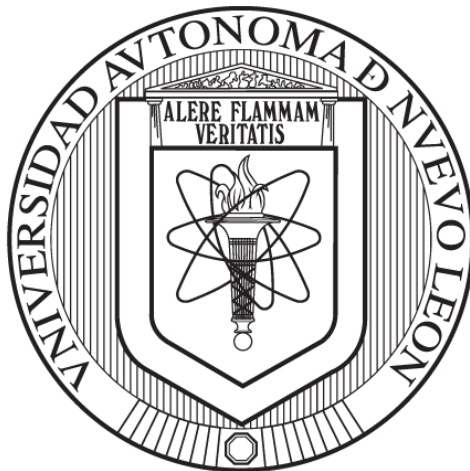


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**EFFECTO DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN EL CONTENIDO
DE CARBONO Y NITRÓGENO EN CUATRO TIPOS DE SUELO
BAJO DOS SISTEMAS DE USO**

Por:

M.C. RODOLFO ALEJANDRO MARTÍNEZ SOTO

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

Diciembre, 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**EFFECTO DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN EL CONTENIDO
DE CARBONO Y NITRÓGENO EN CUATRO TIPOS DE SUELO
BAJO DOS SISTEMAS DE USO**

Por:

M.C. RODOLFO ALEJANDRO MARTÍNEZ SOTO

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

Diciembre, 2025

**EFFECTO DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN EL CONTENIDO
DE CARBONO Y NITRÓGENO EN CUATRO TIPOS DE SUELO
BAJO DOS SISTEMAS DE USO**

Aprobación de Tesis



Dra. María Inés Yáñez Díaz
Director



Dr. Humberto González Rodríguez
Co-director



Dr. Fortunato Garza Ocañas
Asesor



Dr. José Israel Yerena Yamallel
Asesor



Dr. Israel Cantú Silva
Asesor externo

Diciembre, 2025.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por todo su apoyo para la realización de mis estudios, la realización de la investigación y la culminación de mi tesis doctoral.

Al comité de tesis doctoral, Dr. Israel Cantú Silva, Dra. María Inés Yáñez Díaz, Dr. Humberto González Rodríguez, Dr. Fortunato Garza Ocañas y al Dr. José Israel Yerena Yamallel, agradezco el apoyo, consejos y su valioso tiempo para la realización de mi tesis.

Dr. José G. Marmolejo Monsiváis, por el apoyo prestado en esta investigación.

Dr. Israel Cantú Silva, gracias por acompañarme en esta travesía, agradezco la confianza y paciencia que me brindó durante mi formación académica, sus consejos y estirones de orejas, muchas gracias doc por ser mi guía y un gran ser humano.

Dra. María Inés Yáñez Díaz, jefa no me queda más que agradecerle y decirle muchas gracias por todo lo que me enseñó en estos cortos 10 años de aprendizaje, gracias por su guía y su amistad, hay que volver a tomar respiración del suelo.

Karla Díaz Gacía, mi prometida novia y mejor amiga, compañeros desde hace 12 años, siempre trabajando y apoyándonos uno al otro, siendo complementos, eternamente agradecido de haberte conocido.

A mis compadres, amigos y compañeros de carrera, Andrés Velazquez Alvarado, Rafael Cavazos Jiménez y Ramiro Saucedo Moreno, que me brindaron su ayuda, en la toma de datos, muestreo y análisis de laboratorio.

A los alumnos que me acompañaron en diferentes muestreos, Dylan, Jorge, Marce, Mariana, Samantha y Felipe.

DEDICATORIA

A mi abuelita

Ma. De Jesús Soto Rodríguez (+)

A mi madre:

Margarita Martínez Soto.

Por todo el Esfuerzo y dedicación que has hecho a lo largo de tu vida, por superarte y salir adelante, madre estoy infinitamente agradecido contigo y me siento muy orgulloso de ser tu hijo.

Con cariño tu hijo.

Rodolfo Alejandro Martínez Soto

ÍNDICE

1. Introducción.....	1
2. Antecedentes	4
3. Justificación.....	7
4. Hipótesis.....	9
5. Objetivo	9
5.1 Objetivo general.....	9
5.2 Objetivos particulares	9
6. Materiales y métodos	10
6.1 Localización del área de estudio	10
6.2 Descripción de los suelos seleccionados	11
6.3 Suelo Cambisol	11
6.4 Suelo Regosol	12
6.5 Suelo Luvisol (revisar secuencia)	13
6.6 Suelo Vertisol	14
6.7 Descripción de los usos del suelo	15
6.8 Muestreo y análisis de los suelos	17
6.9 Análisis de las propiedades fisicoquímicas.....	18
6.10 Reservorios de COS y Nt	20
6.11 Análisis estadístico	21
7. Resultados	22
7.1 Carbono orgánico del suelo para los cuatro tipos de suelos	22
7.2 Nitrógeno total del suelo para los cuatro tipos de suelos.....	34
7.3 Relación carbono nitrógeno (C:N) para los cuatro tipos de suelos.....	45
8. Discusión.....	54
9. Conclusiones.....	57
10. Literatura	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 . Resumen del análisis de varianza para la variable carbono orgánico del suelo (Mg ha^{-1}).	22
Tabla 2 . Análisis de varianza multifactorial para la variable Nt (Mg ha^{-1})	35
Tabla 3 . Valores medios para Nitrógeno total (Nt, Mg ha^{-1}) en un suelo Cambisol para los usos de MET y Pastizal en cada profundidad.	35
Tabla 4 . Valores medios de Nitrógeno total (Nt, Mg ha^{-1}) en un suelo Regosol y los usos de MET y Pastizal en cada profundidad.	36
Tabla 5 . Valores medios de Nitrógeno total (Nt, Mg ha^{-1}) en un suelo Luvisol y los usos de MET y Pastizal en cada profundidad.	36
Tabla 6 . Valores medios de Nitrógeno total (Nt, Mg ha^{-1}) en un suelo Vertisol y los usos de MET y Pastizal en cada profundidad.	37
Tabla 7 . Resumen del análisis de varianza para la variable relación C:N.	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio.....	10
Figura 2. Suelo tipo Cambisol	12
Figura 3. Suelo tipo Regosol.....	13
Figura 4. Suelo Luvisol	14
Figura 5. Suelo Vertisol.....	15
Figura 6. Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET).....	16
Figura 7. Uso de Pastizal inducido.....	17
Figura 8. Análisis de Materia orgánica para obtención de COS (%).....	18
Figura 9. Equipo Velp Scientifica modelo UDK159 para el análisis de Nitrógeno total (%)	19
Figura 10. Obtención de la Densidad aparente (Da) en los cuatro tipos de suelos	20
Figura 11. Valores medios para el carbono orgánico del suelo (Mg ha^{-1}) en suelo Cambisol. Letras distintas entre MET y Pastizal indican que son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) en cada profundidad. ($n = 4$)	23
Figura 12. Valores medios para el carbono orgánico del suelo (Mg ha^{-1}) en suelo Regosol. Letras distintas entre MET y Pastizal indican que son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) en cada profundidad. ($n = 4$).	24
Figura 13. Valores medios para el carbono orgánico del suelo (Mg ha^{-1}) en suelo Luvisol. Letras distintas entre MET y Pastizal indican que son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) en cada profundidad ($n = 4$).	25
Figura 14. Valores medios para el carbono orgánico del suelo (Mg ha^{-1}) en suelo Vertisol. Letras distintas entre MET y Pastizal indican que son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) en cada profundidad ($n = 4$)	26
Figura 15. Valores medios para el Carbono orgánico del suelo (Mg ha^{-1}) en las profundidades analizadas para el suelo Cambisol. Letras distintas entre profundidades indican que son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) para el MET y pastizal, respectivamente ($n = 4$).	27
Figura 16. Valores medios para el Carbono orgánico del suelo (Mg ha^{-1}) en las profundidades analizadas para el suelo Regosol. Letras distintas entre	

profundidades indican que son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) para el MET y Pastizal, respectivamente ($n = 4$).....	28
Figura 17. Valores medios para el Carbono orgánico del suelo (Mg ha^{-1}) en las profundidades analizadas para el suelo Luvisol. Letras distintas entre profundidades indican que son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) para el MET y Pastizal, respectivamente ($n = 4$).....	29
Figura 18. Valores medios para el Carbono orgánico del suelo (Mg ha^{-1}) en las profundidades analizadas para el suelo Vertisol. Letras distintas entre profundidades indican que son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) para el MET y Pastizal, respectivamente ($n = 4$).....	30
Figura 19. Valores de carbono orgánico del suelo Cambisol almacenado en el perfil 0-100 cm para usos del suelo Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET) y Pastizal.	31
Figura 20. Valores de carbono orgánico del suelo Regosol almacenado en el perfil 0-100 cm para usos del suelo Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET) y Pastizal.	32
Figura 21. Valores de carbono orgánico del suelo almacenado en el perfil 0-100 cm para usos del suelo Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET) y Pastizal.....	33
Figura 22. Valores de carbono orgánico del suelo almacenado en el perfil 0-100 cm para usos del suelo Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET) y Pastizal.....	34
Figura 23. Valores medios para nitrógeno total (Nt, Mg ha^{-1}) para el suelo Cambisol. Letras distintas entre profundidades son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) para MET y Pastizal, respectivamente ($n=4$).	38
Figura 24. Valores medios para nitrógeno total (Nt, Mg ha^{-1}) para el suelo Regosol. Letras distintas entre profundidades son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) para MET y Pastizal, respectivamente ($n=4$).	39
Figura 25. Valores medios para nitrógeno total (Nt, Mg ha^{-1}) para el suelo Luvisol. Letras distintas entre profundidades son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) para MET y Pastizal, respectivamente ($n=4$).	40
Figura 26. Valores medios para nitrógeno total (Nt, Mg ha^{-1}) para el suelo Vertisol. Letras distintas entre profundidades son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) para MET y Pastizal, respectivamente ($n=4$).	41

Figura 27. Valores de nitrógeno total del suelo Cambisol almacenado en el perfil 0-100 cm para usos del suelo Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET) y Pastizal.	42
Figura 28. Valores de nitrógeno total del suelo almacenado en el perfil 0-100 cm para usos del suelo Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET) y Pastizal.	43
Figura 29. Valores de nitrógeno total del suelo almacenado en el perfil 0-100 cm para usos del suelo Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET) y Pastizal.	44
Figura 30. Valores de nitrógeno total del suelo almacenado en el perfil 0-100 cm para usos del suelo Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET) y Pastizal.	45
Figura 31. Valores medios para la relación carbono nitrógeno (C:N) en suelo Cambisol para los dos usos del suelo. Letras distintas entre usos son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) ($n=4$).....	46
Figura 32. Valores medios para la relación carbono nitrógeno (C:N) en suelo Regosol para los dos usos del suelo. Letras distintas entre usos son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) ($n=4$).....	47
Figura 33. Valores medios para la relación carbono nitrógeno (C:N) en suelo Luvisol para los dos usos del suelo. Letras distintas entre usos son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) ($n=4$).....	48
Figura 34. Valores medios para la relación carbono nitrógeno (C:N) en suelo Vertisol para los dos usos del suelo. Letras distintas entre usos son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) ($n=4$).....	49
Figura 35. Valores medios para la relación carbono nitrógeno (C:N) en las profundidades analizadas para el suelo Cambisol. Letras distintas entre profundidades indican que son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) para MET y Pastizal, respectivamente ($n=4$).	50
Figura 36. Valores medios para la relación carbono nitrógeno (C:N) en las profundidades analizadas para el suelo Regosol. Letras distintas entre profundidades indican que son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) para MET y Pastizal, respectivamente ($n=4$).	51
Figura 37. Valores medios para la relación carbono nitrógeno (C:N) en las profundidades analizadas para el suelo Luvisol. Letras distintas entre	

profundidades indican que son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) para MET y pastizal, respectivamente (n=4).....	52
Figura 38. Valores medios para la relación carbono nitrógeno (C:N) en las profundidades analizadas para el suelo Vertisol. Letras distintas entre profundidades indican que son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) para MET y Pastizal, respectivamente (n=4).	53

Resumen

El impacto que tiene el cambio de uso de suelo de vegetación nativa a pastizales para pastoreo o forraje de ganado, genera una alteración en los ciclos biogeoquímicos. Es por ello que es de suma importancia conocer las reservas de carbono orgánico del suelo (COS) y el nitrógeno total (Nt), en cuatro tipos de suelos (Cambisol, Regosol, Luvisol y Vertisol). El presente estudio se realizó en Linares, Nuevo León, México. Se colectaron cuatro muestras compuestas ($n=4$) a cinco profundidades (0-5, 5-15, 15-30, 30-60 y 60-100 cm), en dos usos de suelo 1.- Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET) y 2.- Pastizal inducido de uso pecuario) obteniendo 160 muestras en total (20 por uso de suelo). Las variables analizadas fueron porcentaje de carbono orgánico del suelo (COS, %), nitrógeno total (Nt, %) y se estimó la relación C:N. Así mismo, se determinó la densidad aparente (Da) para cada una de las profundidades para estimar el almacén (Mg ha^{-1}) de COS y Nt. Se realizaron los análisis estadísticos para las variables de COS (Mg ha^{-1}), Nt (Mg ha^{-1}) y a la relación C:N. Con el cumplimiento de los supuestos estadísticos se realizaron análisis de varianza (ANOVA) y se aplicó pruebas de Tukey ($p \leq 0.05$) para detectar las diferencias significativas entre los suelos, sus usos y profundidades. La variable de carbono orgánico del suelo (Mg ha^{-1}), se presentaron diferencias altamente significativas ($p < 0.01$) en todas las interacciones donde fueron altamente significativas a excepción de la interacción Uso*Profundidad ($p > 0.05$). En cuanto a la variable de Nt presentó diferencias significativas en todos los factores a excepción de la interacción Suelo*Uso*Profundidad ($p > 0.05$). La relación C:N en todos los factores presentaron diferencias altamente significativas ($p < 0.01$), de igual manera, todas las interacciones fueron altamente significativas ($p < 0.01$). Los valores medios más bajos de reservorio de COS se presentaron en el uso de pastizal en la profundidad 0-5 cm en el Luvisol con 16.90 Mg ha^{-1} , mientras que la profundidad 60-100 cm del uso MET presentó el valor más alto con 64.26 Mg ha^{-1} que corresponde al Regosol. En cuanto al Nt, el suelo Regosol en su uso de MET presentó el valor más alto con 23.25 Mg ha^{-1} y el valor más bajo corresponde al suelo Luvisol en su uso de pastizal con 10.79 Mg ha^{-1} . Las áreas transformadas de vegetación nativa a un uso de pastizal, ha generado alteraciones en los

reservorios de COS, Nt y en la relación C:N, en las profundidades de los cuatro suelos estudiados.

Summary

The impact of changing land use from native vegetation to pastures for grazing or livestock forage, generates an alteration in the biogeochemical cycles. It is therefore of utmost importance to know the reserves of soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (Nt), in four types of soils (Cambisol, Regosol, Luvisol and Vertisol). This study was conducted in Linares, Nuevo León, Mexico. Four composite samples ($n=4$) were collected at five depths (0-5, 5-15, 15-30, 30-60 and 60-100 cm), in two land uses 1.- Tamaulipan thornscrub (MET) and 2.- Induced grassland of livestock use obtaining 160 samples in total (20 per land use). The variables analyzed were percentage of soil organic carbon (SOC, %), total nitrogen (Nt, %) and the C:N ratio was estimated. Also, the bulk density (D_a) was determined for each of the depths to estimate the storage (Mg ha^{-1}) of SOC and Nt. Statistical analyses were performed for the variables SOC (Mg ha^{-1}), Nt (Mg ha^{-1}) and the C:N ratio. With the fulfillment of the statistical assumptions, analysis of variance (ANOVA) and Tukey tests ($p \leq 0.05$) were applied to detect significant differences between soils, their uses and depths. The soil organic carbon variable (Mg ha^{-1}) showed highly significant differences ($p < 0.01$) in all interactions where they were highly significant except for the interaction Use*Depth ($p > 0.05$). As for the Nt variable, it showed significant differences in all factors except for the interaction Soil*Use*Depth ($p > 0.05$). The C:N ratio in all factors showed highly significant differences ($p < 0.01$), likewise, all interactions were highly significant ($p < 0.01$). The lowest mean SOC reservoir values were presented in the grassland use at depth 0-5 cm in the Luvisol with 16.90 Mg ha^{-1} , while the depth 60-100 cm of the MET use presented the highest value with 64.26 Mg ha^{-1} corresponding to the Regosol. As for Nt, the Regosol soil in its use of MET presented the highest value with 23.25 Mg ha^{-1} and the lowest value corresponds to the Luvisol soil in its use of grassland with 10.79 Mg ha^{-1} . Transformed areas of native vegetation due to grassland use have generated alterations in SOC, Nt and C:N reservoirs in the depths of the four soils studied.

1. Introducción

El recurso suelo está vinculado directamente con el desarrollo de los ecosistemas y es esencial en la producción alimentaria. Desde que los ancestros comenzaron a cultivar el suelo, el humano aprendió rápidamente a identificar los mejores suelos para sus cultivos, por la constante influencia antropogénica se han visto alterados los ciclos biogeoquímicos (Burbano, 2016; Chamorro *et al.*, 2025).

Las actividades antropogénicas son el principal origen de CO₂ que se emite al ambiente, las cuales han contribuido sobre el cambio climático debido a su aumento del en los últimos años, esto porque es de los principales Gases de Efecto Invernadero (GEI) con más toneladas emitidas por año, lo anterior gracias al uso de combustible de origen fósil, los constantes cambios de usos del suelo para el aprovechamiento de madera, los cultivos y maquinaria para producción agrícola, el acelerado ritmo de población en el que estamos viviendo actualmente, la cual demanda una mayor cantidad de alimentos (Mota, 2008).

El suelo es indispensable en el equilibrio de los servicios ecosistémicos, su preservación es la clave para el sustento de las próximas generaciones, las actividades antropogénicas perturban el suelo, llegando alterar su capacidad para combatir el cambio climático (Aguirre *et al.*, 2022).

El reservorio en el suelo de nitrógeno total (Nt) se estima en una profundidad de 1.0 m de 133 a 140 Pg (1 Petagramo, Pg = 1×10^{15} g) de nitrógeno total. No obstante, la degradación y erosión de los suelos por las actividades humanas llegan a limitar y disminuir sus reservas de nitrógeno total en el suelo (Batjes, 2014).

Después de los océanos, el recurso suelo ocupa el segundo lugar en el secuestro de carbono del mundo con 1,550 Pg, la materia orgánica, forma lo que se le conoce como carbono orgánico del suelo. El carbono se compone en dos partes en orgánico, inorgánico, el aire en el suelo y el agua; la materia orgánica no es homogénea ya que su formación es de diferentes orígenes (Carvajal *et al.*, 2008).

La presión ejercida por la creciente población ha causado un daño en el medioambiente, causando una degradación y fragmentación. Martínez *et al.* (2008), determinaron que el reservorio de carbono orgánico del suelo sufre cambios negativos por el uso y el manejo que se le da a los suelos y hacen mención sobre aplicar técnicas para aumentar las reservas de COS.

Las existencias de carbono orgánico del suelo y de nitrógeno total se ven fuertemente alteradas al cambiar su uso nativo a un uso antropogénico como la agricultura y la ganadería en praderas, reportando pérdidas en el COS de hasta 35 % y de Nt en un 39 % respecto a su área testigo (Ferrero *et al.*, 2018). Hume *et al.* (2017), refieren que las reservas de COS y Nt del suelo llegan a oscilar de acuerdo con las condiciones de la región, como lo es el uso del suelo, clima, y la vegetación.

Al tener una relación C:N en niveles bajos se asegura una condición elevada en la calidad de la materia orgánica del suelo, ayudando a la descomposición más rápida y liberando nitrógeno disponible para las plantas. Mantener un rango de entre 10 y 14 de relación C:N se genera una rápida liberación para provocar nitrógeno para los macros y microorganismos del suelo, asimismo, al encontrar una relación C:N superiores a 20 muestran una lenta descomposición (Gamarra *et al.*, 2018).

El norte y noreste de México predominan principalmente los matorrales llegando a cubrir un 26 % del territorio mexicano (Briones *et al.* 2018). El Estado de Nuevo León se encuentra cubierto en la mayor parte de su territorio aproximadamente 1, 056,046 ha, fungiendo como hábitat para un sin número de especies y provisiona productora maderables y no maderables para los habitantes (González *et al.*, 2017)

Se discute que los distintos usos de pastizales llegan a tener un elevado potencial en el secuestro de COS y Nt, desafortunadamente la mayor parte de las investigaciones se concentran en las profundidades más superficiales (0-50 cm), dejando abierta la incógnita de la fluctuación del COS y Nt en profundidades de 100 a 200 cm (Ward *et al.*, 2016). Por su parte, Briones *et al.* (2019), han encontrado reservorios de carbono en pastizales que fluctúan entre 4.72 a 7.96

Mg ha⁻¹. Un manejo adecuado de los pastizales naturales e inducidos, pueden llegar a formar parte de las grandes reservas de COS comparado con otro tipo de vegetación.

En México existen alrededor de 18,880,886 ha de pastizales inducidos y 9,596,140 ha de pastizal natural, que se utilizan principalmente en actividades agropecuarias o como áreas de cultivo de forrajes para el ganado (INEGI 2014). Por su parte, Jurado *et al.* (2021), mencionan que dichos pastizales pueden llegar a almacenar de 24 a 34 Mg ha⁻¹ de COS en los suelos.

2. Antecedentes

El cambio del uso de los suelos afecta de manera directa los reservorios del carbono orgánico del suelo, es por ello que la conservación de áreas con vegetación nativa es de suma importancia para mantener las reservas de COS (Walteros *et al.*, 2022 y Martín *et al.*, 2023).

Mejía *et al.*, (2007), realizaron un estudio sobre aportación de nuevo carbono orgánico en el suelo por plantaciones de *Pinus michoacana* con diferentes años de establecimiento, observando que los primeros centímetros más someros (5 cm) del suelo bajan las reservas del carbono, esto en los primeros cinco años de su plantación, sin embargo, presentan un aumento al doble hasta los 20 años.

La materia orgánica en el suelo (MOS), se conforma por seres vivos de flora y fauna que ya han cumplido su ciclo, brindando nutrientes, protegiendo al suelo de la degradación y mejorando la infiltración del agua, la MOS se fracciona en dos partes, los reservorios activos que se regeneran en tiempos más cortos pasando de meses a años y las reservas pasivas, llegando a tardar en recuperar desde unos pocos años a miles (Gougoulas *et al.*, 2014).

Algunas reservas de carbono orgánico del suelo presentan, diferentes tiempos que abarca desde unos cuantos años (esto en función de la constitución bioquímica, como lo es la lignina que es más estable que la celulosa) a décadas o a más de 1000 años. Los agregados del suelo juegan un papel de protección para la materia orgánica del suelo, así mismo la fracción de arcillas realizan una barrera en las partículas del COS (Balesdent *et al.*, 2000).

Las variaciones sobre el COS y las emisiones de CO₂ en los bosques templados, se les atribuye a transformación y a los usos de los suelos creados por las actividades antropogénicas, como lo es el aprovechamiento forestal, incendios, y el cambio de especies. Algunos de los bosques templados se distribuyen principalmente en los suelos Leptosol, Regosol, Luvisol, Phaeozem, Cambisol, Umbrisol y Andosol, los Andosoles son suelos de muy baja abundancia y presentan la una enorme disposición al almacenaje de COS debido a sus

cualidades mineralógicas ya que fijan la MOS previniendo su acelerada desintegración y posterior incorporación a la atmósfera (Galicia *et al.*, 2016).

Según la FAO (2002), algunos suelos que contienen una gran cantidad de carbono orgánico del suelo en su perfil de 0 a 100 cm son: Andosol 254, Podzol 242, Rendzina 133, Chernozem 125, Vertisol 111, Ferralsol 107, Nitosol 84, Xerosol 48, Litosol 36 y Yermosol 30 Mg ha⁻¹ respectivamente.

Según el mapa de carbono del suelo FAO (2017), el suelo que secuestran la menor cantidad de COS son el arenosol con un 0.6 %, que se encuentran en los grandes desiertos como el Sahara, pero hay otros desiertos que también almacenan poco COS, como el desierto de Atacama en Chile, el Valle de la Muerte en EE.UU., el desierto de Arabia, el desierto de Australia, el desierto de Gobi. México cuenta con dos grandes desiertos que son el desierto Chihuahuense y el desierto de Sonorense, pero estos desiertos presentan más carbono, por ejemplo, el suelo Regosol 0.8 %.

El ciclo del nitrógeno y del carbono son los más importantes para el desarrollo de los organismos, ya que ambos son básicos para el desarrollo óptimo de las plantas. Por un lado, el nitrógeno es un macronutriente fundamental y el carbono es utilizado por las plantas en la fotosíntesis e intercambio por oxígeno y secuestrando el CO₂ en su estructura. Ambos ciclos se han visto desequilibrados por las actividades antropogénicas (Waring *et al.*, 2007; Widdison *et al.*, 2008).

El nitrógeno es un macroelemento de suma importancia para el adecuado crecimiento de la flora. El nitrógeno en el suelo se encuentra de forma orgánica e inorgánica; el nitrógeno total se divide en un 95 % nitrógeno orgánico y 5 % por nitrógeno inorgánico (FAO, 2021).

La fijación de nitrógeno en el suelo ocurre mediante acciones biológicas y no biológicas como atmosféricas (descargas eléctricas). Asimismo, las plantas leguminosas en asociación con otros microorganismos como lo son algunos hongos y bacterias, el nitrógeno queda disponible para ser aprovechado por las plantas (Fisher *et al.*, 2003; Zhou *et al.*, 2016).

Los suelos que presentan un gran reservorio de Nt a en el mundo son los suelos: Andosol 19.9, Podzol 13.9, Cambisol 11.2, Chernozem 17.0 Vertisol 12.3, Ferralsol 9.7, Nitosol 10, Xerosol 5.8 Mg, Histosol 40.1, Yermosol 3.7 y Phaeozem 15.1 Mg ha⁻¹ respectivamente. (FAO, 1989).

Al tener una relación C:N baja en el suelo se puede cuantificar el progreso de desintegración de la materia orgánica, cuando la descomposición de la MO avanza, la relación C:N disminuye y al aproximarse al rango de 9 a 10, la materia orgánica pasa a ser convertida en humus. Cuando en un suelo presenta una relación C/N alta, significa que la cantidad de materia orgánica es alta y el nitrógeno es bajo, así que la mayor parte del nitrógeno aprovechable es tomado por los microorganismos y muy poco es aprovechado por las plantas (Flores, 2003).

3. Justificación

México cuenta con 28 de los 32 grupos de suelos que hay en el planeta siendo uno de los países con mayor heterogeneidad de suelos y se utilizan en una amplia variedad de actividades antropogénicas, como lo son, la ganadería, agostaderos y pastizales naturales (57.3 millones de ha), aprovechamiento forestal (15.6 millones de ha) y la agricultura (29.8 millones de ha) (INEGI, 2015; INEGI, 2023).

Los suelos Cambisol (4.7%), Regosol (14.1%), Luvisol (9.2%) y Vertisol (8.6 %), juntos ocupan el 36.6 % de la superficie terrestre de México, lo que equivale a 36.75 millones de hectáreas aproximadamente (SEMARNAT, 2012). Dichos suelos son los que mayor impacto tienen en actividades antropogénicas.

Los suelos ocupan el mayor reservorio de carbono en tierra firme, pero desde que se implementaron las técnicas de cultivo y domesticación de animales, los cambios de uso de suelo han disminuido su vegetación natural y con ello la disminución del COS y nitrógeno en los suelos. Es por ello que las actividades antropogénicas son las principales causas de la disminución del COS y el nitrógeno en los suelos.

El recurso suelo es uno de los ecosistemas que mayor impacto tiene, ya que, al ser utilizado por el humano para cosechar los alimentos, extraer recursos naturales y para establecer viviendas se ha sometido tanto que actualmente se encuentran con algún grado de erosión y degradación. SEMARNAT (2003), documenta que el 42 % de la superficie del país podría tener un grado de erosión hídrica, 89 % erosión eólica; el 17.8 % del territorio presentó una degradación química y 9.5 % degradación física a nivel nacional.

La degradación y erosión de los suelos, puede ocurrir de manera natural o por acciones antropogénicas asociadas principalmente al cambio de uso del suelo. Según SEMARNAT (2019), en el Estado de Nuevo León se hacen presenten tanto la degradación física y química, así como la erosión eólica e hídrica, presentando diferentes superficies afectadas. La degradación física presenta una superficie de 73,483.27 ha, la degradación química de 614,344.52 ha, la erosión

eólica 1,187,781.44 ha y la erosión hídrica 667,211.81 ha, siendo la erosión eólica la que más superficie afecta, posiblemente se atribuye al remplazo de la vegetación nativa a usos antropogénicos.

Cambisol, Luvisol, Regosol y vertisol, son los suelos evaluados en la presente investigación son los suelos que mayor impacto antropogénico se tiene en el Estado y a nivel de municipio de Linares, Nuevo León, en cuestión de agricultura, pastizal inducido, ganadería y para la extracción de recursos forestales.

4. Hipótesis

Los reservorios de carbono orgánico del suelo y nitrógeno total difieren según el tipo de suelo y profundidad bajo diferente cobertura vegetal.

5. Objetivo

5.1 Objetivo general

Evaluar los reservorios de carbono orgánico del suelo y nitrógeno total, así como la relación C:N en suelos Cambisol, Luvisol, Regosol y Vertisol a diferentes profundidades y bajo usos de Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET) y Pastizal.

5.2 Objetivos particulares

1. Determinar el reservorio de COS (Mg ha^{-1}) en dos usos de suelo (matorral y pastizal) en cinco profundidades (0-5, 5-15, 15-30, 30-60 y 60-100 cm), en diferentes tipos de suelo: Cambisol, Regosol, Luvisol y Vertisol.
2. Evaluar el reservorio (Mg ha^{-1}) de nitrógeno total (Nt) en dos usos de suelo (matorral y pastizal) en cinco profundidades de cuatro tipos de suelos.
3. Estimar la relación carbón nitrógeno (C:N) en dos usos del suelo a través del perfil de los diferentes tipos de suelo bajo estudio.

6. Materiales y métodos

6.1 Localización del área de estudio

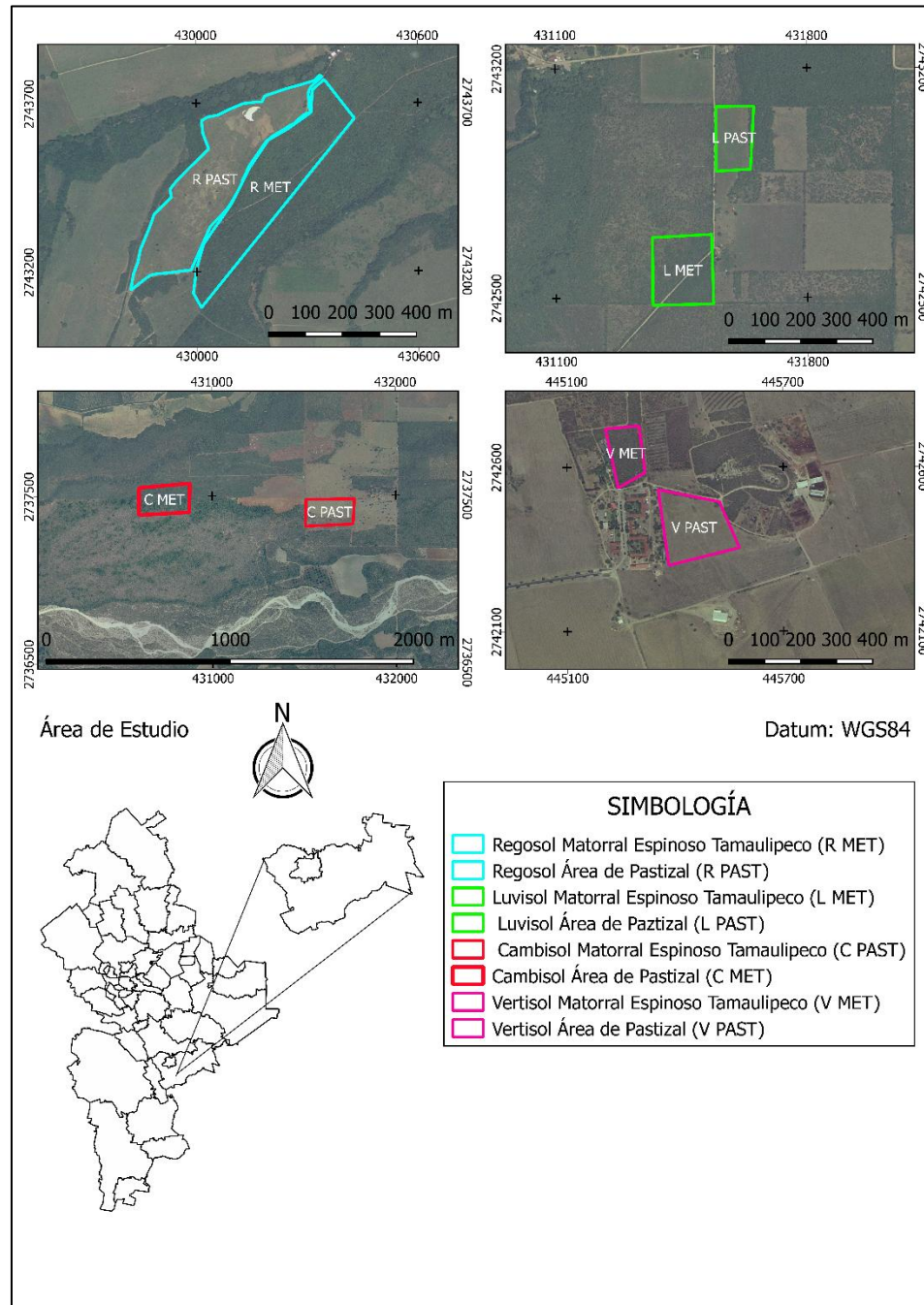


Figura 1. Localización del área de estudio

El área en donde se llevó a cabo el presente trabajo se encuentra en el municipio de Linares Nuevo León, cuenta con una altitud que comprende los 100 a 2500 msnm, pertenece a las provincias de la Llanura Costera del Golfo Norte, la Sierra Madre Oriental, y las Grandes Llanuras de Norteamérica, su clima presenta una variación de 16 a 24°C y una precipitación de 500^a 1,100 mm, cuenta con un clima semicálido con lluvias en verano, así mismo pertenece a las cuencas Río San Fernando en un 98 % y a la cuenca Río Soto la Marina 2%, su vegetación principalmente se compone de Matorral, Bosque y Pastizales. (INEGI, 2010).

6.2 Descripción de los suelos seleccionados

Se seleccionaron cuatro tipos de suelo: Cambisol, Regosol, Luvisol y Vertisol.

El suelo Cambisol se encuentran en el ejido San Rafael, a una altitud de 493 msnm, mientras que el suelo Regosol y Luvisol se localizan en el ejido La Parrita y presentan una altitud de 472 y 470 msnm, respectivamente. La estación meteorológica más cercana corresponde a la estación número 19147 llamada Las Crucitas y cuenta con una precipitación media de 870 mm y una temperatura media de 21.6 °C (CONAGUA, 2025).

El suelo Vertisol se encuentra en los terrenos de la Facultad de Ciencias Forestales, en el municipio de Linares, Nuevo León, a una altitud de 380 msnm. Según la estación más cercana llamada Benítez, con número de identificación 19112, presenta una precipitación promedio de 679 mm y una temperatura media de 23.8 °C (CONAGUA, 2025).

6.3 Suelo Cambisol

Su nombre proviene del latín *cambire*, que significa cambiar, presentan una coloración parduzca en la parte subsuperficial y su principal material de formación es de textura medias y finas, se desarrolla en terrenos que van de montañas a planicies, ocupando así amplia variedad de climas y vegetación, presenta una textura media con un buen drenaje, una susceptibilidad a la erosión de moderada a alta (IUSS, 2015) (Figura 2).



Figura 2. Suelo Cambisol

6.4 Suelo Regosol

Se clasifica como suelo poco desarrollado, son muy comunes en suelos erosionados y en las zonas de acumulación, se presentan principalmente en áreas áridas y semiáridas, su nombre proviene de la palabra griega *rhegos* que significa manto. En el planeta se estiman que existen un aproximado de 260 millones de hectáreas (IUSS, 2015) (Figura 3).



Figura 3. Suelo Regosol

6.5 Suelo Luvisol

Se caracterizan por presentar alto contenido de arcilla en áreas subsuperficial. Lo anterior por la movilización de arcillas a partes más profundidad del suelo, su nombre proviene del latín *eludere* que significa lavar, se desarrolla principalmente en terrenos planos y con estaciones muy marcadas entre secas y húmedas. Se estiman entre 500 a 600 millones de hectáreas en el planeta (INEGI, 2015) (Figura 4).



Figura 4. Suelo Luvisol

6.6 Suelo Vertisol

Su nombre proviene del latín *verteré* que significa dar vuelta, se caracteriza por presentar una gran cantidad de arcillas, se expanden y contraen formando así grietas profundas cuando se secan y se compactan cuando se saturan. A nivel mundial existen aproximadamente 335 millones de hectáreas y son utilizados principalmente para la agricultura (INEGI, 2015) (Figura 5).



Figura 5. Suelo Vertisol

6.7 Descripción de los usos del suelo

Se seleccionaron dos tipos de usos de suelo que es la vegetación nativa, Matorral Espinoso Tamaulipeco y un área de pastizal inducida.

Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET)

Es la vegetación nativa de la zona, está constituido por más de 50 especies arbóreas y arbustivas (1 a 5 m de altura), sin intervención, predominando las especies de *Havardia pallens* (Benth.) Britton & Rose, *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit, *Vachellia farnesiana* (L.) Wight & Arn., *Yucca filifera* Chabaud, *Ebenopsis ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes, *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. Ex Willd) M.C. Johnst y *Cordia boissieri* A. D.C., entre otras (Patiño *et al.*, 2022) (Figura 6).



Figura 6. Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET)

Pastizal inducido

Este corresponde a un sistema de pastoreo intensivo, con rotación en potreros y una carga de 8 UA ha⁻¹, con períodos de descanso de 8 y 5 semanas en temporada de sequía y lluvias, respectivamente. La especie de pasto establecida es *Digitaria sanguinalis* (L.) Scop, es de temporal, con una antigüedad de 20 años (Figura 7).



Figura 7. Uso de Pastizal inducido

6.8 Muestreo y análisis de los suelos

La toma de muestras se llevó a cabo a inicios del mes de mayo de 2021. Se recolectaron muestras de suelo en cada uno de los cuatro tipos de suelo en dos usos de suelo, se obtuvieron cuatro muestras compuestas en cada una de las profundidades seleccionadas, 0-5, 5-15, 15-30, 30-60 y 60-100 cm respectivamente, correspondiendo 40 muestras compuestas de suelo de 1 a 1.5 kg por tipo de suelo, dando un total de 160 muestras de suelo, las cuales fueron trasladadas y preparadas en el laboratorio de suelos y nutrición de bosques de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de nuevo León en donde se llevaron a cabo los análisis.

6.9 Análisis de las propiedades fisicoquímicas

El análisis del contenido de carbono orgánico del suelo se determinó a partir del método de combustión húmeda según Walkley-Black para la obtención de materia orgánica y aplicando el factor de corrección de Van Bemmelen (SEMARNAT, 2002).

$$\% C. Orgánico = 0.779 \times (B - M) \times (0.4)$$

$$\% Materia orgánica = 1.343 \times (B - M) \times (0.4)$$

Dónde:

B = Volumen de sulfato ferroso gastado para valorar el blanco de reactivos (ml).

M = Volumen de sulfato ferroso gastado para valorar la muestra (ml).

0.4 = Normalidad de la solución de dicromato de potasio y de la solución del sulfato ferroso, 12/4000: peso equivalente del carbono en g, 0.58 porcentaje medio de carbono que contiene la materia orgánica. (Woerner, 1989) (Figura 8).



Figura 8. Análisis de Materia orgánica para obtención de COS (%)

Mientras que, para la obtención de Nitrógeno total se analizó por el método de digestión Kjeldahl, utilizándose el equipo Velp Scientifica modelo UDK159. Bremner y Mulvaney (1982) (Figura 9).



Figura 9. Equipo Velp Scientifica modelo UDK159 para el análisis de Nitrógeno total (%)

Para determinar la relación C:N, se estimó a partir de los valores obtenidos del COS y del Nt (SEMARNAT, 2002).

La obtención de la Densidad aparente (D_a) se efectuó por medio de la técnica de muestras no alteradas, denominado método del cilindro y se utiliza un cilindro metálico (5cm*5 cm) para cada una de las profundidades (Woerner, 1989).

$$\delta a = \frac{p2-p1}{Vc}$$

Donde: δa : densidad aparente (g/cm^3), $p2$: peso seco de la muestra con el cilindro (g), $p1$: peso del cilindro (g), Vc : Volumen del cilindro (cm^3) (Figura 10).



Figura 10. Obtención de la Densidad aparente (D_a) en los cuatro tipos de suelos

6.10 Reservorios de COS y Nt

Para la obtención del reservorio de COS (Mg ha^{-1}) y Nt (Mg ha^{-1}), se utilizó el porcentaje de COS y Nt, la densidad aparente (D_a , g cm^{-3}) y el estrato de profundidad del suelo (Eps, cm), aplicando las siguientes fórmulas (González *et al.*, 2008):

$$\text{COS (Mg ha}^{-1}\text{)} = \text{COS\%} \cdot D_a \cdot \text{Eps}$$

$$\text{Nt (Mg ha}^{-1}\text{)} = \text{Nt\%} \cdot D_a \cdot \text{Eps}$$

Dónde: COS = Carbono orgánico del suelo, D_a = Densidad aparente, Eps = Estrato de profundidad del suelo, Nt = Nitrógeno total

Además, se calculó el reservorio acumulado de ambas variables en todo el perfil (0-100 cm) a partir de la sumatoria de los 5 estratos en cada uso del suelo.

6.11 *Análisis estadístico*

Se muestran los resultados de las pruebas de normalidad y homogeneidad donde las tres variables analizadas se transformaron para lograr el supuesto de distribución normal. Para las variables de COS (Mg ha^{-1}) y Nt (Mg ha^{-1}) se transformaron a raíz cuadrada, en cuanto a la relación C:N se empleó una transformación de recíproco de x $1/x$, así mismo, se realizaron análisis de varianza (ANOVA) de acuerdo a que diseño experimental y/o arreglo para analizar efectos principales y las interacciones. Se aplicaron pruebas de Tukey ($p \leq 0.05$) para detectar diferencias significativas entre medias de uso de suelo, tipo de suelo y profundidad. Los análisis fueron ejecutados con el programa SPSS® (Statistical Package for Social Sciences, versión estándar 22 para Windows, SPSS INC., Chicago, IL).

7. Resultados

7.1 Carbono orgánico del suelo para los cuatro tipos de suelos

En la Tabla 1 se presentan los resultados del análisis de varianza de acuerdo a un diseño trifactorial (Factor A: suelos, Factor B: usos y Factor C: profundidades) y sus interacciones para la variable de carbono orgánico del suelo (Mg ha^{-1}), en donde los factores principales presentaron diferencias altamente significativas ($p < 0.01$) asimismo, todas las interacciones fueron significativas a excepción de la interacción Uso*Profundidad ($p > 0.05$).

Tabla 1. Resumen del análisis de varianza para la variable carbono orgánico del suelo (Mg ha^{-1}).

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	Valor F	Valor p
Suelo (S)	31.497	3	10.499	19.235	<0.001
Uso (U)	7.118	1	7.118	13.041	<0.001
Profundidad(P)	70.415	4	17.604	32.252	<0.001
S*U	20.462	3	6.821	12.496	<0.001
S*P	20.473	12	1.706	3.126	0.001
U*P	4.226	4	1.056	1.936	0.109
S*U*P	21.973	12	1.831	3.355	<0.001
Error	65.5	120	0.546		

Valores en negritas denotan diferencias significativas ($p \leq 0.01$).

La prueba Tukey ($p \leq 0.05$), para el suelo Cambisol y sus dos usos indica que existen diferencias únicamente en la profundidad 5-15 cm, así mismo, el uso de MET presentó mayor cantidad de COS (Mg ha^{-1}) en las primeras tres profundidades (0-5, 5-15 y 15-30 cm), mientras que el uso de Pastizal su reservorio de COS fue mayor en las últimas dos profundidades (30-60 y 60-100 cm). La profundidad que más COS presentó fue la profundidad 5-15 cm con 49.72 Mg ha^{-1} en el uso de MET y la profundidad que menor COS presentó fue la de 0-5 cm con 22.36 Mg ha^{-1} para el uso de Pastizal. Reflejando una disminución en las primeras profundidades, pero en las últimas dos el Pastizal fue superior 30-60 cm 35.12 y 41.07 Mg ha^{-1} (Figura 11).

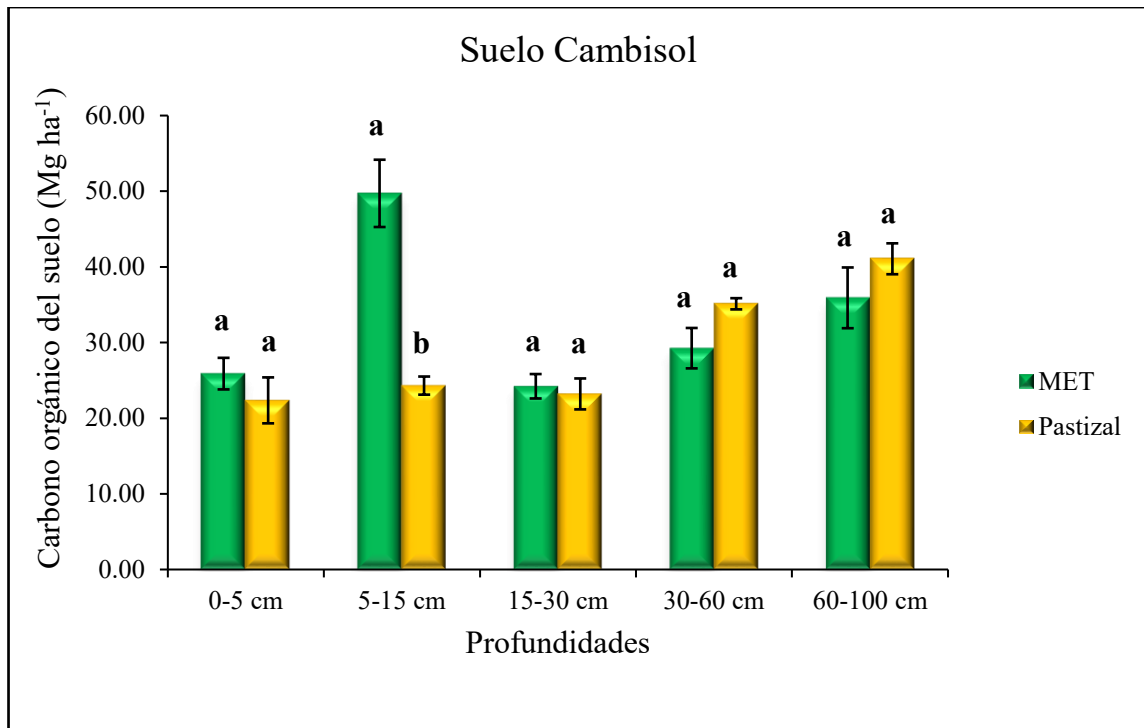


Figura 11. Valores medios para el carbono orgánico del suelo (Mg ha^{-1}) en suelo Cambisol. Letras distintas entre MET y Pastizal indican que son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) en cada profundidad. ($n = 4$)

El uso de MET en el suelo Regosol destaca por ser mayor en todas las profundidades, sin embargo, solo en la profundidad 60-100 cm presenta diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los usos de MET y Pastizal. La profundidad que más COS presentó fue la profundidad 30-60 cm con 78.28 Mg ha^{-1} en el uso de MET, mientras que las profundidades de 0-5 cm (29.67 Mg ha^{-1}) y 60-100 cm (29.04 Mg ha^{-1}) presentaron el menor reservorio de COS y corresponden al uso de Pastizal, en el suelo Regosol (Figura 12).

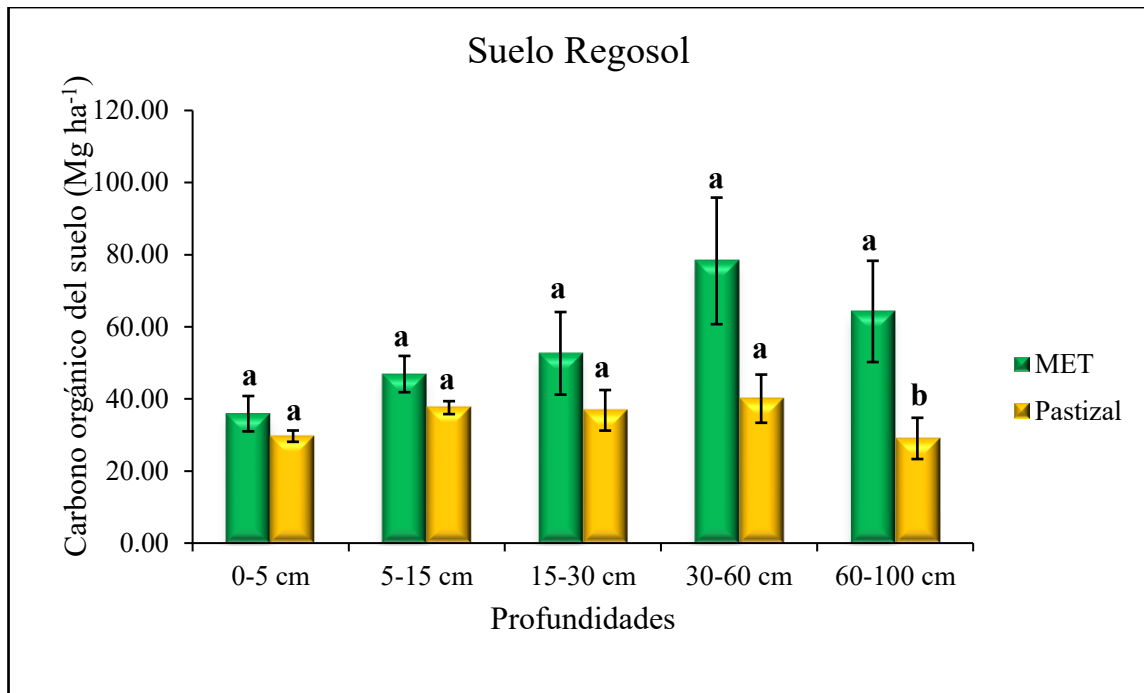


Figura 12. Valores medios para el carbono orgánico del suelo (Mg ha^{-1}) en suelo Regosol. Letras distintas entre MET y Pastizal indican que son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) en cada profundidad. ($n = 4$).

El suelo Luvisol en sus usos de suelo presentó diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en sus primeras dos profundidades 0-5 y 5-15 cm, mientras que el resto de profundidades no presentó diferencias significativas. El MET en las profundidades 0-5, 5-15 y 15-30 cm, respectivamente, presentan un reservorio de 27.28, 40.18 y 40.73 Mg ha^{-1} , mientras que el uso con mayor reservorio de COS fue el Pastizal en la profundidad 60-100 cm con 49.11 Mg ha^{-1} y la profundidad 0-5 cm del mismo uso (Pastizal) presentó el menor (16.90 Mg ha^{-1}) reservorio de COS (Figura 13).

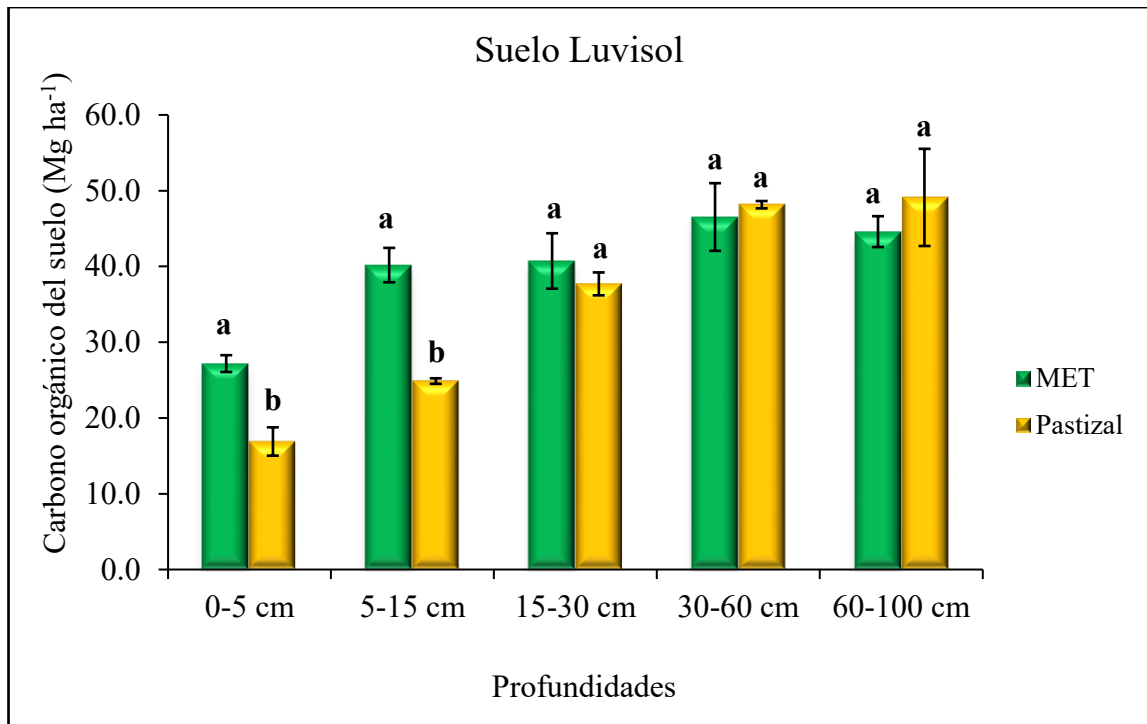


Figura 13. Valores medios para el carbono orgánico del suelo (Mg ha^{-1}) en suelo Luvisol. Letras distintas entre MET y Pastizal indican que son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) en cada profundidad ($n = 4$).

El suelo Vertisol al aplicar la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$), presentó diferencias en las profundidades de 0-5, 30-60 y 60-100 cm. En el uso de Pastizal, presentó los reservorios de COS más altos en todas las profundidades excepto en la profundidad 15-30 cm. La profundidad de 60-100 cm contiene una reserva de COS más alta con 70.19 Mg ha^{-1} en el uso de Pastizal, mientras que el uso de MET en su profundidad de 0-5 cm presentó las reservas más bajas con 22.38 Mg ha^{-1} (Figura 14).

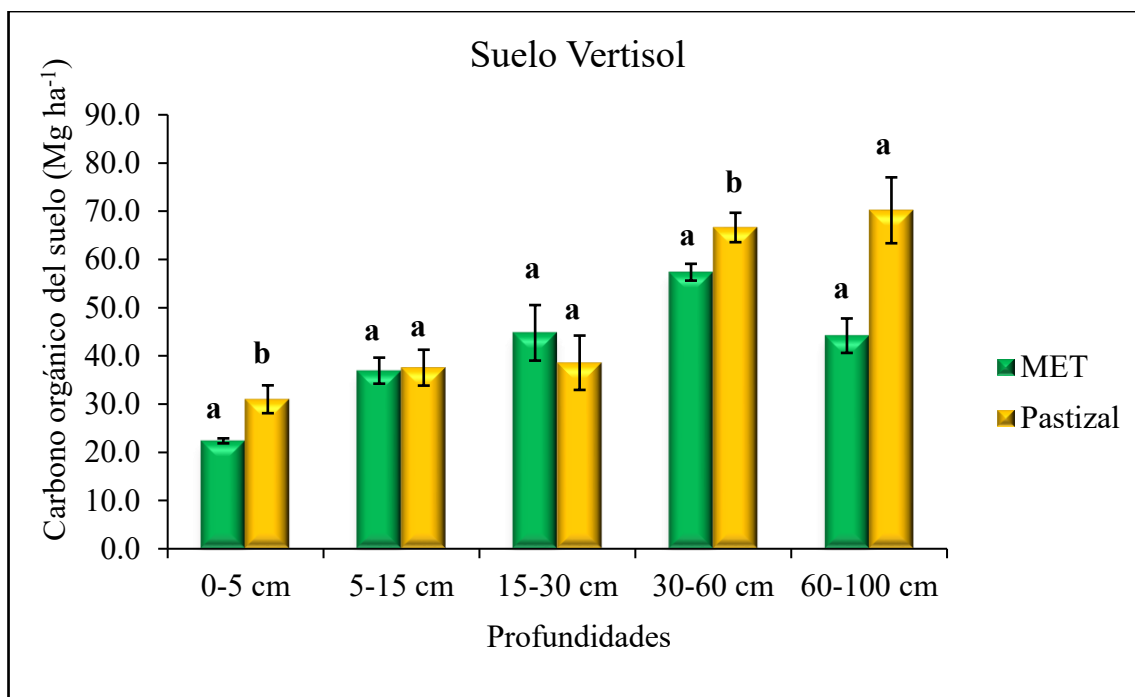


Figura 14. Valores medios para el carbono orgánico del suelo (Mg ha^{-1}) en suelo Vertisol. Letras distintas entre MET y Pastizal indican que son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) en cada profundidad ($n = 4$).

En el suelo Cambisol, el carbono orgánico del suelo presentó variaciones entre las profundidades y sus usos, sin embargo, solo la profundidad de 5-15 cm en el uso de MET presenta diferencias significativas ($p \leq 0.05$) según la prueba de Tukey. Dicha profundidad es la que mayor reservorio de COS presentó 49.72 Mg ha^{-1} y la profundidad más superficial (0-5 cm) presentó solamente 25.89 Mg ha^{-1} para el uso de pastizal las últimas dos profundidades 30-60 y 60-100 cm presentaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$), la profundidad 60-100 cm mostró el contenido de COS más alto con 41.07 Mg ha^{-1} en cuanto a la profundidad que menor reserva de COS presentó corresponde a 0-5 cm con 22.36 Mg ha^{-1} . En general el MET presentó los mayores reservorios de COS en los primeros tres estratos más superficiales 0-5, 5-15 y 15-30 cm respectivamente, mientras que el uso de Pastizal es particularmente alto en los últimos dos estratos 30-60 y 60-100 cm (Figura 15).

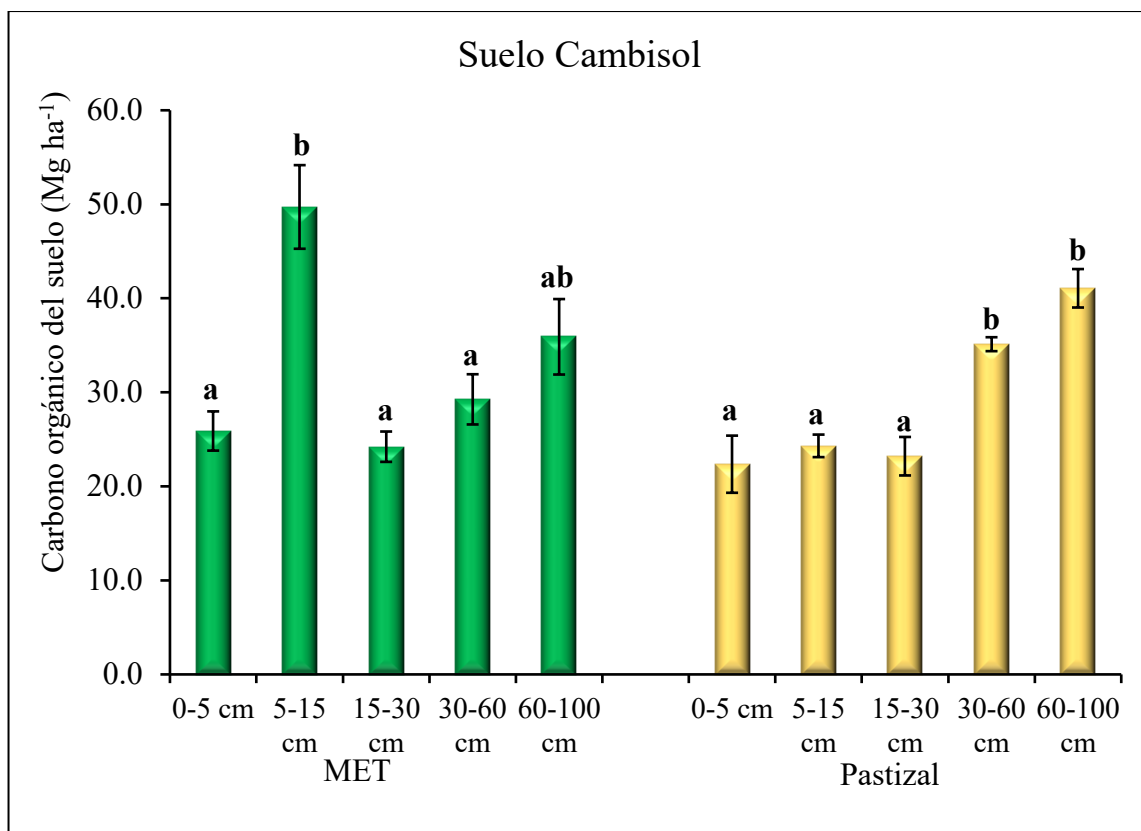


Figura 15. Valores medios para el Carbono orgánico del suelo (Mg ha^{-1}) en las profundidades analizadas para el suelo Cambisol. Letras distintas entre profundidades indican que son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) para el MET y pastizal, respectivamente ($n = 4$).

Para el suelo Regosol no presentan diferencias significativas en ninguna de sus profundidades en ambos usos del suelo, el estrato de 30-60 cm fue el que mayor reservorio de COS presentó con 78.28 Mg ha^{-1} que corresponde al uso de MET seguido del estrato de 30-60 cm con 64.26 Mg ha^{-1} , en cuanto al uso de Pastizal la profundidad de 0-5 cm y 60-100 cm presentaron 29.67 y 29.04 Mg ha^{-1} respectivamente concentrándose los mayores reservorios en la parte media del perfil que corresponde a los estratos de 5-15, 15-30 y 30-60 cm con 37.58 , 36.84 y 40.06 Mg ha^{-1} respectivamente (Figura 16).

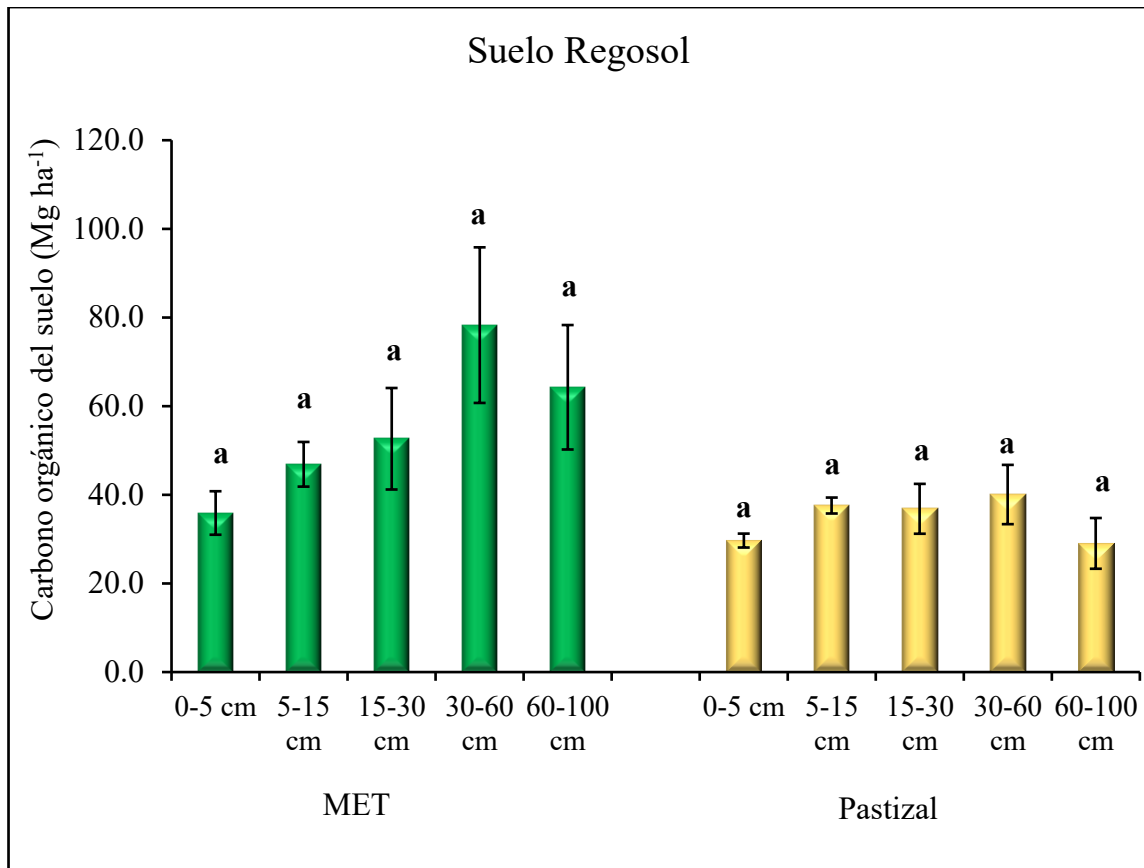


Figura 16. Valores medios para el Carbono orgánico del suelo (Mg ha^{-1}) en las profundidades analizadas para el suelo Regosol. Letras distintas entre profundidades indican que son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) para el MET y Pastizal, respectivamente ($n = 4$)

El uso de MET presentó diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) realizada únicamente en la profundidad más somera 0-5 cm, la profundidad con mayor contenido de COS corresponde a 30-60 cm con 46.52 Mg ha^{-1} . Por su parte, el uso del Pastizal, las primeras dos profundidades correspondientes a 0-5 cm y 5-15 cm presentan diferencias significativas ($p \leq 0.05$) comparados con el grupo de 15-30, 30-60 y 60-100 cm, respectivamente. El uso del Pastizal presenta una marcada tendencia a aumentar su reservorio de COS conforme la profundidad es mayor esto en el suelo Luvisol (Figura 17).

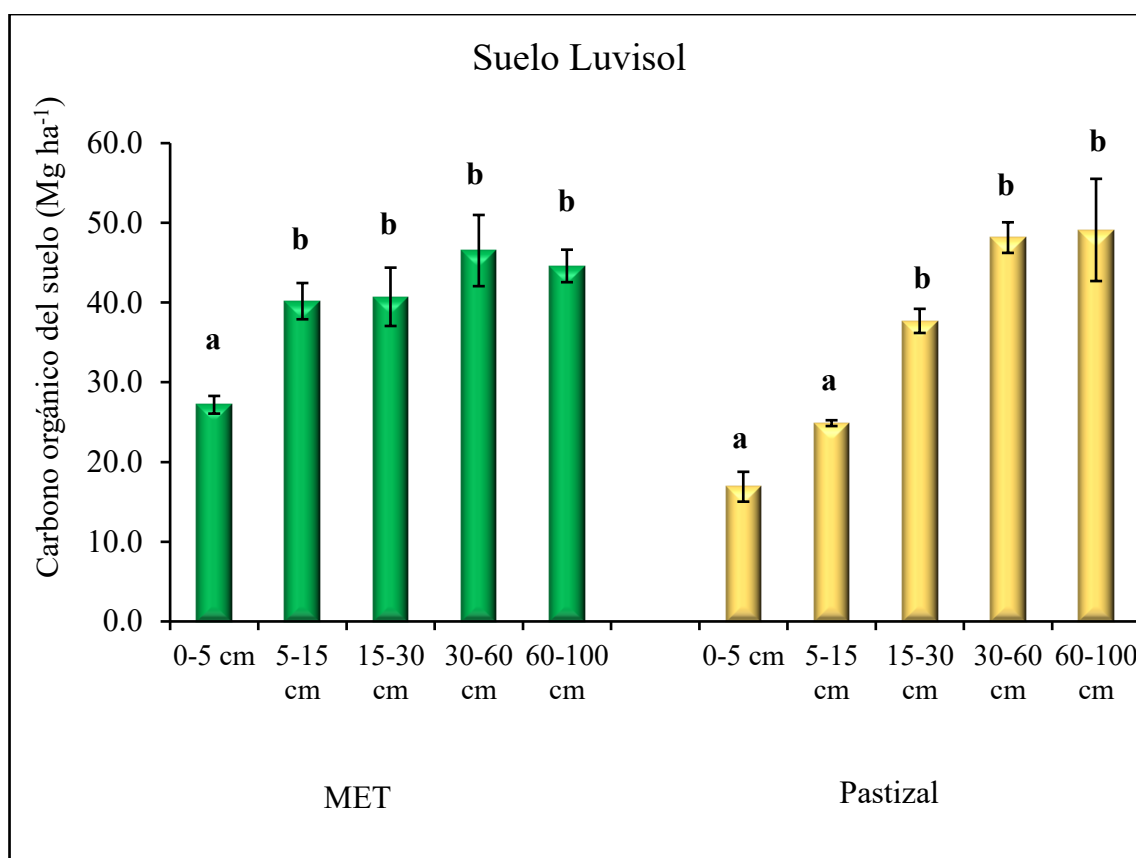


Figura 17. Valores medios para el Carbono orgánico del suelo (Mg ha^{-1}) en las profundidades analizadas para el suelo Luvisol. Letras distintas entre profundidades indican que son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) para el MET y Pastizal, respectivamente ($n = 4$).

Las profundidades de 0-5, 5-15 y 30-60 cm presentan diferencias significativas Tukey ($p \leq 0.05$) para el uso del MET. La profundidad 30-60 cm mostró los contenidos de COS más altos con 57.35 Mg ha^{-1} y con solo 22.38 Mg ha^{-1} la parte más somera 0-5 cm fue el más bajo, mientras que para el uso de Pastizal forman dos grupos los primeros tres 0-5, 5-15 y 15-30 cm no presentan diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre ellos, pero si con los últimos dos 30-60 y 60-100 cm que tampoco muestran diferencias significativas entre ellos. El uso del Pastizal fue mayor en todas sus profundidades con excepción de 15-30 cm del MET 44.78 Mg ha^{-1} , Pastizal 38.58 Mg ha^{-1} (Figura 18).

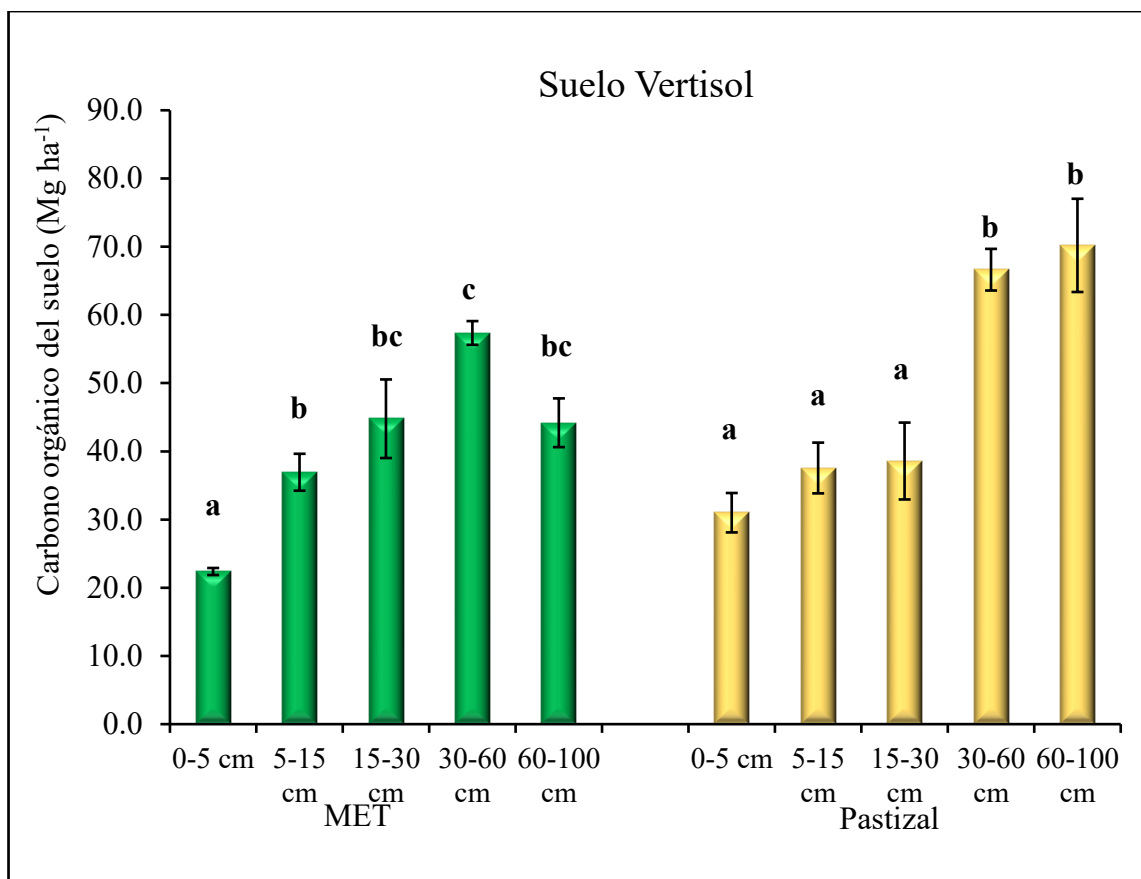


Figura 18. Valores medios para el Carbono orgánico del suelo (Mg ha^{-1}) en las profundidades analizadas para el suelo Vertisol. Letras distintas entre profundidades indican que son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) para el MET y Pastizal, respectivamente ($n = 4$).

El suelo Cambisol presentó un valor total de COS para el uso de suelo MET de $164.99 \text{ Mg ha}^{-1}$ en su perfil de 0 a 100 cm y para el uso de Pastizal cuenta con un reservorio de $146.07 \text{ Mg ha}^{-1}$, presentando una disminución de 18.93 Mg ha^{-1} lo que equivale a una disminución del 11.47 % del total del Carbono orgánico en el perfil del suelo Cambisol. El estrato de 5-15 cm del uso de MET es el que mayor reservorio de COS presenta con 49.72 Mg ha^{-1} lo que equivale al 30.13 %. El estrato de menor reservas de COS es el de 0-5 cm con 22.36 Mg ha^{-1} y equivale al 15.69 % del total del perfil. Por su parte, el uso de Pastizal el estrato que más reservas de COS presentó corresponde a la profundidad 60-100 cm con 41.07 Mg ha^{-1} (28.12 %) y el estrato que menor reserva presenta es el 0-5 cm con 22.36 Mg ha^{-1} (15.31 %) (Figura 19).

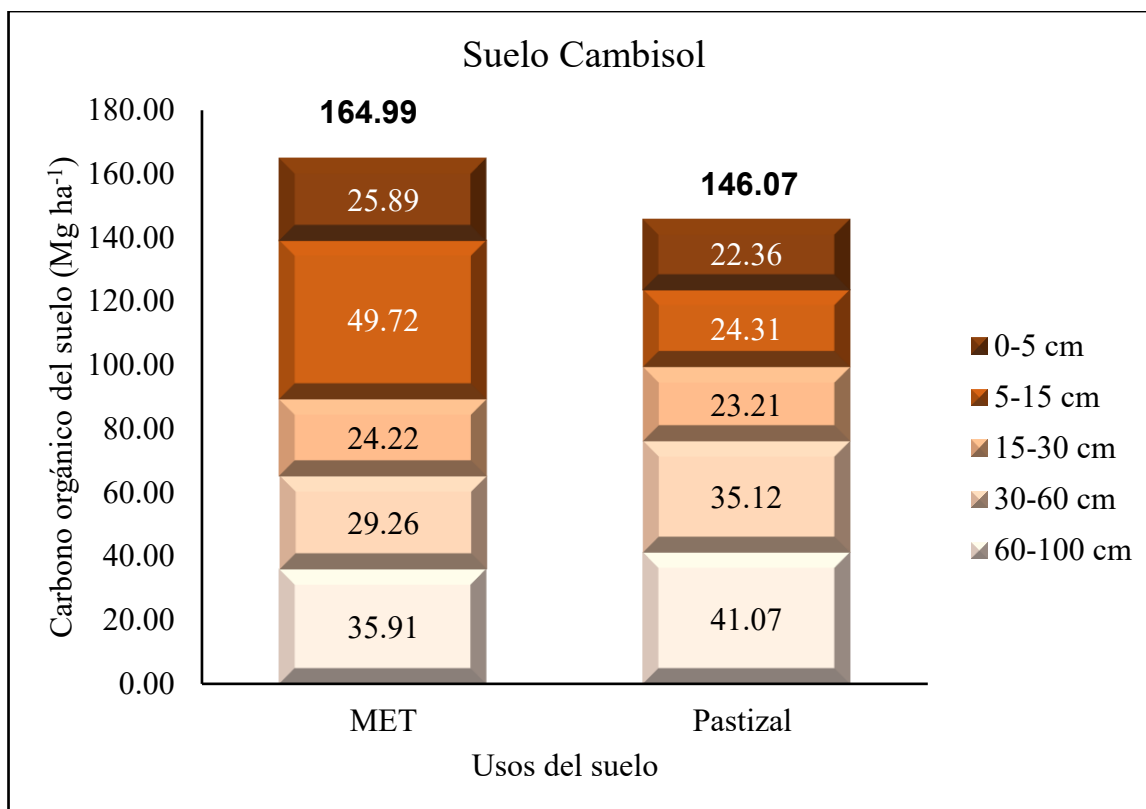


Figura 19. Valores de carbono orgánico del suelo Cambisol almacenado en el perfil 0-100 cm para usos del suelo Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET) y Pastizal.

El suelo Regosol presentó un reservorio de 277.96 Mg ha⁻¹ en el uso de MET, mientras que el uso de Pastizal fue de 173.17 Mg ha⁻¹, observándose una disminución muy significativa del 37.70 % lo que es igual a 104.79 Mg ha⁻¹ lo que indica una fuerte pérdida de COS en el perfil de 0 a 100 cm para el uso de Pastizal. En el uso de MET los estratos que más reserva de COS contienen son 30-60 y 60-100 cm ya que juntos suman 142.54 Mg ha⁻¹ de COS lo que equivale al 51.28 % del total del perfil. En cuanto al uso de Pastizal, el mayor contenido de COS está en la parte central del perfil en los estratos 5-15, 15-30 y 30-60 cm sumando 114.47 Mg ha⁻¹ (63.97%), mientras que las profundidades 0-5 y 60-100 cm presentan los menores reservorios con 29.04 y 29.67 Mg ha⁻¹, respectivamente (17.13 % y 16.77%) (Figura 20).

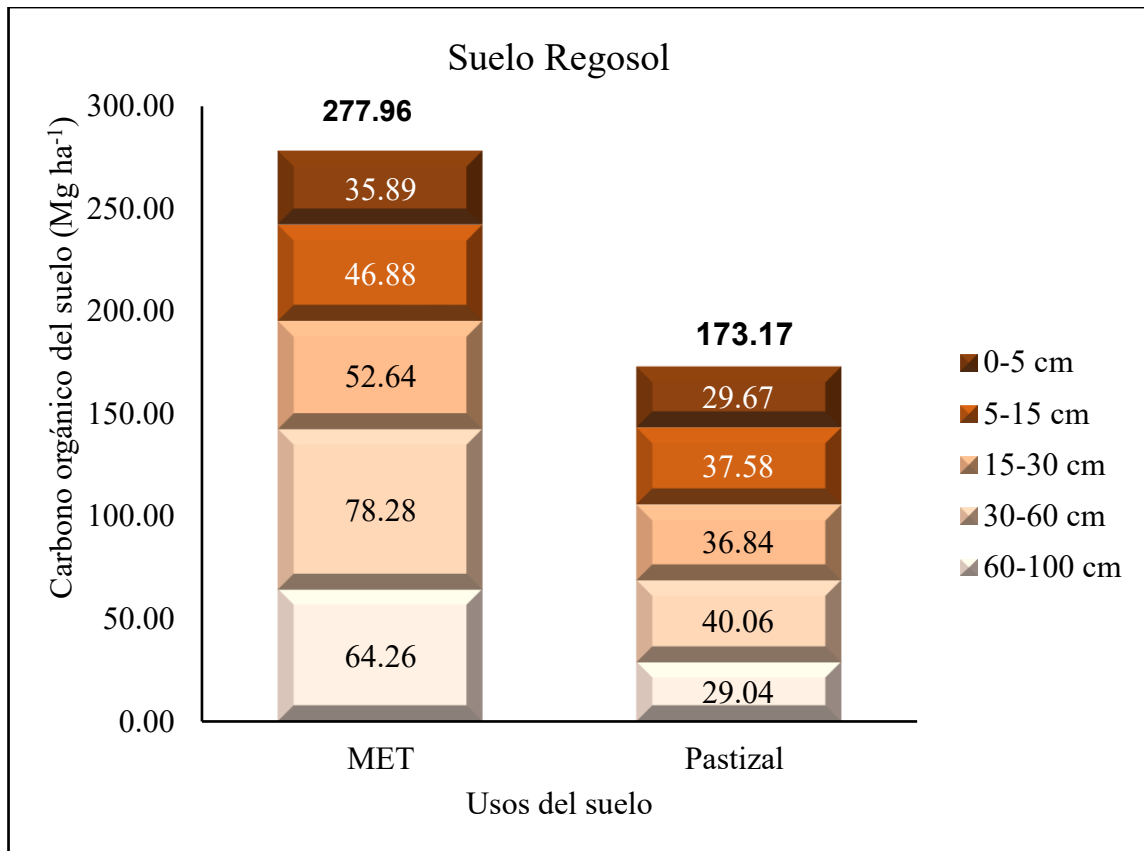


Figura 20. Valores de carbono orgánico del suelo Regosol almacenado en el perfil 0-100 cm para usos del suelo Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET) y Pastizal.

El uso de Pastizal presentó 176.74 Mg ha⁻¹ y una disminución de 22.47 Mg ha⁻¹ lo que equivale a un 11.28 % respecto al uso de MET, que mostró un reservorio de 199.21 Mg ha⁻¹ en el suelo Luvisol. El uso de MET destacó por presentar 108.09 Mg ha⁻¹ en las primeras tres profundidades 0-5, 5-15 y 15-30 cm esto representa un 54.26 % del reservorio total del MET, mientras el uso de Pastizal presentó sus mayores reservas de COS con un 55.03 % (30-60 cm y 60-100 cm), lo que equivale a 97.27 Mg ha⁻¹. La profundidad que menor reservorio de COS mostró corresponde a 0-5 cm con 16.90 Mg ha⁻¹ (9.56 %) (Figura 21).

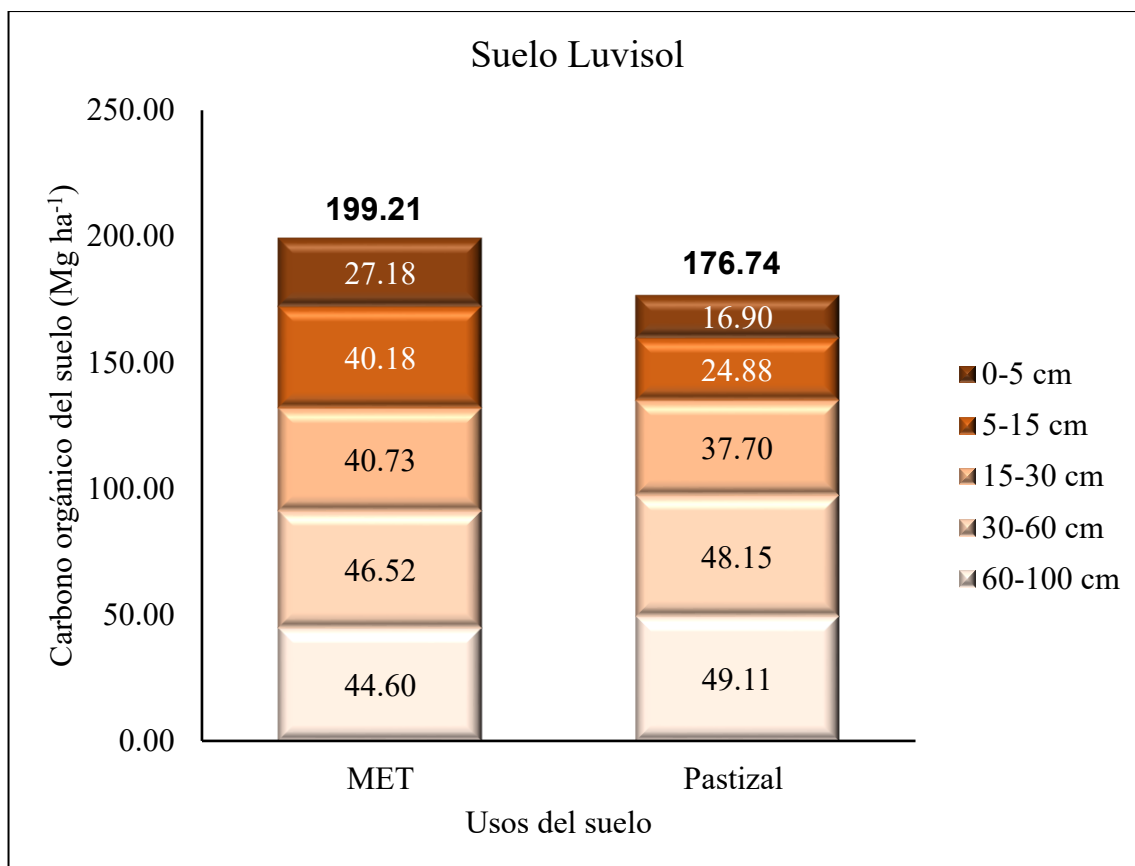


Figura 21. Valores de carbono orgánico del suelo almacenado en el perfil 0-100 cm para usos del suelo Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET) y Pastizal.

El suelo Vertisol en el uso de MET y Pastizal mostraron un reservorio de 205.63 y 243.96 Mg ha^{-1} , respectivamente, siendo el uso de Pastizal un 18.64% superior lo que representa 38.32 Mg ha^{-1} más. El MET distribuye casi de manera igual su reservorio a lo largo del perfil de 0 a 100 cm, los estratos 0-5, 5-15 y 15-30 cm mostraron 104.09 Mg ha^{-1} (50.62%) mientras que los dos estratos restantes, 30-60 y 60-100 cm, presentaron el 49.38 %, lo que representa 136.82 Mg ha^{-1} . Por su parte, el uso de Pastizal los estratos más inferiores, 30-60 y 60-100, contienen 136.82 Mg ha^{-1} (56.08 %) mientras que los estratos más someros 0-5, 5-15 y 15-30 cm mostraron 107.14 Mg ha^{-1} (43.92 %). El estrato que mostró mayor reservorio de COS fue el 60-100 cm con 70.19 Mg ha^{-1} (21.41 %) que corresponde al uso de Pastizal. El uso de MET en su estrato de 0-5 cm presentó las menores reservas de COS con 22.38 Mg ha^{-1} (10.88%) (Figura 22).

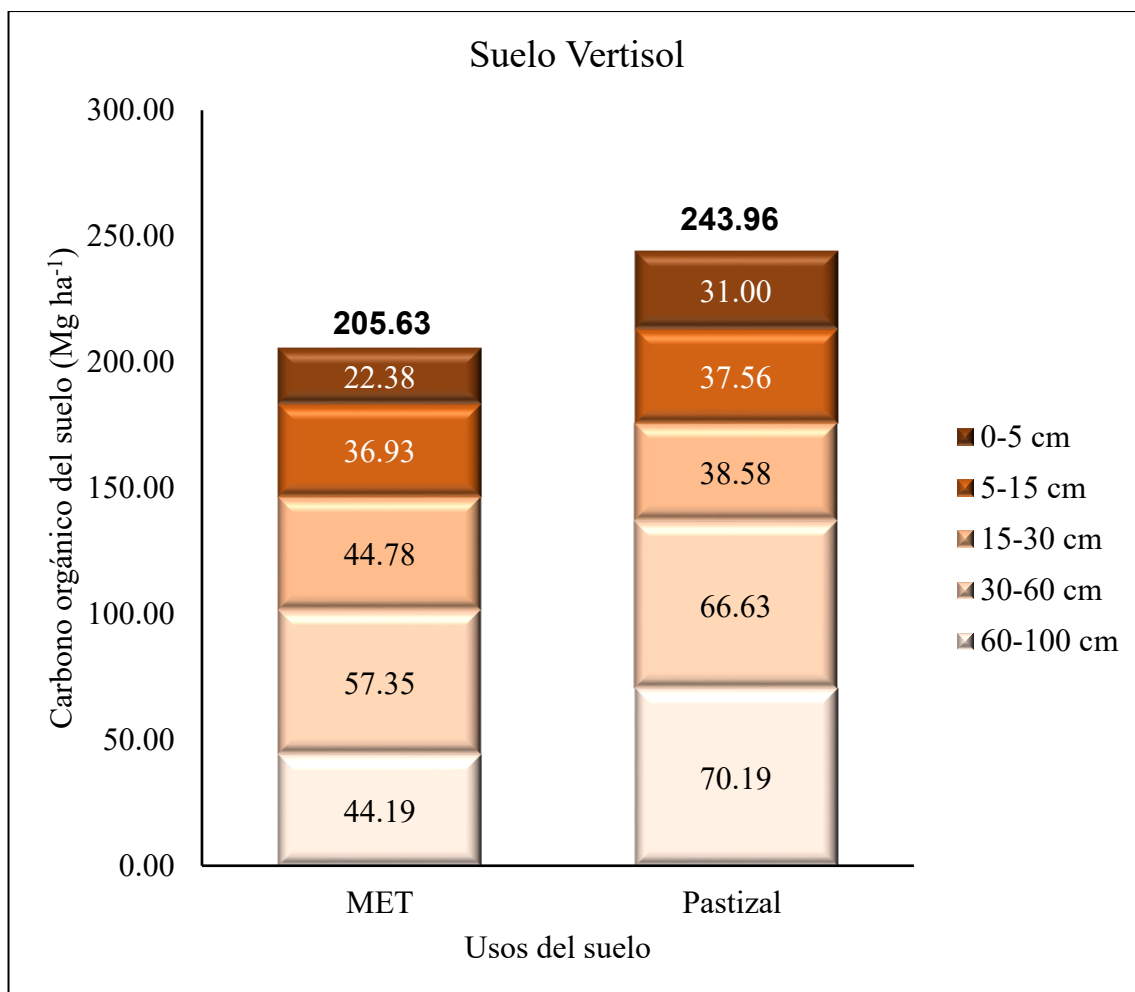


Figura 22. Valores de carbono orgánico del suelo almacenado en el perfil 0-100 cm para usos del suelo Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET) y Pastizal.

7.2 Nitrógeno total del suelo para los cuatro tipos de suelos

En la Tabla 2 se presentan los resultados del análisis de varianza de acuerdo a un arreglo trifactorial (Factor A: suelos, Factor B: usos y Factor C: profundidades) para la variable de Nt (Mg ha^{-1}), en donde todos los factores principales presentaron diferencias altamente significativas ($p < 0.01$) asimismo, todas las interacciones fueron significativas a excepción de la interacción Suelo*Uso*Profundidad ($p > 0.05$).

Tabla 2. Análisis de varianza multifactorial para la variable Nt (Mg ha⁻¹)

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	Valor F	Valor p
Suelo (S)	3.413	3	1.138	28.286	<0.001
Uso (U)	0.864	1	0.864	21.478	<0.001
Profundidad (P)	5.861	4	1.465	36.433	<0.001
S*U	2.313	3	0.771	19.168	<0.001
S*P	3.560	12	0.297	7.376	<0.001
U*P	0.850	4	0.213	5.285	0.001
S*U*P	0.507	12	0.042	1.050	0.408
Error	4.826	120	0.040		

Valores en negritas denotan diferencias significativas ($p \leq 0.01$).

La Tabla 3 presentan los valores medios para nitrógeno total (Nt) Mg ha⁻¹. Según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) no detectó diferencias significativas en las reservas de Nt para los usos de MET y Pastizal en ninguna de sus profundidades analizadas para suelo Cambisol. Los estratos que mayor reserva de Nt presentaron fueron los estratos de mayor profundidad 60-100 cm en el MET con 5.92 Mg ha⁻¹ y para Pastizal fue el estrato de 30-60 cm con 5.76 Mg ha⁻¹.

Tabla 3. Valores medios para Nitrógeno total (Nt, Mg ha⁻¹) en un suelo Cambisol para los usos de MET y Pastizal en cada profundidad.

Suelo	Uso	0-5 cm	5-15 cm	15-30 cm	30-60 cm	60-100 cm
Cambisol	MET	2.64 a	2.92 a	3.41 a	4.93 a	5.92 a
	Pastizal	2.36 a	2.03 a	2.55 a	5.76 a	5.11 a

Letras distintas indican diferencias (Tukey, $p \leq 0.05$) entre usos Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET) y Pastizal en cada profundidad.

El suelo Regosol aplicando la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) presenta diferencias significativas entre los usos. Las profundidades que muestran diferencias solamente son las de 0-5 y 5-15 cm. La profundidad que más Nt contiene corresponde al uso de MET en la profundidad de 5-15 cm con 5.22 Mg ha⁻¹

mientras que la profundidad que menor reservorio de Nt presentó fue 0-5 cm con 2.50 Mg ha⁻¹ que corresponde al uso de Pastizal (Tabla 4).

Tabla 4. Valores medios de Nitrógeno total (Nt, Mg ha⁻¹) en un suelo Regosol y los usos de MET y Pastizal en cada profundidad.

Suelo	Uso	0-5 cm	5-15 cm	15-30 cm	30-60 cm	60-100 cm
Regosol	MET	3.95 a	5.22 a	4.72 a	4.59 a	4.77 a
	Pastizal	2.50 b	3.61 b	3.45 a	4.47 a	3.88 a

Letras distintas indican diferencias (Tukey, $p \leq 0.05$) entre usos Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET) y Pastizal para cada profundidad.

Los valores medios de Nitrógeno total (Nt) ~~en Mg ha⁻¹~~ para el suelo Luvisol, muestran que el uso de MET es mayor en todas sus profundidades así mismo la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) indica que existen diferencias significativas en todas las profundidades estudiadas, destacando la profundidad 0-5 cm. El uso de Pastizal presentó los reservorios más bajos 0.89 Mg ha⁻¹. Respecto al uso del MET, la profundidad que más reservas presentó es la de 60-100 cm con 5.00 Mg ha⁻¹ (Tabla 5).

Tabla 5. Valores medios de Nitrógeno total (Nt, Mg ha⁻¹) en un suelo Luvisol y los usos de MET y Pastizal en cada profundidad.

Suelo	Uso	0-5 cm	5-15 cm	15-30 cm	30-60 cm	60-100 cm
Luvisol	MET	2.51 a	2.95 a	2.73 a	4.27 a	5.00 a
	Pastizal	0.89 b	1.38 b	1.84 b	3.14 b	3.53 b

Letras distintas indican diferencias (Tukey, $p \leq 0.05$) entre usos Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET) y Pastizal para cada profundidad.

Las profundidades que mayor contenido de Nt Mg ha^{-1} presentan corresponden a 30-60 y 60-100 cm con 4.27 y 3.93 Mg ha^{-1} , respectivamente. Así mismo, la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) nos indica diferencias solamente en las profundidades 30-60 cm y 60-100 cm. El uso de MET fue el que presentó las reservas de Nt más bajas con 1.87 Mg ha^{-1} en la profundidad 60-100 cm para el suelo Vertisol (Tabla 6).

Tabla 6. Valores medios de Nitrógeno total (Nt, Mg ha^{-1}) en un suelo Vertisol y los usos de MET y Pastizal en cada profundidad.

Suelo	Uso	0-5 cm	5-15 cm	15-30 cm	30-60 cm	60-100 cm
Vertisol	MET	2.29 a	3.06 a	3.47 a	2.53 a	1.87 a
	Pastizal	2.83 a	2.78 a	3.38 a	4.27 b	3.93 b

Letras distintas indican diferencias (Tukey, $p \leq 0.05$) entre usos Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET) y Pastizal para cada profundidad.

El uso de MET del suelo Cambisol, las profundidades presentan diferencias significativas entre sí, según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Las profundidades 0-5, 5-15 y 15-30 cm no muestran diferencias entre sí, pero muestran diferencias con las profundidades de 30-60 y 60-100 cm. En cuanto al uso de Pastizal, la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$), muestra un comportamiento igual en las primeras tres profundidades (0-5, 5-15 y 15-30 cm) donde no se observan diferencias entre sí. Pero las profundidades 30-60 y 60-100 cm, muestran diferencias significativas respecto a las primeras tres profundidades. La profundidad con menos reservorio de Nt pertenece a 5-15 cm del uso del Pastizal con 2.03 Mg ha^{-1} y la profundidad con más contenido de Nt pertenece al uso MET 60-100 cm con 5.92 Mg ha^{-1} ; se mantiene una tendencia a aumentar los reservorios conforme la profundidad aumenta (Figura 23).

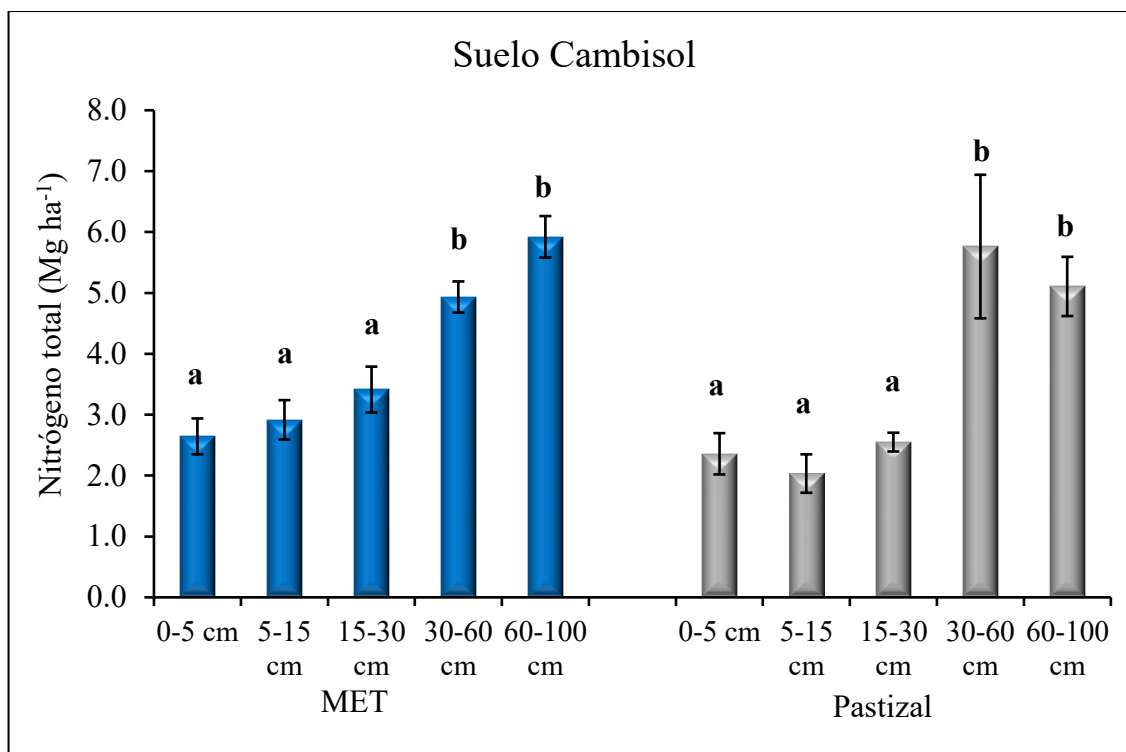


Figura 23. Valores medios para nitrógeno total (Nt, Mg ha⁻¹) para el suelo Cambisol. Letras distintas entre profundidades son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) para MET y Pastizal, respectivamente (n=4).

El suelo Regosol en el uso de MET, no presentan diferencias significativas entre sus profundidades. Por su parte, el uso de Pastizal presenta diferencias significativas únicamente en las profundidades de 0-5 cm y 30-60 cm. La profundidad 5-15 cm del uso de MET presenta el mayor reservorio de Nt con 5.22 Mg ha⁻¹. Por otro lado, la profundidad 0-5 cm que presenta las menores reservas de Nt corresponde al uso de Pastizal con un 3.95 Mg ha⁻¹ (Figura 24).

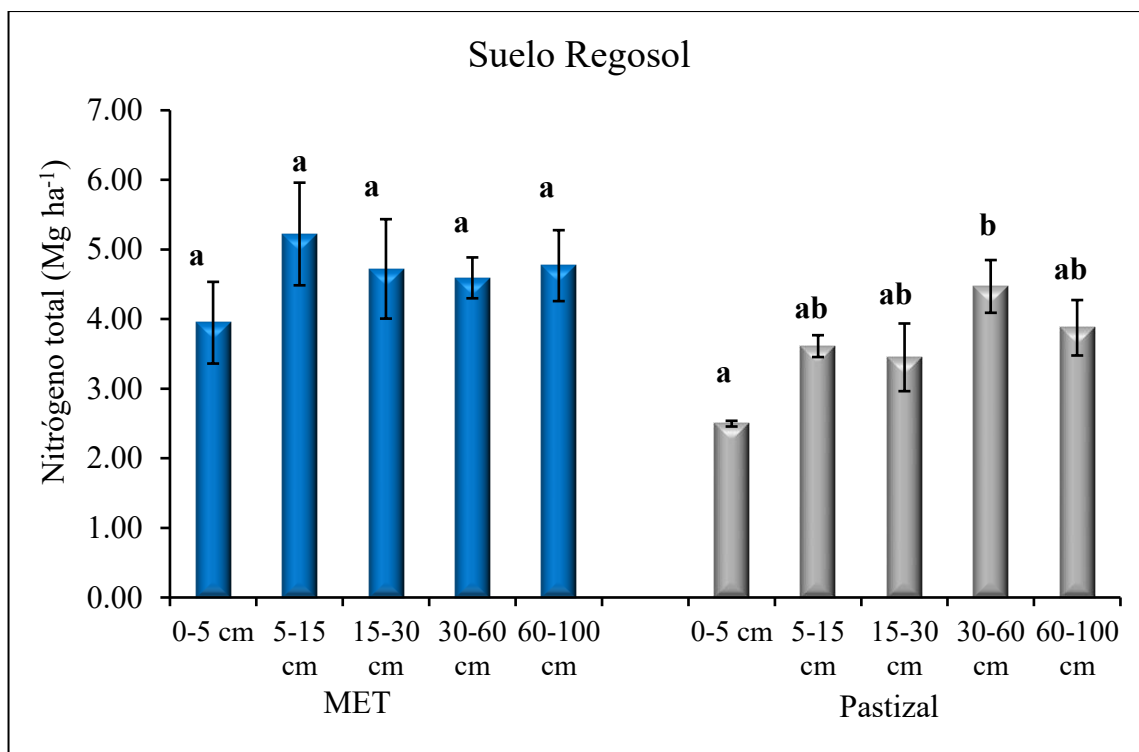


Figura 24. Valores medios para nitrógeno total (Nt, Mg ha⁻¹) para el suelo Regosol. Letras distintas entre profundidades son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) para MET y Pastizal, respectivamente ($n=4$).

El Nitrógeno total (Nt) en el suelo Luvisol presenta una mayor reserva en el uso de MET. La profundidad en la que mayor reservorio se observó es la de 60-100 cm con 5.00 Mg ha⁻¹. Por su parte, el uso de Pastizal presenta un aumento en la reserva de Nt, conforme la profundidad va aumentando, ya que varía desde 0.89, 1.38, 1.84, 3.14 y 3.53 Mg ha⁻¹ en las profundidades 0-5, 5-15, 15-30, 30-60 y 60-100 cm, respectivamente. Según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$), se presentan diferencias significativas entre sí en las profundidades 0-5, 15-30 y 60-100 cm. Para el uso de pastizal, se encontraron tres grupos con diferencias significativas entre sí, la profundidad más superficial 0-5 cm (a), las profundidades 5-15 y 15-30 cm (b) que no muestran diferencias entre sí, y el tercer grupo (c) las profundidades con mayor reservorio 30-60 y 60-100 cm (Figura 25).

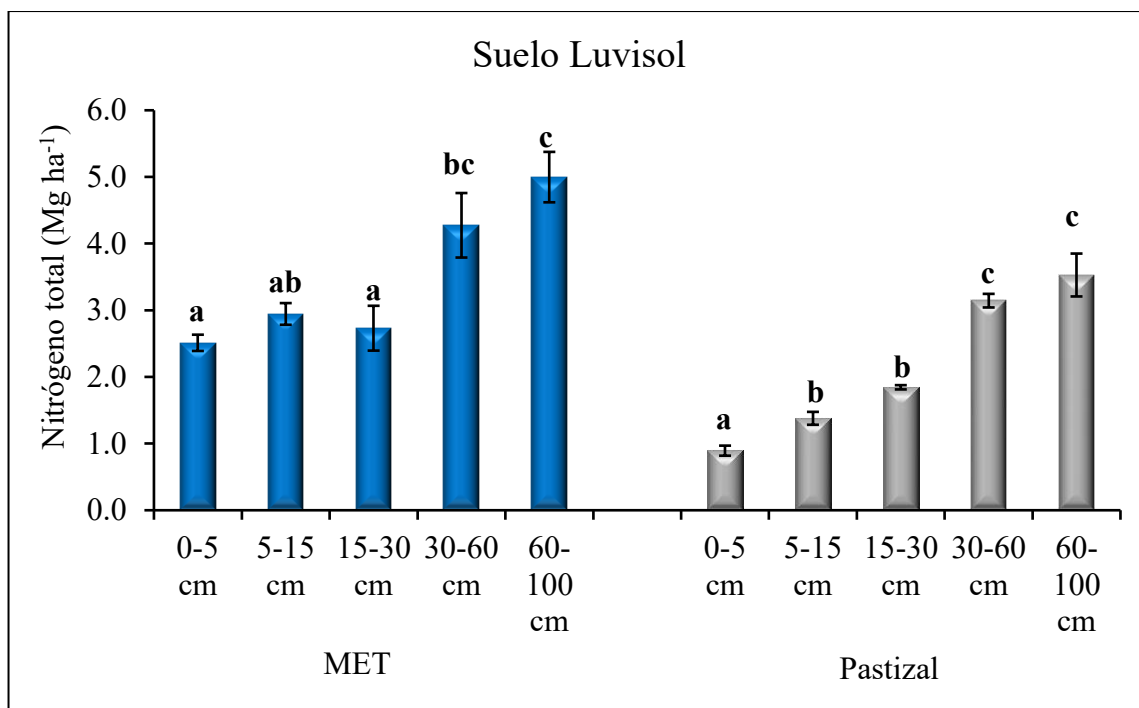


Figura 25. Valores medios para nitrógeno total (Nt, Mg ha⁻¹) para el suelo Luvisol. Letras distintas entre profundidades son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) para MET y Pastizal, respectivamente ($n=4$).

En el suelo Vertisol, el uso de MET concentra el mayor reservorio de Nt Mg ha^{-1} en la profundidad 15-30 cm (3.47 Mg ha^{-1}), mientras que su reservorio más bajo corresponde a la profundidad 60-100 cm (1.87 Mg ha^{-1}). Por su parte, en el uso de Pastizal su reserva más alta corresponde a 4.27 Mg ha^{-1} en la profundidad 30-60 cm y la más baja alcanza un valor de 2.78 Mg ha^{-1} en la profundidad de 5-15 cm. No obstante que, el uso de Pastizal sea mayor en reservas de Nt, la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) nos indica que no existen diferencias significativas entre las profundidades de dicho uso (Figura 26).

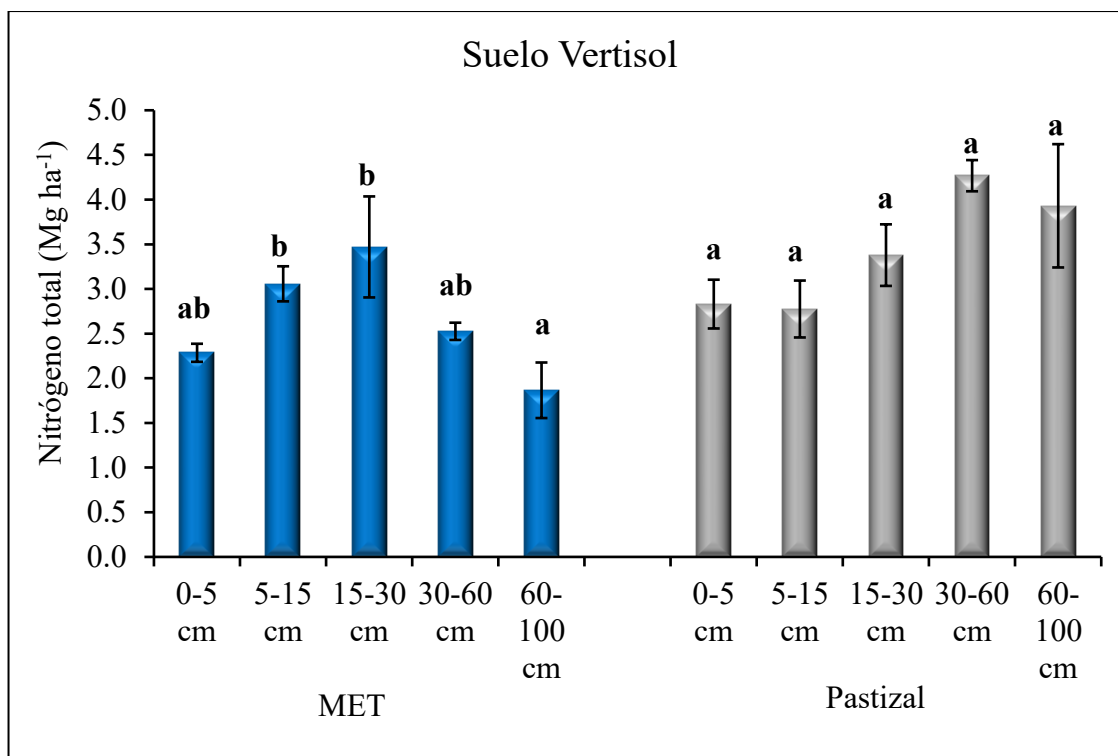


Figura 26. Valores medios para nitrógeno total (Nt, Mg ha^{-1}) para el suelo Vertisol. Letras distintas entre profundidades son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) para MET y Pastizal, respectivamente ($n=4$).

En su perfil de 0 a 100 cm, el suelo Cambisol en el uso de MET presentó un reservorio de 19.83 Mg ha^{-1} de Nitrógeno total y el uso de Pastizal mostró un reservorio de $20.4683 \text{ Mg ha}^{-1}$, siendo un 3.09 % mayor que el uso de MET. Esto equivale a 0.63 Mg ha^{-1} . La distribución de las reservas de Nt en las profundidades de 30-60 y 60-100 cm contienen 10.48 y 13.22 Mg ha^{-1} para MET y Pastizal, respectivamente (Figura 27).

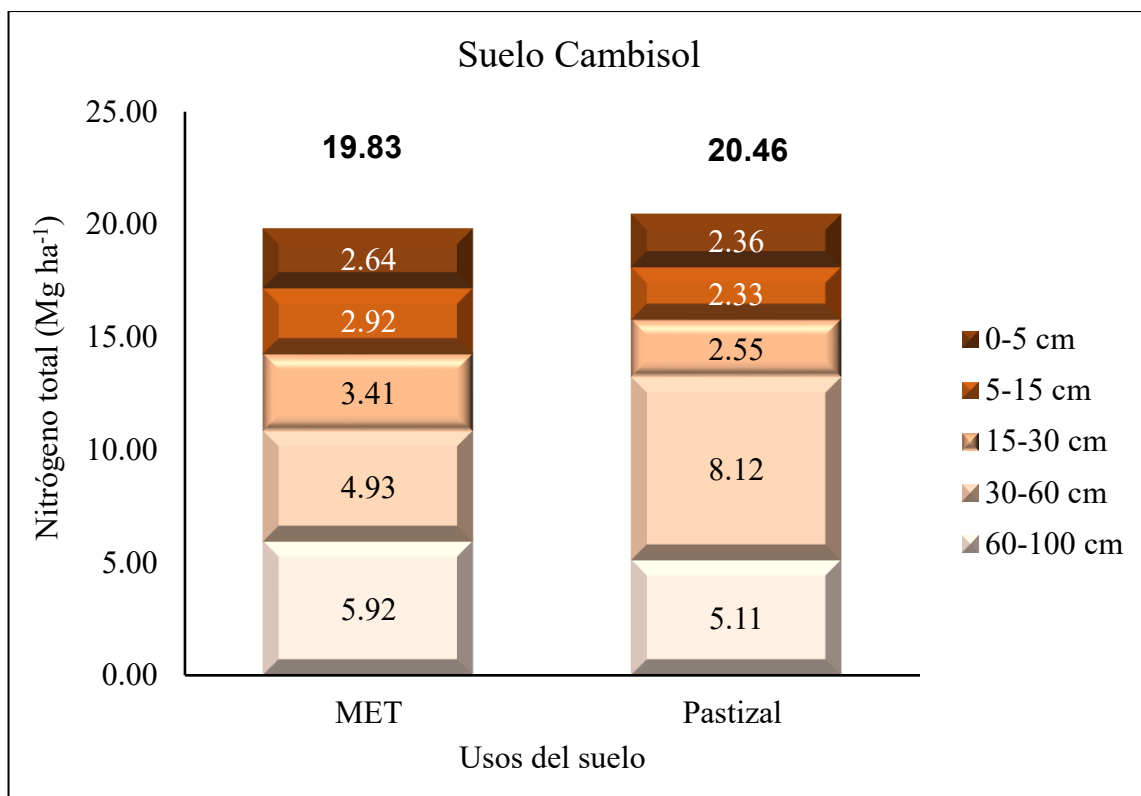


Figura 27. Valores de nitrógeno total del suelo Cambisol almacenado en el perfil 0-100 cm para usos del suelo Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET) y Pastizal.

El reservorio de Nt del suelo Regosol en su uso de MET, alcanzó 23.25 Mg ha⁻¹ mientras que el uso de Pastizal mostró 17.90 Mg ha⁻¹, dando una reducción del 23.00 %, lo que equivale a 5.35 Mg ha⁻¹. El uso de MET en sus profundidades de 0-30 cm obtuvo el 59.74 % (13.89 Mg ha⁻¹) mientras que el uso de Pastizal en el mismo rango de profundidad mostró 53.39 % (9.59 Mg ha⁻¹), mostrando que el suelo Regosol su mayor reservorio se encuentra en sus profundidades más superficiales para el uso de MET (Figura 28).

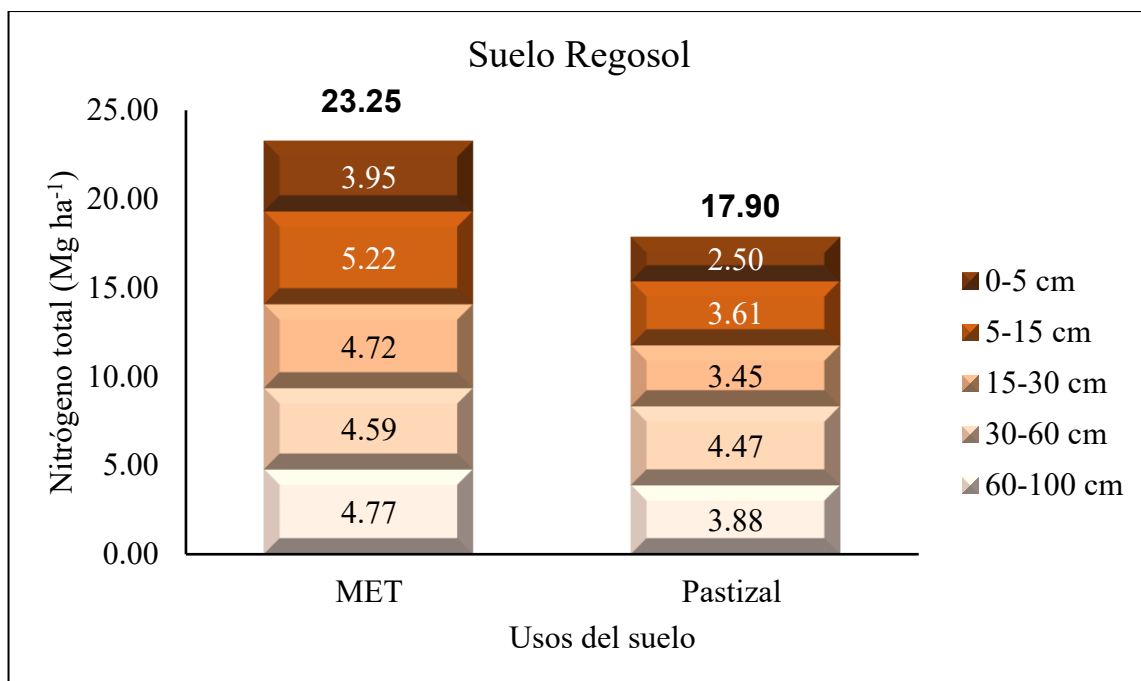


Figura 28. Valores de nitrógeno total del suelo almacenado en el perfil 0-100 cm para usos del suelo Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET) y Pastizal.

El reservorio de Nitrógeno total en el suelo Luvisol mostró una pérdida del 38.20 % (6.67 Mg ha^{-1}) en el uso de Pastizal. En su perfil de 0 a 100 cm el uso de MET presentó 17.46 Mg ha^{-1} y el uso del Pastizal 10.79 Mg ha^{-1} , evidenciando una clara disminución en el reservorio de Nt. La profundidad 60-100 cm del uso de MET mostró el mayor reservorio con 5.00 Mg ha^{-1} (28.62 %), mientras que el uso de Pastizal en su profundidad de 0-5 cm presentó 0.89 Mg ha^{-1} (8.28 %) (Figura 29).

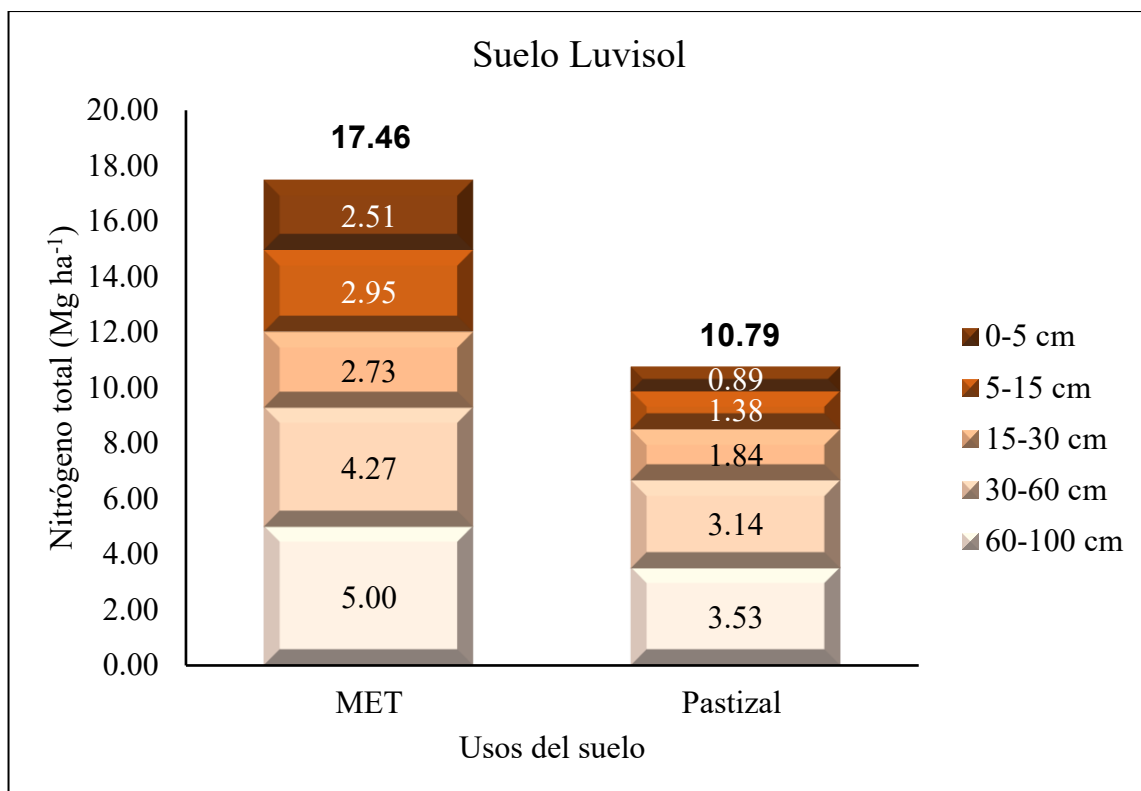


Figura 29. Valores de nitrógeno total del suelo almacenado en el perfil 0-100 cm para usos del suelo Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET) y Pastizal.

El uso de MET presentó 13.20 Mg ha⁻¹ y el uso de Pastizal 17.18 Mg ha⁻¹ en el suelo Vertisol. El uso de Pastizal es superior en un 23.16 %, lo que equivale a 3.98 Mg ha⁻¹. En el uso de MET, la parte central del perfil (5-15, 15-30 y 30-60 cm) presentaron la mayor reserva de Nt con el 68.57 %, mientras que las profundidades de 0-5 m y 60-100 cm presentan los reservorios más bajos con 14.13 y 17.31 %, respectivamente. Por su parte, el uso de Pastizal las profundidades que mayor reserva mostraron corresponden a 30-60 y 60-100 cm con el 24.84 y 22.88 %, respectivamente (Figura 30).

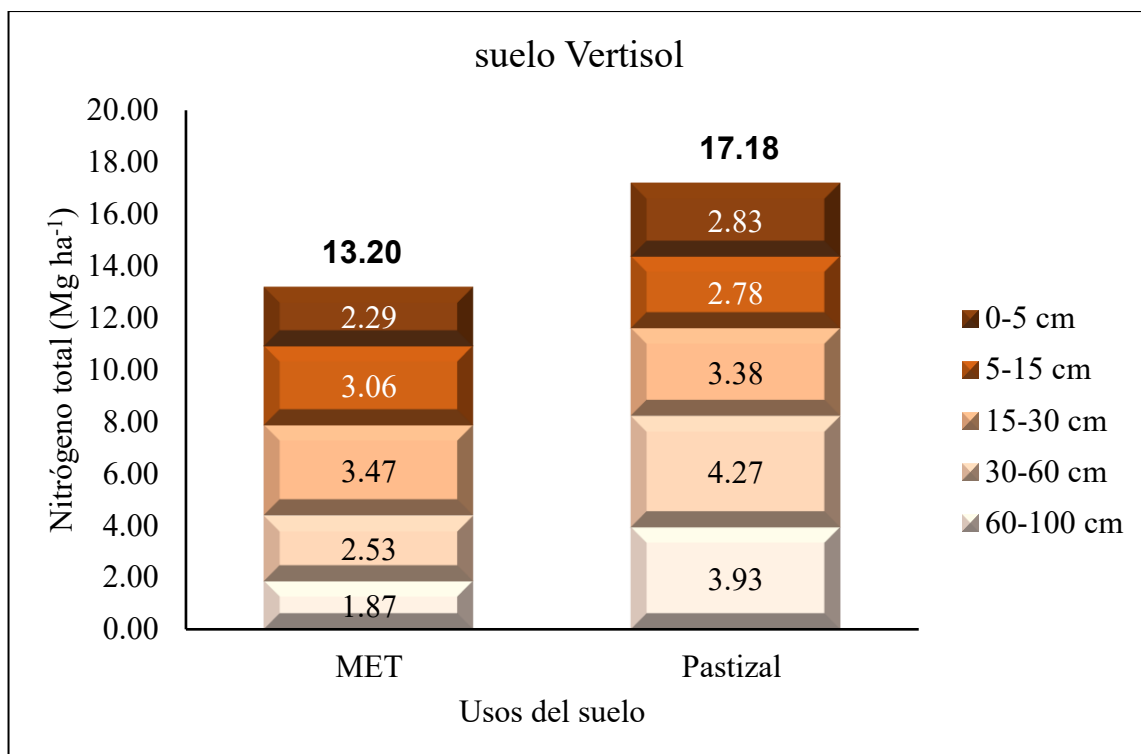


Figura 30. Valores de nitrógeno total del suelo almacenado en el perfil 0-100 cm para usos del suelo Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET) y Pastizal.

7.3 Relación carbono nitrógeno (C:N) para los cuatro tipos de suelos

Se presentan los resultados del análisis de varianza multifactorial (FA: suelos, FB: usos, FC: profundidades) para la variable Relación C:N, en donde todos los factores presentaron diferencias altamente significativas ($p < 0.01$) así mismo, todas las interacciones fueron altamente significativas ($p < 0.01$) (Tabla 7).

Tabla 7. Resumen del análisis de varianza para la variable relación C:N.

Fuente de Variación	Suma de cuadrados	gl	Cuadrado Medio	Valor F	Sig.
Suelo (S)	0.084	3	0.028	25.732	<0.001
Uso (U)	0.008	1	0.008	7.596	0.007
Profundidad (P)	0.046	4	0.011	10.467	<0.001
S*U	0.020	3	0.007	6.280	0.001
S*P	0.102	12	0.009	7.814	<0.001
U*P	0.015	4	0.004	3.467	0.010
S*U*P	0.076	12	0.006	5.831	0.001
Error	0.131	120	0.001		

Valores en negritas denotan diferencias significativas ($p \leq 0.01$).

En el suelo Cambisol, la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) mostró diferencias significativas en la profundidad 60-100 cm. En cuanto a las profundidades 0-5, 5-15, 15-30 y 30-60 cm, respectivamente, la prueba de Tukey no mostró diferencias significativas entre sí. La relación C:N presentó los valores más elevados en la profundidad 5-15 cm (MET 17.21 y Pastizal 16.26), mientras que la profundidad 30-60 cm mostró la relación más baja con 5.94 para MET y 7.02 para Pastizal. (Figura 31).

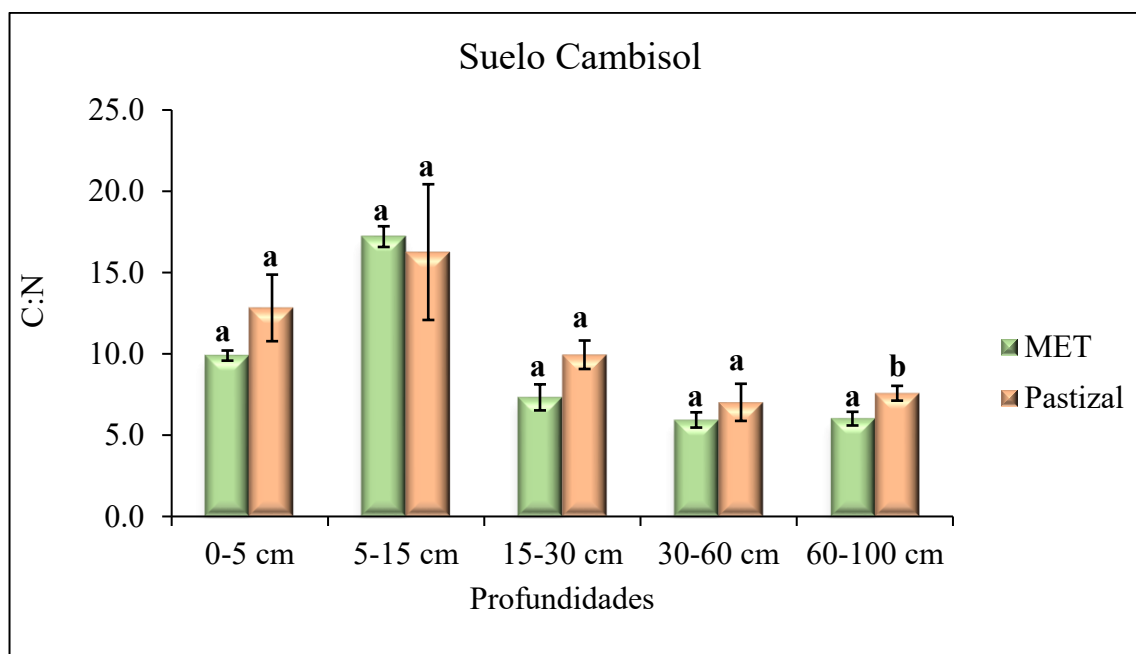


Figura 31. Valores medios para la relación carbono nitrógeno (C:N) en suelo Cambisol para los dos usos del suelo. Letras distintas entre usos son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) ($n=4$).

En Regosol la relación C:N, según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) aplicada, presentó diferencias significativas en las profundidades 0-5 cm y 30-60 cm, mientras que las profundidades 5-15, 15-30 y 60-100 cm no presentaron diferencias significativas entre sí. La profundidad 30-60 cm mostró la relación C:N más alta con 17.17 (MET), mientras que la profundidad 60-100 cm con mejor relación C:N (7.3) pertenece al uso de Pastizal (Figura 32).

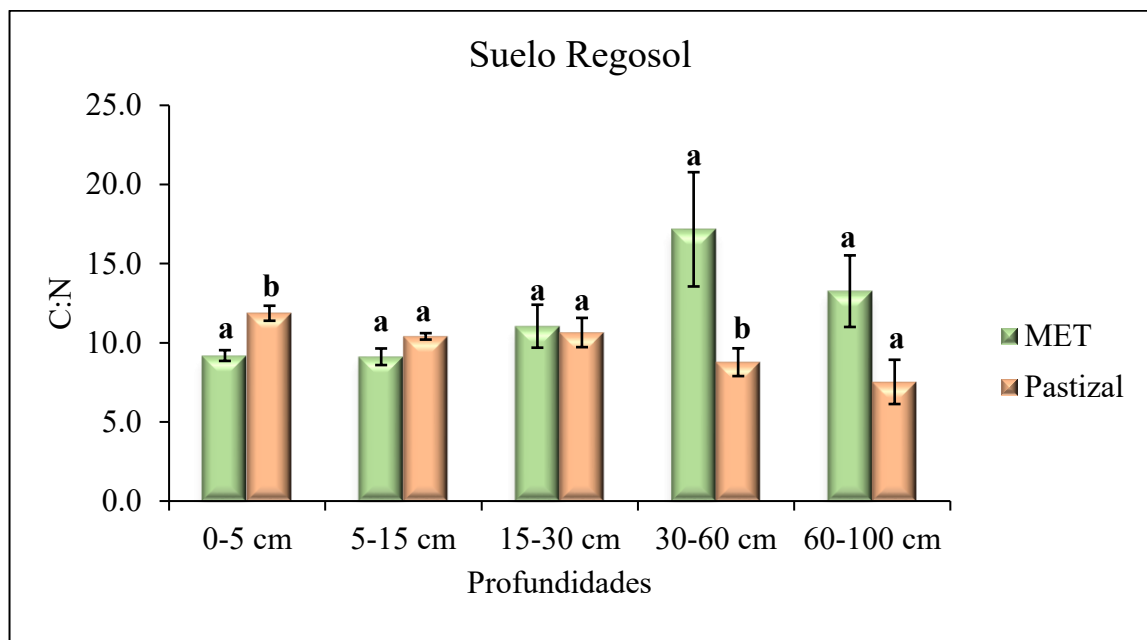


Figura 32. Valores medios para la relación carbono nitrógeno (C:N) en suelo Regosol para los dos usos del suelo. Letras distintas entre usos son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) ($n=4$).

Según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) aplicada para el suelo Luvisol, se encontraron diferencias significativas entre sí ($p \leq 0.05$) para todas las profundidades de MET y Pastizal. El uso de Pastizal presentó los valores más altos de C:N en las profundidades de 0-5 y 5-15 cm con valores de C:N de 18.82 y 18.24, respectivamente. La profundidad 15-30 cm de Pastizal, presentó la mejor relación C:N con 8.18 y por parte del MET mostró la mejor relación en la profundidad 60-100 cm (Figura 33).

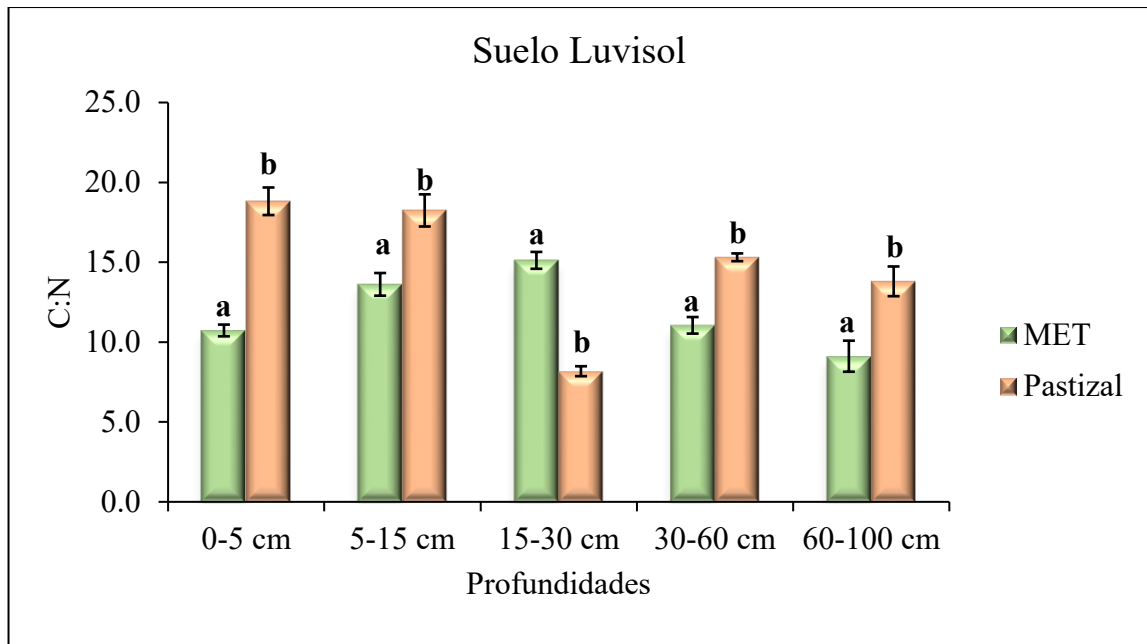


Figura 33. Valores medios para la relación carbono nitrógeno (C:N) en suelo Luvisol para los dos usos del suelo. Letras distintas entre usos son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) ($n=4$).

La prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) aplicada para las profundidades en un suelo Vertisol, presentaron diferencias significativas en las profundidades 30-60 y 60-100 cm, mientras que el resto de profundidades 0-5, 5-15 y 15-30 cm, respectivamente, no muestran diferencias entre sí. El uso de Pastizal, en su profundidad 60-100 cm, mostró la relación más alta con 19.56. Por su parte, el uso de MET presentó la mejor relación C:N con 9.90 en su profundidad más somera de 0-5 cm (Figura 34).

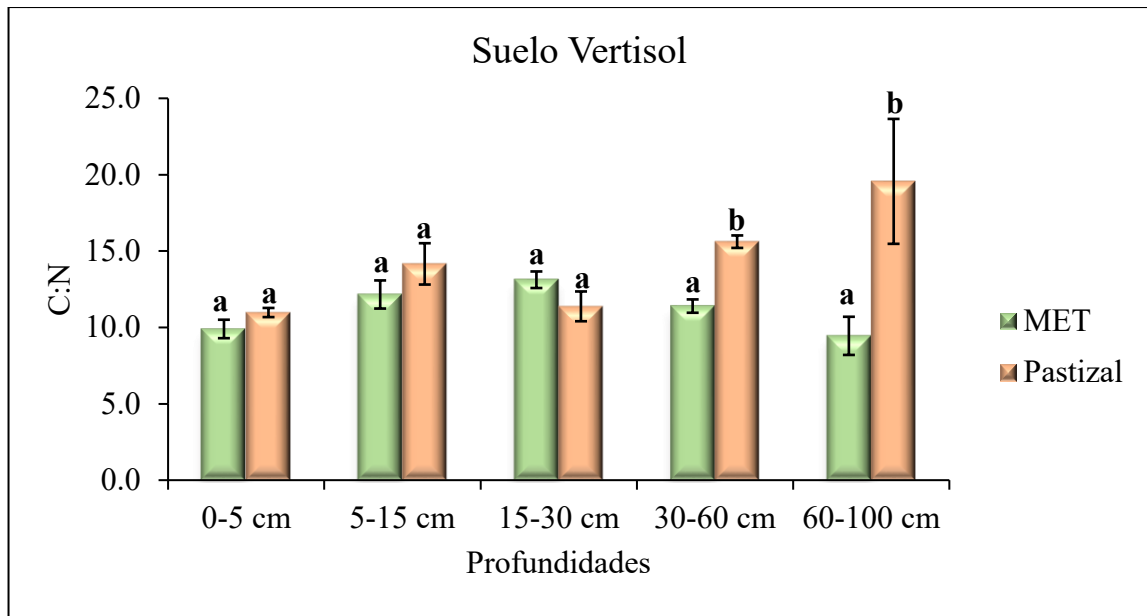


Figura 34. Valores medios para la relación carbono nitrógeno (C:N) en suelo Vertisol para los dos usos del suelo. Letras distintas entre usos son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) ($n=4$).

La relación C:N en el suelo Cambisol, según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$), el uso de MET mostró diferencias significativas en la profundidad 0-5 y 5-15 cm, mientras que el resto de profundidades 15-30, 30-60 y 60-100 cm, son estadísticamente similares. Por su parte, el uso de Pastizal presentó diferencias significativas únicamente en las profundidades 5-15 y 30-60 cm. La relación C:N más alta la presentó el uso de MET con 17.21 en la profundidad 5-15 cm, le sigue el uso de Pastizal con 16.26 (5-15 cm), mientras que la mejor relación C:N la obtuvo el MET con 5.94 en su profundidad de 30-60 cm (Figura 35).

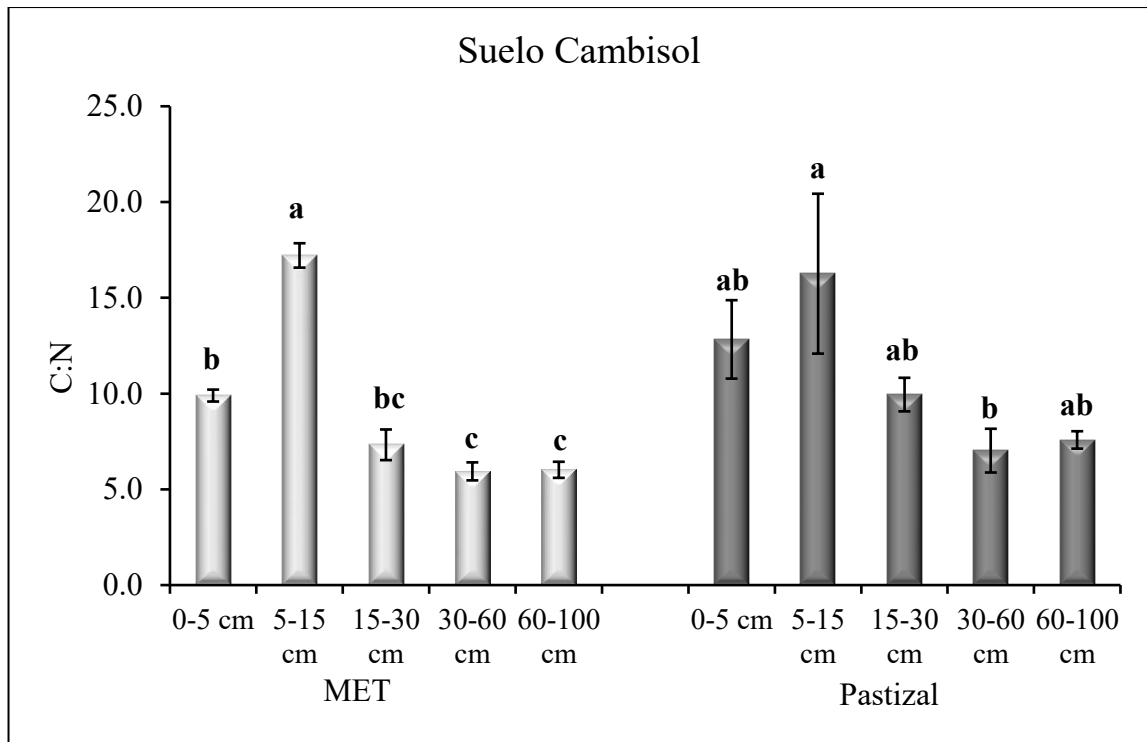


Figura 35. Valores medios para la relación carbono nitrógeno (C:N) en las profundidades analizadas para el suelo Cambisol. Letras distintas entre profundidades indican que son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) para MET y Pastizal, respectivamente ($n=4$).

El suelo Regosol en su uso de MET, no presentó diferencias estadísticamente diferentes, siendo la profundidad 30-60 cm la que mostró mayores valores de C:N con 17.17, mientras que el uso de Pastizal, según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) aplicada, se encontraron diferencias significativas en las profundidades 0-5 y 60-100 cm, mientras que el resto de las profundidades no muestran diferencias entre sí (5-15, 15-30 y 30-60 cm). La mejor relación C:N la presenta el uso de Pastizal en su profundidad 60-100 cm con 7.53 (Figura 36).

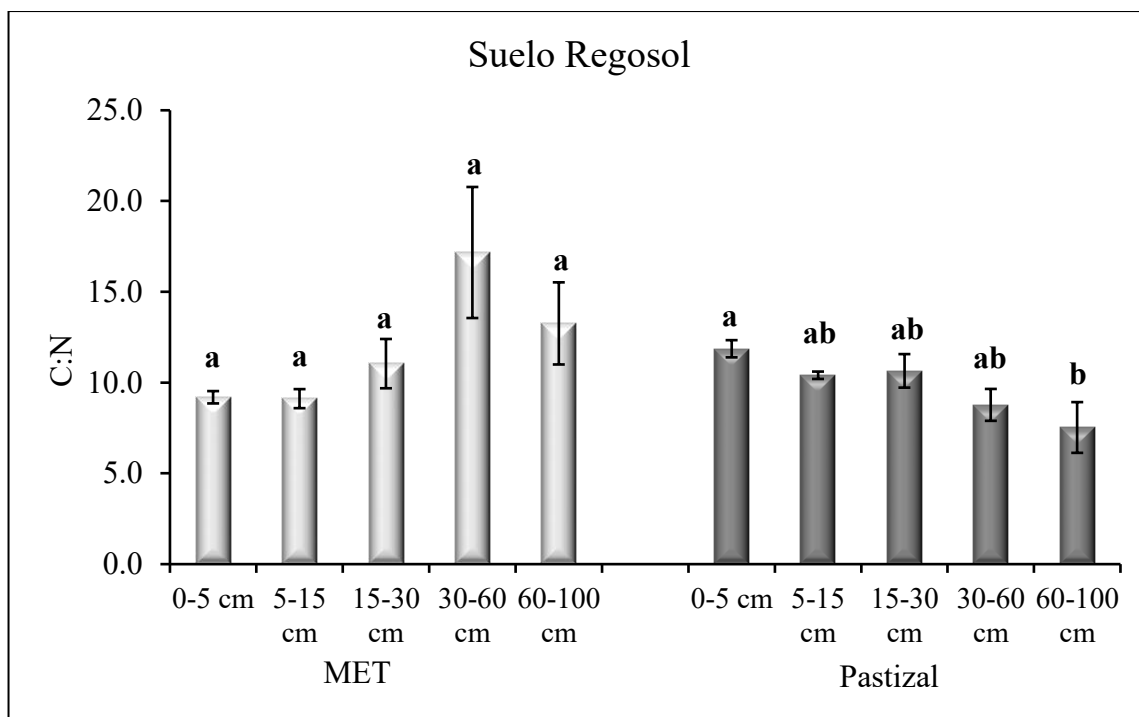


Figura 36. Valores medios para la relación carbono nitrógeno (C:N) en las profundidades analizadas para el suelo Regosol. Letras distintas entre profundidades indican que son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) para MET y Pastizal, respectivamente ($n=4$).

Respecto al suelo Luvisol, el uso de MET, según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$), presentó diferencias significativas en las profundidades 0-5, 15-30, y 60-100 cm. La profundidad de 60-100 cm presentó el mejor valor de C:N con 9.12 y el valor más alto de C:N fue la profundidad 15-30 cm con 15.12. EL uso de Pastizal mostró diferencias significativas Tukey ($p \leq 0.05$) en las profundidades 0-5, 5-15, 15.30 y 60-100 cm. La profundidad de 0-5 cm presentó el valor más alto (18.82) de C:N, mientras que la profundidad 15-30 cm con 8.18 (Figura 37).

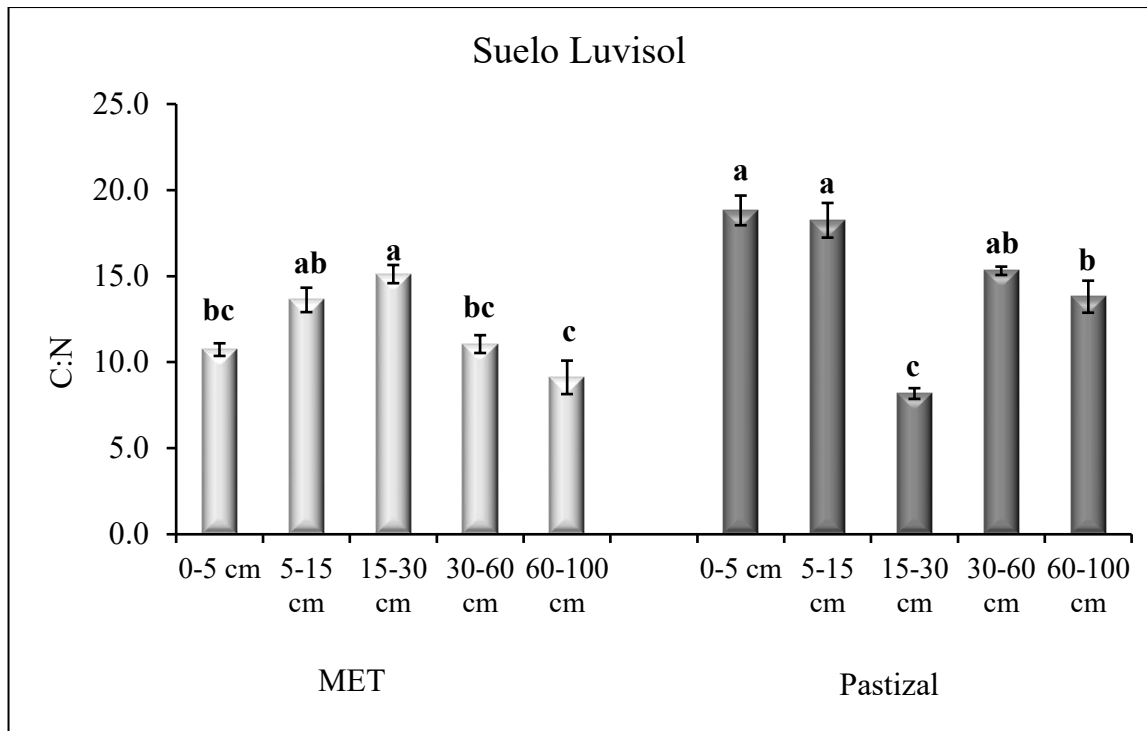


Figura 37. Valores medios para la relación carbono nitrógeno (C:N) en las profundidades analizadas para el suelo Luvisol. Letras distintas entre profundidades indican que son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) para MET y pastizal, respectivamente ($n=4$).

EL suelo Vertisol, en su uso de MET, según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$), no presentó diferencias estadísticas entre sus profundidades. El valor más alto de C:N se presentó en la profundidad 15-30 cm (13.12) mientras que las profundidades que mejor C:N presentaron fueron la de 60-100 cm (9.45) y 0-5 cm (9.90). En cuanto al uso de Pastizal, la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) indicó diferencias significativas entre sus profundidades. En 0-5 y 60-100 cm, mientras que las profundidades 5-15, 15-30 y 30-60 cm no presentaron diferencias. El valor más alto de C:N (19.56) fue para la profundidad 60-100 cm y la profundidad que mejor relación C:N presentó es 0-5 cm (10.98) (Figura 38).

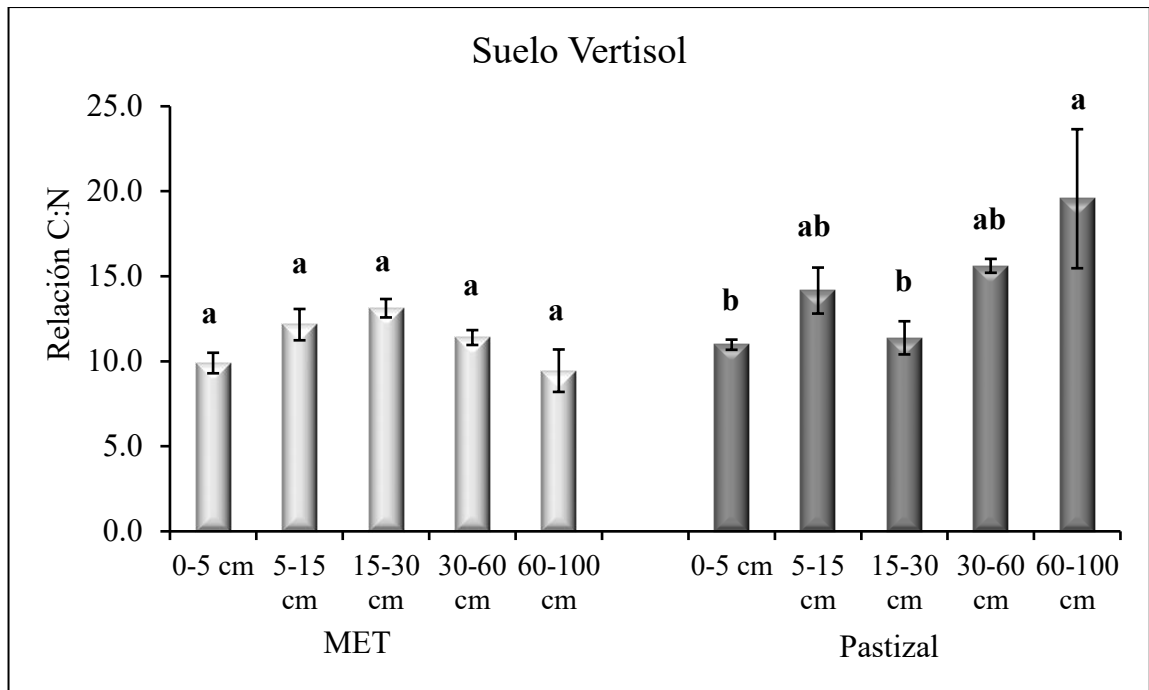


Figura 38. Valores medios para la relación carbono nitrógeno (C:N) en las profundidades analizadas para el suelo Vertisol. Letras distintas entre profundidades indican que son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$) para MET y Pastizal, respectivamente ($n=4$).

8. Discusión

Mantener y aumentar la cubierta forestal es de suma importancia ya que la temperatura y la humedad aumentan y la materia orgánica del suelo se descompone a mayor velocidad aumentando y secuestrando el carbono en el suelo tal y como lo documentan Zhu *et al.* (2017) y Zhu *et al.* (2020), quienes reportan una ganancia de hasta 8 Mg de carbono orgánico del suelo en 20 años de estudio. Dichos resultados son menores a los observados en el presente estudio, ya que al cambiar de un uso de vegetación nativa a pastizal se han perdido aproximadamente 18.93 y 104.79 Mg ha⁻¹ de COS en los suelos Cambisol y Regosol, respectivamente.

El cambio de MET a Pastizal provocan disminuciones en las reservas de COS en todos los suelos a excepción del suelo Vertisol, en donde el Pastizal fue 38.32 Mg ha⁻¹ superior que el MET. En cuanto al Nt, los suelos Cambisol, Regosol y Luvisol presentaron pérdidas de 18.93, 104.79 y 22.74 Mg ha⁻¹, respectivamente. Tal como lo sugiere Amores (2020), el cambio de uso del suelo propicia la disminución del COS en el suelo en las profundidades más superficiales, pero también reporta alteraciones hasta 1.0 m de profundidad; así lo muestran los resultados generados en el presente estudio, en donde se percibe una disminución en todas las profundidades, en especial en el suelo Regosol.

Chang *et al.* (2018), determinaron la pérdida de COS en pastizales, encontrando hasta 50 Mg ha⁻¹ de COS en los primeros 30 centímetros. Estos resultados contrastan con los resultados observados en el presente estudio para el suelo tipo Vertisol, ya que el uso de Pastizal se encontró 243.96 Mg ha⁻¹, siendo 38.32 Mg ha⁻¹ superior al uso de vegetación nativa. Céspedes *et al.* (2012), en su estudio encontraron reservorios de COS en pastizales hasta 1.0 m de profundidad de 108.61 a 110.1 Mg ha⁻¹; resultados similares a los encontrados en el presente trabajo en el uso Pastizal. Por su parte, Espinoza *et al.* (2025), mencionan la importancia del COS en la regulación de los factores climáticos y la disponibilidad de nutrientes, además las prácticas agresivas de cultivo tienen un impacto negativo en el COS, llegando a provocar erosión y degradación de los suelos.

Celaya *et al.* (2015), encontraron en los primeros 5 cm de profundidad una diferencia de 0.3 Mg ha^{-1} de nitrógeno total entre la vegetación nativa y la de pastizal. Dichos resultados son similares a los encontrados en la presente investigación ya que en los primeros 5 cm se observaron diferencias entre el MET y el área de Pastizal para los suelos Cambisol, Regosol y Luvisol con 0.29, 1.45 y 1.62 Mg ha^{-1} , respectivamente, demostrando así una disminución en las reservas de nitrógeno total debido al impacto del cambio de uso del suelo.

Geng *et al.* (2025), mencionan en su estudio que el efecto de los usos del suelo al ser utilizados por actividades antropogénicas, tiene un fuerte impacto en las profundidades, así como en los microorganismos responsables de los ciclos biogeoquímicos. Dicha alteración disminuyó en un 50 % el Nt desde la capa interior hasta el metro de profundidad. Dichos resultados concuerdan con los encontrados en la presente investigación, ya que en dos de los suelos (Regosol y Luvisol) se redujo el Nt.

Los usos del suelo son los principales factores decisivos de como fluctúan las reservas del Nt. Las reservas en áreas forestales suelen ser mayores que en usos de pastizales. Paltineanu *et al.* (2024), en su investigación encontraron reservas de Nitrógeno total (0-50 cm) de 11.4 y 10.8 Mg ha^{-1} , para bosques y pastizales respectivamente, dichos resultados concuerdan con los datos que se obtuvieron de los suelos Regosol (17.90 Mg ha^{-1}) y Luvisol (10.79 Mg ha^{-1}), en donde el uso de vegetación nativa es superior que el Pastizal (MET, Regosol 23.25 Mg ha^{-1} y Luvisol 17.46 Mg ha^{-1}).

Sandoval y Cantú (2025) en su estudio de un suelo Luvisol en la sierra de Oaxaca encontraron valores para COS de 148.19 y $180.68 \text{ Mg ha}^{-1}$, Nt 9.26 y 10.97 Mg ha^{-1} así como una relación C:N de 16.21 y 16.77 para uso de Pastizal y Bosque de Pino, respectivamente. En general el uso de Pastizal fue superior en todas sus variables, en cambio con el suelo Luvisol estudiado, en donde su uso de vegetación nativa fue superior en todas las variables. Sin embargo, cabe destacar que aunque se estudió hasta los 100 cm de profundidad, aún así los valores son inferiores que el suelo Luvisol de Oaxaca. Esto indica las diferencias de las regiones, climas y vegetación que tienen un impacto directo en las reservas de COS, Nt y la relación C:N.

Cantú y Yáñez (2018), encontraron una relación C:N en una profundidad de 0-30 cm idónea y similar a la encontrada en el presente trabajo en donde el MET presentó la relación C:N más baja (7.59) y el Pastizal la más alta con 10.37. Dichos resultados son similares, siendo que en el MET se observó una relación de 11.73 y para el Pastizal de 12.17, encontrándose dentro de los parámetros idóneos. Brust (2019), menciona que una relación C:N que se presente entre 1 a 15, produce una mineralización y liberación más rápida de Nitrógeno para la disponibilidad de las plantas.

9. Conclusiones

La afectación en los reservorios de COS y de Nt así como a la relación C:N por el cambio de uso del suelo de Matorral Espinoso Tamaulipeco a Pastizal, se observó en las profundidades y varía respecto con el tipo de suelo.

Los reservorios de COS tienden a aumentar conforme el estrato de la profundidad es mayor, a excepción de algunas profundidades como lo es en el uso de MET, en donde el suelo Cambisol presentó un mayor reservorio en la profundidad 5-15 cm. Por su parte, los suelos Regosol, Luvisol y Vertisol, mostraron su mayor reservorio en la profundidad 30-60 cm.

Las reservas de Nt en el uso de Pastizal, presentan una tendencia a aumentar conforme el estrato es mayor. Los suelos Cambisol, Luvisol y Vertisol presentaron sus mayores reservas en la última profundidad, 60-100 cm, mientras que el suelo Regosol su mayor reservorio se encontró en la profundidad 30-60 cm.

El uso de monocultivos, como lo es la producción de pastizales inducidos, deja en evidencia la disminución del secuestro de COS y Nt en los suelos Cambisol, Regosol y Luvisol. El suelo Vertisol destaca ya que fue el único en el que el uso de Pastizal fue superior al uso de MET en las reservas de COS y Nt.

Las características de los suelos, su uso, así como su manejo, demuestra una gran heterogeneidad en las reservas de las variables estudiadas, ya que se observó que un solo suelo y uso no domina las tres variables, si no que se aumentan o disminuyen de un uso a otro, así como entre las profundidades hay una gran variabilidad.

10. Literatura

- Aguirre, F. S. E., Piraneque G. N. V. y Mercado F. T. (2022). Suelo y cambio climático. Incluye estudio de casos. Editorial Unimagdalena. <https://doi.org/10.21676/9789587464993>.
- Amores, M. M. M. (2020). Efecto de prácticas de manejo del suelo y sus interacciones en la dinámica del carbono orgánico del suelo: Revisión de Literatura. Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniera en Ambiente y Desarrollo en el grado académico de licenciatura. 29 pp.
- Balesdent, J., Chenu, C., Balabane, M. (2000). Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research* 53:215-220.
- Batjes, N. H. (2014). Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science* 65(1):10-21. https://doi.org/10.1111/ejss.12114_2
- Bremner, J. M. and C. S. Mulvaney. 1982. Nitrogen-Total. In: Page, A. L., R. H. Miller and D. R. Keeney (ed.). *Methods of soil analysis part 2: chemical and microbiological properties*. Agronomy Monograph Num. 9. 2nd ed. American Society of Agronomy and Academic Press. Madison, WI, USA. pp. 595-624.
- Briones, O., Perroni Y., Bullock S., Castellanos A. E., De Jon B., Estrada C. I., Paz P. F., Martínez Y. A., Maya Y. Montaña. N. M., Pavón N., Velázquez R. A. y Yepez E. A. (2019) *Ecosistemas Terrestres. Matorrales y Pastizales. Estado del Ciclo del Carbono: Agenda Azul y Verde. Programa Mexicano del Carbono*. Texcoco, Estado de México, México. 353-386.
- Briones, O., Perroni Y., Castellanos A. E., Estrada C. I., Yrizar A. M., Maya Y., Montaña N. M., Pavón N. y Yepez E. A., (2018). Base de datos sobre almacenes y flujos de carbono en los matorrales y pastizales xerófilos de México. *Elementos para Políticas Públicas* 2, 200–209.

- Brust, G. E. (2019). Chapter 9. Management Strategies for Organic Vegetable Fertility. In *Safety and Practice for Organic Food* (pp. 193–212). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812060-6.00009-X>.
- Burbano, O. H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas* 33(2), 117-124. <https://doi.org/10.22267/rcia.163302.58>
- Celaya, M. H., García, O. F., Casas, R. J. y Castellanos, V. A. E. (2015). Cambios en el almacenamiento de nitrógeno y agua en el suelo de un matorral desértico transformado a sabana de buffel (*Pennisetum ciliare* (L.) Link Savanna. *TERRA LATINOAMERICANA* volumen 33 número 1.
- Céspedes, F. F. E., Fernández J. A., Gobbi A. J. y Berdardis C. A. (2012). Reservorio de carbono en suelo y raíces de un pastizal y una pradera bajo pastoreo. *Revista Fitotecnia* 35(1):79 – 86.
- Chamorro, C. E., Valencia H. y Camero E. (2025). *Introducción a la Biología del Suelo: Aspectos de su génesis y ecología*. Bogotá: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Chang, Q., Wang, L., Ding, S., Xu, T., Li, Z., Song, X., Zhao, X., Wang, D., & Pan, D. (2018). Grazer effects on soil carbon storage vary by herbivore assemblage in a semi-arid grassland. *Journal of Applied Ecology*, 55(5), 2517-2526. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13166>
- Di Gerónimo, P. F., Videla, C., & Laclau, P. (2018). Distribución de carbono y nitrógeno orgánico en fracciones granulométricas de suelos bajo pastizales, agricultura y forestaciones. Faltaba completar cita
- FAO, (1989). *FAO-ISRIC Soil Database (SDB)*. World Soil Resources Report 64. Food and Agriculture Organization, Rome

- FAO, (2002). Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Roma.
- FAO, (2015). Learning tool on Nationally Appropriate Mitigation Actions (NAMAs) in the agriculture, forestry and other land use (AFOLU) sector. Roma:
- FAO, (2017). Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura Roma, Italia.
- FAO, 2021. Standard operating procedure for soil nitrogen - Kjeldahl method. Rome. 25 pp.
- Ferrero, M. R., Basanta M. y Álvarez C. (2018). Stock de carbono y nitrógeno orgánicos y variables físicas en un haplustol éntico bajo diferentes usos en el sudeste de Córdoba. XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 2018. Tucumán, Argentina.
- Fisher, K. & Newton W. E. (2003). Nutrition Nitrogen Fixation. In Encyclopedia of Applied Plant Sciences, 634–642. <https://doi.org/10.1016/b0-12-227050-9/00102-2>
- Flores, S. J. (2003). Agricultura Ecológica, Manual y guía didáctica. editorial Irma, S.L. Instituto de Restauración y Medio Ambiente. 414 pp
- Galicia, L., Cáceres, A. M. G., Cram, S., Chávez-Vergara, B., Ramírez, V. P., Saynes, V., & Siebe, C. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. Falta revista, volumen numero y páginas <https://doaj.org/article/cc9bb690237f4362ba71e8d66991fbe1>
- Gamarra, C., Lezcano, M. I. D., De Ortíz, M. V., Del Pilar Galeano, M., & Cardús, A. J. N. C. (2018). Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco Paraguayo. Revista Mexicana de Ciencias Forestales9(46). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.134>

- Geng T., Wang Z., Wang Q., Yang Q. & Wang J. (2025). Effects of land-use type and soil depth on soil physicochemical properties, enzyme activities and bacterial community composition in black soil region of Northeast China. CATENA 258, 109276. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.109276>.
- González, D. M., Rahim F. P., Rocha D. L., Guzmán L. M. A. y González R. H. (2017) Composición florística Y caracterización Estructural Del Matorral desértico micrófilo En Galeana, Nuevo León. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 8(39):83-98. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i39.45>.
- González, M. L., Etchevers B. J. D., y Hidalgo M. C. (2008). Carbono en suelos de ladera: factores que deben considerarse para determinar su cambio en el tiempo. Agrociencia, 42(7):741-751. <http://www.redalyc.org/pdf/302/30211207001.pdf>
- Gougoulas, C., Clark, J. M. & Shaw, L. J. (2014). The role of soil microbes in the global carbon cycle: tracking the below-ground microbial processing of plant-derived carbon for manipulating carbon dynamics in agricultural systems. Journal of the Science.
- Hume, A. M., Chen, H. Y. H., & Taylor, A. R. (2017). Intensive forest harvesting increases susceptibility of northern forest soils to carbon, nitrogen and phosphorus loss. Journal of Applied Ecology 55(1): 246-255. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12942>
- Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática (INEGI) (2007) Aspectos generales del territorio mexicano. Recursos naturales. Edafología. Disponible en: <http://mapserver.inegi.org.mx>. Fecha de consulta: febrero de 2012.
- Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática (INEGI) (2010) Compendio de Información geográfica municipal 2010 Linares Nuevo León. Compendio de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Linares, Nuevo León. Clave geoestadística 19033. 10pp.

https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/19/19033.pdf

Informe de la Situación del Medio Ambiente en México (SEMARNAT) (2012).
Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de
Desempeño Ambiental. Edición 2012.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2014). Carta de Uso del
Suelo y Vegetación Serie VI (2014), escala 1:250 000. INEGI. México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2015). Estadísticas a
propósito de día mundial del suelo (5 de diciembre). 9 pp
<https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2015/suelo0.pdf>.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2023). Censo Agropecuario
2022, Resultados definitivos. 62 pp.
https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ca/2022/doc/ca2022_rdnal.pdf

International Business Machines (IBM). 2013. IBM SPSS Statistics for Windows,
Version 22.0. Armonk, NY, United States of America. IBM Corp.
<https://www.ibm.com/support/pages/spss-statistics-220-available-download>. (20 de marzo de 2023).

IUSS Working Group WRB. (2015). World Reference Base for Soil Resources
2014, update 2015. International soil classification system for naming soils
and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106.
FAO, Rome.

Jurado, G. P., Velázquez M. M., Sánchez G. R. A., Álvarez H. A., Martínez, P. A.
D., Gutiérrez L. R., Garza C. R. D., Luna L. M., & Chávez R. M. G. (2021).
Los pastizales y matorrales de zonas áridas y semiáridas de México:
estatus actual, retos y perspectivas. Revista Mexicana de Ciencias
Pecuarias 12: 261-285. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v12s3.5875>

- Martín, G. G., Pablos R. P., Cobo V., Villazón G. J. A. y Serrano G. A. (2023). Efecto de diferentes tipos de uso de la tierra en las fracciones del carbono orgánico del suelo. *Pastos y Forrajes* 46:1-8
- Mejía, L.S., Gómez G. A., Etchevers B. J., Ángeles P. G., López L.M. y Horwath, W. R. (2007). Acumulación de carbono orgánico en el suelo en reforestaciones de *Pinus michoacana*. *Agrociencia* 41(7):711-721.
- Mota, C., Alcaraz L. C., Iglesias M., Martínez B. M.C. y Carvajal M. (2008.) Investigación sobre la absorción de Co₂ por los cultivos más representativos. Departamento de Nutrición Vegetal CEBAS-Consejo Superior de Investigaciones Científicas 30100-Espinardo, (Murcia), SPAIN 41p.
- Paltineanu C., Dumitru S., Vizitiu O., Mocanu V., Lăcătușu A. R., Estelino I. & Domnariu H (2024). Soil organic carbon and total nitrogen stocks related to land use and basic environmental properties: assessment of soil carbon sequestration potential in different ecosystems. *CATENA*. Vol. 246 15 pp. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108435>
- Pardos, J.A. (2010). Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria Ministerio de Ciencia e Innovación. Madrid. 253 p.
- Patiño, F. A. M., Alanís R. E., Guerra, V. M. M., Jurado, E., González R. H., Calderón, Ó. A. A., & Chávez C. A. C. (2022). Regeneración natural en un área restaurada del matorral Espinoso Tamaulipeco del noreste de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* (en línea), 9(1). <https://doi.org/10.19136/era.a9n1.2853>
- Sandoval G. C. y Cantú S. I. (2025). Reserva de carbono orgánico y nitrógeno en Luvisol bajo diferentes usos del suelo en Oaxaca, México. *Polibotánica* 60:163-176. DOI:10.18387/polibotanica.60.10

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2016). Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. Indicadores clave, de desempeño ambiental y de crecimiento verde 498 pp. (Edición 2015).
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2019). Capítulo 3 Suelos. La degradación de suelos en México. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, edición 2018. SEMATNAT. México. 2019. 175- 217pp.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2002. NOM-021- RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación, Segunda Sección.
- Wagner, R. C., Furon, A. C., Mclaughlin, N. L., Lee, I., Barbeau, J., Jayasundara, S., Parkin, G., Von Bertoldi, P., & Warland, J. (2007). Intensive measurement of nitrous oxide emissions from a corn-soybean-wheat rotation under two contrasting management systems over 5 years. *Global Change Biology* 13(8):1722-1736. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01388.x>
- Walteros, T. I., Palacios P. S., Cely, G. E., Serrano, P. A., y Moreno P. D. (2022). Influencia del cambio de uso del suelo sobre las reservas de carbono orgánico en el Parque Natural Regional Cortadera, Boyacá (Colombia). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* 25(2):faltan páginas <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1846>.
- Ward, S. E., Smart, S. M., Quirk, H., Tallowin, J. R. B., Mortimer, S. R., Shiel, R. S., Wilby, A., & Bardgett, R. D. (2016). Legacy Effects of grassland management on soil Carbon to depth. *Global Change Biology* 22(8):2929-2938. <https://doi.org/10.1111/gcb.13246>

- Waring, R. H. & Running S. W. (2007). Chapter 3. Carbon Cycle. In *Forest Ecosystems Third Edition* (pp. 59–98). <https://doi.org/10.1016/b978-012370605-8.50008-6>.
- Widdison, P. E. & Burt, T. P. (2008). Nitrogen Cycle. In *Encyclopedia of Ecology* (pp. 2526–2533). <https://doi.org/10.1016/b978-008045405-4.00750-3>.
- Zhou, X. M., Ma B. L. & Smith D. L. (2016). Nitrogen in Grain Production Systems, Reference Module in Food Science. Falta completar cita
- Zhu, J., Hu, H., Tao, S., Chi, X., Li, P., Jiang, L., Ji, C., Zhu, J., Tang, Z., Pan, Y., Birdsey, R. A., He, X. & Fang, J. (2017). Carbon stocks and changes of dead organic matter in China's forests. *Nature Communications* 8(1):faltan páginas. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00207-1>
- Zhu, J., Wang, C., Zhou, Z., Zhou, G., Hu, X., Jiang, L., Li, Y., Liu, G., Ji, C., Zhao, S., Li, P., Zhu, J., Tang, Z., Zheng, C., Birdsey, R. A., Pan, Y. & Fang, J. (2020). Increasing soil carbon stocks in eight permanent forest plots in China. *Biogeosciences* 17(3):715–726. <https://doi.org/10.5194/bg-17-715-2020>