



Efecto de diferentes usos del suelo en las propiedades físicas e hidrológicas de un Luvisol en Oaxaca

Effect of different land use in the physical and hydrological properties of a Luvisol in the state of Oaxaca

Celestino Sandoval García¹, Israel Cantú Silva^{1*}, Humberto González Rodríguez¹, María Inés Yáñez Díaz¹, José Guadalupe Marmolejo Monsiváis¹, Marco Vinicio Gómez Meza²

Abstract

Changes in land use in the southern sierra and coast of Oaxaca have caused the deterioration of the forest ecosystem. Thus, given the scarce information on their impact on soil properties, the objective was to evaluate the effect of different land uses on the physical and hydrological properties of a Luvisol. The treatments evaluated were: pasture, agricultural, forest plantation, pine forest (control), and agricultural-livestock, located in the micro-watershed of the La Venta River, Copalita, Oaxaca. The parameters measured in the field were: hydraulic conductivity (K), bulk density (AD), total porosity (Po), which were obtained in undisturbed soil samples, mechanical resistance to penetration (MRP), initial infiltration (Ia), cumulative infiltration (Ib) and infiltration capacity (Ic). The determination of sand (S), silt (Si) and clay (Cl) particles, field capacity (FC), permanent wilting point (PWP), and available water (Aw) was performed on eight disturbed samples (four per depth) at each use, for a total of 40. Significant differences were observed in Po, MRP, AD, K, FC, PWP, Aw, and in the proportion of sand between land uses. K exhibited a significant positive correlation ($p \leq 0.05$) with PWP, Aw, S, Ia, Ib, and Ic; the last three were positively correlated. Agricultural, pasture and agricultural-livestock uses showed more negative impacts on infiltration and hydraulic conductivity, as well as on apparent density, porosity, mechanical resistance, and water availability; the forest plantation had a positive effect on the evaluated properties.

Key words: Pine forest, infiltration, Luvisol, hydrological properties, forest soil, land use.

Resumen

Los cambios de uso del suelo en la Sierra Sur y Costa de Oaxaca han provocado el deterioro del ecosistema forestal. Así, ante la escasa información sobre su impacto en las propiedades del suelo, se planteó el objetivo de evaluar el efecto de distintos usos del suelo en las propiedades físicas e hidrológicas de un Luvisol. Los tratamientos evaluados fueron: pastizal, agrícola, plantación forestal, bosque de pino (control) y agropecuario; ubicados en la microcuenca Río La Venta, Copalita, Oaxaca. Los parámetros medidos en campo fueron: conductividad hidráulica (Ks), densidad aparente (DA), porosidad total (Po) que se obtuvieron en muestras inalteradas de suelo; además de, la resistencia mecánica a la penetración (RMP), infiltración inicial (Ia), infiltración acumulada (Ib) y capacidad de infiltración (Ic). La determinación de las partículas de arena (A), limo (L) y arcilla (Ar), capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y el agua disponible (Ad) se realizó en ocho muestras disturbadas (cuatro por profundidad) en cada uso, para un total de 40. Se registraron diferencias significativas en Po, RMP, DA, Ks, CC, PMP, Ad y en la proporción de arena entre usos de suelo. Ks presentó una correlación positiva significativa ($p \leq 0.05$) con PMP, Ad, A, Ia, Ib e Ic; las tres últimas tuvieron correlación positiva. Los usos agrícola, pastizal y agropecuario evidenciaron más impactos negativos en la infiltración y conductividad hidráulica; así como en la densidad aparente, porosidad, resistencia mecánica y disponibilidad del agua; la plantación forestal registró un efecto positivo en las propiedades evaluadas.

Palabras clave: Bosque de pino, infiltración, Luvisol, propiedades hidrológicas, suelo forestal, uso del suelo.

Fecha de recepción/Reception date: 26 de noviembre de 2020

Fecha de aceptación/Acceptance date: 28 de mayo de 2021

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

²Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Economía. México.

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

Introducción

El suelo es un recurso natural importante, del cual depende la sociedad (George *et al.*, 2016). Sin embargo, la presión ejercida por el hombre en los últimos años lo está degradando (FAO-ITPS, 2015). Los impactos al suelo empiezan con la remoción de la vegetación natural. En México, la tasa de cambio de vegetación primaria es de -0.6 %, para el periodo 2000–2010; y de -0.7 % de 1990-2015 (FAO, 2015). Asimismo, en el análisis realizado por Mas *et al.* (2009) indican que en el país se presenta una tasa anual de deforestación de -4.2 a -8.15 % para la selva alta perennifolia y de -10.1 % para bosque mesófilo de montaña. Es decir, la tasa de deforestación varía con el tipo de ecosistema, pero en general en los ecosistemas tropicales es mayor.

Por otra parte, es importante señalar que la deforestación y degradación forestal provocan una importante pérdida del carbono almacenado en la biomasa aérea y subterránea de los ecosistemas terrestres (de Jong *et al.*, 2018). Por ello, es necesario tener información a una escala apropiada para el sector agrícola, forestal y otros usos del suelo que permita conocer la emisión de gases de efecto invernadero, lo cual servirá de base para determinar políticas públicas sobre el cambio climático (Paz *et al.*, 2020).

Los luvisoles son suelos que se desarrollan en clima templado, presentan el mayor contenido de arcilla en el subsuelo y son muy productivos para los usos agrícola y forestal (IUSS-WRB-FAO, 2015); como es el caso de la parte alta de la subcuenca Río Copalita, Oaxaca (INEGI, 2013). Por lo anterior, el cambio de uso del suelo en los luvisoles puede reflejarse en modificaciones en sus propiedades físicas e hidrológicas. Estudiar estos cambios permite identificar los principales efectos de uso del suelo y su relación como un factor principal de la pérdida de cubierta vegetal por actividades socioeconómicas. El objetivo del presente estudio fue evaluar las propiedades físicas e hidrológicas de un Luvisol bajo usos de suelo agrícola, pastizal, plantación de pino,

bosque de pino y agropecuario en la microcuenca Río La Venta, Copalita, Oaxaca, México. La hipótesis fue que a través del tiempo, la magnitud de los cambios en las propiedades físicas e hidrológicas del Luvisol investigado varía de acuerdo con el tipo de uso.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El área de estudio se localiza en la microcuenca Río La Venta, Copalita, Oaxaca, México ($16^{\circ}12'0''$ LN, $96^{\circ}25'30''$ LO); a una altitud promedio de 2 850 m (Figura 1). De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por García (2004), el área de estudio presenta un clima C (w); semifrío subhúmedo, con verano fresco y largo; lluvia invernal menor a 5 % de la anual, con precipitación media anual superior a 1 300 mm, con una máxima media durante el mes de julio de 215 mm y mínima media en febrero menor a 10 mm. Temperatura media anual de 18 a 20 °C, con máxima en abril y mayo de 24 °C y mínima en diciembre y enero de 0 a 5 °C. El tipo de suelo es Luvisol; poseen alto potencial para la agricultura, pero también para bosques y selvas (INEGI, 2013).



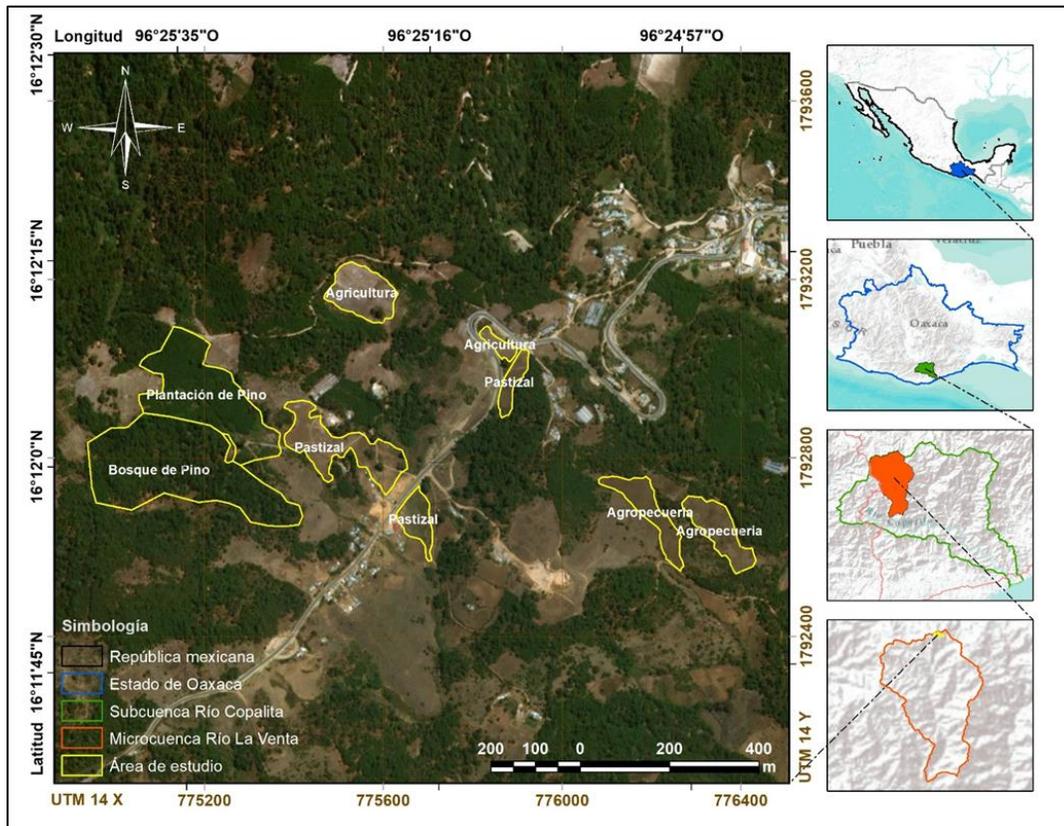


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

Descripción de los sitios de muestreo

La presente investigación se desarrolló en cinco usos de suelo con tipo de suelo Luvisol (INEGI, 2013):

a) Pastizal. El área presenta diferentes especies de pastos: *Bouteloua repens* (Kunth) Scribn. & Merr., *Muhlenbergia robusta* (E. Fourn.) A. Hitchc., *Panicum bulbosum* Kunth, *Panicum mertensii* Roth., *P. parviglume* Hack., *Paspalum convexum* Humb, et Bonpl. ex Flüggé (Pacheco-Rivera y Dávila-Aranda, 2004); que se establecieron de manera natural en parcelas usadas para la producción agrícola durante, aproximadamente, 10 años, las cuales después se convirtieron a pastizal; en la actualidad, tienen 32 años con el mismo uso de suelo.

- b) Agrícola. Se desarrolla en áreas no mayores a 5 ha, donde se practica agricultura de temporal, con siembras de maíz asociado con haba y en algunas ocasiones se intercala con el cultivo de papa, por ser especies adaptadas a estas condiciones; con 42 años sin cambio de uso.
- c) Plantación de pino. Se estableció en áreas agrícolas con 10 años de antigüedad; posteriormente, se utilizaron como pastizal por un periodo de 17 años. Actualmente, la plantación tiene una edad aproximada de 15 años; se plantó bajo el sistema tresbolillo, con una densidad de 1 111 árboles por hectárea, con equidistancia de 3 m × 3 m, las especies utilizadas son *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schltld., *P. douglasiana* Martínez y *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. et Cham.
- d) Bosque de pino original (control). Está constituido por diferentes taxones: *P. ayacahuite*, *P. douglasiana*, *P. patula* var. *longepedunculata* Loock. ex Martínez, *P. leiophylla* Schltld. & Cham y *Abies religiosa*.
- e) Uso Agropecuario. Los campesinos usan estas parcelas para realizar el pastoreo del ganado bovino, caprino y ovino. Son áreas agrícolas en descanso de 1 a 2 años y actividad agrícola intermitente en los últimos 20 años.

Muestreo y análisis de suelo

En cada uso del suelo se recolectaron cuatro muestras compuestas (de cuatro submuestras) a dos profundidades (0-10 cm y 10-30 cm), para un total de 40, que se analizaron en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). Las muestras se secaron y cribaron con mallas metálicas de 2 mm, para la realización de los diferentes análisis (Cuadro 1).

Cuadro 1. Métodos para la determinación de las propiedades físicas e hidrológicas.

Propiedad	Unidad	Método
Física		
$A^{1,2}$	%	Método AS-09 de la NOM-021-RECNAT-2000 (Semarnat, 2002).
$Ar^{1,2}$	%	
$L^{1,2}$	%	
DA^1	$g\ cm^{-3}$	Método gravimétrico (Woerner, 1989; Zhang <i>et al.</i> , 2017).
RMP^1	Mpa	Medidor de dureza/penetrómetro (tipo <i>Yamanaka</i> , 22110 <i>Orion</i> , <i>MKK Co</i> , <i>Japan</i>).
Po^1	%	La estimación fue a partir de los valores de densidad aparente, asumiendo una densidad de partícula de $2.65\ g\ cm^{-3}$ (McPhee <i>et al.</i> , 2015).
Hidrológica		
Ks^1	$cm\ s^{-1}$	Método del cilindro (Das, 2002).
I_a^1	$mm\ h^{-1}$	Método de doble anillo (Zhang <i>et al.</i> 2017).
I_b^1	mm	
I_c^1	$mm\ h^{-1}$	
$CC^{1,2}$ (0.033 MPa)	%	Método de la placa y la membrana de presión, utilizando extractores de presión (<i>Soil Moisture Equipment Corp.</i> , <i>Santa Barbara</i> , CA) (Klute y Dirksen, 1986).
$PMP^{1,2}$ (1.5 MPa)	%	
$Ad^{1,2}$	%	

A = Arena; Ar = Arcilla; L = Limo; DA = Densidad aparente; RMP = Resistencia mecánica a la penetración; Po = Porosidad; H = Humedad; Ks = Conductividad hidráulica; I_a = Infiltración inicial; I_b = Infiltración acumulada; I_c = Capacidad de infiltración; CC = Capacidad de campo; PMP = Punto de marchitez permanente; Ad = Agua disponible; ¹ = 0 a 10 cm; ² = 10 a 30 cm.



Propiedades físicas e hidrológicas

En el Cuadro 1 se presentan las metodologías usadas para la determinación de las variables físicas e hidrológicas.

Análisis estadísticos

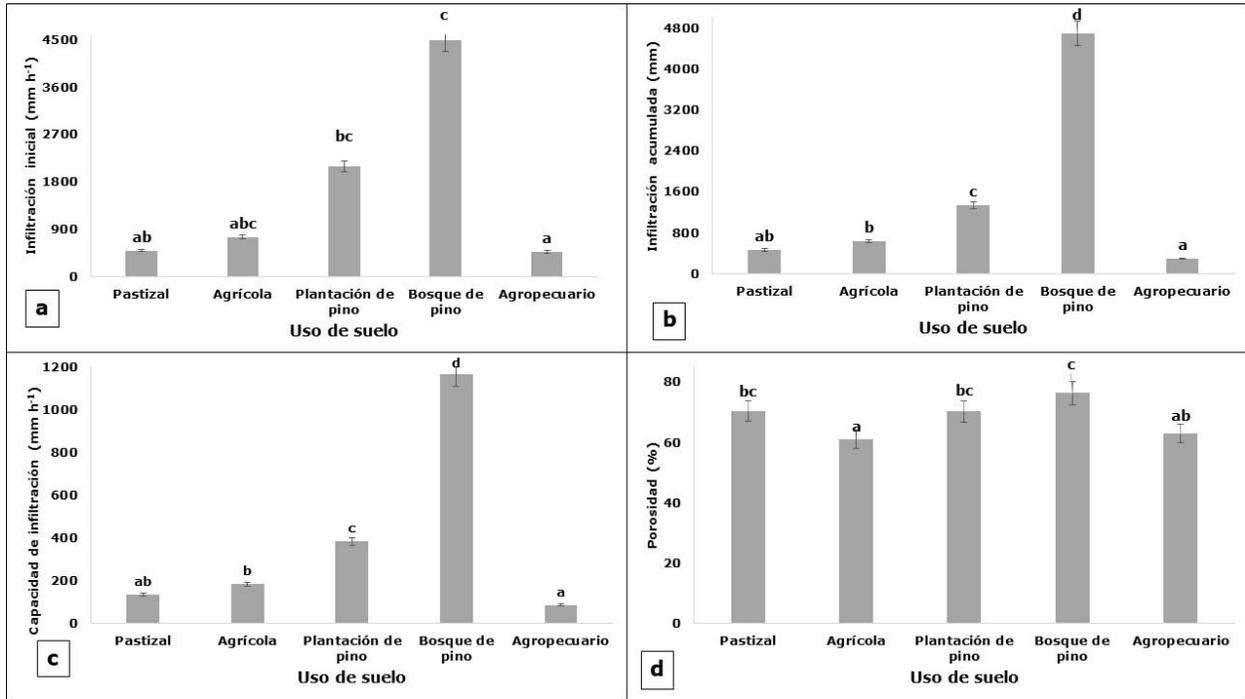
Todas las variables se sometieron a la prueba de *Kolmogorov-Smirnov* con corrección de *Liliefors* y de *Levene* (Steel y Torrie, 1988) para determinar, si la distribución era normal y la homogeneidad de varianza. A las variables infiltración acumulada (I_b), capacidad de infiltración (I_c) y conductividad hidráulica se les aplicó una transformación logarítmica (Log_{10}), y para la variable infiltración inicial (I_a) se usó una transformación arcotangente. Al final, solo las variables Po , I_a , I_b e I_c cumplieron con los supuestos de normalidad y homocedasticidad. Posteriormente, se realizó el análisis de varianza (ANOVA) para los diferentes usos del suelo. En las variables Ks , DA , RMP , A , Ar , L , CC , PMP y Ad de la profundidad de 0 a 10 cm; y en A , Ar , L , CC , PMP y Ad de la profundidad de 10 a 30 cm, se usó la prueba de *Kruskal-Wallis* por no cumplir con los supuestos requeridos para el análisis paramétrico.

Asimismo, se realizó la prueba *Post Hoc* de Bonferroni de *Kruskal-Wallis* con comparaciones por parejas para cada uso del suelo. La relación entre las variables se analizó mediante la correlación de *Spearman* para las dos profundidades muestreadas. La prueba de *Tukey* ($p=0.05$) se utilizó para realizar la comparación de medias. Cada uno de los análisis estadísticos se hicieron con un nivel de significancia (α) 0.05, en el programa estadístico *SPSS*[®] (*Statistical Package for the Social Sciences*) versión 22.

Resultados y Discusión

Capacidad de infiltración y porosidad

Los resultados de la Infiltración inicial (I_a), Infiltración acumulada (I_b) y Capacidad de infiltración (I_c) para cada uso de suelo se ilustran en la Figura 2.



Los valores graficados representan la media ($n=X$), \pm error estándar. Medias con letras diferentes indican diferencias estadísticas de acuerdo a la prueba de *Tukey* ($p = 0.05$).

Figura 2. Infiltración inicial (a), Infiltración acumulada (b), Capacidad de infiltración (c) y Porosidad (d) para diferentes usos de suelo a la profundidad de 0 a 10 cm.

El bosque de pino (control) presentó el mayor valor de I_a ($4\,500\text{ mm h}^{-1}$), seguido por la plantación de pino ($2\,100\text{ mm h}^{-1}$), el área agrícola (760 mm h^{-1}), el pastizal (500 mm h^{-1}) y el uso agropecuario (480 mm h^{-1}). Los otros componentes de la infiltración (I_b e I_c) tuvieron comportamiento similar de acuerdo con el uso del suelo.

Los resultados del análisis de varianza mostraron que las variables I_a , I_b , I_c y Po , presentaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los usos de suelo (Cuadro 2).

Cuadro 2. Análisis de varianza de una vía (uso de suelo), contraste de *Levene* y prueba de *Kolmogorov Smirnov (K-S)* con corrección de *Lilliefors*.

Variables	Valor F (4,10)	Valor p	Prueba de Levene F (4,10)	Valor p	K-S	Valor p
I_a (mm h ⁻¹)	6.31	0.008	3.06	0.068	0.18	0.186
I_b (mm)	51.93	0.001	2.97	0.074	0.20	0.077
I_c (mm h ⁻¹)	51.14	0.001	3.10	0.067	0.21	0.072
Po (%)	7.65	0.001	2.44	0.092	0.11	0.200

I_a = Infiltración inicial; I_b = Infiltración acumulada; I_c = Capacidad de infiltración; Po = Porosidad; *K-S* = *Kolmogorov-Smirnov* con corrección de *Lilliefors*. Valor de p de 0.001, cuando el valor de p es igual o menor a 0.001.

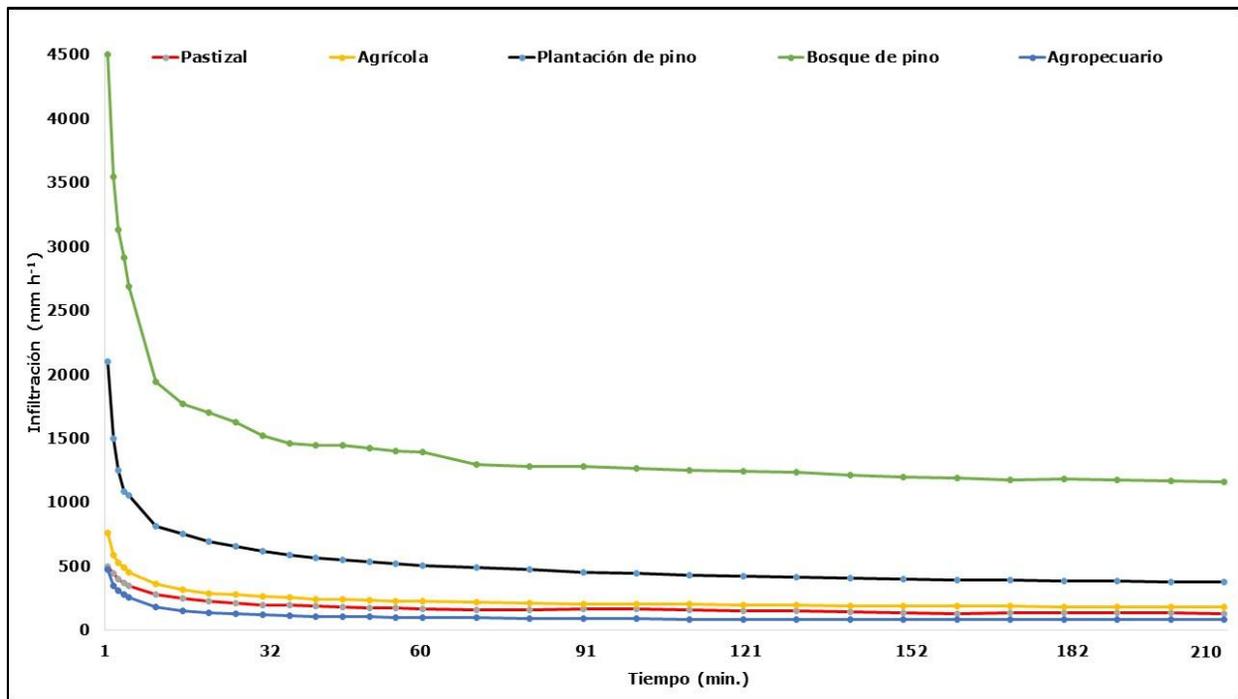
La infiltración observada en los usos del suelo, cuando son comparadas con la del bosque de pino (control) evidencia claramente el efecto del cambio de uso en esta característica. Propiedades como la porosidad, la densidad aparente, la resistencia mecánica a la penetración, así como las prácticas de manejo del suelo provocan que la infiltración se modifique.

Luna *et al.* (2020) evaluaron la infiltración en un suelo tipo Umbrisol, sometido a diferentes tratamientos silvícolas en un bosque de pino, y registraron valores menores a los medidos en la presente investigación para el bosque de pino y en la plantación de pino; así como en el estudio de Chagoya *et al.* (2015).

El bosque de pino presentó la mayor porosidad (76 %), seguido por el pastizal y la plantación de pino (70 %), agropecuario (63 %), y el uso que tuvo menor valor fue el agrícola (61 %). Lo anterior, indica la diferencia de la infiltración y la porosidad entre el bosque de pino (control) y los otros usos evaluados. Esto demuestra que, al cambiar el uso de suelo de bosque, las diferentes variables físicas e hidrológicas son afectadas. La porosidad del suelo en el bosque de pino y la plantación de pino se

asocia con la incorporación de materia orgánica; mientras que la del pastizal, a la gran cantidad de raíces de las herbáceas y pastos que se incorporan cada año, y que penetran la superficie, lo cual propicia aireación e infiltración del agua al suelo.

En la Figura 3, se exhibe el comportamiento de la infiltración promedio para cada uso del suelo evaluado durante 210 minutos; en ella se aprecia la diferencia entre el bosque de pino y plantación de pino, en relación con los usos agrícola, pastizal y agropecuario. A partir del minuto 90, se observó una estabilidad de la infiltración en todos los usos de suelo.



Los valores graficados representan la media ($n=x$).

Figura 3. Curvas de infiltración promedio de los diferentes usos del suelo.

De acuerdo a la prueba de *Kruskal-Wallis* de las variables *Ks*, *DA*, *RMP*, *A*, *CC*, *PMP* y *Ad*, se rechazó la hipótesis nula de igualdad de parámetros de centralidad para los diferentes usos del suelo en la profundidad de 0 a 10 cm (Cuadro 3); mientras que,

en la profundidad de suelo 10 a 30 cm, solo la variable *Ad* registró diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los usos del suelo (Cuadro 4).

Cuadro 3. Prueba de *Kruskal-Wallis* para detectar diferencias significativas en las propiedades físicas e hidrológicas del suelo entre los usos del suelo analizados (profundidad de 0 a 10 cm).

Estadístico	<i>Ks</i> cm s ⁻¹	<i>DA</i> g cm ⁻³	<i>RMP</i> Mpa	<i>A</i> (%)	<i>Ar</i> (%)	<i>L</i> (%)	<i>CC</i> (%)	<i>PMP</i> (%)	<i>Ad</i> (%)
<i>N</i>	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Media	0.007	0.84	2.30	67.05	6.65	26.35	42.22	25.63	16.56
Mediana	0.002	0.90	1.75	68.00	6.00	26.00	40.62	21.85	16.77
$X^2_{(4)}$	15.44	12.57	12.27	12.21	4.16	8.95	13.10	17.17	14.64
Sig. asintótica	0.004	0.014	0.015	0.016	0.385	0.062	0.011	0.002	0.006

Ks = Conductividad hidráulica; *DA* = Densidad aparente; *RMP* = Resistencia mecánica a la penetración; *A* = Arena; *Ar* = Arcilla; *L* = Limo; *CC* = Capacidad de campo; *PMP* = Punto de marchitez permanente; *Ad* = Agua disponible. Números en negrita indican las variables que presentaron significancia.

Cuadro 4. Prueba de *Kruskal-Wallis* para detectar diferencias significativas de propiedades físicas e hidrológicas entre los usos del suelo analizados (profundidad de 10 a 30 cm).

Estadístico	<i>A</i> (%)	<i>Ar</i> (%)	<i>L</i> (%)	<i>CC</i> (%)	<i>PMP</i> (%)	<i>Ad</i> (%)
<i>N</i>	20	20	20	20	20	20
Media	69.60	5.30	25.10	38.43	24.12	14.31
Mediana	70.00	6.00	25.00	38.14	22.15	14.43
$X^2_{(4)}$	7.78	5.60	6.47	5.64	8.94	13.21
Sig. asintótica	0.100	0.231	0.167	0.227	0.063	0.010

A = Arena; *Ar* = Arcilla; *L* = Limo; *CC* = Capacidad de campo; *PMP* = Punto de marchitez permanente; *Ad* = Agua disponible. Números en negrita indican las variables que presentaron significancia.

Asimismo, se realizaron las pruebas *Post Hoc* de *Kruskal-Wallis* para muestras independientes con comparaciones por pares y corrección de *Bonferroni* para los usos de suelo. Estas evidenciaron para las variables *Ks*, *DA*, *CC*, *PMP*, *A* diferencias significativas en los usos de la combinación Agrícola-Bosque; y para *Ks*, *PMP* y *Ad* en los del Bosque-Agropecuario de la profundidad 0-10 cm; y *Ad* tuvo diferencias entre Plantación de pino-Agropecuario en la profundidad 10-30 cm (Cuadro 5).



Cuadro 5. Prueba *Post Hoc* de *Kruskal-Wallis* con corrección de *Bonferroni* para detectar diferencias significativas para las variables físicas e hidrológicas a la profundidad de 0 a 10 cm y de 10-30 cm para la variable *Ad*.

Uso del suelo 1 y 2	Variables							
	<i>RMP</i>	<i>Ks</i>	<i>DA</i>	<i>CC</i>	<i>PMP</i>	<i>Ad¹</i>	<i>Ad²</i>	<i>A</i>
Sig. ajustada								
Agrícola-Plantación de pino	1.000	0.168	0.786	0.198	0.168	1.000	1.000	0.223
Agrícola-Bosque	1.000	0.050	0.024	0.004	0.002	0.831	1.000	0.009
Agrícola-Agropecuario	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.558	0.486	1.000
Agrícola-pastizal	0.070	1.000	0.560	0.639	0.232	1.000	0.070	1.000
Plantación de pino-Bosque	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.270	1.000	1.000
Plantación de pino-Agropecuario	1.000	0.168	1.000	1.000	1.000	1.000	0.013	1.000
Plantación de pino-Pastizal	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.486	1.000
Bosque-Agropecuario	1.000	0.008	0.068	0.486	0.034	0.003	0.050	0.666
Bosque-Pastizal	0.070	0.163	1.000	0.943	1.000	1.000	0.070	0.353
Agropecuario-Pastizal	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.102	1.000	1.000

Cada fila prueba la hipótesis nula de que las distribuciones del uso de suelo 1 y 2 son iguales. *RMP* = Resistencia mecánica a la penetración; *Ks* = Conductividad hidráulica; *DA* = Densidad aparente; *Ad¹* = Agua disponible (0-10 cm); *Ad²* = Agua disponible (10-30 cm); *CC* = Capacidad de campo; *PMP* = Punto de marchitez permanente; *A* = Arena. Se muestran las significancias asintóticas (pruebas bilaterales). El nivel de significancia es de 0.05.

Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica saturada (K_s) presentó diferencias significativas entre los usos del suelo analizados. Los valores medios de K_s fueron de 0.001 cm s^{-1} para los usos agropecuario y agrícola; 0.002 cm s^{-1} para pastizal; 0.008 cm s^{-1} para plantación de pino; y 0.022 cm s^{-1} para el bosque de pino. El valor bajo de K_s para el uso agropecuario se debe al incremento en densidad aparente y disminución de la porosidad. La presión estática y dinámica que ejerce el ganado sobre el suelo superficial provoca su compactación y resistencia mecánica. Los resultados de K_s son similares a los obtenidos en otros estudios (Quichimbo *et al.*, 2012; Jaurixje *et al.*, 2013; Novillo-Espinosa *et al.*, 2018).

Densidad aparente

Los valores medios de DA de la profundidad 0 a 10 cm fueron 0.63 g cm^{-3} para el bosque de pino, 0.78 g cm^{-3} para pastizal, 0.79 g cm^{-3} para plantación de pino, 0.98 g cm^{-3} para agropecuario y 1.03 g cm^{-3} en el uso agrícola. La baja DA en el bosque de pino se debe a su porosidad y resistencia mecánica, además de presentar una clase textural arenoso franco. Lo anterior demuestra que al ocurrir el cambio de uso del suelo se incrementa la DA , lo cual también resulta en un incremento de la RMP y disminución de la K_s . Cruz-Ruiz *et al.* (2012), Carlos-Gómez *et al.* (2014), Chagoya *et al.* (2015) y Alejandro-Martínez *et al.* (2019) documentan valores similares de densidad aparente y porosidad, además señalan que la DA tiende a incrementarse a mayores profundidades y la Po disminuye en texturas franco, franco arenoso y arcilloso.



Resistencia mecánica a la penetración del suelo

La *RMP* del suelo a la profundidad de 0 a 10 cm presentó diferencias significativas entre los usos del suelo. El pastizal registró el mayor valor de dureza (0.42 Mpa), seguido por el agropecuario (0.27 Mpa). Mientras que, los usos agrícola, plantación de pino y bosque de pino tuvieron una *RMP* igual (0.15 Mpa). El alto valor de *RMP* observado en el pastizal, se debe a la compactación del suelo provocada, principalmente, por la ganadería, además del incremento de la *DA* y la disminución de la *Po*; la exposición y falta de cobertura favoreció una mayor pérdida de humedad del suelo. Yáñez-Díaz *et al.* (2019) citaron resultados similares para la resistencia mecánica a la penetración en un suelo Vertisol, en el cual es común la dureza cuando pierde humedad. Caso contrario, Medina-Guillén *et al.* (2017) indicaron valores menores de *RMP*, la cual puede variar de acuerdo con el tipo de vegetación, manejo y la carga animal presentes.

Textura del Suelo

En la profundidad de 0-10 cm, solo la proporción de arena tuvo diferencias significativas entre los usos del suelo, y varió de 62 a 72 %. La proporción de arcilla y limo se ubicó en el intervalo de 5 a 8 %, y de 22 a 30 %, respectivamente. En estas dos variables no se observaron diferencias significativas entre los usos del suelo.

Para la profundidad de 10 a 30 cm, ninguna de las variables de textura mostró diferencias significativas, y los porcentajes de arena variaron de 67 a 73 %; limo de 23 a 27 % y arcilla de 4 a 6 %. La valoración de textura para la profundidad 0-10 cm correspondió a las clasificaciones de franco arenosa (pastizal, agrícola, plantación de pino y agropecuario), arenoso franco (bosque de pino). Mientras que, para la profundidad de 10-30 cm correspondieron a franco arenoso (pastizal, agrícola, agropecuario) y arenoso franco (plantación de pino y bosque de pino). Lo anterior, significa que la plantación y bosque de pino tienen menor densidad

aparente y resistencia mecánica a la penetración, pero mayor porosidad; ello favorece la conductividad hidráulica e infiltración del suelo. De esta manera se contribuye a la recarga de los acuíferos y disminuye el riesgo a la erosión.

Los resultados de la presente investigación coinciden con los de Lozano-Trejo *et al.* (2020), quienes evaluaron un suelo Luvisol en la subcuenca Río Copalita.

Características hídricas del suelo

Capacidad de campo (CC). La CC de la profundidad de 0 a 10 cm del suelo evidenció diferencias significativas entre los usos bajo estudio; sus valores se ubicaron en el intervalo de 33.59 a 51.86 % de agua; el bosque de pino (51.86 %) y el uso agrícola (33.59 %) fueron los de mayor y menor porcentaje de retención de agua a capacidad de campo. La CC del resto de los usos fueron: agropecuario (39.64 %), pastizal (42.77 %) y plantación de pino (43.57 %).

En la profundidad 10 a 30 cm no se detectaron diferencias significativas entre usos. La CC varió entre 32.81 y 42.70 %, el uso agrícola tuvo el menor valor (32.81 %) y el pastizal el mayor (42.77 %); la plantación de pino registró 36.44 %, el uso agropecuario 39.49 % y el bosque de pino 40.22 %.

El bosque de pino fue el uso del suelo con el valor de CC más alto, debido probablemente al contenido de materia orgánica en el suelo que favorece la retención de humedad; además de, tener baja densidad y resistencia mecánica a la penetración, todo ello posibilita la infiltración del agua.

La capacidad de campo es afectada por el cambio de uso; así, el agrícola presentó la menor CC. Esto responde a su porosidad y textura (FAO, 2005); además de que la alta densidad aparente, su menor contenido de materia orgánica, falta de cobertura, baja conductividad hidráulica y la compactación del suelo aumentan la resistencia mecánica a la penetración, lo cual no permite que se retenga una mayor cantidad de agua (FAO, 2009).

Punto de Marchitez Permanente (PMP). El *PMP* de la profundidad 0 a 10 cm del Luvisol presentó diferencias significativas entre los usos del suelo, con una variación entre 16.77 % y 39.72 %. El uso agrícola tuvo el menor valor (16.77 %) y el mayor correspondió al bosque de pino (39.72 %). Los usos agropecuario, plantación de pino y pastizal registraron: 19.02, 25.94 y 26.76 %, respectivamente. El intervalo de *PMP* para la profundidad de 10 a 30 cm fue de 18.70 % a 29.15 %; el agrícola presentó el menor valor (18.70 %), seguido por el agropecuario (20.76 %), plantación de pino (24.91 %), pastizal (27.09 %), y en el bosque de pino se determinó el valor más alto con 29.15 %. En general, se observó un bajo contenido de arcilla en el Luvisol, lo cual influye en una menor retención de humedad.

Estos resultados son similares a los obtenidos por Muñoz-Iniestra *et al.* (2013). Silva *et al.* (2011) afirman que un sistema agroforestal, al mantener una cobertura permite tener mayor humedad en el suelo.

Agua disponible (Ad). El contenido de *Ad* tuvo diferencias significativas entre los usos de suelo en las dos profundidades de muestreo (0-10 cm y 10-30 cm). Para la profundidad de 0 a 10 cm, varió de 12.14 a 20.62 %; el bosque de pino presentó un menor porcentaje de *Ad* (12.14 %), seguido por el pastizal (15.71 %), el agrícola (16.83 %), la plantación de pino (17.66 %), y el uso agropecuario registró el mayor porcentaje (20.62 %). El *Ad* en la profundidad de 10 a 30 cm fluctuó entre 11.08 y 19.13 %, de igual manera el bosque de pino tuvo el menor porcentaje con 11.08 %; seguido por la plantación de pino, con 11.54 %; agrícola, con 12.13 %; pastizal, con 15.69 %; y en el uso agropecuario se registró el mayor porcentaje, con 19.13 %.

El menor porcentaje de agua disponible se obtuvo en el bosque de pino y la plantación pino, ya que fueron los usos con una clase textural (arenoso franco) con un porcentaje alto de arena, principalmente, en la profundidad de 10-30 cm; por lo que al presentar una mayor cantidad de macroporos, el agua se filtra más rápidamente al subsuelo, como agua gravitacional.

Estos valores de agua disponible son superiores a los documentados por González-Nivia (2014) y La Manna *et al.* (2018), pero menores a los señalados por Béjar-Pulido *et al.* (2020) en andosoles de Uruapan, Michoacán; ya que, al ser un suelo arenoso existe una mayor infiltración de agua, y en consecuencia hay un menor porcentaje de agua disponible. Bachmair *et al.* (2009) indican que el cambio de uso de suelo incide en el movimiento vertical y horizontal del agua.

Correlación de las variables físicas e hidrológicas

Las correlaciones de *Spearman* (r_s) para las variables físicas e hidrológicas evaluadas en el incremento de profundidad 0 a 10 cm se presentan en el Cuadro 6. La *DA* se correlacionó significativamente, aunque en forma negativa con *Po*, *CC* y *PMP*. La *RMP* presentó una correlación negativa y altamente significativa con I_a e I_b . Respecto a la profundidad de 10-30 cm, solo la capacidad de campo (*CC*) tuvo una correlación positiva significativa con *A*, *Ad* y el *PMP*.



Cuadro 6. Coeficientes de correlación de *Spearman* (r_s) para las variables físicas e hidrológicas evaluadas a la profundidad de 0-10 cm.

	DA (n=20)	RMP (n=20)	Po (n=20)	Ks (n=20)	I_a (n=15)	I_b (n=15)	I_c (n=15)	CC (n=20)	PMP (n=20)	Ad (n=20)	A (n=20)	Ar (n=20)	L (n=20)
DA	-	0.730	0.000	0.015	0.146	0.086	0.071	0.000	0.000	0.033	0.031	0.363	0.279
RMP	0.082	-	0.762	0.130	0.003	0.001	0.003	0.586	0.824	0.336	0.551	0.542	0.982
Po	-0.988**	-0.072	-	0.009	0.124	0.079	0.060	0.000	0.000	0.035	0.041	0.367	0.319
Ks	-0.536*	-0.350	0.565**	-	0.000	0.001	0.001	0.018	0.000	0.008	0.001	0.138	0.015
I_a	-0.394	-0.712**	0.415	0.789**	-	0.000	0.000	0.085	0.044	0.121	0.011	0.498	0.045
I_b	-0.458	-0.764**	0.468	0.779**	0.927**	-	0.000	0.071	0.025	0.022	0.025	0.604	0.069
I_c	-0.300	-0.603*	0.325	0.690**	0.774**	0.692**	-	0.063	0.049	0.634	0.002	0.105	0.045
CC	-0.760**	0.130	0.785**	0.523*	0.459	0.479	0.524*	-	0.000	0.420	0.006	0.859	0.010
PMP	-0.861**	0.053	0.883**	0.720**	0.525*	0.575*	0.602*	0.916**	-	0.028	0.002	0.464	0.013
Ad	0.478*	0.227	-0.473*	-0.577**	-0.418	-0.586*	-0.570*	-0.191	-0.490*	-	0.204	0.813	0.291
A	-0.484*	-0.142	0.461*	0.692**	0.637*	0.575*	0.569*	0.595**	0.645**	-0.523	-	0.010	0.661
Ar	0.215	0.145	-0.213	-0.344	-0.190	-0.146	-0.075	-0.042	-0.174	-0.481	0.927**	-	0.000
L	0.254	0.005	-0.235	-0.534*	-0.523*	-0.481	-0.500	-0.561*	-0.546*	-0.480	0.925**	0.999**	-

Valores de r_s en la matriz triangular inferior, valores de p en la matriz triangular superior; **RMP** = Resistencia mecánica a la penetración; **Ks** = Conductividad hidráulica; **DA** = Densidad aparente; **Po** = Porosidad; **CC** = Capacidad de campo; **PMP** = Punto de marchitez permanente; **Ad** = Agua disponible; **A** = Arena; **Ar** = Arcilla; **L** = Limo; **I_a** = Infiltración inicial; **I_b** = Infiltración acumulada; **I_c** = Capacidad de infiltración; * = Correlación significativa con ($p \leq 0.05$); ** = Correlación altamente significativa ($p \leq 0.01$).

Conclusiones

Los resultados indican que el Luvisol sometido a diferentes usos experimenta modificaciones en sus propiedades físicas e hidrológicas como consecuencia del cambio de uso del suelo. Principalmente, cuando ocurre de Bosque al uso Agrícola, donde las variables conductividad hidráulica, densidad aparente, capacidad de campo, punto de marchitez permanente y arena son significativamente diferentes. Las variables conductividad hidráulica, punto de marchitez permanente y agua disponible presentan diferencias significativas con el cambio de Bosque a uso Agropecuario.

Los resultados de la determinación de capacidad de infiltración de los diferentes usos del suelo evidencian que los bosques de pino tienen una mayor capacidad de infiltración y que son superiores en este aspecto al resto de los usos del suelo investigados, lo que explica su alta capacidad de proveer servicios ambientales hidrológicos. Cuando se cambia el uso del suelo, ocurre una disminución significativa de esta variable, como se observa en el caso del uso agropecuario y pastizal, que presentan la menor capacidad de infiltración.

La baja densidad aparente del suelo en el bosque de pino es resultado de una baja compactación. Por el contrario, el uso agropecuario exhibe alta densidad aparente, debido a la compactación causada por el pastoreo.

La conductividad hidráulica es claramente dependiente del tipo de uso del suelo, así el bosque de pino muestra un alto valor comparado con los demás usos que tienen una menor permeabilidad.

Las variables con más diferencias por el cambio del uso son la capacidad de infiltración, conductividad hidráulica, densidad aparente y resistencia mecánica a la penetración; por consiguiente, se modifican la capacidad de campo, punto de marchitez permanente y agua disponible en el suelo.

Los resultados obtenidos de la presente investigación permiten conocer el impacto que provoca el cambio de uso del suelo en la microcuenca Río la Venta, Copalita; y se concluye que es importante la conservación de la vegetación arbórea, ya que de esta manera se logrará mantener la recarga de los acuíferos, así como de las funciones ambientales del ecosistema.

Agradecimientos

Los autores agradecen a las autoridades del Ejido San Felipe Cieneguilla, municipio San Sebastián Río Hondo, Miahuatlán, Oaxaca, al Sr. Pablo Ramírez Pascual y a la Sra. Nazaria Ramírez Río, por su apoyo en el trabajo de campo. Así como al Conacyt por la beca de doctorado otorgada al primer autor.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Celestino Sandoval García: desarrollo de la investigación, estructura y diseño del manuscrito; Israel Cantú Silva: diseño del experimento y corrección del manuscrito; Humberto González Rodríguez: revisiones y correcciones del documento; María Inés Yáñez Díaz: análisis estadístico y corrección del escrito; José Guadalupe Marmolejo Monsiváis: revisiones del manuscrito; Marco Vinicio Gómez Meza: análisis estadístico y revisión del escrito.



Referencias

- Alejandro-Martínez, P., M. De la Cruz-Morales, D. J. Palma-López, H. J. Megia-Vera y D. J. Palma-Cancino. 2019. Efecto del cambio de uso de suelo sobre las propiedades edáficas en La Sabana, Huimanguillo, Tabasco, México. *Agroproductividad* 12 (7): 95-100. Doi.org/10.32854/agrop.v0i0.1476.
- Bachmair S., M. Weiler and G. Nützmänn. 2009. Controls of land use and soil structure on water movement: Lessons for pollutant transfer through the unsaturated zone. *Journal of Hydrology* 369: 241–252. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.02.031.
- Béjar-Pulido, S. J., I. Cantú-Silva, M. I. Yáñez-Díaz y E. O. Luna-Robles. 2020. Curvas de retención de humedad y modelos de pedotransferencia en un Andosol bajo distintos usos de suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11 (59). 31-50. Doi:10.29298/rmcf.v11i59.666.
- Carlos-Gómez, G., R. Munive-Cerrón, T. Mallma-Capcha y C. Orihuela-Villacencio. 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 (01):32-43. Doi: 10.18259/acs.2014004.
- Chagoya F., J. L., C. Mallen R., M. A. McDonal, F. Jiménez O, M. Akbar I., L. Velázquez F. y F. Becerra L. 2015. Información hidrológica, primer paso para diseñar una política local de pago por servicios ambientales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 6 (29): 24-43. Doi: 10.29298/rmcf.v6i29.214.
- Cruz-Ruiz, E., A. Cruz-Ruiz, I. Aguilera Gómez, H. T. Norman-Mondragón, A. Velázquez R, G. Nava-Bernal, L. Dendooven y B. G. Reyes-Reyes. 2012. Efecto en las características edáficas de un bosque templado por el cambio de uso de suelo. *Terra Latinoamericana* 30 (2): 189-197. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v30n2/2395-8030-tl-30-02-00189.pdf> (8 de junio de 2020).

Das, B. M. 2002. Soil Mechanics Laboratory Manual. 6th edition. Oxford, NY, USA. 216 p. <https://www.pdfdrive.com/soil-mechanics-laboratory-manual-e42049849.html>. (12 de febrero de 2020).

de Jong, B., M. Olguín, F. Rojas, V. Maldonado y F. Paz. 2018. Base de datos de la biomasa de los sitios del inventario nacional forestal y de suelos del ciclo 2004-2007. Elementos para Políticas Públicas 2:69-84. <http://www.elementopolipub.org/ojs/index.php/epp/article/view/19/17> (15 de abril de 2020).

García, E. 2004. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Serie Libros, Núm. 6. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México. D. F. 97 p. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/83/82/251-1> (6 de mayo de 2020).

George, J., L. Baby, A. P. Arickal and J. Dev Vattoly. 2016. Land Use/Land cover Mapping with Change Detection Analysis of Aluva Taluk Using Remote Sensing and GIS. International Journal of Science, Engineering and Technology 4 (2): 383-389. <https://www.ijset.in/wp-content/uploads/2016/03/10.2348.03160383.pdf> (18 de abril de 2020).

González-Nivia, J. 2014. Efecto del uso y ocupación en las propiedades físicas y químicas en un suelo del pie de monte llanero. Tesis de magister en Ingeniería Agrícola. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 123 p.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2013. Carta Edafológica, Villa de Zaachila, Serie II, escala 1: 250 000. Edición: 1. Aguascalientes, Ags., México. s/p.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2015. Carta de uso de suelo y vegetación, Villa de Zaachila, Serie V, escala 1: 250 000. Aguascalientes, Ags., México. s/p.

Jaurixje, M., D. Torres, B. Mendoza, M. Henríquez y J. Contreras. 2013. Propiedades físicas y químicas del suelo y su relación con la actividad biológica bajo diferentes manejos en la zona de Quíbor, Estado Lara. *Bioagro* 25 (1): 47-56. <http://ve.scielo.org/pdf/ba/v25n1/art06.pdf> (20 de mayo de 2020).

Klute, A. and C. Dirksen. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity. Laboratory methods. *In: Klute, A. (Ed.). Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods.* ASA and SSSA Madison, WI, United States. pp. 123–131.

La Manna, L., M. Tarabini, F. Gómez, P. A. Noli, B. Vogel y C. G. Buduba. 2018. Estimación de la capacidad de retención de agua en suelos volcánicos en función de variables de fácil determinación a campo. *Asociación Argentina Ciencia del Suelo* 36 (1): 23-29. <http://www.suelos.org.ar/publicaciones/volumen3612018/pag%2023-29%20CS526%20Estimaci%C3%B3n%20de%20la%20capacidad%20de%20retenci%C3%B3n%20de%20agua%20de%20suelos%20volc%C3%A1nicos.pdf> (10 de junio de 2020).

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: 57-66. Doi:10.28940/terra.v38i1.443.

Luna, 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.

Mas, J. F., A. Velázquez y S. Couturier. 2009. La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la República Mexicana. *Investigación ambiental* 1 (1): 23-39.

https://www.researchgate.net/publication/263255508_La_evaluacion_de_los_cambios_de_coberturauso_del_suelo_en_la_Republica_Mexicana (18 de abril de 2020).

McPhee, J. E., P. L. Aird, M. A. Hardie and S. R. Corkrey. 2015. The effect of controlled traffic on soil physical properties and tillage requirements for vegetable production. *Soil and Tillage Research* 149: 33–45. Doi:10.1016/j.still.2014.12.018.

Medina-Guillén, R., I. Cantú-Silva, H. González-Rodríguez, M. Pando-Moreno, T. Kubota y M. V. Gómez-Meza. 2017. Efectos del rodillo aireador y el fuego en las propiedades físicas e hidrológicas del suelo en matorrales de Coahuila, México. *Agrociencia* 51: 471-485. <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v51n5/1405-3195-agro-51-05-00471.pdf> (12 de abril de 2020).

Muñoz-Iniestra, D. J., M. Ferreira-Ramírez, I. B. Escalante-Arriaga y J. López-García. 2013. Relación entre la cobertura del terreno y la degradación física y biológica de un suelo aluvial en una región semiárida. *Terra Latinoamericana* 31 (3): 201-210. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v31n3/2395-8030-tl-31-03-00201.pdf> (16 de mayo de 2020).

Novillo-Espinosa, I. D., M. D. Carrillo-Zenteno, J. E. Cargua-Chavez, V. Nabel-Moreira, K. E. Alban-Solarte y F. L. Morales-Intrigo. 2018. Propiedades físicas del suelo en diferentes sistemas agrícolas en la provincia de los Ríos, Ecuador. *Temas Agrarios* 23 (2): 177-187. Doi:10.21897/rta.v23i2.1301.

Organización de las Naciones Unidad para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2005. Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal, el significado de la porosidad del suelo. Roma, Italia. 128 p.

Organización de las Naciones Unidad para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2009. Guía para la descripción de los suelos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la alimentación. Cuarta edición. Roma, Italia. pp. 29-66.

Pacheco-Rivera, D. y P. Dávila-Aranda. 2004. Sinopsis de las gramíneas de Oaxaca, México. *Acta Botánica Mexicana* 69: 83-114. Doi: 10.21829/abm69.2004.982.

Paz, F., M. I. Marín, M. Bolaños-González, J. D. Etchevers, B. de Jong., J. Herrera y A. S. Velázquez-Rodríguez. 2020. La urgente necesidad de México de contar con

datos de actividad a escala apropiada para el sector agricultura, forestería y otros usos del suelo. *Elementos para Políticas Públicas* 4:61-71. <http://www.elementospolipub.org/ojs/index.php/epp/article/view/30/28> (25 de mayo de 2020).

Quichimbo, P., G. Tenorio, P. Borja, I. Cárdenas, P. Crespo y R. Céleri. 2012. Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso de suelo: Paramo de Quimsacocha al Sur de Ecuador. *Suelos Ecuatoriales* 42 (2): 138-153. https://www.researchgate.net/publication/260389572_EFECTOS_SOBRE_LAS_PROPiedades_FISICAS_Y_QUIMICAS_DE_LOS_SUELOS_POR_EL_CAMBIO_DE_LA_COBERTURA_VEGETAL_Y_USO_DEL_SUELO_PARAMO_DE_QUIMSACOCCHA_AL_SUR_DEL_ECUADOR (20 de junio de 2020).

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). 2002. NOM-021-SEMARNAT -2000. Establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. Segunda edición. 28 de octubre de 2002. México, D. F. México 73 p.

Silva, G. L., H. V. Lima, M. M. Campanha, R. J. Gilkes and T. S. Oliveira. 2011. Soil physical quality of Luvisol under agroforestry, natural vegetation and conventional crop management systems in the Brazilian semi-arid region. *Geoderma* 167-168: 61-70. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.09.009>.

Steel, R. G. D. y J. H. Torrie. 1988. *Bioestadística: principios y procedimientos*. McGraw-Hill. Segunda Edición. 622 p.

Unión Internacional de las Ciencias del Suelo-Centro Internacional de Información y Referencia de Suelos-Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (IUSS-WRB-FAO). 2015. Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Actualización 2015. *Informes sobre recursos mundiales de suelos* (106). FAO. Roma, Italia. 218 p.

Food and Agriculture Organization of the United Nations-Intergovernmental Technical Panel on Soils (FAO-ITPS). 2015. Status of the World's Soil Resources (SWSR)–Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. Rome, Italy. 605 p. <http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf> (5 de agosto de 2020).

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2015. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015, compendio de datos. Roma, Italia. 253 p. <http://www.fao.org/3/a-i4808s.pdf> (15 de julio de 2020).

Woerner, M. 1989. Método químico para el análisis de suelos calizos de zonas áridas y semiáridas. Facultad de Ciencias Forestales, Departamento Agroforestal, Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, N. L., México. 103 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): 10. Doi: 10.1111/sum. 12500.

Zhang, J., T. Lei, L. Qu, P. Chen, X. Gao, C. Chen, L. Yuan, M. Zhang, and G. Su. 2017. Method to measure soil matrix infiltration in forest soil. *Journal of Hydrology* 552: 241-248. Doi:10.1016/j.jhydrol.2017.06.032.



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.