



DOI: 10.29298/rmcf.v16i89.1522

Artículo de Investigación

Evaluación física y química de un Vertisol en dos usos de suelo en el noreste de México

Physical and chemical evaluation of a Vertisol in two land uses in Northeastern Mexico

Jorge Alexis Luna Robles¹, Israel Cantú Silva^{1*}, Erik Orlando Luna Robles², Silvia Janeth Bejar Pulido²

Fecha de recepción/Reception date: 6 de octubre de 2024.
Fecha de aceptación/Acceptance date: 19 de marzo de 2025.

¹Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

²Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de El Salto. México

*Autor para correspondencia; correo-e: icantu59@gmail.com

*Corresponding author; e-mail: icantu59@gmail.com

Resumen

La conversión de áreas forestales a tierras de uso agrícola y pecuario, así como sus prácticas intensivas pueden provocar la degradación del suelo. El objetivo del presente estudio fue analizar los efectos del cambio de uso de suelo sobre las propiedades físicas (densidad aparente [*DA*], porosidad [*P*], textura, resistencia mecánica a la penetración [*RMP*]) y químicas (materia orgánica [*MOS*], Carbono orgánico [%*C*], pH y conductividad eléctrica [*CE*]) de un Vertisol en diferentes profundidades (0-5, 5-15, 15-30, 30-60 y 60-100 cm); a partir de que diversos estudios se enfocan solo en la evaluación de los primeros centímetros del suelo, existe desconocimiento e incertidumbre acerca del comportamiento de las variables edáficas en intervalos de profundidad mayores. En cada uso de suelo, se recolectaron cuatro muestras de suelo compuestas por profundidad ($n=40$). Los resultados indican que las variables químicas no presentaron diferencias significativas entre usos de suelo, pero sí entre profundidades. La *MOS* y %*C* disminuyeron significativamente conforme aumentó la profundidad; en 0-5 cm se registraron los valores más altos en ambos usos. El pH fue medianamente alcalino, mientras que la *CE* se registró por debajo de los niveles de salinidad. En cuanto a las propiedades físicas solo *DA* y la porosidad presentaron diferencias significativas entre usos de suelo ($p<0.05$); entre profundidades únicamente variaron los contenidos de arenas y limos. La *RMP* solo presentó diferencias entre usos de suelo ($p<0.01$). El Vertisol tiene mayor sensibilidad en sus propiedades físicas tras la conversión del Matorral Espinoso Tamaulipeco a Pastizal.

Palabras clave: Carbono orgánico, materia orgánica, Matorral Espinoso Tamaulipeco, Pastizal, prácticas intensivas, degradación del suelo.

Abstract

The conversion of forest areas into agricultural and livestock lands, as well as intensive practices can cause soil degradation. The objective of this study was to analyze the effects of land use change on the physical (Bulk Density [*BD*], Porosity [*P*], Texture, Mechanical Resistance to Penetration [*MRP*]) and chemical properties (Organic Matter [*SOM*], Organic Carbon [%*C*], *pH* and Electrical Conductivity [*EC*]) of a Vertisol at different depths (0-5, 5-15, 15-30, 30-60 and 60-100 cm); considering that most research focuses only on the evaluation of the first

centimeters of soil, so there is lack of knowledge and uncertainty about the behavior of edaphic variables in greater depth ranges. In each land use, four soil samples composed of depth ($n=40$) were collected. The chemical variables did not present significant differences between land uses, but between depths. The *SOM* and %C decreased significantly as depth increased, where the highest values were recorded at 0-5 cm in both land uses. The *pH* was moderately alkaline, while the *EC* was below salinity levels. In regard to physical properties, only *BD* and porosity showed significant differences between land uses ($p<0.05$); between depths, only the contents of sand and silt varied. *MRP* only presented differences between land uses ($p<0.01$). Vertisol presented greater sensitivity in the physical properties of the soil after the conversion of the Tamaulipan Thorny Scrub to Grassland.

Key words: Organic Carbon, Organic matter, Tamaulipan Thorny Scrub, Grassland, intensive practices, soil degradation.

Introducción

El suelo se considera como un sistema dinámico multifuncional que se origina de interacciones bióticas y abióticas, y que es pieza clave en el funcionamiento de los ecosistemas. Su importancia radica en su capacidad de otorgar bienes y servicios ecosistémicos necesarios para satisfacer las múltiples demandas y requerimientos del ser humano, los cuales se clasifican en servicios de provisión, regulación, soporte y culturales (Avenidaño-Leadem et al., 2020). Aunado a lo anterior, las propiedades del suelo son indicadores de su salud, que a su vez se manifiestan de forma directa en la calidad de sus servicios ecosistémicos (Rodríguez et al., 2024).

El suelo representa la mayor reserva de Carbono (C) terrestre, ya que almacena aproximadamente tres veces más que la atmósfera y 4.5 veces más que la biosfera (Veni et al., 2020; Wang et al., 2021). Esto lo convierte en un contribuyente potencial en la mitigación del cambio climático, el cual es uno de los problemas globales más importantes que afectan a la humanidad (El-Ghamry et al., 2024). De igual forma, cabe mencionar que el Carbono orgánico es un elemento clave que determina la calidad, fertilidad, productividad y rentabilidad del suelo ya que interviene en diferentes procesos físicos, hidrológicos, químicos y biológicos, que definen el grado de la estructura del suelo, la retención y circulación tanto del agua, como de los nutrientes (Kumar et al., 2022). No obstante, todas estas capacidades son dinámicas,

y están sujetas al uso de suelo, prácticas de manejo y disturbios al que sea sometido (Cantú & Bejar, 2024).

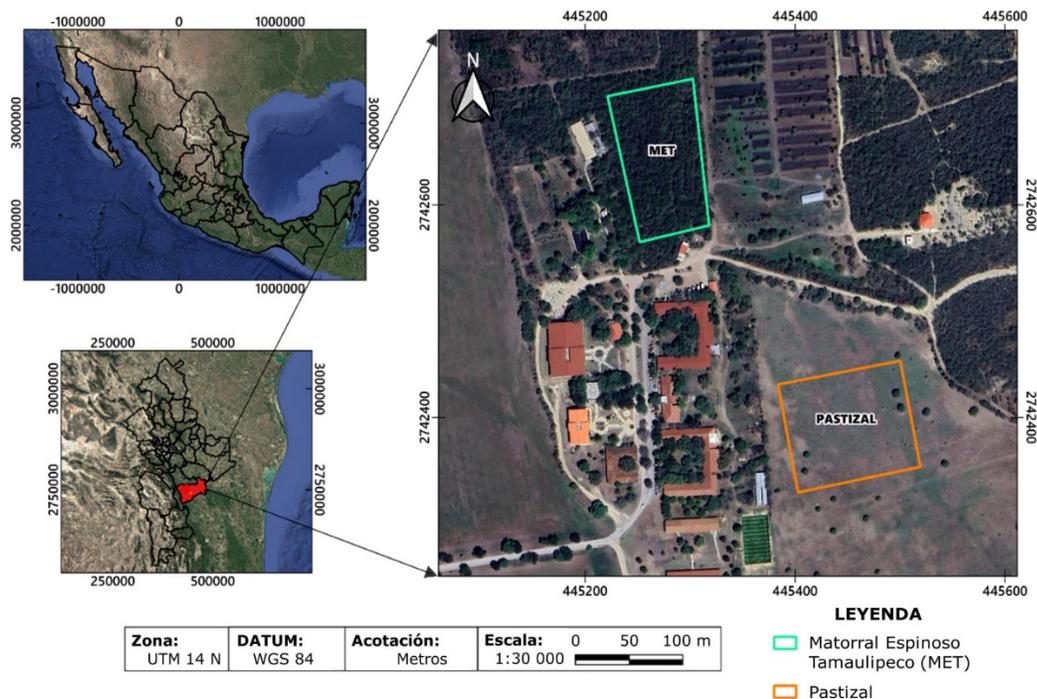
En este sentido, el cambio de uso de suelo es uno de los principales factores en su degradación, debido a la transformación recurrente y desmedida para fines de producción (agrícola, ganadera, industrialización y urbanización), ya que por el constante aumento demográfico se incrementan las demandas humanas, lo cual conduce a ejercer mayor presión sobre el suelo y repercute en aspectos ambientales, económicos y sociales (Dumas *et al.*, 2022; Escandón *et al.*, 2018; Kouassi *et al.*, 2021).

Particularmente en Linares, Nuevo León, en la actualidad los pastizales son el tipo de uso con mayor superficie del municipio (Hernández-Cavazos *et al.*, 2023), donde el Vertisol es el suelo que domina en el área, el cual se caracteriza por ser profundo y tener un contenido de más de 30 % de arcilla, además es el de mayor potencial agrícola y de pastoreo en el país (International Union of Soil Sciences [IUSS], 2015; Torres *et al.*, 2016); sin embargo, son suelos que presentan degradación física por compactación y sellamiento superficial, así como degradación química por pérdida de nutrientes o declinación en la fertilidad, derivada de la aplicación de malas prácticas como uso excesivo de productos químicos orgánicos e inorgánicos en actividades agrícolas, labranza convencional (intensiva), uso de maquinaria pesada, sobrepastoreo, incendios y riegos (Luna *et al.*, 2022a; Salamanca *et al.*, 2004; Torres *et al.*, 2016).

Con base en lo anterior y en la dominancia y transformación de los sistemas de uso de pastoreo sobre las áreas de matorral en el estado de Nuevo León, se consideró como objetivo del presente estudio analizar los efectos de este uso de suelo sobre las características físicas y químicas de un Vertisol, en un gradiente de 0 a 100 cm de profundidad; lo anterior se fundamenta en que muchos de los estudios se enfocan solo en la evaluación de los primeros centímetros, por lo que hay desconocimiento e incertidumbre acerca del comportamiento de las variables físicas y químicas del suelo en intervalos mayores de profundidad.

Materiales y Métodos

El estudio se realizó en el municipio Linares, Nuevo León, en el *campus* de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, a una altitud de 380 m, temperatura media mensual de 22.4 °C y precipitación media anual de 805 mm. La vegetación característica corresponde al Matorral Espinoso Tamaulipeco y un área de pastizal de la especie *Dichanthium annulatum* (Forssk.) Stapf (Yáñez et al., 2018) (Figura 1).



MET = Matorral Espinoso Tamaulipeco.

Figura 1. Localización del área de estudio en Linares, Nuevo León, México.

Muestreo en campo

La recolecta de muestras se llevó a cabo en dos parcelas, las cuales se describen a continuación:

(a) Área testigo, característica de la vegetación nativa de la región y sin presencia de disturbio en los últimos 20 años, denominada Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET).

(b) Uso de suelo de pastizal, con una antigüedad de 20 años, el cual corresponde a un sistema de pastoreo intensivo con ciclos de rotación en potreros y una carga animal de 8 UA ha⁻¹, con periodos de descanso de 8 y 5 semanas en temporada de sequía y lluvias, respectivamente.

En cada uso de suelo se recolectaron cuatro muestras compuestas de 1 a 1.5 kg a cinco profundidades (0-5, 5-15, 15-30, 30-60 y 60-100 cm) (Comisión Nacional Forestal [Conafor], 2017), para un total de 40 muestras de suelo compuestas; también, se extrajeron 40 muestras inalteradas con uso de cilindros metálicos de 5 cm de diámetro por 5 cm de longitud para determinar la densidad aparente, las cuales fueron trasladadas al Laboratorio de Suelos y Nutrición de Bosques de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León para su posterior análisis.

En el Cuadro 1 se muestran las diferentes propiedades físicas y químicas, así como el método y las unidades de medida que fueron utilizados para su determinación.

Cuadro 1. Métodos de determinación de las propiedades físicas y químicas.

Propiedades		Metodología
Físicas	<i>DA</i> (g cm ³)	Método gravimétrico (Woerner, 1989)
	<i>P</i> (%)	Estimación por <i>DA</i> y relación tamaño de partícula (Luna-Robles <i>et al.</i> , 2021)

	<i>RMP</i> (kg cm ²)	Penetrómetro (Herrick & Jones, 2002)
	Textura (%)	AS-09 NOM-021-RECNAT-2000 (NOM-021-RECNAT-2000, 2001; Silva et al., 2020)
Químicas	<i>MOS</i> (%)	Combustión húmeda según <i>Walkley-Black</i> (Cantú & Yáñez, 2018; Woerner, 1989)
	<i>C</i> (%)	Estimación por medio de <i>MOS</i> (Cantú & Luna, 2022; Woerner, 1989)
	<i>pH</i> (%)	AS-23 NOM-021-RECNAT-2000 (NOM-021-RECNAT-2000, 2001)
	<i>CE</i> (μS cm ⁻¹)	Determinación rápida suelo-agua 1:5 (Woerner, 1989)

DA = Densidad aparente; *P* = Porosidad; *RMP* = Resistencia mecánica a la penetración; *MOS* = Materia orgánica del suelo; *C* = Contenido de Carbono orgánico; *CE* = Conductividad eléctrica.

Análisis estadístico

Todos los datos de las variables se sometieron a pruebas de normalidad de *Kolmogorov-Smirnov* y homogeneidad de varianzas de *Levene* (Flores & Flores, 2021), a las variables que cumplieron ambos supuestos (%*C*, *MOS*, *CE*, *pH*, *DA*, *P*, arena y limo) se les realizó un análisis de varianza de dos vías para determinar diferencias significativas entre usos de suelo (matorral y pastizal), profundidades (0-5, 5-15, 15-30, 30-60 y 60-100 cm), así como entre su interacción con sus respectivas pruebas de *Tukey* ($p=0.05$). Mientras que a *RMP* y arcilla se aplicó la prueba *U* de *Mann-Whitney* (Berlanga & Rubio, 2012) y la prueba de *Kruskal-Wallis* para determinar diferencias significativas entre usos de suelo e intervalos de profundidad. Todos los análisis estadísticos se realizaron en el programa *SPSS* versión 22.0 (International Business Machines [IBM], 2020).

Resultados

Propiedades químicas

De acuerdo con los resultados del ANOVA de dos vías ninguna de las variables químicas presentó diferencias significativas entre usos de suelo ($p > 0.05$); pero sí las hubo entre profundidades, así como entre su interacción ($p < 0.01$) (Cuadro 2).

Cuadro 2. ANOVA de dos vías para usos de suelo (MET y Pastizal), profundidades (0-5, 5-15, 15-30, 30-60 y 60-100 cm) y su interacción en las propiedades químicas de un Vertisol.

Variable	Usos de suelo Valor de <i>F</i>	Profundidad Valor de <i>F</i>	Usos* Profundidad Valor de <i>F</i>	Levene
<i>MOS</i> (%)	1.21ns (0.06)	109.46** (< 0.01)	4.54** (< 0.01)	0.431
%C	1.87ns (0.28)	105.03** (< 0.01)	4.71** (< 0.01)	0.830
<i>pH</i>	6.05 (0.18)ns	32.44** (< 0.01)	7.59** (< 0.01)	0.062
<i>CE</i> ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	0.16 (0.68)ns	71.23** (< 0.01)	3.02* (< 0.05)	0.111

MOS = Materia orgánica del suelo; %C = Contenido de Carbono orgánico; *CE* = Conductividad eléctrica; ns = Diferencias no significativas ($p > 0.05$); ** Diferencias altamente significativas ($p \leq 0.01$); * Diferencias significativas ($p \leq 0.05$); entre paréntesis se indica el valor de *p*.

Específicamente, el contenido de materia orgánica (*MOS*) fue de 4.52 y 4.24 % en el MET y en el Pastizal, respectivamente; mientras que, los valores correspondientes a Carbono orgánico fueron de 2.62 % en el MET y 2.42 % en el Pastizal. Por otra parte, el pH para ambos usos de suelo se consideró medianamente alcalino; la *CE* se registró por debajo de los niveles de salinidad considerados como muy escasos ($<500 \mu\text{S cm}^{-1}$) (Cuadro 3).

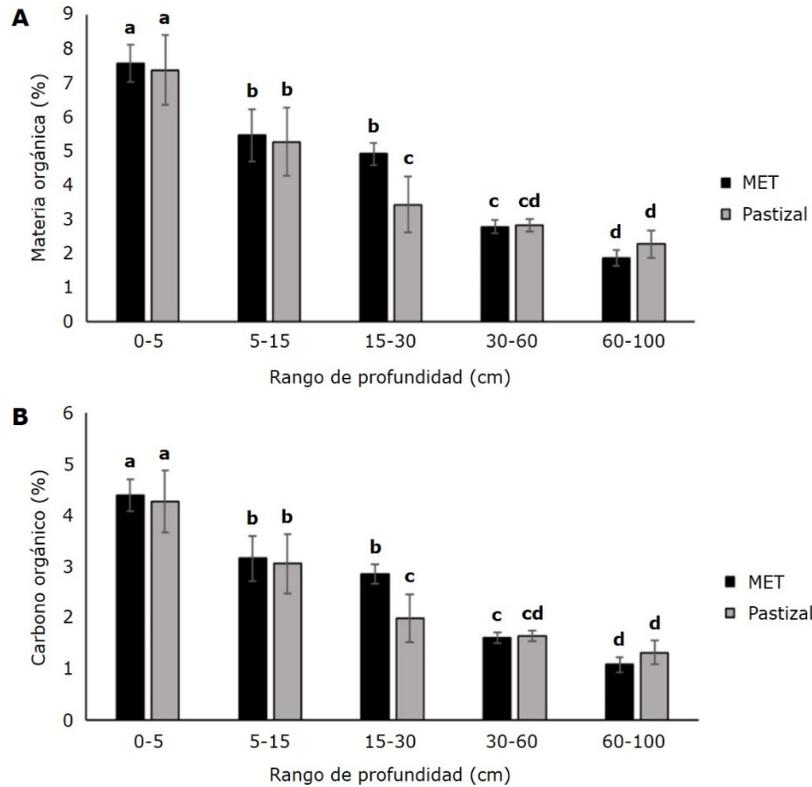
Cuadro 3. Valores medios de las variables químicas entre usos de suelo ($n=20$).

Variable	MET	Pastizal
<i>MOS</i> (%)	4.52±2.11	4.24±2.03
%C	2.62±1.23	2.42±1.15
<i>pH</i>	7.45±0.11	7.50±0.16
<i>CE</i> ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	73.72±11.8	74.08±17.98

MOS = Materia orgánica del suelo; %C = Contenido de Carbono orgánico;

CE = Conductividad eléctrica; MET = Matorral Espinoso Tamaulipeco.

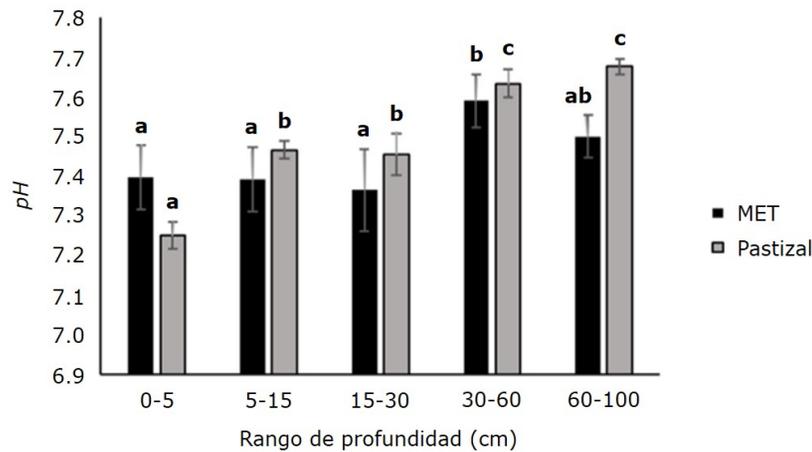
En la Figura 2 se ilustran las variables por intervalos de profundidad, es evidente que la materia orgánica (*MOS*) y el Carbono orgánico (%C) tuvieron una misma tendencia decreciente, uniforme con el aumento de la profundidad en ambos usos de suelo. En particular en el MET, los niveles más elevados de *MOS* y %C se registraron en la profundidad de 0-5 cm, y alcanzaron valores de 7.6 y 4.4 %, respectivamente; los números más bajos se presentaron en la profundidad de 60-100 cm con 1.9 % para *MOS* y 1.1 % para el %C. En el Pastizal, los contenidos de *MOS* fluctuaron entre 2.3 y 7.4 % y los de %C de 1.3 y 4.3 %.



A = Materia orgánica; B = Carbono orgánico. MET = Matorral Espinoso Tamaulipeco. Las letras diferentes representan diferencias significativas.

Figura 2. Contenidos de Materia orgánica y Carbono orgánico por profundidad, en los dos usos de suelo.

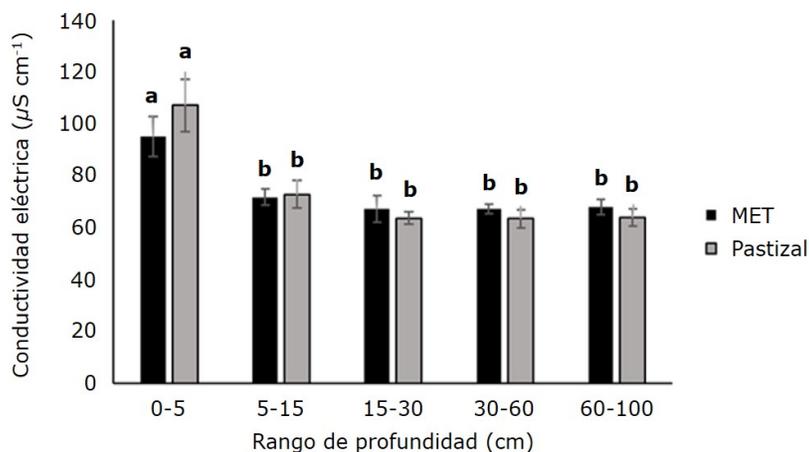
En lo que respecta a los niveles de pH, en el MET los valores más bajos se obtuvieron en el intervalo de profundidad de 15-30 cm (7.4), y los valores más altos se observaron en el de 30-60 cm (7.6). En cambio, en el Pastizal se observó una tendencia prácticamente ascendente a medida que aumentó la profundidad, con cifras entre 7.3 y 7.7, por lo que, de acuerdo con su valoración, son suelos medianamente alcalinos (Figura 3).



MET = Matorral Espinoso Tamaulipeco. Las letras diferentes representan diferencias significativas.

Figura 3. Valores de pH por profundidad en los dos usos de suelo.

La Figura 4 describe el comportamiento de la *CE* en los cinco intervalos de profundidad; se aprecia que de 0-5 cm se registraron los valores más altos con $95 \mu\text{S cm}^{-1}$ para el MET y $106.96 \mu\text{S cm}^{-1}$ en el Pastizal. Sin embargo, a medida que la profundidad aumenta, la *CE* disminuye de forma significativa, y se mantuvo en rangos más estables entre 66.98 y $67.94 \mu\text{S cm}^{-1}$ para el MET y de 63.33 a $63.75 \mu\text{S cm}^{-1}$ en el uso de pastizal, lo que se considera una *CE* muy reducida.



MET = Matorral Espinoso Tamaulipeco. Las letras diferentes representan diferencias significativas.

Figura 4. Valores de la *CE* por profundidad en los dos usos de suelo.

Propiedades físicas

El ANOVA de dos vías para las variables indicó que solo *DA* y *P* presentaron diferencias significativas entre usos de suelo ($p < 0.05$); entre intervalos de profundidad solo variaron los contenidos de arenas y limos; y en su interacción, ninguna variable evidenció diferencias significativas ($p > 0.05$) (Cuadro 4). La prueba *U* de *Mann-Whitney* evidenció que únicamente *RMP* tuvo diferencias altamente significativas entre usos de suelo ($p < 0.01$).

Cuadro 4. ANOVA de dos vías para usos de suelo (MET y Pastizal), profundidades (0-5, 5-15, 15-30, 30-60 y 60-100 cm) y su interacción en las propiedades físicas de un Vertisol.

Variable	Usos	Profundidad	Usos* Profundidad	Levene
<i>DA</i> (g cm ⁻³)	29.10** (<0.01)	0.67ns (>0.05)	1.56ns (>0.05)	0.487
<i>P</i> (%)	29.10 (<0.01)**	0.67ns (>0.05)	1.56ns (>0.05)	0.487
Arena (%)	1.05 (0.58)ns	0.87** (<0.01)	2.76ns (>0.05)	0.126
Limo (%)	0.01 (0.68)ns	7.74** (<0.01)	1.54ns (>0.05)	0.107

DA = Densidad aparente; *P* = Porosidad; ns = Diferencias no significativas ($p > 0.05$); ** Diferencias altamente significativas ($p \leq 0.01$); entre paréntesis se indica el valor de *p*.

Los valores de la *DA* y *RMP* del Pastizal, en particular, se incrementaron de forma importante con respecto al Matorral; mientras que la porosidad se redujo 7 % en promedio. Ambos usos de suelo fueron similares en el contenido granulométrico, y se clasificaron como clase textural franco-arcilloso (Cuadro 5).

Cuadro 5. Valores medios de las variables físicas entre usos de suelo ($n=20$).

Variable	MET	Pastizal
<i>DA</i> (g cm^{-3})	1.09±0.15	1.34±0.14
<i>P</i> (%)	57.40±5.99	47.84±5.34
<i>RMP</i> (kg cm^2)*	3.31±1.84	15.73±14.9
Arena (%)	24.57±4.66	23.40±2.98
Arcilla (%)*	32.01±3.14	33.05±5.68
Limo (%)	43.42±4.99	43.55±3.69

DA = Densidad aparente; *P* = Porosidad; *RMP* = Resistencia mecánica a la penetración.

En el Cuadro 6 se reúnen los resultados de la prueba de *Kruskal-Wallis* de *RMP* y porcentaje de arcilla, en el MET solo esta última fue similar entre los diferentes intervalos de profundidad ($p > 0.05$); mientras que en el Pastizal, ambas variables fueron significativas entre profundidades ($p < 0.05$).

Cuadro 6. Estadísticos del análisis de varianza y prueba de *Kruskal-Wallis* de las variables físicas entre profundidades ($n=4$).

Uso	Variable	Chi-cuadrado	Valor <i>p</i>
MET	<i>RMP</i>	16.473	0.002

	Arcilla	9.073	0.059
Pastizal	<i>RMP</i>	10.497	0.033
	Arcilla	13.234	0.010

MET = Matorral Espinoso Tamaulipeco; *RMP* = Resistencia mecánica a la penetración.

Los valores de *DA* fueron ligeramente más altos en el área de Pastizal, respecto al MET para todas las profundidades analizadas; en el Pastizal varió de 1.26 (5-15 cm) a 1.45 g cm⁻³ (0-5 cm); los registros en el MET fueron de 1.02 (0-5 cm) a 1.19 g cm⁻³ (30-60 cm). La porosidad en el MET fluctuó de 53.65 a 60.15 % y en el Pastizal fue de 43.41 a 50.74 % (Cuadro 7).

Cuadro 7. Valores medios de la densidad aparente y porosidad del suelo en los intervalos de profundidad y usos de suelo analizados.

Intervalo de profundidad (cm)	MET		Pastizal	
	<i>DA</i> (g cm ⁻³)	<i>P</i> (%)	<i>DA</i> (g cm ⁻³)	<i>P</i> (%)
0-5	1.02	60.15	1.45	43.41
5-15	1.17	54.45	1.26	50.74
15-30	1.04	59.31	1.29	49.65
30-60	1.19	53.65	1.35	47.17
60-100	1.04	59.44	1.33	48.22
Promedio	1.09	57.4	1.33	47.83

MET = Matorral Espinoso Tamaulipeco; *DA* = Densidad aparente; *P* = Porosidad.

Las composiciones granulométricas de arena, arcilla y limo se muestran en el Cuadro 8 para cada profundidad en ambos usos de suelo, así como su clase textural correspondiente.

Cuadro 8. Clasificación de la textura en cada profundidad por uso de suelo.

Intervalo de profundidad (cm)	MET				Pastizal			
	% Arena	% Arcilla	% Limo	Clase textural	% Arena	% Arcilla	% Limo	Clase textural
0-5	21.76	28.29	49.95	Franco arcilloso	26.58	26.42	47	Franco
5-15	22.35	31.56	46.09	Franco arcilloso	23.99	32.51	43.5	Franco arcilloso
15-30	26.58	32.56	40.86	Franco arcilloso	23.4	32.51	44.09	Franco arcilloso
30-60	27.08	34.06	38.86	Franco arcilloso	23.31	35.01	41.68	Franco arcilloso
60-100	26.51	33.92	39.57	Franco arcilloso	19.72	38.78	41.5	Franco arcillo limosa

MET = Matorral Espinoso Tamaulipeco.

Discusión

En el ámbito mundial, las modificaciones de las coberturas forestales a usos pecuarios son considerados como uno de los factores con mayor afectación sobre la condición del suelo (Lalthakimi et al., 2023); no obstante, dichas alteraciones están sujetas al tipo de suelo, uso de suelo y prácticas de manejo que se implementen. En este sentido, los resultados del presente estudio permiten inferir que la conversión de matorral a pastizal no provoca un cambio significativo en las propiedades químicas del Vertisol, lo que se ha referido previamente, cuando se señala que la conversión de ecosistemas a pastizal es uno de los usos de suelo con poco o nulo efecto sobre los contenidos de materia orgánica, Carbono, pH y *CE* del suelo (Martínez et al., 2023; Yáñez et al., 2018).

Específicamente, los resultados de *MOS* del presente estudio fueron de 5.98 y 5.36 % hasta los 30 cm de profundidad para el MET y el Pastizal, respectivamente; lo que se considera alto y se atribuye a la incorporación de los residuos de cosecha, a las tasas de mineralización y humificación en el suelo y que, a su vez, repercute en los contenidos de %C (Montoya-Jasso *et al.*, 2022). Lo anterior se ha discutido por Yáñez *et al.* (2018) con el mismo tipo y usos de suelo (6.1 % en MET y 4.6 % en Pastizal). Cabe destacar que, aunque el ganado en el lugar consume gran parte de la fuente de materia orgánica del suelo (hierbas y arbustos), estas variables no revelaron diferencias entre los usos de suelo evaluados, ya que en cierto grado puede ocurrir una compensación por la acumulación de orina y las heces del ganado en el suelo (Martínez *et al.*, 2023; Tácuna *et al.*, 2015). De igual forma, Yáñez *et al.* (2018) mencionan que el Vertisol, al poseer una textura rica en arcillas, suele retener más materia orgánica y %C, lo cual se refleja en ambos usos de suelo.

Los contenidos más altos de Carbono orgánico en ambos usos de suelo (4.39 y 4.27 % para el MET y Pastizal, respectivamente) se registraron en la profundidad de 0-5 cm, debido a que en esta profundidad se verifica la mayor acumulación de materia orgánica y, por ende, se presenta la mineralización más alta (Cantú & Luna, 2022).

Sin embargo, la dinámica del %C puede estar determinada por otros factores ambientales como el tipo de vegetación y el manejo que se le da al ganado (Conforti *et al.*, 2016; Luna *et al.*, 2022b). Al respecto, Bautista-García *et al.* (2022) señalan que el pastoreo rotacional controlado garantiza la restauración de la fertilidad de los suelos y la productividad del sitio en el tiempo, ya que este sistema de manejo promueve la cobertura vegetal, que conlleva a mantener entradas constantes de materia orgánica al suelo y, a su vez, mantiene estable las tasas de mineralización.

En cuanto a los valores de pH, en ambos usos de suelo variaron en promedio de 7.3 a 7.7, lo que indica que es un suelo medianamente alcalino; esto concuerda con los

resultados de Córdova-Sánchez et al. (2023), quienes determinaron la misma clasificación para un Vertisol. De acuerdo con la valoración de la NOM-021-RECNAT-2000 (2001) y Woerner (1989), la conductividad eléctrica fue muy baja.

Por otra parte, las propiedades físicas como densidad aparente, porosidad y resistencia mecánica a la penetración son las más sensibles a la presencia de ganado, pues este factor puede incrementarlas significativamente en comparación con lo que ocurre en el uso forestal, lo que se atribuye al pisoteo constante del ganado (Rodríguez et al., 2024). Lo antepuesto coincide con lo determinado en el presente estudio, en el que dichas variables fueron afectadas después de la conversión del matorral a pastizal.

Asimismo, Bellora et al. (2023), Villazón et al. (2015) y Zemke et al. (2019) señalan que la cobertura aérea y del suelo desempeñan un papel importante en la humedad edáfica, la densidad aparente, porosidad y dureza del suelo, lo cual se refleja en los resultados del Pastizal; ya que, al tener insuficiente cubierta vegetal, no existe protección para amortiguar los efectos del pisoteo del ganado, lo que resulta en cambios significativos en la física del suelo. En particular, en ambos usos de suelo en los primeros cinco centímetros se registraron los valores más altos en la resistencia mecánica a la penetración y densidad aparente del suelo, que de acuerdo con Woerner (1989) pasó de ser muy baja en el Matorral ($<1.20 \text{ g cm}^{-3}$) a medianamente baja para el pastizal ($>1.30 \text{ g cm}^{-3}$), registros que igualmente no limitan significativamente el establecimiento de las plantas.

No obstante, Cid-Lazo et al. (2021) indican que la eliminación de la vegetación impacta directamente sobre la humedad del Vertisol y genera cambios inmediatos sobre la densidad aparente, la porosidad y la *RMP* del suelo. Aunado a lo anterior, Álvarez et al. (2012) determinaron que el uso de maquinaria en pastizales puede ser otro factor que determine la dinámica de las características del suelo. Cherubin et al. (2016) y Mitchell et al. (2017) señalan que estas variables mejoran con el manejo de coberturas, aumento en los ciclos de rotación y al disminuir la carga animal; además,

una alternativa para el mejoramiento de las propiedades puede ser el uso y manejo de abonos orgánicos (Bolo *et al.*, 2020).

En relación con la textura del suelo, Valdez-Galvez *et al.* (2023) la describen como una propiedad que resulta difícil que el cambio de uso de suelo la modifique a corto y mediano plazo bajo diferentes prácticas de manejo poco intensivas; por lo que en este contexto, se puede inferir que el Vertisol mantiene en forma su estabilidad granulométrica (Franco-Franco arcillosa) bajo un sistema de uso de pastizal; sin embargo, los primeros centímetros de suelo están sujetos a alteraciones debido a las intervenciones erosivas derivadas de la falta de cobertura y el pisoteo del ganado.

Es común realizar los análisis del suelo dentro de los primeros 40 cm debido a que se considera que es donde las propiedades edáficas son más susceptibles a modificaciones por las alteraciones que se presenten en la vegetación y la implementación de cambios de uso de suelo (Gómez *et al.*, 2021; Gross & Harrison, 2019; Guevara & Vargas, 2021); sin embargo, profundizar más en estas evaluaciones permite identificar la respuesta de las propiedades físicas y químicas del suelo ante cualquier alteración y determinar, de manera más puntual, su grado y profundidad de afectación.

Conclusiones

En el presente estudio, las propiedades físicas del Vertisol evidencian mayor impacto tras la conversión del Matorral Espinoso Tamaulipeco a Pastizal, mientras que las químicas no evidencian alteraciones significativas entre usos del suelo, pero sí entre profundidades.

La *DA*, porosidad y *RMP* son las más susceptibles a la conversión de Matorral a Pastizal; la *DA* y *RMP* en particular, se incrementan 23 y >400 %, respectivamente; y la porosidad disminuye 13 %. Los cambios pueden relacionarse con la presencia de ganado en el área de Pastizal, donde el pisoteo constante ha modificado considerablemente la estructura del suelo.

Los contenidos de *MOS* y %C en ambos usos de suelo indican una tendencia de disminución conforme se incrementa la profundidad.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por la beca otorgada al primer autor para la realización de la presente investigación.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Contribución por autor

Jorge Alexis Luna Robles: desarrollo de investigación en campo y escritorio; Israel Cantú Silva: revisiones y correcciones del escrito y análisis estadístico; Erik Orlando Luna Robles: revisiones y correcciones del escrito y análisis estadístico; Silvia Janeth Bejar Pulido: revisiones y correcciones del escrito.

Referencias

- Álvarez, C. R., Fernández, P. L., y Taboada, M. A. (2012). Relación de la inestabilidad estructural con el manejo y propiedades de los suelos de la región pampeana. *Ciencia del Suelo*, 30(2), 173-178. https://www.researchgate.net/publication/260773628_Relacion_de_la_inestabilidad_estructural_con_el_manejo_y_propiedades_de_los_suelos_de_la_region_pampeana
- Avendaño-Leadem, D. F., Cedeño-Montoya, B. C., y Arroyo-Zeledón, M. S. (2020). Integrando el concepto de servicios ecosistémicos en el ordenamiento territorial. *Revista Geográfica de América Central*, 65(2), 63-90. <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.65-2.3>
- Bautista-García, G., López-Ortiz, S., Murillo-Cuevas, F. D., Pérez-Hernández, P., Ortega-Jiménez, E., y López-Collado, C. J. (2022). Estudio preliminar del pastoreo racional Voisin como herramienta para mejorar las condiciones del suelo después del pastoreo extensivo. *Terra Latinoamericana*, 40, Artículo e893. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.893>
- Bellora, G., Lozano, L. A., Soracco, C. G., Guilino, F., Polich, N., Salazar, M. P., Villareal, R., y Palancar, T. (2023). Tránsito repetido sobre la misma huella: efecto en las propiedades físicas de un argiudol típico. *Ciencia del suelo*, 41(1), 1-10. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/223123/CONICET_Digital_Nro.7bf096cf-f05e-45d8-836e-83200d14a601_B.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Berlanga S., V., y Rubio H., M. J. (2012). Clasificación de pruebas no paramétricas. Cómo aplicarlas en SPSS. *REIRE Revista d'Innovació i Recerca en Educació*, 5(2), 101-113. <https://www.raco.cat/index.php/reire/article/download/255793/342836>
- Bolo V., J. D., Reynoso Z., A., Cosme De la C., R. C., Arone G., G., y Calderón M., C. (2020). La aplicación combinada de abonos orgánicos mejora las propiedades físicas del suelo asociado al cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Scientia Agropecuaria*, 11(3), 401-408. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.03.12>

- Cantú S., I., & Bejar P., S. J. (2024). Impacts of land use change on carbon and nitrogen stocks in an Andosol in Michoacan, Mexico. *Egyptian Journal of Soil Science*, 64(3), 1305-1314. https://ejss.journals.ekb.eg/article_362245.html
- Cantú S., I., & Luna R., E. O. (2022). Nitrogen storage and C:N ratio of an Umbrisol under forest management in Durango, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(72), 82-111. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i72.1055>
- Cantú S., I., y Yáñez D., M. I. (2018). Efecto del cambio de uso de suelo en el contenido del carbono orgánico y nitrógeno del suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(45), 122-150. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i45.138>
- Cherubin, M. R., Karlen, D. L., Franco, A. L. C., Tormena, C. A., Cerri, C. E. P., Davies, C. A., & Cerri, C. C. (2016). Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. *Geoderma*, 267, 156-168. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.004>
- Cid-Lazo, G., López-Seijas, T., Herrera-Puebla, J., y González-Robaina, F. (2021). Variación de la Densidad Aparente para diferentes contenidos de agua en suelos cubanos. *Revista Ingeniería Agrícola*, 11(2), 3-9. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=586266250001>
- Comisión Nacional Forestal. (2017). *Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Procedimientos de muestreo. Versión 19.0*. Comisión Nacional Forestal. https://www.conafor.gob.mx/apoyos/docs/externos/2022/DocumentosMetodologicos/2019/ANEXO_Procedimientos_de_muestreo_2019.pdf
- Conforti, M., Lucà, F., Scarciglia, F., Matteucci, G., & Buttafuoco, G. (2016). Soil carbon stock in relation to soil properties and landscape position in a forest ecosystem of southern Italy (Calabria region). *Catena*, 144, 23-33. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.04.023>
- Córdova-Sánchez, A., Obrador-Olán, J. J., Castelán-Estrada, M., Palma-López, D. J., García-López, E., Villanueva-López, G., y Pascual-Córdova, G. (2023). Densidad de longitud de raíces finas de teca, en un Vertisol Léptico de Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(2), Artículo e3417. <https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3417>

- Dumas, P., Wirsenius, S., Searchinger, T., Andrieu, N., y Vogt-Schilb, A. (2022). *Opciones de la agricultura y los cambios del uso del suelo para alcanzar cero emisiones netas en América Latina y el Caribe* (Documento de trabajo del BID N° IDB-WP-01377). Banco Interamericano de Desarrollo. <https://publications.iadb.org/es/options-achieve-net-zero-emissions-agriculture-and-land-use-changes-latin-america-and-caribbean>
- El-Ghamry, A. M., Mosa, A. A., El-Ramady, H. R., Ghazi, D. A., El-Sherpiny, M. A., & Helmy, A. A. (2024). Climate change and the possibility of tea production in the Egyptian soils. *Egyptian Journal of Soil Science*, 64(2), 373-383. https://ejss.journals.ekb.eg/article_336374.html
- Escandón C., J., Ordóñez D., J. A. B., Nieto de Pascual P., M. C. del C., y Ordóñez D., M. de J. (2018). Cambio en la cobertura vegetal y uso del suelo del 2000 al 2009 en Morelos, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(46), 27-51. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.135>
- Flores T., C. E., y Flores C., K. L. (2021). Pruebas para comprobar la normalidad de datos en procesos productivos: Anderson-Darling, Ryan-Joiner, Shapiro-Wilk y Kolmogórov-Smirnov. *Societas Revista de Ciencias Sociales y Humanísticas*, 23(2), 83-106. <https://revistas.up.ac.pa/index.php/societas/article/view/2302/2137>
- Gómez, J. D., Etchevers, J. D., Monterroso, A. I., Campo, J., Paustian, K., y Asensio, C. (2021). Carbono orgánico del suelo y su relación con la biomasa radical de *Quercus* sp. *Madera y Bosques*, 27(4), Artículo e2742445. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2742445>
- Gross, C. D., & Harrison, R. B. (2019). The case for digging deeper: soil organic carbon storage, dynamics, and controls in our changing world. *Soil Systems*, 3(2), 28. <https://doi.org/10.3390/soilsystems3020028>
- Guevara, M., y Vargas, R. (2021). Predicción de carbono orgánico en los suelos de México a 1 m de profundidad y 90 m de resolución espacial (1999-2009). *Terra Latinoamericana*, 39, Artículo e1241. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.1241>

Hernández-Cavazos, M. C., Sandoval-García, R., Molina-Guerra, V. M., y Alanís-Rodríguez, E. (2023). Análisis multitemporal del cambio de uso de suelo en el municipio de Linares, Nuevo León. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(2), Artículo e3743. <https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3743>

Herrick, J. E., & Jones, T. L. (2002). A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 1320-1324. <https://www.ars.usda.gov/ARUserFiles/30501000/HerrickJones2002Penetrometer.pdf>

International Business Machines. (2020, April 16). SPSS Statistics 22.0 Available for Download (Version 22.0) [Software]. IBM SPSS Statistics. <https://www.ibm.com/support/pages/spss-statistics-220-available-download>

International Union of Soil Sciences. (2015). *World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Update 2015* (World Soil Resources Reports No. 106). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/bcdecec7-f45f-4dc5-beb1-97022d29fab4/content>

Kouassi, J.-L., Gyau, A., Diby, L., Bene, Y., & Kouamé, C. (2021). Assessing land use and land cover change and farmers' perceptions of deforestation and land degradation in South-West Côte d'Ivoire, West Africa. *Land*, 10(4), 429. <https://doi.org/10.3390/land10040429>

Kumar, S., Meena, R. S., Sheoran, S., Jangir, C. K., Jhariya, M. K., Banerjee, A., & Raj, A. (2022). Remote sensing for agriculture and resource management. In M. K. Jhariya, R. S. Meena & S. N. Meena (Eds.), *Natural Resources Conservation and Advances for Sustainability* (pp. 91-135). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822976-7.00012-0>

Lalthakimi, C., Singh, N. S., Vanlalfakawma, D. C., Upadhyay, K. K., & Tripathi, S. K. (2023). Land use change effects on soil physical and biochemical properties during wet and dry season in forest and shifting cultivation (*Jhum*) sites in Northeast India. *Environment and Ecology*, 41(4A), 2584-2594.

<https://environmentandecology.com/wp-content/uploads/2024/04/MS26-Land-Use-Change-Effects-on-Soil-Physical-and-.pdf>

Luna R., E. O., Cantú S., I., y Bejar P., S. J. (2022a). Efectos del cambio climático en la gestión sostenible del recurso suelo. *Tecnociencia Chihuahua*, 16(3), Artículo e1097. <https://doi.org/10.54167/tch.v16i3.1097>

Luna R., E. O., Cantú-Silva, I., & Bejar P., S. J. (2022b). Soil organic carbon changes in an Umbrisol under different silvicultural treatments in a temperate forest in Northwestern Mexico. *Journal of Sustainable Forestry*, 42(4), 368-383. <https://doi.org/10.1080/10549811.2022.2043904>

Luna-Robles, E. O., Cantú-Silva, I., González-Rodríguez, H., Marmolejo-Monsiváis, J., Yáñez-Díaz, M. I., Hernández, F. J., & Bejar-Pulido, S. J. (2021). Effects of forest management on the physical and hydrological properties of an Umbrisol in the Sierra Madre Occidental. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales*, 27(1), 19-32. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.11.085>

Martínez S., R. A., Cantú S., I., Yáñez D., M. I., González R., H., y Béjar P., S. J. (2023). Reservorio de carbono y nitrógeno en un suelo Cambisol bajo dos usos de suelo en Linares, Nuevo León, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 14(79), 4-30. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i79.1339>

Mitchell, J. P., Shrestha, A., Mathesius, K., Scow, K. M., Southard, R. J., Haney, R. L., Schmidt, R., Munk, D. S., & Horwath, W. R. (2017). Cover cropping and no-tillage improve soil health in an arid irrigated cropping system in California's San Joaquin Valley, USA. *Soil and Tillage Research*, 165, 325-335. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.09.001>

Montoya-Jasso, V. M., Ordaz-Chaparro, V. M., Benedicto-Valdés, G. S., Ojeda-Trejo, E., y Gutiérrez-Castorena, E. V. (2022). Atributos químicos para definir la aptitud agrícola de vertisoles del bajío mexicano. *Suelos Ecuatoriales*, 52(1 y 2), 130-136. https://www.researchgate.net/publication/367380302_ATRIBUTOS_QUIMICOS_PARA_DEFINIR_LA_APTITUD_AGRICOLA_DE_VERTISOLES_DEL_BAJIO_MEXICANO

- NOM-021-RECNAT-2000. (2001, 14 de agosto). NORMA Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación, Segunda Sección, 31 de diciembre de 2002. <https://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- Rodríguez R., I., Luna R., E. O., Aguirre C., C. E., Bejar P., S. J., y Álvarez F., D. O. (2024). Evaluación de las propiedades físicas e hidrológicas de un Vertisol con diferentes usos de suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 15(84), 105-131. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i84.1463>
- Salamanca A., W. F., Bonilla C., C. R., y Sánchez, M. S. (2004). Evaluación de seis abonos verdes en un vertisol ústico en condiciones del Valle del Cauca. *Acta Agronómica*, 53(3), 55-60. https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/99
- Silva P., A., Rodríguez R., B. A., y Vargas A., N. (2020). Análisis textural en la regulación de funciones ecosistémicas en sistemas agroforestales de un oxisol de Piedemonte Llanero en época seca, Colombia. *IDESIA*, 38(3), 43-51. <https://revistas.uta.cl/pdf/322/6.pdf>
- Tácuna, R. E., Aguirre, L., y Flores, E. R. (2015). Influencia de la revegetación con especies nativas y la incorporación de materia orgánica en la recuperación de pastizales degradados. *Ecología Aplicada*, 14(2), 191-200. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1726-22162015000200011&script=sci_arttext
- Torres G., C. A., Gutiérrez C., M. del C., Ortiz S., C. A., y Gutiérrez C., E. V. (2016). Manejo agronómico de los Vertisoles en México: una revisión. *Terra Latinoamericana*, 34, 457-466. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n4/2395-8030-tl-34-04-00457.pdf>
- Valdez-Galvez, M. J., Coronado-González, Y. U., y Camarena-Gómez, B. O. (2023). Degradación ambiental y sustentabilidad en áreas con prácticas agrícolas intensivas de Sonora, México. *Scientia et PRAXIS*, 3(5), 26-50.

- https://www.researchgate.net/publication/371797464_Degradacion_ambiental_y_sustentabilidad_en_areas_con_practicas_agricolas_intensivas_de_Sonora_Mexico
- Veni, V. G., Srinivasarao, C., Reddy, K. S., Sharma, K. L., & Rai, A. (2020). Soil health and climate change. In M. N. V. Prasad & M. Pietrzykowski (Eds.), *Climate Change and Soil Interactions* (pp. 751-767). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818032-7.00026-6>
- Villazón, J. A., Martín, G., Rodríguez, Y., y Cobo, Y. (2015). Resistencia a la penetración en un Vertisol Crómico con diferentes usos, manejos y sitios de muestreo. *Pastos y Forrajes*, 38(2), 162-169. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0864-03942015000200002&script=sci_arttext&lng=pt
- Wang, K., Qi, Y., Guo, W., Zhang, J., & Chang, Q. (2021). Retrieval and mapping of soil organic carbon using sentinel-2A spectral images from bare cropland in autumn. *Remote Sensing*, 13(6), 1072. <https://doi.org/10.3390/rs13061072>
- Woerner P., M. (1989). *Métodos químicos para el análisis de suelos calizos de zonas áridas y semiáridas*. Universidad Autónoma de Nuevo León. https://books.google.com.mx/books/about/M%C3%A9todos_qu%C3%ADmicos_para_el_an%C3%A1lisis_de.html?id=FW61YgEACAAJ&redir_esc=y
- Yáñez D., M. I., Cantú S., I., y González R., H. (2018). Efecto del cambio de uso de suelo en las propiedades químicas de un vertisol. *Terra Latinoamericana*, 36, 369-379. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.349>
- Zemke, J. J., Enderling, M., Klein, A., & Skubski, M. (2019). The influence of soil compaction on runoff formation. A case study focusing on skid trails at forested Andosol sites. *Geosciences*, 9(5), 204. <https://doi.org/10.3390/geosciences9050204>



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.