



DOI: 10.29298/rmcf.v15i84.1463

Artículo de investigación

## Evaluación de las propiedades físicas e hidrológicas de un Vertisol con diferentes usos de suelo

### Evaluation of the physical and hydrological properties of a Vertisol with different land use

Isaac Rodríguez Reta<sup>1</sup>, Erik Orlando Luna Robles<sup>1\*</sup>, Carlos Enrique Aguirre Calderón<sup>1</sup>, Silvia Janeth Bejar Pulido<sup>1</sup>, David Orlando Álvarez Favela<sup>1</sup>

Fecha de recepción/Reception date: 26 de enero de 2024  
Fecha de aceptación/Acceptance date: 5 de abril del 2024

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de El Salto. México.

\*Autor para correspondencia; correo-e: eranroka@hotmail.com

\*Corresponding author; e-mail: eranroka@hotmail.com

#### Resumen

Los cambios de uso de suelo afectan sus características y servicios ecosistémicos, como la regulación de los procesos hidrológicos. El objetivo del presente estudio fue evaluar las propiedades físicas e hidrológicas de un Vertisol con diferentes usos de suelo en la región El Salto, Durango. Se compararon tres tipos de uso: forestal, pecuario y agrícola mediante pruebas de infiltración por el método del infiltrómetro de doble anillo; en cada uso de suelo, se extrajeron ocho muestras inalteradas para determinar la permeabilidad ( $K_s$ ), ocho para la densidad aparente ( $DA$ ) y la porosidad total del suelo ( $P\%$ ); todo en dos intervalos de profundidad (cuatro de 0-10 cm y cuatro de 10-20 cm). Los resultados indican un incremento  $>100\%$  en la infiltración inicial ( $I_i$ ), capacidad de infiltración del suelo ( $I_b$ ) y lámina total infiltrada ( $I_a$ ) en el uso agrícola, respecto al forestal. El uso pecuario registró los valores más bajos en  $I_i$ ,  $I_b$  e  $I_a$ . El ANOVA bifactorial evidenció que todas las variables presentaron diferencias significativas entre usos de suelo. Los valores medios de  $DA$  fueron de 0.82 a 1.58 g cm<sup>-3</sup>; la  $P\%$  promedio fue de 53 %. Los usos agrícola y pecuario, en ambas profundidades, tuvieron los valores más bajos y altos de  $DA$  y  $P\%$ , respectivamente. La  $K_s$  del área forestal fue de 0.0011 cm s<sup>-1</sup> considerada como muy baja. La eliminación de la vegetación y las modificaciones de las propiedades físicas del suelo por los cambios de uso influyeron significativamente sobre la infiltración y permeabilidad.

**Palabras clave:** Densidad aparente, forestal, infiltración, permeabilidad, porosidad, suelo.

#### Abstract

Land use changes can affect soil characteristics and ecosystem services such as the regulation of hydrological processes. The objective of this study was to evaluate the physical and hydrological properties of a Vertisol with different types of land use in the *El Salto, Durango* region. Three types were evaluated: forest, livestock and agriculture, carrying out infiltration tests using the double ring infiltrometer method. Likewise, in each land use, eight unaltered samples were extracted to determine permeability ( $K_s$ ), eight samples for bulk density ( $BD$ ) and total soil porosity ( $P\%$ ), all in two depth ranges (four from 0-10 cm and four from 10-20 cm). Results showed an increase of more than 100 % in initial infiltration ( $I_i$ ), soil infiltration capacity ( $I_b$ ) and total infiltrated layer ( $I_a$ ) in agricultural use compared to forest use. Livestock use presented the lowest values in  $I_i$ ,  $I_b$  and  $I_a$ . The

two-factor ANOVA showed that all variables presented significant differences between land uses. The mean *BD* values ranged from 0.82 to 1.58 g cm<sup>-3</sup>, while the average *P%* was 53 %. Agricultural and livestock uses presented the lowest and highest values of *BD* and *P%* of the soil respectively at both depths. The *Ks* of the forest area was 0.0011 cm s<sup>-1</sup>, considered very low. The elimination of vegetation and the modifications of the physical properties of the soil due to changes in land use significantly influenced infiltration and permeability.

**Key words:** Bulk density, forest, infiltration, permeability, porosity, soil.

## Introducción

El suelo es un recurso natural complejo, diverso y dinámico, considerado como base para el crecimiento y desarrollo de organismos y microorganismos (Burbano-Orjuela, 2016; Kopittke *et al.*, 2019). Provee múltiples servicios ecosistémicos que son indispensables para asegurar el bienestar del ser humano, los cuales se pueden clasificar en tres categorías principales: funciones de provisión y sostenimiento, reguladoras y culturales (Luna *et al.*, 2022). En este sentido, el suelo posee diferentes propiedades físicas, hidrológicas, químicas y biológicas, las cuales permiten valorar indirectamente la calidad y funcionamiento de los sistemas ambientales.

No obstante, dichas características están sujetas a los escenarios climáticos (lluvia y sequía, principalmente), tipo de ecosistema, así como del uso y prácticas de manejo; por lo que, un desbalance en cualquiera de ellos tiene una repercusión inmediata sobre su condición y los servicios ecosistémicos asociados (Bai *et al.*, 2018).

En el ámbito mundial, la transformación de bosques a tierras de uso agropecuario es una de las acciones más serias que afectan negativamente la calidad del suelo, y además, contribuye significativamente en los procesos de cambio climático a nivel regional (Babin *et al.*, 2019; Lalthakimi *et al.*, 2023). En

general, los cambios de uso de suelo modifican las propiedades físicas (densidad aparente, porosidad, cobertura, estructura, textura, entre otras), y en consecuencia, se alteran las aportaciones hídricas (recarga de acuíferos), debido a que estas características del suelo regulan la capacidad de infiltración, la escorrentía superficial y los procesos de erosión (Yáñez-Díaz *et al.*, 2019).

De acuerdo con Galicia *et al.* (2018) en México, los bosques templados son importantes para la recarga de los mantos acuíferos, ya que están situados en 77 de las 110 principales zonas de recarga y purificación de acuíferos (total de 653), lo que coincide con localidades de gran concentración poblacional (>30 millones de habitantes), que cubren las áreas metropolitanas de la Ciudad de México, Guadalajara y Puebla (INEGI, 2010). No obstante, gran parte de esos ecosistemas tienen problemas de fragmentación debido al cambio de uso de suelo y a las malas elecciones de prácticas de manejo, lo cual aumenta el escurrimiento superficial, la pérdida de suelo y la disponibilidad del recurso hídrico (Návar y Synnott, 2000).

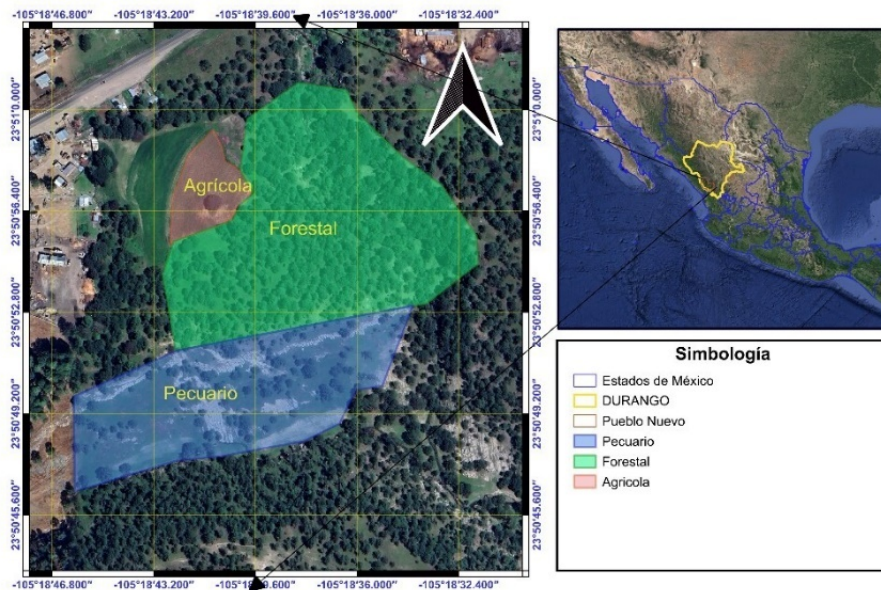
Dueñez-Alanís *et al.* (2006) señalan que los suelos del estado de Durango presentan una marcada fragilidad o vulnerabilidad ante las malas prácticas agrícolas y pecuarias, que incrementan la escorrentía superficial, la erosión del suelo y reducen la capacidad de infiltración. En este sentido, la transición de áreas forestales a zonas de cultivo y ganadería extensiva ha aumentado, progresivamente, en la región de estudio, la cual se ubica en la localidad José María Morelos, en la región El Salto, Durango; donde los daños ya observan en la capacidad de infiltración, captación de agua y productividad del ecosistema.

La presente investigación tuvo como objetivo determinar el efecto del cambio de uso de suelo sobre las propiedades físicas e hidrológicas de un Vertisol a dos intervalos de profundidad en bosques de Durango, México; y con ello generar información que pueda utilizarse en la toma de decisiones y criterios técnicos del manejo forestal, agrícola y pecuario de la región.

## Materiales y Métodos

### Área de estudio

El área de estudio se ubica en el macizo montañoso Sierra Madre Occidental del estado de Durango, en el ejido José María Morelos, municipio Pueblo Nuevo; entre las coordenadas  $23^{\circ}50'57''$  N y  $-105^{\circ}18'41''$  O (Figura 1).



**Figura 1.** Localización del área de estudio.

La vegetación dominante está integrada por *Pinus cooperi* C. E. Blanco, *P. leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham., *P. teocote* Schltdl. & Cham., *P. engelmannii* Carrière, *Juniperus deppeana* Steud., *Quercus sideroxyla* Bonpl. y *Q. durifolia* Seemen (González-Elizondo *et al.*, 2012).

La precipitación media anual varía de 600 a 1 000 mm en las partes más secas hasta las más húmedas (INEGI, 2010; Inegi, 2017).

El tipo de suelo dominante corresponde al Vertisol, el cual es oscuro, carece de horizontes distintivos, con una profundidad media de 50 cm; presenta 30 % o más de arcilla, mediana pedregosidad y grietas que se abren y cierran periódicamente; además estos suelos tienen una alta fertilidad natural, por lo que comúnmente se destinan a usos agrícolas (Sotelo *et al.*, 2008).

## **Usos de suelo**

Se incluyeron tres usos de suelo, que se describen a continuación:

**a) Uso forestal (7 ha):** bosque abierto de pino-encino, con presencia de *P. cooperi*, *P. engelmannii*, *P. teocote*, *Quercus durifolia* y *Q. sideroxyla*. Los individuos son de porte medio con diámetro normal promedio de 30-35 cm y una altura de 12-15 m. Existe un estrato inferior conformado, principalmente, por *Quercus striatula* Trel. y especies herbáceas anuales entre las que sobresale *Muhlenbergia porteri* Scribn. La pendiente es muy suave, con exposición predominante al sureste. La hojarasca es escasa, y se ubica en capas delgadas en torno a los árboles presentes. Existe una capa delgada del mantillo de 1 a 1.5 cm en promedio. El área está bajo manejo con el Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI),

mediante la selección de árboles individuales; hay poca regeneración y se observa en manchones.

**b) Uso pecuario (4 ha):** área desde hace más de 50 años con ganadería extensiva. El ganado se conforma por 80 % bovinos de doble propósito y 20 % equinos.

**c) Uso agrícola (1.2 ha):** área con más de 50 años con cultivos de avena, maíz, calabaza y, con menor frecuencia, frijol; son de temporal (mayo a noviembre). Se acostumbra hacer un barbecho mecanizado con tractor agrícola o con animales de tiro en enero o febrero. Los experimentos se realizaron en las primeras semanas de mayo de 2023.

## Densidad aparente y porosidad del suelo

En cada uso de suelo se recolectaron de manera aleatoria, ocho muestras inalteradas de suelo a dos profundidades (cuatro muestras de 0 a 10 cm y cuatro de 10 a 20 cm), por medio de cilindros metálicos de 5 cm de diámetro por 5 cm de longitud. Posteriormente, las muestras se secaron en una estufa de aire forzado (*Yamato Scientific America Inc.*<sup>®</sup>, modelo DNE910) de 24 a 48 horas a 105 °C. Para la densidad aparente y porosidad se aplicaron las siguientes ecuaciones (Woerner, 1989; Yáñez-Díaz *et al.*, 2019):

### a) Densidad aparente

$$DA = \frac{P}{VC} \quad (1)$$

Donde:

$DA$  = Densidad aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ )

$P$  = Peso seco de la muestra con el cilindro (g)

$VC$  = Volumen del cilindro ( $\text{cm}^3$ )

### **b) Porosidad**

$$P\% = \left[ 1 - \left( \frac{DA}{2.65} \right) \right] \times 100 \quad (2)$$

Donde:

$P\%$  = Porosidad expresada en porcentaje

$DA$  = Densidad aparente del suelo ( $\text{g cm}^{-3}$ )

2.65 = Densidad de partícula asumida

## **Permeabilidad**

La permeabilidad del suelo ( $K_s$ ) se determinó mediante la extracción de muestras de suelo inalteradas (cuatro por profundidad) de manera aleatoria con dos cilindros metálicos de igual tamaño (5 cm de altura y 3.7 cm de diámetro) y volumen ( $53.76 \text{ cm}^3$ ); las muestras fueron saturadas por 24

horas, para luego medir el tiempo en que una columna de agua atraviesa la columna de suelo saturado. La permeabilidad se obtuvo con la siguiente fórmula (Sánchez, 2015; Yáñez-Díaz *et al.*, 2019):

$$K_s = \frac{3.46}{T} \quad (3)$$

Donde:

$K_s$  = Permeabilidad del suelo ( $\text{cm s}^{-1}$ )

3.46 = Constante relacionada con el volumen del cilindro ( $\text{cm}^{-3}$ )

$T$  = Tiempo en segundos

## **Infiltración de agua en el suelo**

En cada uso de suelo se realizaron tres pruebas de infiltración con aplicación de rellenos durante 150 minutos (2.5 horas); para ello se usó un infiltrómetro de doble anillo (metálico) (*Royal Eijkelkamp*®, modelo M-0904E) (Luna *et al.*, 2020).

## **Variables de infiltración**



A partir de las lecturas *in situ* se calcularon las variables del proceso de infiltración las cuales se presentan a continuación (Yáñez-Díaz *et al.*, 2019):

### **a) Velocidad de infiltración**

$$I = \frac{HL \times 10 \times 60}{T} \quad (4)$$

Donde:

$I$  = Velocidad de infiltración ( $\text{mm h}^{-1}$ )

$HL$  = Diferencia entre lecturas (cm)

10 = Factor de conversión de cm a mm

60 = Factor de conversión de minutos a horas

$T$  = Lapso de tiempo (min)

### **b) Infiltración inicial**

$$I_1 = V_1 \quad (5)$$

Donde:

$V_1$  = Velocidad de infiltración al minuto 1 ( $\text{mm h}^{-1}$ )

### **c) Capacidad de infiltración**

$$Ib = \frac{V120+V135+V150}{3} \quad (6)$$

Donde:

$Ib$  = Capacidad de infiltración ( $\text{mm h}^{-1}$ )

$V120$  = Velocidad de infiltración al minuto 120 ( $\text{mm h}^{-1}$ )

$V135$  = Velocidad de infiltración al minuto 135 ( $\text{mm h}^{-1}$ )

$V150$  = Velocidad de infiltración al minuto 150 ( $\text{mm h}^{-1}$ )

#### **d) Lámina total infiltrada**

$$Ia = \sum L \quad (7)$$

Donde:

$Ia$  = Lámina total infiltrada (mm)

$\sum L$  = Suma total de los volúmenes de agua infiltrada en el tiempo de 2.5 h

### **Análisis estadísticos**

Los datos de todas las variables fueron sometidos a pruebas de normalidad y de bondad de ajuste de *Kolmogorov-Smirnov*, y se realizaron las transformaciones

necesarias (raíz cuadrada y  $\text{Log}_{10}$ ) y la prueba de homogeneidad de varianzas de *Levene* (Rubio y Berlanga, 2012). Con base en los resultados se hicieron los siguientes análisis: (A) análisis de varianza (ANOVA) de un factor ( $P \leq 0.05$ ) a las variables infiltración inicial, capacidad de infiltración del suelo y la lámina total infiltrada; (B) para detectar diferencias entre usos de suelo y profundidades, se aplicó un ANOVA de dos factores ( $P \leq 0.05$ ) a las variables de densidad aparente (*DA*), porosidad (*P*) y permeabilidad (*Ks*); (C) se utilizó la prueba *post hoc* de *Tukey* ( $P \leq 0.05$ ) para la comparación de medias. Todos los datos se analizaron con el paquete estadístico *SPSS* versión 22.0 (IBM, 2013).

## Resultados

Los resultados de las pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas se presentan en el Cuadro 1, se observa que todas las variables cumplieron con ambos supuestos, por lo cual se emplearon análisis de varianza de uno y dos factores para detectar diferencias significativas entre los usos de suelo, así como entre la profundidad.

**Cuadro 1.** Estadísticos de las pruebas *Kolmogorov-Smirnov* y *Levene*.

	Prueba de <i>Kolmogorov-Smirnov</i>		Prueba de <i>Levene</i>	
	Estadístico	Valor de <i>p</i>	Estadístico	Valor de <i>p</i>
		<i>N</i> =9		
<i>Ii</i> (mm h <sup>-1</sup> )	0.226	0.200	0.486	0.638
<i>Ib</i> (mm h <sup>-1</sup> )	0.159	0.200	2.040	0.211
<i>Ia</i> (mm)	0.169	0.200	2.211	0.191

	N=24			
DA (g cm <sup>-3</sup> )	0.149	0.177	1.940	0.137
P (%)	0.149	0.177	1.940	0.137
Ks (cm s <sup>-1</sup> )	0.151	0.166	2.904	0.051

*Ii* = Infiltración inicial; *Ib* = Capacidad de infiltración del suelo; *Ia* = Lámina total infiltrada; *DA* = Densidad aparente; *P* = Porosidad; *Ks* = Permeabilidad.

### **DA, P% y Ks**

Los resultados del análisis de varianza bifactorial se muestran en el Cuadro 2, en el que se aprecian las diferencias significativas entre usos de suelo y no entre profundidades.

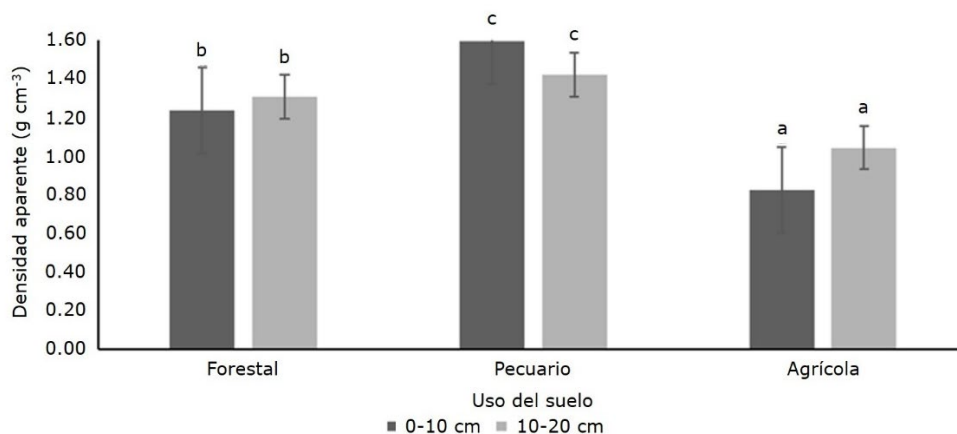
**Cuadro 2.** Análisis de varianza de dos factores para las variables físicas

Origen		Suma de cuadrados	gl	Cuadrado medio	F	Sig.
Uso de suelo	DA	1.333	2	0.667	47.980	<0.005
	Porosidad	1 898.235	2	949.117	47.980	<0.005
	Ks	0.477	2	0.239	3.378	0.047
Profundidad	DA	0.009	1	0.009	0.626	0.439
	Porosidad	12.388	1	12.388	0.626	0.439
	Ks	0.357	1	0.357	5.052	0.059

DA = Densidad aparente; Ks = Permeabilidad; Sig. = Significancia (valor de *p*).

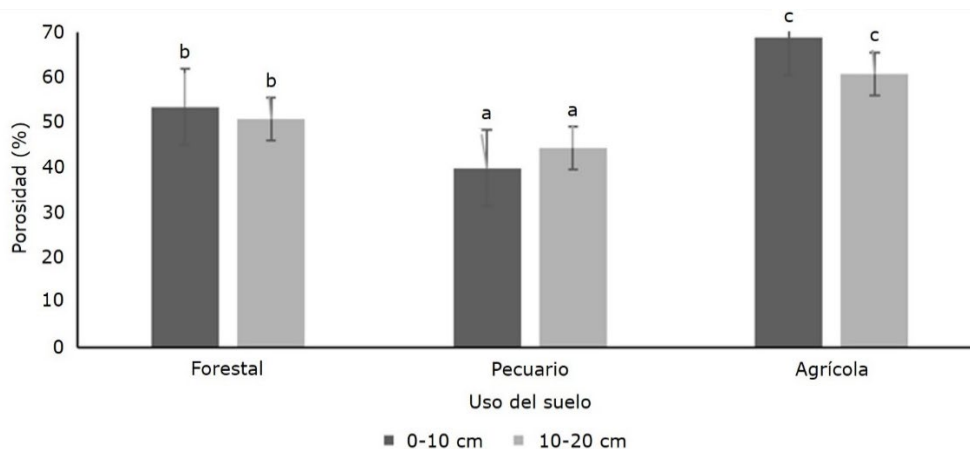
En la Figura 2 se presentan los valores por profundidad y uso de suelo para la DA. El área forestal tuvo un valor de 1.24 g cm<sup>-3</sup> de 0 a 10 cm, mientras que los usos

agrícola y pecuario registraron menores y mayores valores de *DA* (34 y 24 %) respecto al área forestal. Para la profundidad de 10-20 cm la tendencia fue similar; el área forestal registró una *DA* de  $1.31 \text{ g cm}^{-3}$  y los usos agrícola y pecuario 14 y 17 %, respectivamente.



**Figura 2.** Valores promedio de *DA* por uso de suelo y profundidad.

Por otra parte, los valores de la *P%* se exhiben en la Figura 3; el valor en el área forestal fue de de 53 *P%* y de 40 *P%* en el uso pecuario para la primera profundidad. De 10-20 cm, la *P%* media fue de 53 % para el forestal con aumentos y descensos significativos en el uso agrícola (62 *P%*) y pecuario (44 *P%*).



**Figura 3.** Valores promedio de  $P\%$  por uso de suelo y profundidad.

La permeabilidad ( $K_s$ ) cambió significativamente entre los usos de suelo (Cuadro 3). Los valores medios de  $K_s$  del área forestal fueron de  $0.0013 \text{ cm s}^{-1}$ , con una reducción ligera en el pecuario ( $0.0011 \text{ cm s}^{-1}$ ) y aumentos significativos en el agrícola ( $0.0019 \text{ cm s}^{-1}$ ).

**Cuadro 3.** Valores medios de permeabilidad por uso de suelo.

Uso de suelo	Profundidad	$K_s \text{ (cm s}^{-1}\text{)}$
Forestal	0-10 cm	0.0013
	10-20 cm	0.0012
	Promedio	0.0013a
Pecuario	0-10 cm	0.0016
	10-20 cm	0.0006
	Promedio	0.0011a
Agrícola	0-10 cm	0.0019
	10-20 cm	0.0019
	Promedio	0.0019b

## Infiltración

En el Cuadro 4 se muestran los resultados del análisis de varianza del uso de suelo para las variables que componen el proceso de infiltración, todas presentaron diferencias significativas.

**Cuadro 4.** Análisis de varianza para las variables de infiltración.

Variable	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
<i>Ii</i> (mm h <sup>-1</sup> )	2 565 600	2	1 282 800	36.034	<0.001
<i>Ib</i> (mm h <sup>-1</sup> )	0.952	2	0.476	7.006	0.027
<i>Ia</i> (mm)	0.922	2	0.461	6.609	0.030

*Ii* = Infiltración inicial; *Ib* = Capacidad de infiltración del suelo; *Ia* = Lámina total infiltrada; *Sig.* = Significancia (valor de *p*).

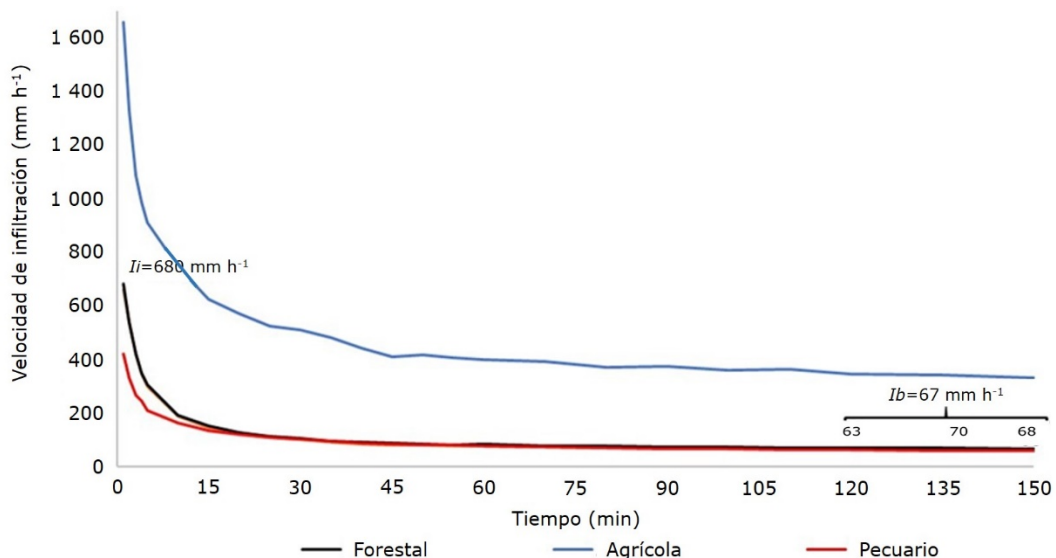
La variable *Ii* fue de 680 mm h<sup>-1</sup> en el área forestal, con un incremento de 145 % en el área agrícola y un decremento de 40 % en el uso pecuario. La *Ib* fue similar entre el área forestal y el uso pecuario; sin embargo, tuvo un incremento de 500 % en el área agrícola. En tanto que la *Ia* presentó el siguiente orden descendente: agrícola>forestal>pecuario (Cuadro 5).

**Cuadro 5.** Valores medios de las variables de infiltración por uso de suelo.

Uso de suelo	<i>Ii</i> (mm h <sup>-1</sup> )	<i>Ib</i> (mm h <sup>-1</sup> )	<i>Ia</i> (mm)
Agrícola	1 660 <sup>b</sup> ±242	338.96 <sup>b</sup> ±190	830 <sup>b</sup> ±500
Forestal	680 <sup>a</sup> ±150	67.31 <sup>a</sup> ±10	182.33 <sup>a</sup> ±22
Pecuario	420 <sup>a</sup> ±160	59.72 <sup>a</sup> ±40	145.33 <sup>a</sup> ±108

$I_i$  = Infiltración inicial;  $I_b$  = Capacidad de infiltración del suelo;  $I_a$  = Lámina total infiltrada;  $\pm$  Desviación estándar.

En la Figura 4 se representan las curvas de infiltración para cada uso de suelo. Se pueden apreciar tres periodos distintos: en principio, la velocidad de infiltración inicial es alta y se mantiene constante por un corto tiempo (<10 min) en los tres usos de suelo; después, baja considerablemente y es el uso agrícola el que se prolonga de manera intensa hasta antes del minuto 45, mientras que en el forestal y pecuario se observa antes del minuto 15; por último, se logra apreciar un tercer momento de estabilización (donde la curva se vuelve más asintótica) denominado capacidad de infiltración del suelo, el cual se aprecia antes de los 120 minutos en el uso agrícola, en tanto que en el forestal y pecuario cerca de los 105 minutos.



$I_i$  = Infiltración inicial del área forestal;  $I_b$  = Capacidad de infiltración de suelo del área forestal.

**Figura 4.** Velocidad de infiltración promedio por uso de suelo.



## Discusión

Los resultados del presente estudio evidenciaron diferencias significativas de la infiltración, permeabilidad y propiedades físicas entre usos de suelo y el área forestal, lo que puede acelerar los procesos de degradación del suelo y repercutir, de manera directa en los múltiples servicios ecosistémicos que ofrece el suelo (Béjar-Pulido *et al.*, 2021).

El valor de la capacidad de infiltración del suelo forestal es similar a los referidos por Pérez-Hernández *et al.* (2023) para bosques de clima templado (Media:  $1\ 600 \pm 1\ 100$  mm h<sup>-1</sup>). Por otra parte, la valoración de Woerner (1989) para la densidad aparente promedio indica que para el área forestal y el uso pecuario fue de clase baja ( $1.27$  g cm<sup>-3</sup>) y media ( $1.51$  g cm<sup>-3</sup>), respectivamente; mientras que el uso agrícola fue considerado como muy baja ( $0.93$  g cm<sup>-3</sup>).

Zemke *et al.* (2019) señalan que en suelos forestales la cobertura aérea como la del suelo (material leñoso, hojarasca y humus) desempeñan un papel importante, ya que regulan la entrada de agua hacia el suelo, por lo que su eliminación puede provocar variaciones que se reflejan en aumentos y decrementos de manera significativa. Específicamente, Landini *et al.* (2007) indican que el arbolado tiene un papel importante en la infiltración de agua en el suelo, ya que define los niveles de intercepción de la precipitación, los contenidos de humedad y cantidad de materia orgánica en el suelo; variables que influyen de manera significativa sobre la infiltración, así como en la permeabilidad del mismo.

De acuerdo a los valores observados de la infiltración en los diferentes usos de suelo, el área agrícola provocó un efecto más significativo sobre esta propiedad hidrológica; particularmente, registró incrementos de más de 100 % sobre las variables de  $I_i$  ( $\text{mm h}^{-1}$ ),  $I_b$  ( $\text{mm h}^{-1}$ ) e  $I_a$  (mm), respecto a los usos pecuario y forestal. Los resultados del presente estudio son similares a los valores registrados por Yáñez-Díaz *et al.* (2019), quienes evaluaron la respuesta de un suelo Vertisol con diferentes sistemas de manejo (agricultura, plantación forestal, matorral espinoso tamaulipeco y pastizales), donde la agricultura sobresalió como el cambio de uso de suelo con las modificaciones más significativas sobre las propiedades físicas del suelo y la disponibilidad de agua.

Martínez *et al.* (2015), Torres *et al.* (2016), Lozano-Trejo *et al.* (2020) y Béjar-Pulido *et al.* (2021) señalan que la capacidad de infiltración y permeabilidad del suelo puede ser más alta en usos agrícolas respecto a zonas forestales, debido a que la estructura del suelo es constantemente alterada por las actividades de labranza y las rotaciones de cultivos que favorecen la formación de grietas, el aumento de poros y la baja densidad aparente, los cuales incrementan el movimiento del agua en el suelo; sin embargo, el grado de movimiento del agua depende de la naturaleza del tipo de suelo. No obstante, Gómez *et al.* (2014) señalan que al incrementarse la infiltración en áreas agrícolas, estas demandan mayor cantidad de agua para mantener la producción de los cultivos, por lo que sugieren incorporar materia orgánica como abonos para optimizar la capacidad de infiltración del suelo que debe variar entre 40 y 70  $\text{mm h}^{-1}$ ; en este sentido, la capacidad de infiltración evaluada en el uso agrícola fue superior a 300  $\text{mm h}^{-1}$ .

Villagra-Mendoza *et al.* (2023) determinaron que el incremento de la infiltración en terrenos de uso agrícola es común en los suelos Vertisol, en los cuales, al estar desnudos y sujetos a continuos subsoleos, se reduce la humedad del suelo y la densidad aparente; mientras que la porosidad y la permeabilidad aumentan, en

consecuencia su capacidad de saturación e infiltración pueden elevarse; en contraste con el suelo forestal, donde al mantener su capa orgánica (hojarasca y humus) y vegetación, se reduce la evaporación del suelo y se conservan los niveles de humedad; con la lluvia, estos componentes aumentan el tiempo de retención del agua para después incorporarla lentamente (Lozano-Trejo *et al.*, 2020).

Por otra parte, Hidalgo *et al.* (2019) destacan la importancia de la materia orgánica para la formación y estabilidad de los agregados del suelo; independientemente del tipo de uso de suelo, consideran que cualquier desequilibrio sobre los contenidos de materia orgánica (ganancias o pérdidas) incidirá directamente sobre los procesos físicos e hidrológicos del suelo.

Sánchez *et al.* (2003) y Yáñez-Díaz *et al.* (2019) documentan que en los usos agrícolas se pueden presentar dos escenarios, el primero al inicio del cultivo y el segundo en el proceso de cosecha. Durante el periodo de cosecha, hay una tendencia a incrementar la compactación del suelo y reducir el flujo de agua de manera significativa; sin embargo, estas características son restablecidas parcialmente por los subsoleos y los cultivos; al respecto, la respuesta de las variables físicas e hidrológicas del Vertisol coinciden con los aspectos antes mencionados.

Los resultados de las variables físicas e hidrológicas del uso pecuario respecto a los obtenidos en el uso forestal se pueden atribuir al efecto del pisoteo por ganado, lo cual ya se ha registrado en varios trabajos a nivel global, en los que se describe que la compactación del suelo puede llegar a afectar los primeros 20 cm de profundidad (Karlin *et al.*, 2019), lo que concuerda con las profundidades analizadas en el presente estudio. Gómez *et al.* (2014) refieren que el ganado aprovecha extensivamente la cobertura vegetal constituida, en gran medida, por gramíneas, lo que provoca que la estructura del suelo se debilite; ya que por la carga animal se reduce considerablemente la proporción de poros del suelo; por lo tanto, los niveles de ingreso de agua al perfil disminuyen de manera significativa.

En este estudio, la variabilidad de la infiltración y permeabilidad entre los usos de agrícola y pecuario con el área forestal puede estar asociada a los cambios sobre las características físicas del mismo, principalmente la densidad aparente y la porosidad total, las cuales se afectaron por la compactación del suelo debido al pisoteo y tránsito del ganado, la eliminación de la cobertura y los subsoleos (Torres *et al.*, 2016; Martínez *et al.*, 2023). Por lo tanto, estos suelos con precipitaciones abundantes son más susceptibles a desarrollar algún grado de degradación, en comparación con las áreas forestadas donde todos los estratos arbóreos, así como la cobertura del suelo y las raíces, funcionan como agentes que moderan la velocidad de entrada y circulación de agua en el suelo (Muñoz-Villers *et al.*, 2015; Lozano-Trejo *et al.*, 2020).

Los valores de  $K_s$  se consideran bajos para el área forestal y el uso pecuario, y moderadamente bajos para el agrícola. Lo anterior coincide con Kumar *et al.* (2017), quienes registraron valores de  $K_s$  mayores para suelos con manejo agrícola, en relación al forestal, donde la densidad aparente y la porosidad del suelo fueron las variables responsables de marcar diferencias significativas. Cabe señalar que esas variables están influenciadas por la cobertura vegetal, la profundidad, la pendiente, la textura y los errores en su determinación (Figueroa *et al.*, 2018; Nuñez-Peñaloza *et al.*, 2022).

Las tendencias de los resultados de la permeabilidad del suelo han sido referidas en otras investigaciones para el tipo Vertisol, en las cuales se cita que un cambio de uso de suelo forestal a agrícola incrementa significativamente la permeabilidad del sustrato. En contraste, cuando el cambio de uso de suelo es de forestal a pecuario, existen flujos más lentos derivados de la pérdida de cobertura y pisoteo del ganado (Yáñez-Díaz *et al.*, 2019).

## **Conclusiones**

Los cambios de uso del suelo modifican las propiedades físicas e hidrológicas del suelo y en consecuencia, sus servicios ecosistémicos como la infiltración de agua son alterados de manera significativa.

Desde la perspectiva de conservación, el área forestal se mantiene intermedia en la valoración de las propiedades físicas e hidrológicas, por lo que es posible distinguir claramente los efectos de manera específica de cada uso de suelo. La vegetación presente, así como la cobertura del suelo desempeñan un papel importante en la regulación de los procesos físicos e hidrológicos del suelo.

La infiltración varía significativamente en el uso agrícola, con aumentos superiores a 100 %, con respecto al uso forestal. La infiltración inicial, la capacidad de infiltración y la lámina total infiltrada siguen la misma tendencia en orden descendente (agrícola>forestal>pecuario).

El uso pecuario registra los valores más altos de las propiedades físicas del suelo (densidad aparente y porosidad) y los menores en las propiedades hidrológicas del suelo (infiltración y permeabilidad), lo cual se atribuye al pisoteo constante del ganado que modifica considerablemente la estructura del suelo.

## **Agradecimientos**

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el apoyo otorgado para el desarrollo de la investigación.

### **Conflicto de intereses**

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

### **Contribución por Autor**

Isaac Rodríguez Reta: trabajo en campo, revisión y corrección del manuscrito; Erik Orlando Luna Robles: trabajo en campo y elaboración del manuscrito; Carlos Enrique Aguirre Calderón: revisión y corrección; Silvia Janeth Bejar Pulido: trabajo en campo y correcciones del manuscrito; David Orlando Álvarez Favela: trabajo en campo y correcciones del manuscrito.

### **Referencias**

- Babin, D., A. Deubel, S. Jacquiod, S. J. Sørensen, ... and K. Smalla. 2019. Impact of long-term agricultural management practices on soil prokaryotic communities. *Soil Biology and Biochemistry* 129:17-28. Doi: 10.1016/j.soilbio.2018.11.002.
- Bai, Z., T. Caspari, M. Ruiperez G., N. H. Batjes, ... and Z. Tóth. 2018. Effects of agricultural management practices on soil quality: A review of long-term experiments for Europe and China. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 265:1-7. Doi: 10.1016/j.agee.2018.05.028.
- Béjar-Pulido, S. J., I. Cantú-Silva, H. González-Rodríguez, J. G. Marmolejo-Moncivais, M. I. Yáñez-Díaz and E. O. Luna-Robles. 2021. Effect of land use change and agricultural management on physical and hydrological properties of an Andosol in Uruapan, Michoacán. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 27(2):323-335. Doi: 10.5154/r.rchscfa.2020.04.032.

- Burbano-Orjuela, H. 2016. El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas* 33(2):117-124. Doi: 10.22267/rcia.163302.58.
- Dueñez-Alanís, J., J. Gutiérrez, L. Pérez y J. Návar. 2006. Manejo silvícola, capacidad de infiltración, escurrimiento superficial y erosión. *Terra Latinoamericana* 24(2):233-240. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57311108010.pdf>. (13 de junio de 2024).
- Figueroa J., M. de L., M. R. Martínez M., C. A. Ortiz S. y D. Fernández R. 2018. Influencia de los factores formadores en las propiedades de los suelos en la Mixteca, Oaxaca, México. *Terra Latinoamericana* 36(3):287-299. Doi: 10.28940/terra.v36i3.259.
- Galicia, L., B. M. Chávez-Vergara, M. Kolb, R. I. Jasso-Flores, ... y A. Villanueva. 2018. Perspectivas del enfoque socioecológico en la conservación, el aprovechamiento y pago de servicios ambientales de los bosques templados de México. *Madera y Bosques* 24(2):1-18. Doi: 10.21829/myb.2018.2421443.
- Gómez, G. C., R. Munive C., T. Mallma C. y C. Orihuela V. 2014. Evaluación de la tasa de infiltración en tierras agrícolas, forestales y de pastoreo en la subcuenca del río Shullcas. *Apuntes de Ciencia y Sociedad* 4(1):32-43. Doi: 10.18259/ACS.2014004.
- González-Elizondo, M. S., M. González-Elizondo, J. A. Tena-Flores, L. Ruacho-González e I. L. López-Enríquez. 2012. Vegetación de la Sierra Madre Occidental, México: Una síntesis. *Acta Botánica Mexicana* (100):351-403. Doi: 10.21829/abm100.2012.40.
- Hidalgo, C., A. Merino, V. Osorio-Hernández, J. D. Etchevers, ... and E. Aguirre. 2019. Physical and chemical processes determining soil organic matter dynamics in a managed vertisol in a tropical dryland area. *Soil and Tillage Research* 194:104348. Doi: 10.1016/j.still.2019.104348.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2010. Compendio de información geográfica municipal 2010. Pueblo Nuevo, Durango. Clave

geoestadística 10023. INEGI. Aguascalientes, Ags., México. 9 p. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/10/10023.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/10/10023.pdf). (14 de enero de 2024).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). 2017. Anuario estadístico y geográfico de Durango 2017. Inegi. Aguascalientes, Ags., México. 501 p. [https://datatur.sectur.gob.mx/ITxEF\\_Docs/DGO\\_ANUARIO\\_PDF.pdf](https://datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/DGO_ANUARIO_PDF.pdf). (22 de enero de 2024).

International Business Machines (IBM). 2013. SPSS Statistics 22.0 Available for Download. Armonk, NY, United States of America. IBM Corp. <https://www.ibm.com/support/pages/spss-statistics-220-available-download>. (13 de junio de 2024).

Karlin, M. S., J. Bernasconi S., A. Cora, S. Sánchez, S. Arnulphi y R. Accietto. 2019. Cambios en el uso del suelo: capacidad de infiltración en el centro de Córdoba (Argentina). *Ciencia del Suelo* 37(2):196-208. <https://www.ojs.suelos.org.ar/index.php/cds/article/view/435>. (27 de febrero de 2024).

Kopittke, P. M., N. W. Menzies, P. Wang, B. A. McKenna and E. Lombi. 2019. Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment International* 132:e105078. Doi: 10.1016/j.envint.2019.105078.

Kumar K., T., A. Datta, N. Basak, S. Mandi, S. Hembram and R. Roy. 2017. Evaluation of saturated hydraulic conductivity from soil properties in an Inceptisol using different land cover and depths. *Journal of Applied and Natural Science* 9(3):1482-1488. Doi: 10.31018/JANS.V9I3.1388.

Lalthakimi, C., N. S. Singh, D. C. Vanlalfakawma, K. K. Upadhyay and S. K. Tripathi. 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. Doi: 10.60151/envec/EJWW4919.

Landini, A. M., D. Martínez, H. Días, E. Soza, D. Agnes y C. Sainato. 2007. Modelos de infiltración y funciones de pedotransferencia aplicados a suelos de distinta



- textura. Ciencia del Suelo 25(2):123-131. <http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v25n2/v25n2a03.pdf>. (27 de enero de 2024).
- Lozano-Trejo, S., J. Olazo-Aquino, M. I. Pérez-León, E. Castañeda-Hidalgo, G. O. Díaz-Zorrilla y G. M. Santiago-Martínez. 2020. Infiltración y escurrimiento de agua en suelos de una cuenca en el sur de México. *Terra Latinoamericana* 38(1):57-66. Doi: 10.28940/terra.v38i1.443.
- Luna R., E. O., I. Cantú S. y S. J. Bejar P. 2022. Efectos del cambio climático en la gestión sostenible del recurso suelo. *Tecnociencia Chihuahua* 16(3):1-21. Doi: 10.54167/tch.v16i3.1097.
- Luna R., E. O., I. Cantú S., M. I. Yáñez D., H. González R., J. G. Marmolejo M. y S. J. Béjar P. 2020. Ajuste de modelos empíricos de infiltración en un Umbrisol bajo diferentes tratamientos silvícolas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11(57):132-152. Doi: 10.29298/rmcf.v11i57.643.
- Martínez S., R. A., I. Cantú S., M. I. Yáñez D., H. González R. y S. J. Béjar P. 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. Doi: 10.29298/rmcf.v14i79.1339.
- Martínez V., J. J., V. M. Vaca G., M. V. Esteller A., A. González H., M. R. Arriaga y F. Gutiérrez R. 2015. Velocidad media de infiltración en un vertisol bajo distintos sistemas de labranza. *Terra Latinoamericana* 33(1):95-99. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v33n1/2395-8030-tl-33-01-00095.pdf>. (27 de enero de 2024).
- Muñoz-Villers, L. E., F. Holwerda, M. S. Alvarado-Barrientos, D. Geissert, ... y L. A. Bruijnzeel. 2015. Efectos hidrológicos de la conversión del bosque de niebla en el centro de Veracruz, México. *Bosque* 36(3):395-407. Doi: 10.4067/S0717-92002015000300007.

- Návar, J. and T. J. Synnott. 2000. Surface runoff, soil erosion, and land use in Northeastern Mexico. *Terra Latinoamericana* 18(3):247-253. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57318308.pdf>. (12 de enero de 2024).
- Nuñez-Peñaloza, J. L., D. Cristóbal-Acevedo, E. Hernández-Acosta y A. Villanueva-Morales. 2022. Efecto de tres sistemas de producción sobre el estado de la fertilidad física del suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 13(72):55-81. Doi: 10.29298/rmcf.v13i72.1279.
- Pérez-Hernández, J. F., R. Razo-Zárate, R. Rodríguez-Laguna, J. Capulín-Grande, I. Árcega-Santillán y N. Manzur-Chávez. 2023. Efecto del manejo forestal en las características físico-hidrológicas del suelo en un bosque de clima templado. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 14(80):54-79. Doi: 10.29298/rmcf.v14i80.1388.
- Rubio H., M. J. y V. Berlanga S. 2012. Cómo aplicar las pruebas paramétricas bivariadas *t* de Student y ANOVA en SPSS. Caso práctico. *REIRE Revista d'Innovació i Recerca en Educació* 5(2):83-100. Doi: 10.1344/reire2012.5.2527.
- Sánchez V., G., J. J. Obrador O., D. J. Palma-López y S. Salgado G. 2003. Densidad aparente en un vertisol con diferentes agrosistemas. *Interciencia* 28(6):347-351. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33908107.pdf>. (13 de junio de 2024).
- Sánchez, L. 2015. An integrated study of sediment related disaster prevention and erosion control for urbanized forest slopes in Nuevo Leon, Mexico. Doctoral thesis. School of Bioresource and Bioenvironmental Sciences, Kyushu University. Fukuoka, Fuk, Japan. 112 p.
- Sotelo R., E., M. del C. Gutiérrez C., G. Cruz B., C. A. Ortiz S. y M. A. Segura C. 2008. Historia y desarrollo de la clasificación de vertisoles en el Sistema FAO y la taxonomía. *Terra Latinoamericana* 26(4):325-332. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-57792008000400005](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792008000400005). (27 de enero de 2024).
- Torres G., C. A., M. del C. Gutiérrez C., C. A. Ortiz S. y E. V. Gutiérrez C. 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>. (11 de enero de 2024).

Villagra-Mendoza, K., D. Brenes-Cano y N. Gómez-Calderón. 2023. Efecto del balanceo de cargas en los ejes de tractores agrícolas sobre la eficiencia de labranza y las propiedades físico-mecánicas de un suelo Vertisol. *Agronomía Costarricense* 47(1):101-121. Doi: 10.15517/rac.v47i1.53968.

Woerner P., M. 1989. Métodos químicos para el análisis de suelos calizos de zonas áridas y semiáridas. Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, NL, México. 105 p.

Yáñez-Díaz, M. I., I. Cantú-Silva, H. González-Rodríguez and L. Sánchez-Castillo. 2019. Effects of land use change and seasonal variation in the hydrophysical properties in Vertisols in northeastern Mexico. *Soil Use and Management* 35(3):378-387. Doi: 10.1111/sum.12500.

Zemke, J. J., M. Enderling, A. Klein and M. Skubski. 2019. The influence of soil compaction on runoff formation. A case study focusing on skid trails at forested Andosol sites. *Geosciences* 9(5):204. Doi: 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.