scott, N. A., & Feltham, C. W. (1999). Land-use change: effects on soil carbon, nitrogen and phosphorus pools and fluxes in three adjacent ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 31(6), 803–813. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(98\)00180-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(98)00180-1)
- Salamanca, A., & Siavosh, S. (2005). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera Colombiana. *Cenicafé*, 56(4), 381–397.
- Sanchez-Castillo, L. (2015). An integrated study of sediment related disaster prevention and erosion control for urbanized forest slopes in Nuevo Leon, Mexico. Kyushu University, Japon
- Sanchez-Castillo, L., Kubota, T., & Cantú, I. (2014). Root strength characteristics of understory vegetation species for erosion mitigation on forest slopes of Mexico. *International Journal of Ecology & Development*, 28(2)

- Scharlemann, J. P., Tanner, E. V., Hiederer, R., & Kapos, V. (2014). Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management*, 5(1), 81–91. <https://doi.org/10.4155/cmt.13.77>
- Schoenholtz, S. ., Miegroet, H. V., & Burger, J. . (2000). A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management*, 138(1), 335–356. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00423-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00423-0)
- Scholze, M., Knorr, W., & Heimann, M. (2003). Modelling terrestrial vegetation dynamics and carbon cycling for an abrupt climatic change event. *The Holocene*, 13(3), 327–333. <https://doi.org/10.1191/0959683603hl625rp>
- Schwendenmann, L., Pendall, E., & Potvin, C. (2007). Surface soil organic carbon pools, mineralization and CO₂ efflux rates under different land-use types in Central Panama. *Stability of Tropical Rainforest Margins: Linking Ecological, Economic and Social Constraints of Land Use and Conservation*, 109–131.
- SEMARNAT. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Secretaría De Medio Ambiente Y Recursos Naturales. *Diario Oficial*, (Establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis), 85. Retrieved from <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3335/1/nom-021-semarnat-2000.pdf>
- SEMARNAT. (2016). *Informe de la situación del medio ambiente en México, 2015. compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave, de desempeño ambiental y de crecimiento verde.*
- Simon, M., Peralta, N., & Costa, J. L. (2013). Relación entre la conductividad eléctrica aparente con propiedades del suelo y nutrientes. *Ciencia Del Suelo*, 31(1), 45–55.
- Smith, P., House, J. I., Bustamante, M., Sobocká, J., Harper, R., Pan, G., ... Pugh, T. A. M. (2016). Global change pressures on soils from land use and management. *Global Change Biology*, 22(3), 1008–1028. <https://doi.org/10.1111/gcb.13068>

- Sofi, J., Lone, A., Ganie, M., Dar, N., Bhat, S., Mukhtar, M., ... Ramzan. (2016). Soil microbiological activity and carbon dynamics in the current climate change scenarios: A review. *Pedosphere*, 26(5), 577–591.
- Sokal, R. R., & Rohlf, F. J. (2003). *Biometry the principles and practice of statistics in biological research* (Third Edit). New York: W. H. Freeman and company.
- SPSS. (2009). Statistical Package for the Social Sciences. Chicago, IL. U.S.A.: SPSS Inc.
- Srivastava, M., Sharma, S. D., & Kudrat, M. (2012). Effect of crop rotation, soil temperature and soil moisture on CO₂ emission rate in Indo-Gangetic plains of India. *International Journal of Agriculture and Forestry*, 2(3), 117–120. <https://doi.org/10.5923/j.ijaf.20120203.07>
- Susha, S. U., Singh, D. N., & Shojaei, M. (2014). A critical review of soil moisture measurement. *Measurement*, 54, 92–105. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.007>
- Tada, A. (1987). Chapter 9. Bearing capacity. In *Physical measurement in flooded rice soils: The Japanese methodologies*. (pp. 54–61). Philippines.
- Temesgen, D., Gonzalo, J., & Turrion, M. . (2016). Effects of short-rotation eucalyptus plantations on soil quality attributes in highly acidic soils of the central highlands of Ethiopia. *Soil Use and Management*, 32(June), 210–219. <https://doi.org/10.1111/sum.12257>
- Torres, C. A., Gutiérrez, M. del C., Ortiz, C. A., & Gutiérrez, E. V. (2016). Manejo agronómico de los Vertisoles en México : una revisión Agricultural management of Vertisols in Mexico : a review, 457–466.
- Trucíos, R., Rivera, M., Delgado, G., Estrada, J., & Cerano, J. (2013). Análisis sobre cambio de uso de suelo en dos escalas de trabajo. *Terra Latinoamericana*, 31(4), 339–346.
- Vallejo, V., Díaz-Fierros, F., & De la Rosa, D. (2005). 8. Impactos Sobre Los Recursos Edáficos. *Impactos Del Cambio Climático En España*, 355–398.
- Vasques, J. R., & Macías, F. (2017). Fraccionamiento químico del carbono en suelos con diferentes usos en el departamento del Magdalena, Colombia.

Terra Latinoamericana, 35(1), 7–17.

- Vásques, J. R., Macías, F., & Menjivar, J. C. (2013). Respiración del suelo según su uso y su relación con algunas formas de carbono en el departamento del Magdalena, Colombia, *25*(3), 175–180.
- Vela Correa, G., López, J., & Gamiño, M. del L. (2012). Niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, centro de México. *Investigaciones Geograficas, Boletín Del Instituto de Geografía, UNAM*, 77, 18–30.
- Villalón, H. (1989). *Ein Beitrag zur Verwertung von Biomasseproduktion und deren Qualität für die forst- und landwirtschaftliche Nutzung des Matorrals in der Gemeinde Linares, N.L., Mexiko. Göttinger Beiträge zur Land- und Forstwirtschaft in den Tropen und Subtropen.*
- Vinhal-Freitas, I. C., Corrêa, G. F., Wendling, B., Bobuľská, L., & Ferreira, A. S. (2017). Soil textural class plays a major role in evaluating the effects of land use on soil quality indicators. *Ecological Indicators*, 74, 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.020>
- Wang, W., Wang, C., Sardans, J., Min, Q., Zeng, C., Tong, C., & Peñuelas, J. (2015). Agricultural land use decouples soil nutrient cycles in a subtropical riparian wetland in China. *Catena*, 133, 171–178. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.05.003>
- Wassar, F., Gandolfi, C., Rienzner, M., Chiaradia, E. A., & Bernardoni, E. (2016). Predicted and measured soil retention curve parameters in Lombardy region north of Italy. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(3), 207–214. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.05.005>
- Wei, S., Zhang, X., McLaughlin, N. B., Liang, A., Jia, S., Chen, X., & Chen, X. (2014). Effect of soil temperature and soil moisture on CO₂ flux from eroded landscape positions on black soil in Northeast China. *Soil and Tillage Research*, 144, 119–125. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.07.012>
- Weissert, L. F., Salmond, J. A., & Schwendenmann, L. (2016). Variability of soil organic carbon stocks and soil CO₂ efflux across urban land use and soil cover types. *Geoderma*, 271, 80–90.

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.02.014>

- Woerner, M. (1989). Métodos químicos para el análisis de suelos calizos de zonas áridas y semiáridas. Linares, Nuevo León, México: Dpto. Agroforestal, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Woerner, M. (1991). *Los suelos bajo vegetación de matorral del noreste de México descritos a través de ejemplos en el campus universitario de la UANL Linares, N. L.* Reporte Científico No. 22. Linares, Nuevo León, México.
- Wu, J. (2008). Land use changes: Economic, social, and environmental impacts. *CHOICES 4th Quarter The Magazine of Food, Farm, and Resource Issues AAEA*, 23(4), 6–10.
- Yáñez, M. I., Cantú, I., González, H., Jurado, E., Marmolejo, J. G., & Gómez, M. V. (2017). Respiración del suelo en cuatro sistemas de uso de la tierra. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(42), 123–149.
- Yao, S. X., Zhao, C. C., Zhang, T. H., & Liu, X. P. (2013). Response of the soil water content of mobile dunes to precipitation patterns in Inner Mongolia, northern China. *Journal of Arid Environments*, 97, 92–98. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2013.06.003>
- Zhang, J., Lei, T., Qu, L., Chen, P., Gao, X., Chen, C., ... Su, G. (2017). Method to measure soil matrix infiltration in forest soil. *Journal of Hydrology*, 552, 241–248. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.032>
- Zhou, X., Lin, H. S., & White, E. A. (2008). Surface soil hydraulic properties in four soil series under different land uses and their temporal changes. *Catena*, 73(2), 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.09.009>
- Zitzer, S. F., Archer, S. R., & Boutton, T. W. (1996). Spatial variability in the potential for symbiotic N₂ fixation by woody plants in a subtropical savanna ecosystem. *Journal of Applied Ecology*, 33(5), 1125–1136.