

Effects of forest management on the physical and hydrological properties of an Umbrisol in the Sierra Madre Occidental

Efectos del manejo forestal en las propiedades físicas e hidrológicas de un Umbrisol en la Sierra Madre Occidental

Erik O. Luna-Robles^{1*}; Israel Cantú-Silva¹; Humberto González-Rodríguez¹; José Marmolejo-Monsiváis¹; María I. Yáñez-Díaz¹; Francisco J. Hernández²; Silvia J. Béjar-Pulido¹

¹Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. Carretera Nacional núm. 85 km 145. C. P. 67700. Linares, Nuevo León, México.

²Instituto Tecnológico de El Salto. Mesa del Tecnológico s/n. C. P. 34942. El Salto, Durango, México.

*Corresponding author: eranroka@hotmail.com; tel.: 675 113 52 96.

Abstract

Introduction: Land uses associated with anthropogenic activities affect soil quality negatively. **Objective:** To determine the effect of regeneration cuts on the physical and hydrological properties of an Umbrisol.

Materials and methods: In each stand (Seed trees [ST], clear cutting [CC], selection [S], regenerated area post fire [PF] and reference [R]), *in situ* tests were performed and four samples composed of soil by depth (0 to 20 cm and 20 to 40 cm) were collected. Data were analyzed by Kruskal-Wallis and ANOVA tests. The physical variables (bulk density [BD], porosity, silt, leaf litter and humus, mechanical resistance to penetration [MRP], sand and clay) and hydrological variables (infiltration, field capacity, permanent wilt point, available water and permeability) were related by means of the Spearman correlation coefficient.

Results and discussion: Differences were significant ($P \leq 0.01$) in MRP, sand and clay in the forest stand factor. For the depth factor, all the variables were similar, except for the MRP; its increase in clear cutting was higher than 100 %, with respect to R. The interaction was only significant ($P \leq 0.01$) for the sand percentage. The Kruskal-Wallis test ($P \leq 0.05$) indicated that infiltration, humus and litter were lower in clear cutting. There is a significant negative correlation ($P \leq 0.01$) of BD with permeability, porosity, clay and sand. ST and clear cuttings increased BD (24.28 and 37.58 %) and MRP (32.59 and 222.22 %), with respect to R.

Conclusion: ST and selection cuts did not cause significant variations in properties such as those of a total cut (clear cutting).

Resumen

Introducción: Los usos del suelo asociados con actividades antrópicas afectan la calidad del suelo negativamente.

Objetivo: Determinar el efecto de cortas de regeneración sobre las propiedades físicas e hidrológicas de un Umbrisol.

Materiales y métodos: En cada rodal (árboles padre [AP], matarrasa [CC], selección, área regenerada [posincendio] y de referencia [R]) se realizaron pruebas *in situ* y se colectaron cuatro muestras compuestas de suelo por profundidad (0 a 20 cm y 20 a 40 cm). Los datos se analizaron mediante pruebas de Kruskal-Wallis y ANOVA. Las variables físicas (densidad aparente [DA], porosidad, limo, hojarasca y humus, resistencia mecánica a la penetración [RMP], arena y arcilla) e hidrológicas (infiltración, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, agua disponible y permeabilidad) se relacionaron mediante el coeficiente de correlación Spearman.

Resultados y discusión: Las diferencias fueron significativas ($P \leq 0.01$) en la RMP, arena y arcilla en el factor de rodal silvícola. Para el factor profundidad, todas las variables fueron similares, a excepción de la RMP; su incremento en matarrasa fue superior al 100 %, respecto a R. La interacción solo fue significativa ($P \leq 0.01$) para el porcentaje de arena. La prueba de Kruskal-Wallis ($P \leq 0.05$) indicó que la infiltración, humus y hojarasca fueron más bajas en matarrasa. Existe correlación negativa significativa ($P \leq 0.01$) de la DA con la permeabilidad, porosidad, arcilla y arena. Las cortas de AP y matarrasa aumentaron la DA (24.28 y 37.58 %) y RMP (32.59 y 222.22 %), respecto a R.

Conclusión: Las cortas de AP y selección no provocaron variaciones significativas en las propiedades como las de una corta total (matarrasa).

Keywords: regeneration cuttings; Seed trees; post-fire; clear cutting; soil quality.

Palabras clave: cortas de regeneración; árboles padre; posincendio; matarrasa; calidad del suelo.

Introduction

Soil, a complex and diverse ecosystem, is a finite, non-renewable and dynamic natural resource; it is made up of minerals, organic matter, air and water, and is considered a natural environment capable of supporting the growth of organisms and microorganisms (Bhattacharyya & Pal, 2015; Food and Agriculture Organization [FAO], 2019; Kopittke et al., 2019; Montanarella, 2015). According to Muñoz-Rojas (2018), ecosystem functions are difficult to assess directly and are derived from the measurable properties of the soil. The soil physical, hydrological, chemical and biological properties are considered quality indicators. The balance of such properties reflects high quality; however, this also depends on climatic and geographical conditions, as well as use and management practices (Bai et al., 2018; Bünemann et al., 2018).

Land uses associated with anthropogenic activities such as agriculture, grazing, and forest management can affect soil quality negatively and contribute significantly to climate change processes at the regional level (Sahagún & Reyes, 2018). Likewise, soil uses cause a decrease in water inputs, due to the loss of infiltration capacity and aquifer recharge; thus, surface runoff increases, accelerating erosion processes (Ortega, Ortega, Moncayo, Vargas, & Pompê, 2018; Turnbull, Wainwright, & Brazier, 2010).

According to Edlund, Keramati, and Servin (2013), one of the most important problems in the forestry sector is to minimize the damage caused to soil by forestry operations. In particular, forestry operations such as felling, hauling and stacking cause impacts on soil such as compaction, rutting, changes in the microclimate, damage to adjacent trees, increased erosion, vulnerability to fungal infections, and loss of biodiversity, organic matter and tree density (Cambi, Certini, Neri, & Marchiet, 2015; Cambi et al., 2016; Cambi et al., 2017; Siren, Ala-Ilomäki, Mäkinen, Lamminen, & Mikkola, 2013).

The impact of forestry activities on the soil ecosystem depends on factors such as the harvesting system (Spinelli, Magagnotti, & Nati, 2010), site characteristics and removal intensity (Tavankar, Bonyad, & Majnounian, 2015) and the degree of mechanization (Picchio et al., 2011; Picchio et al., 2012; Picchio, Magagnotti, Sirna, & Spinelli, 2012).

In Mexico, forest exploitation is done under two main regeneration cuts: selection cut corresponding to the Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI) (Mexican Method of Irregular Forest Management in English) and cut of seed trees

Introducción

El suelo, un ecosistema complejo y diverso, es un recurso natural finito, no renovable y dinámico; está constituido por minerales, materia orgánica, aire y agua, y es considerado un medio natural capaz de sustentar el crecimiento de organismos y microorganismos (Bhattacharyya & Pal, 2015; Food and Agriculture Organization [FAO], 2019; Kopittke et al., 2019; Montanarella, 2015). De acuerdo con Muñoz-Rojas (2018), las funciones de los ecosistemas son difíciles de evaluar directamente y se derivan de las propiedades mensurables del suelo. Las propiedades físicas, hidrológicas, químicas y biológicas del suelo se consideran indicadores de calidad. El balance de dichas propiedades refleja alta calidad; sin embargo, esta también depende de las condiciones climáticas y geográficas, así como del uso y prácticas de manejo (Bai et al., 2018; Bünemann et al., 2018).

Los usos del suelo asociados con actividades antrópicas, tales como agricultura, pastoreo y manejo forestal pueden afectar la calidad de suelo negativamente y contribuir significativamente en los procesos de cambio climático a nivel regional (Sahagún & Reyes, 2018). Asimismo, los usos del suelo ocasionan la disminución de aportaciones hídricas, debido a la pérdida de capacidad de infiltración y recarga de acuíferos; de este modo, la escorrentía superficial aumenta, acelerando los procesos de erosión (Ortega, Ortega, Moncayo, Vargas, & Pompê, 2018; Turnbull, Wainwright, & Brazier, 2010).

Según Edlund, Keramati, y Servin (2013), uno de los problemas más importantes del sector forestal es minimizar el daño causado al suelo por las operaciones forestales. En particular, las operaciones forestales como el derribo, arrastre y apilamiento causan impactos en el suelo como la compactación, formación de surcos, cambios en el microclima, daños en el arbolado adyacente, mayor erosión, vulnerabilidad a las infecciones por hongos, y pérdida de la biodiversidad, materia orgánica y densidad de árboles (Cambi, Certini, Neri, & Marchiet, 2015; Cambi et al., 2016; Cambi et al., 2017; Sirén, Ala-Ilomäki, Mäkinen, Lamminen, & Mikkola, 2013).

El impacto de las actividades forestales en el ecosistema del suelo depende de factores como el sistema de cosecha (Spinelli, Magagnotti, & Nati, 2010), características del sitio e intensidad de eliminación (Tavankar, Bonyad, & Majnounian, 2015) y el grado de mecanización (Picchio et al., 2011; Picchio et al., 2012; Picchio, Magagnotti, Sirna, & Spinelli, 2012).

En México, el aprovechamiento forestal se hace bajo dos cortas de regeneración principalmente: corta de

considered by the Método de Desarrollo Silvícola (MDS) (Silvicultural Development Method in English) (López-Hernández et al., 2017; Torres-Rojo, Moreno-Sánchez, & Mendoza-Briseño, 2018). It is worth noting that in recent years, the method of regeneration of clear cutting (total cut) has also been chosen, although it is less frequent and is executed in small areas of land because of the irregularity and topography that forests present.

For this reason, the present investigation had the objective of determining the effect of three regeneration cuts (seed trees, clear cutting or total cut, and selection) on the physical and hydrological properties of an Umbrisol, through the comparison with a regenerated area (post-fire) and a reference stand in forests of Durango, Mexico. It should be noted that there is no information regarding the study of soil properties for this area of temperate forests, which leads to generate information that can be used in decision making and technical criteria of forest management.

Materials and methods

Study Area

The study area is located in the forests of the ejido La Ciudad (2 583 m; longitude: -105.690556 and latitude: 23.732222), located in the mountainous massif called Sierra Madre Occidental, in the municipality of Pueblo Nuevo, Durango, Mexico. Vegetation is mainly composed by *Pinus durangensis* Martínez, *P. cooperi* C. E. Blanco, *P. ayacahuite* Ehren, *Juniperus deppeana* Steud. and *Quercus sideroxylla* Bonpl. (González-Elizondo, González-Elizondo, Tena-Flores, Ruacho-González, & López-Enríquez, 2012). The dominant soil in the area belongs to the Umbrisol type (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2005) (Figure 1). The main types of climate are: C(E)(m), semi-cold humid; C(E)(w₂), semi-cold sub-humid; and C(w₂), temperate sub-humid, all with precipitation in summer. The average annual precipitation is 1 200 mm and the average annual temperature is 18 °C, with maximums of 22 °C and minimums of 3 °C (Zúñiga et al., 2018).

Methodology

The evaluation was made in five stands located on the Umbrisol extension; three of them underwent short regeneration periods, one corresponded to a regenerated area after a fire and another one as control, called reference stand. These are described as follows: 1) clear cutting (CC) of 10.29 ha that consisted of the total extraction of the tree; 2) seed trees (ST) with 9 ha and cutting intensity of 80 %, leaving a residual density of 77 ind·ha⁻¹; 3) selection (S) that has 20 ha and

selección correspondiente al Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI) y corta de árboles padre considerado por el Método de Desarrollo Silvícola (MDS) (López-Hernández et al., 2017; Torres-Rojo, Moreno-Sánchez, & Mendoza-Briseño, 2018). Cabe señalar que, en años recientes, se ha optado también por el método de regeneración de matarrasa (corta total), aunque es menos frecuente y se ejecuta en extensiones pequeñas de terreno por la irregularidad y topografía que los bosques presentan.

Por lo anterior, la presente investigación tuvo como objetivo determinar el efecto de tres cortas de regeneración (árboles padre, matarrasa o corta total, y selección) sobre las propiedades físicas e hidrológicas de un Umbrisol, mediante la comparación con un área regenerada (posincendio) y un rodal de referencia en bosques de Durango, México. Cabe destacar que no existe información en lo que refiere al estudio de las propiedades edafológicas para esta zona de bosques templados, lo que conlleva a generar información que puede ser usada en la toma de decisiones y criterios técnicos del manejo forestal.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio se ubica en los bosques del ejido La Ciudad (2 583 m; longitud: -105.690556 y latitud: 23.732222), situada en el macizo montañoso denominado Sierra Madre Occidental, en el municipio Pueblo Nuevo, Durango, México. La vegetación está compuesta principalmente por *Pinus durangensis* Martínez, *P. cooperi* C. E. Blanco, *P. ayacahuite* Ehren, *Juniperus deppeana* Steud. y *Quercus sideroxylla* Bonpl. (González-Elizondo, González-Elizondo, Tena-Flores, Ruacho-González, & López-Enríquez, 2012). El suelo dominante en la zona pertenece al tipo Umbrisol (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2005) (Figura 1). Los principales tipos de clima son: C(E)(m), semifrío húmedo; C(E)(w₂), semifrío subhúmedo; y C(w₂), templado subhúmedo, todos con lluvias en verano. La precipitación media anual es de 1 200 mm y la temperatura media anual es 18 °C, con máximas de 22 °C y mínimas de 3 °C (Zúñiga et al., 2018).

Metodología

La evaluación se hizo en cinco rodales situados sobre la extensión del Umbrisol; tres sometidos a cortas de regeneración, uno correspondió a un área regenerada posincendio y otro más como testigo, denominado rodal de referencia. Estos se describen a continuación: 1) matarrasa (M) de 10.29 ha que consistió en la extracción total del arbolado; 2) árboles padre (AP) con 9 ha e intensidad de corta de 80 %, dejando

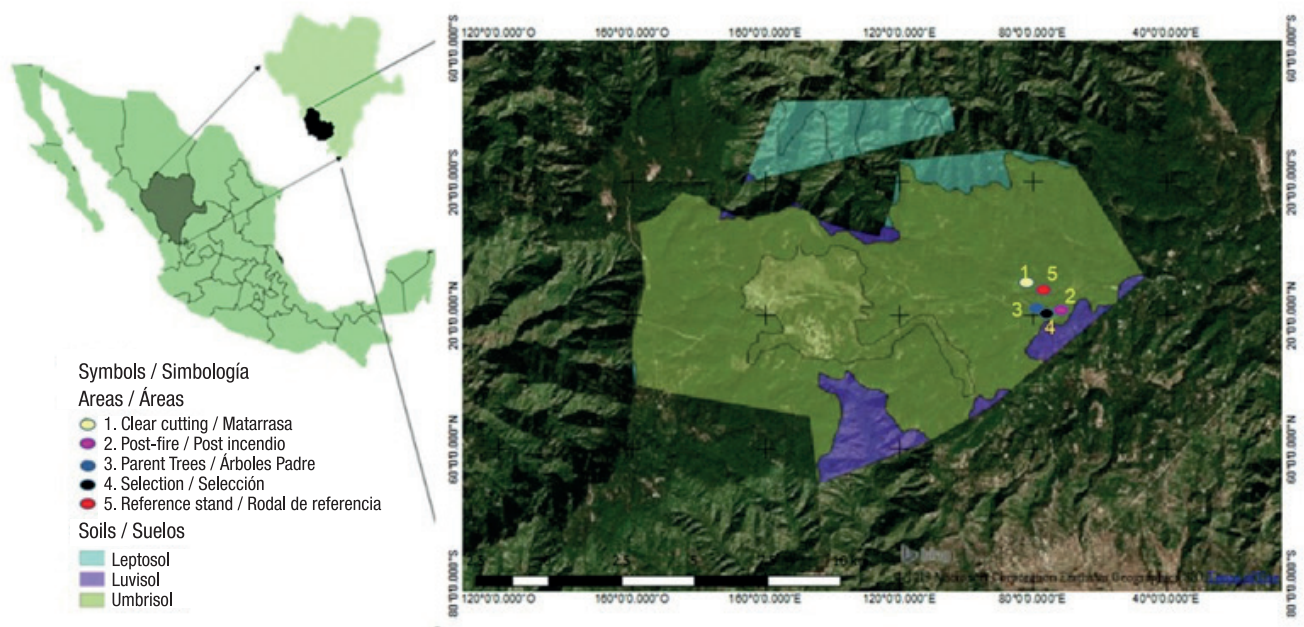


Figure 1. Study area in the forests of the ejido La Ciudad, municipality of Pueblo Nuevo, Durango, Mexico
Figura 1. Área de estudio en los bosques del ejido La Ciudad, municipio Pueblo Nuevo, Durango, México.

was established with an initial volume of $223.8 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, taking advantage of the equivalent of 34 % of the total volume; 4) post-fire (PF) of 10 ha, which received a pre-thinning (year 2017) when it had a density of $10\,000 \text{ ind} \cdot \text{ha}^{-1}$, and 5) reference stand (R), considered as such because it is the tree mass closest to the state of maturity, whose area is 4.35 ha with an actual volume of $231 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$.

In general, the stands have an average age of eight years to be exploited and, if necessary, damaged by fire. It is important to mention that the trees adjacent to the implemented cuts are representative of the diversity of the forest, in addition to being shade intolerant (*Pinus* genus), with age and seed production capacity, which did not compromise the establishment of regeneration (Hernández, Deras-Ávila, Deras-Ávila, & Colín, 2019).

Eight composite soil samples were collected from each stand at two depths (four samples from 0 to 20 cm and four more from 20 to 40 cm), for a total of 40 composite samples. The analysis was carried out in this way because the Umbrisols have a deep superficial horizon and are rich in organic matter, being these depths where the greatest amount of organic matter and nutrient cycling is concentrated (IUSS Working Group WRB, 2015). Subsequently, the samples were air dried and sieved ($<2 \text{ mm}$). The physical and hydrological properties, the method of determination and the unit of measurement used are shown in Table 1. It should be noted that the mechanical resistance to penetration and infiltration capacity were determined *in situ*.

una densidad residual de $77 \text{ ind} \cdot \text{ha}^{-1}$; 3) selección (S) que cuenta con 20 ha y se estableció con un volumen inicial de $223.8 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, aprovechando el equivalente a 34 % del volumen total; 4) posincendio (PI) de 10 ha, el cual recibió un preaclareo (año 2017) cuando tenía una densidad de $10\,000 \text{ ind} \cdot \text{ha}^{-1}$, y 5) rodal de referencia (R), considerado así por ser la masa arbórea más próxima al estado de madurez, cuya superficie es de 4.35 ha con un volumen real de $231 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$.

En general, los rodales cuentan con edad promedio de ocho años de ser sometidos el aprovechamiento y, en su caso, siniestrados por el incendio. Es importante mencionar que los árboles contiguos a las cortas implementadas son representativos de la diversidad del bosque, además de ser intolerantes a la sombra (género *Pinus*), con edad y capacidad de producción de semilla, lo cual no comprometió el establecimiento de la regeneración (Hernández, Deras-Ávila, Deras-Ávila, & Colín, 2019).

En cada rodal se recolectaron ocho muestras compuestas de suelo a dos profundidades (cuatro muestras de 0 a 20 cm y cuatro más de 20 a 40 cm), para un total de 40 muestras compuestas. El análisis se realizó de esta manera porque los Umbrisoles cuentan con un horizonte superficial profundo y son ricos en materia orgánica, siendo dichas profundidades, donde se concentra la mayor cantidad de materia orgánica y ciclaje de nutrientes (IUSS Working Group WRB, 2015). Posteriormente, las muestras se secaron al aire y se tamizaron ($<2 \text{ mm}$). En el Cuadro 1 se muestran las propiedades físicas e hidrológicas, el método de

Table 1. Methods for evaluating the physical and hydrological properties of an Umbrisol.
Cuadro 1. Métodos de evaluación de las propiedades físicas e hidrológicas de un Umbrisol.

Properties / Propiedades		Method / Método
Physical / Físicas	Texture (%) ^{1,2} / Textura (%) ^{1,2}	AS-09 NOM-021-RECNAT-2000 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2002)
	BD (g·cm ⁻³) ^{1,2} / DA (g·cm ⁻³) ^{1,2}	Gravimetric method (Woerner, 1989) / Método gravimétrico (Woerner, 1989)
	MRP (kg·cm ⁻²) ^{1,2} / RMP (kg·cm ⁻²) ^{1,2}	Penetrometer (soil hardness tester Yamanaka) (Medina et al., 2017) / Penetrómetro (soil hardness tester Yamanaka) (Medina et al., 2017)
	Porosity (%) ^{1,2} / Porosidad (%) ^{1,2}	Estimation by means of BD and particle size / Estimación por medio de DA y tamaño de partícula
	Ks (cm·s ⁻¹) ^{1,2}	Analysis specified by Japanese Industrial Standards (Das, 2002) / Análisis especificado por Japanese Industrial Standards (Das, 2002)
Hydrological / Hidrológicas	F _b , F ₀ y F _a (mm·h ⁻¹) ¹	Double ring (Yáñez-Díaz, Cantú-Silva, González-Rodríguez, & Sánchez-Castillo, 2019; Zhang et al., 2017) Doble anillo (Yáñez-Díaz, Cantú-Silva, González-Rodríguez, & Sánchez-Castillo, 2019; Zhang et al., 2017)
	Ad (%) ^{1,2}	Use of layer and pressure membrane with layer extractors (Soil Moisture Equipment Corp., Santa Barbara, CA, USA) (Klute & Dirksen, 1986) / Uso de la placa y la membrana de presión con extractores de placa (Soil Moisture Equipment Corp., Santa Barbara, CA, USA) (Klute & Dirksen, 1986)
	PWP (1.5 MPa) ^{1,2} / PMP (1.5 MPa) ^{1,2}	
	CC (%; 0.033 MPa) ^{1,2}	

AD = Bulk density, MRP = mechanical resistance to penetration, Ks = permeability, PWP = permanent wilt point, F_b = basic infiltration, F₀ = initial infiltration, F_a = accumulated infiltration, Ad = available water, CC = field capacity. Depth: 1 = 0 to 20 cm; 2 = 20 to 40 cm. Source: Own elaboration.

DA = densidad aparente, RMP = resistencia mecánica a la penetración, Ks = permeabilidad, PMP = punto de marchitez permanente, F_b = infiltración básica, F₀ = infiltración inicial, F_a = infiltración acumulada, Ad = agua disponible, CC = capacidad de campo. Profundidad: 1 = 0 a 20 cm; 2 = 20 a 40 cm. Fuente: Elaboración propia.

The organic layer (humus and litter fall) represents a fundamental component of the productivity of forest soils, so three quadrants of 30 cm x 30 cm were randomly selected for the collection of organic material in each forest stand. The dry weight (t·ha⁻¹) of litter fall and humus was analyzed separately. Each component was dried at 60 °C for 24 hours in the drying oven and weighed with the aid of a precision analytical balance (CP2202S, Sartorius, Germany).

Statistical Analysis

The Kolmogorov-Smirnov normality and goodness-of-fit test was applied to all variables, performing the necessary transformations (square root basis). Based on the results the following analyses were carried out: non parametric test of Kruskal-Wallis ($P \leq 0.05$) to the variables basic infiltration, accumulated infiltration, bulk density, porosity and silt; one way ANOVA (forest stand; $P \leq 0.01$) on initial infiltration and litter and humus contents; factorial ANOVA (forest stands and depth; $P \leq 0.01$) on the variables mechanical resistance to penetration, sand, clay, field capacity, permanent wilt point, available water and permeability.

In the case of the ANOVA, the Tukey *post hoc* test ($P \leq 0.05$) was carried out for the comparison of means. Finally, the physical and hydrological variables were related

determinación y la unidad de medición utilizadas. Cabe señalar que la resistencia mecánica a la penetración y la capacidad de infiltración se determinaron *in situ*.

La capa orgánica (humus y hojarasca) representa un componente fundamental de la productividad de los suelos forestales, por lo que se seleccionaron al azar tres cuadrantes de 30 cm x 30 cm, para la recolección del material orgánico en cada rodal silvícola. El peso seco (t·ha⁻¹) de la hojarasca y el humus se analizó por separado. Cada componente se secó a 60 °C durante 24 h en el horno de secado y se pesó con ayuda de una balanza analítica de precisión (CP2202S, Sartorius, Alemania).

Análisis estadístico

Se aplicó la prueba de normalidad y de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov a todas las variables, realizando las transformaciones necesarias (base raíz cuadrada). Con base en los resultados se realizaron los siguientes análisis: prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis ($P \leq 0.05$) a las variables infiltración básica, infiltración acumulada, densidad aparente, porosidad y limo; ANOVA de un factor (rodal silvícola; $P \leq 0.01$) en infiltración inicial y los contenidos de la hojarasca y humus; ANOVA factorial (rodas silvícolas y profundidad; $P \leq 0.01$) en las variables resistencia mecánica a la penetración, arena, arcilla, capacidad

by means of the Spearman correlation coefficient. All data were analyzed through the statistical package SPSS version 22 (International Business Machines [IBM], 2013).

Results

The Kruskal-Wallis test showed that at least one of the stands presented significant differences ($P \leq 0.05$) in F_b , F_a , BD, P and L. The one-way ANOVA indicated significant differences ($P \leq 0.05$) in initial infiltration (F_0) and in organic layer contents (humus and litter) between the forest stands. Table 2 shows that, according to Tukey's tests ($P \leq 0.05$), the average humus values in the seed tree, selection, post-fire, and reference stand treatments are statistically similar, in contrast to the clear cutting stand that had the lowest contents. The application of clear cutting had a negative effect on the hydrological variables F_0 , F_b , and F_a ; these decreased 52, 28, and 33 %, respectively, compared to the reference stand.

According to Table 3, the analysis of variance of two factors indicates that the differences were highly significant ($P \leq 0.01$) in MRP, sand (A) and clay (R) in the silvicultural treatment factor (FA). For the depth factor (FB), all variables were similar, except for the MRP. The interaction of the two factors (FA*FB) was significant only for the percentage of sand.

Table 4 presents the comparison of means for the depth factor; differences were significant ($P \leq 0.05$) in MRP, A and R in the two depths (0 to 20 cm and 20 to 40 cm). Tukey's test allowed differentiating the values in the reference stand and in the clear cutting, where MRP is the variable that suffers significant change, derived from the total removal of the tree, with increase higher than 100 % in both depths. According to the values of granulometric analysis, the soil textural class for all the stands was loam with 6 to 20 % of clay, 39 to 44 % of sand and 36 to 50 % of silt; the differences in the contents were significant ($P \leq 0.05$) between the silvicultural treatments and the regenerated post-fire area.

Correlation of physical and hydrological properties

Spearman's correlation coefficient shows that BD is significantly and negatively associated ($P \leq 0.01$) with A, R, Ks, and P. P and Ks are positively related to A and R and negatively related to BD and L, while the variables H_0 (litter), H_u (humus), F_0 , F_b , and F_a did not reflect correlation with any other property except for the positive relationship between F_0 and F_b (Table 5).

Discussion

According to results, the hydrological variables (F_0 , F_b and F_a) that compose the infiltration process, as well

de campo, punto de marchitez permanente, agua disponible y permeabilidad.

En el caso de los ANOVA se procedió a realizar la prueba *post hoc* de Tukey ($P \leq 0.05$) para la comparación de medias. Por último, las variables físicas e hidrológicas se relacionaron mediante el coeficiente de correlación Spearman. Todos los datos se analizaron a través del paquete estadístico SPSS versión 22 (International Business Machines [IBM], 2013).

Resultados

La prueba de Kruskal-Wallis demostró que, por lo menos uno de los rodales presentó diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en F_b , F_a , DA, P y L. El ANOVA de un factor indicó diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en infiltración inicial (F_0) y en los contenidos de la capa orgánica (humus y hojarasca) entre los rodales silvícolas. El Cuadro 2 muestra que, de acuerdo con las pruebas de Tukey ($P \leq 0.05$), los valores promedios de humus en los tratamientos de árboles padre, selección, posincendio y rodal de referencia son estadísticamente similares, en contraste con el rodal de matarrasa que tuvo el contenido más bajo. La aplicación de matarrasa tuvo efecto negativo en las variables hidrológicas F_0 , F_b y F_a ; estas disminuyeron 52, 28 y 33 %, respectivamente, en comparación con el rodal de referencia.

Acorde con el Cuadro 3, el análisis de varianza de dos factores indica que las diferencias fueron altamente significativas ($P \leq 0.01$) en la RMP, arena (A) y arcilla (R) en el factor de tratamiento silvícola (FA). Para el factor profundidad (FB), todas las variables fueron similares, a excepción de la RMP. La interacción de los dos factores (FA*FB) solo fue significativa para el porcentaje de arena.

El Cuadro 4 presenta la comparación de medias para el factor profundidad; las diferencias fueron significativas ($P \leq 0.05$) en RMP, A y R en las dos profundidades (0 a 20 cm y 20 a 40 cm). La prueba de Tukey permitió diferenciar los valores en el rodal de referencia y matarrasa, donde RMP es la variable que sufre cambio significativo, derivado de la remoción total del arbolado, con incremento superior al 100 % en ambas profundidades. De acuerdo con los valores del análisis granulométrico, la clase textural para todos los rodales fue franco con 6 a 20 % de arcilla, 39 a 44 % de arena y 36 a 50 % de limo; las diferencias en los contenidos fueron significativas ($P \leq 0.05$) entre los tratamientos silvícolas y el área regenerada de posincendio.

Correlación de las propiedades físicas e hidrológicas

El coeficiente de correlación de Spearman muestra que la DA se asocia significativa y negativamente

Table 2. Comparison of means for infiltration and organic layer variables in five forest stands in an Umbrisol.**Cuadro 2. Comparación de medias para variables de infiltración y capa orgánica en cinco rodales silvícolas en un Umbrisol.**

Forestry stands / Rodaes silvícolas	Variables of the infiltration process / Variables del proceso de infiltración			Organic layer (t·ha ⁻¹) / Capa orgánica (t·ha ⁻¹)	
	F ₀ (mm·h ⁻¹)	F _b (mm·h ⁻¹)	F _a (mm)	Leaf litter / Hojarasca	Humus
Clear cutting / Matarrasa	1 000 a	214.09*	1 090.49*	0.34 a	0.69 a
Selection / Selección	1 080 ab	322.08*	1 522.43*	0.92 a	2.34 b
Post-fire / Posincendio	1 120 ab	226.95*	1 172.49*	2.14 ab	2.42 b
Seed trees / Árboles padre	1 350 b	299.56*	1 720.37*	0.95 a	2.46 b
Reference stand / Rodal de referencia	2 080 c	297.93*	1 642.29*	1.60 b	2.28 b

Values with a different letter (Tukey) and with an asterisk (Kruskal-Wallis) represent significant statistical differences between the stands ($P \leq 0.05$). F₀, F_b and F_a = initial, basic and accumulated infiltration, respectively.

Valores con letra distinta (Tukey) y con asterisco (Kruskal-Wallis) representan diferencias estadísticas significativas entre los rodales ($P \leq 0.05$). F₀, F_b y F_a = infiltración inicial, básica y acumulada, respectivamente.

Table 3. Summary of the analysis of variance of silvicultural treatment (FA) and depth (FB) factors and their interaction (FA*FB) in the physical and hydrological properties of an Umbrisol.**Cuadro 3. Resumen del análisis de varianza de los factores tratamiento silvícola (FA) y profundidad (FB) y su interacción (FA*FB) en las propiedades físicas e hidrológicas de un Umbrisol.**

Variable (unit) / Variable (unidad)	FA (F _{4, 30})	FB (F _{1, 30})	FA*FB (F _{9, 30})
MRP (kg·cm ⁻²) / RMP (kg·cm ⁻²)	13.199**	35.037**	2.333 ns
Sand (%) / Arena (%)	19.641**	1.287 ns	2.954**
Clay (%) / Arcilla (%)	9.105**	3.651 ns	1.080 ns
Field capacity (%) / Capacidad de campo (%)	1.725 ns	0.059 ns	1.045 ns
PWP (%) / PMP (%)	1.995 ns	0.263 ns	0.561 ns
Available water (%) / Agua disponible (%)	1.683 ns	1.423 ns	1.436 ns
Permeability (cm·s ⁻¹) / Permeabilidad (cm·s ⁻¹)	2.115 ns	0.476 ns	0.260 ns

**Highly significant differences ($P \leq 0.01$); ns = not significant. MRP = mechanical resistance to penetration, PWP = permanent wilt point.

**Diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$); ns = no significativo. RMP = resistencia mecánica a la penetración, PMP = punto de marchitez permanente.

Table 4. Comparison of averages of physical and hydrological properties for depths 0 to 20 cm and 20 to 40 cm in the forest stands of an Umbrisol soil.**Cuadro 4. Comparación de medias de las propiedades físicas e hidrológicas para las profundidades 0 a 20 cm y 20 a 40 cm en los rodales silvícolas de un suelo Umbrisol.**

Variable	Silvicultural stand/Rodal silvícola				
	0 to 20 cm	PF/PI	S	R	ST/AP
P (%)	78.108*	80.815*	78.110*	72.762*	69.888*
BD (g·cm ⁻³)/DA (g·cm ⁻³)	0.580*	0.508*	0.580*	0.722*	0.798*
MRP (kg·cm ⁻²)/RMP (kg·cm ⁻²)	3.575 a	4.100 a	3.375 a	4.475 a	10.875 b
A (%)	39.920 a	44.680 b	43.660 b	40.600 a	40.260 a
R (%)	10.940 bc	6.0867 a	7.396 ab	8.141 bc	8.141 c
L (%)	48.440*	38.040*	40.700*	45.970*	48.560*
FC (%) / CC (%)	67.471 a	70.079 a	52.273 a	62.198 a	43.720 a
PWP (%) / PMP (%)	40.990 a	35.637 a	24.312 a	43.651 a	21.326 a
Ad (%)	31.146 a	43.490 a	29.104 a	32.433 a	23.555 a
Ks (cm·s ⁻¹)	0.002 a	0.002 a	0.003 a	0.002 a	0.002 a
20 a 40 cm	PF/PI	S	R	ST/AP	CC/M
P (%)	74.409*	67.969*	74.005*	67.862*	71.095*
BD (g·cm ⁻³)/DA (g·cm ⁻³)	0.678*	0.849*	0.689*	0.852*	0.766*
MRP (kg·cm ⁻²)/RMP (kg·cm ⁻²)	1.300 a	1.650 a	1.425 a	1.637 a	4.100 b
A (%)	39.580 a	44.340 b	40.600 a	41.280 a	39.580 a
R (%)	12.360 bc	19.460 a	19.820 a	17.180 ab	10.430 c
L (%)	48.060*	36.20*	39.580*	41.540*	49.990*
FC (%) / CC (%)	59.156 a	64.439 a	40.920 a	59.057 a	43.769 a
PWP (%) / PMP (%)	31.170 a	30.416 a	17.431 a	30.305 a	26.222 a
Ad (%)	27.747 a	33.857 a	23.672 a	29.473 a	24.431 a
Ks (cm·s ⁻¹)	0.006 a	0.004 a	0.005 a	0.001 a	0.004 a

Different letters (Tukey) and asterisks (Kruskal-Wallis) represent significant differences ($P \leq 0.05$). PF = post-fire, S = selection, R = reference stand, ST = seed trees, CC = clear cutting, P = porosity, BD = bulk density, MRP = mechanical resistance to penetration, A = sand, R = clay, L = silt, FC = field capacity, PWP = permanent wilt point, Ad = available water, Ks = permeability.

Letras distintas (Tukey) y asteriscos (Kruskal-Wallis) representan diferencias significativas ($P \leq 0.05$). PI = posincendio, S = selección, R = rodal de referencia, AP = árboles padre, M = matarrasa, P = porosidad, DA = densidad aparente, RMP = resistencia mecánica a la penetración, A = arena, R = arcilla, L = limo, CC = capacidad de campo, PMP = punto de marchitez permanente, Ad = agua disponible, Ks = permeabilidad.

Table 5. Spearman correlation coefficient for physical and hydrological properties analyzed in an Umbrisol soil. Cuadro 5. Coeficiente de correlación de Spearman para las propiedades físicas e hidrológicas analizadas en un suelo Umbrisol.

	BD/ DA	MRP/ RMP	A	R	L	CC	PWP/ PMP	Ad	Ks	P	Ho	Hu	F ₀	F _b	F _a
BD/ DA	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MRP/ RMP	0.37	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A	-.60**	-0.31	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R	-.72**	-0.40	.79**	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L	.68**	0.32	-.94**	-.93**	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FC/ CC	-0.44	-.537*	0.28	0.35	-0.24	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PWP/ PMP	-0.24	-.531*	0.01	0.30	-0.10	.68**	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Ad	-0.39	-0.25	.47*	0.25	-0.33	.68**	-0.02	1	-	-	-	-	-	-	-
Ks	-.610**	-0.12	.72**	.56*	-.67**	0.21	-0.13	0.46	1	-	-	-	-	-	-
P	-1.00**	-0.37	.60**	.72**	-.68**	0.44	0.24	0.39	.61**	1	-	-	-	-	-
Ho	-0.01	-0.20	0.33	0.05	-0.19	-0.04	-0.12	0.08	0.28	0.01	1	-	-	-	-
Hu	0.23	0.50	-0.09	-0.37	0.28	-0.31	-0.53	-0.06	0.34	-0.23	0.46	1	-	-	-
F ₀	-0.03	-0.16	-0.02	-0.11	-0.05	-0.31	-0.22	-0.17	-0.07	0.03	0.05	-0.29	1	-	-
F _b	-0.21	-0.34	0.18	0.00	-0.17	-0.02	-0.17	0.20	0.33	0.21	0.22	-0.15	.74**	1	-
F _a	0.16	-0.14	-0.34	-0.36	0.42	0.32	0.28	0.11	-0.08	-0.16	-0.16	0.02	-0.05	0.24	1

*Significant correlations ($P \leq 0.05$); **highly significant correlations ($P \leq 0.01$). BD = bulk density, MRP = mechanical resistance to penetration, A = sand, R = clay, L = silt, FC = field capacity, PWP = permanent wilt point, Ad = available water, Ks = permeability, P = porosity, Ho = litter, Hu = humus, F_b = basic infiltration, F₀ = initial infiltration, F_a = accumulated infiltration.

*Correlaciones significativas ($P \leq 0.05$); **correlaciones altamente significativas ($P \leq 0.01$). DA = densidad aparente, RMP = resistencia mecánica a la penetración, A = Arena, R = arcilla, L = limo, CC = capacidad de campo, PMP = punto de marchitez permanente, Ad = agua disponible, Ks = permeabilidad, P = porosidad, Ho = hojarasca, Hu = humus, F_b = infiltración básica, F₀ = infiltración inicial, F_a = infiltración acumulada.

as the contents of the organic layer, were directly affected by the modification of the plant cover, effect of the regeneration cuts. These results reaffirm what Dueñez, Gutiérrez, Pérez, and Nívar (2006), Landini et al. (2007) and Di Prima et al. (2017) have reported, who define that the degree of intensity of the cuts, as well as the planning and use activities, directly influence the physical and hydrological relations of the soil.

On the other hand, Ghestem, Sidle, and Stokes (2017) point out that the high rates of infiltration can be attributed to the formation of macropores associated with the decomposition of buried roots, residuals of the exploitations, being a significant channel of infiltration for the soil. This coincides with the high values of basic infiltration (F_b) of the selection stands, with respect to the reference stand. The opposite occurred in the clear cutting stand, where despite total extraction, low infiltration rates were shown. In this regard, Cambi et al. (2017) state that the decrease in infiltration may be due to factors such as demolition activities and the use of mechanization that cause compaction and reduction of pores in the soil. Leung, Garg, Co, Ng, and Hau (2017) and Scholl et al. (2014)

($P \leq 0.01$) con A, R, Ks y P. La P y Ks se relacionan positivamente con A y R y negativamente con DA y L, mientras que las variables Ho (hojarasca), Hu (humus), F₀, F_b, y F_a no reflejaron correlación con alguna otra propiedad a excepción de la relación positiva entre F₀ y F_b (Cuadro 5).

Discusión

De acuerdo con los resultados, las variables hidrológicas (F₀, F_b y F_a) que componen el proceso de infiltración, así como los contenidos de la capa orgánica, fueron afectados directamente por la modificación de la cobertura vegetal, efecto de las cortas de regeneración. Estos resultados reafirman lo señalado por Dueñez, Gutiérrez, Pérez, y Nívar (2006), Landini et al. (2007) y Di Prima et al. (2017), quienes definen que el grado de intensidad de las cortas, así como las actividades de planeación y aprovechamiento, influyen directamente en las relaciones físicas e hidrológicas del suelo.

Por otra parte, Ghestem, Sidle, y Stokes (2017) señalan que las tasas altas de infiltración pueden atribuirse a la formación de macroporos asociados a la

indicate that decreased infiltration may be caused by root occupation that reduces the pore space of the soil, blocking the flow of water; while Karlin et al. (2019) point out that another possible cause of the modification of infiltration capacity may be the alteration of the porosity and density of soils at the surface level, due to the accumulation of organic material combustion. However, it is important to note that in the results of the present study no significant correlations were observed between the infiltration variables and the rest of the physical and hydrological variables, for which reason no direct attributions can be established in the variations of infiltration in the evaluated stands.

Some important aspects that contribute to a greater resilience of the physical and hydrological properties of the soil are the state or degree of composition, structure and state of maturity of the forest stands (Archer et al., 2016). This is consistent with the results, where the reference (control) stand showed optimal conditions for most variables, in general.

In the post-fire area, litter fall and humus contents increased 33.75 and 6.14 %, respectively, regarding the reference stand, mainly due to the fact that the forest mass is developing in competition for space, causing constant self-pruning and accumulation of organic plant material on the soil surface. This coincides with Jain et al. (2008), who point out that the effects of fire directly influence the composition and structure of forests and, therefore, the physical characteristics of the soil are modified. Rodríguez-Ortiz et al. (2011a) indicate that the concentrations of litter fall and humus vary between each regeneration cut, mainly by density, size and age of the residual trees, since the denser and more mature a mass is, there is probably a greater amount of litter fall deposit in the soil. This coincides with the values of litter in the reference stand with respect to the clear cutting, selection and seed trees of this study.

In this study, the forest stands showed similar humus contents, except for the clear cutting stand, where the content decreased by almost 80 %. There are several factors that can alter the amount of humus; for example, it is understood that the clear cutting eliminates soil cover and, in the case of intense precipitation events and strong winds, the amount of humus will most likely decrease due to erosion (Rodríguez-Ortiz et al., 2011b).

The partial and complete elimination of the tree cover due to the effect of the treatments of seed trees and clear cuttings, considered of greater intensity (80 and 100 %, respectively), contributed directly to the increase of BD (24.28 and 37.58 %) and MRP (32.59 and 222.22 %) values in the depth of 0 to 20 cm in relation to the

descomposición de las raíces enterradas, residuales de los aprovechamientos, siendo un canal de infiltración significativo para el suelo. Lo anterior coincide con los valores altos de infiltración básica (F_b) de los rodales de selección, respecto al rodal de referencia. Contrario a lo anterior ocurrió en el rodal de matarrasa, donde a pesar de la extracción total se mostraron tasas de infiltración bajas. Al respecto, Cambi et al. (2017) afirma que la disminución de infiltración puede deberse a factores como las actividades de derribo y mecanización del aprovechamiento que causan la compactación y disminución de poros en el suelo. Leung, Garg, Co, Ng, y Hau (2017) y Scholl et al. (2014) indican que la disminución de infiltración puede ser causada por la ocupación de las raíces que reducen el espacio poroso del suelo, bloqueando el flujo del agua; mientras que Karlin et al. (2019) señalan que otra causa posible de la modificación de la capacidad de infiltración puede ser la alteración de la porosidad y densidad de los suelos a nivel superficial, por efecto de la acumulación de material orgánico combustionado. No obstante, es importante señalar que en los resultados del presente estudio no se observaron correlaciones significativas entre las variables de infiltración y el resto de las variables físicas e hidrológicas, por lo que no se pueden establecer atribuciones directas en las variaciones de infiltración en los rodales evaluados.

Algunos aspectos importantes que contribuyen a una mayor resiliencia de las propiedades físicas e hidrológicas del suelo son el estado o grado de composición, estructura y estado de madurez de las masas forestales (Archer et al., 2016). Esto concuerda con los resultados, donde el rodal de referencia (testigo) mostró, en general, condiciones óptimas para la mayoría de las variables.

En el área posincendio, los contenidos de hojarasca y humus incrementaron 33.75 y 6.14 %, respectivamente, respecto al rodal de referencia, debido principalmente a que la masa forestal se desarrolla en competencia por el espacio provocando autopodas constantes y acumulación de material orgánico vegetal en la superficie del suelo. Lo anterior coincide con Jain et al. (2008), quienes señalan que los efectos del incendio influyen directamente sobre la composición y estructura de los bosques y, por ende, las características físicas del suelo se modifican. Rodríguez-Ortiz et al. (2011a) indican que las concentraciones de hojarasca y humus varían entre cada corta de regeneración, principalmente por la densidad, dimensiones y la edad del arbolado residual, ya que entre más densa y madura esté una masa, probablemente exista mayor cantidad de depósito de hojarasca en el suelo. Esto coincide con los valores de hojarasca en el rodal de referencia respecto a matarrasa, selección y árboles padre del presente estudio.

reference stand. This is consistent with Edlund et al. (2013) and Marchi et al. (2016), who indicate that the most significant impact on the condition of forest soil is caused by forestry operations, mainly on the surface of the land.

In general, the contents of FC, PWP and Ad were similar in all stands. However, in the selection stand, these variables increased by 45.76, 60.53, and 46.22 % compared to the reference stand, respectively. Variations may be related to the applied cutting intensity, since it defines the canopy opening, modifying the levels of precipitation interception and percolation, causing an effect on soil moisture; however, total elimination of the tree increases soil temperature and evaporation rates, which may reflect low moisture contents (Di Prima et al., 2017; Landini et al., 2007). Likewise, Gaspar-Santos, González-Espinosa, Ramírez-Marcial, and Álvarez-Solís (2015) point out that soil moisture can be linked to physical and chemical attributes such as the amount of humus; decreases in this component will cause considerable soil moisture losses, which coincides with the results of the clear cutting stand that has low contents of this organic material and low soil moisture.

From Spearman's correlation test, it can be deduced that logging mainly modifies the physical properties of the soil. The test indicated that P and Ks showed significant negative association with BD. The values of the stands of seed trees and clear cutting confirm the above; both stands, subjected to high intensity logging, had increases in BD and decreases in P and Ks. According to Amoakwah, Frimpong, Okae-Anti, and Arthur (2017), these variables perform vitally important functions for vegetation, such as nutrient availability and air and water circulation, and are considered highly vulnerable due to anthropogenic action.

Conclusions

The effects of forest management on soil properties vary according to the regeneration cut and the occurrence of the fire. Leaf and humus contents, mechanical resistance to penetration, bulk density, porosity and infiltration were more vulnerable to changes in canopy structure. The clear cutting provides immediate economic benefits, but has disadvantages such as decreased moisture and organic material, and soil compaction. For this reason, the use of clear cutting should consider management and conservation practices immediate to the cut, for example, the maintenance of waste in the soil that could avoid water loss due to precipitation and direct exposure to the sun. From the perspective of conservation of physical and hydrological properties, the cutting of seed trees and selection did not cause significant variations

En este estudio, los rodales silvícolas mostraron contenidos de humus similares, a excepción del rodal de matarrasa, donde el contenido disminuyó casi en 80 %. Hay varios factores que pueden alterar la cantidad de humus; por ejemplo, se entiende que la corta de matarrasa elimina la cobertura del suelo y, en caso de ocurrencia de eventos de precipitación intensos y vientos fuertes, lo más probable es que la cantidad de humus disminuya por efecto de la erosión (Rodríguez-Ortiz et al., 2011b).

La eliminación parcial y completa de la cobertura arbórea por efecto de los tratamientos de árboles padre y matarrasa, considerados de mayor intensidad (80 y 100 %, respectivamente), contribuyó directamente en el aumento de los valores de DA (24.28 y 37.58 %) y RMP (32.59 y 222.22 %) en la profundidad de 0 a 20 cm con relación al rodal de referencia. Lo anterior concuerda con lo señalado por Edlund et al. (2013) y Marchi et al. (2016), quienes indican que el impacto más significativo sobre la condición del suelo forestal es ocasionado por las operaciones forestales, principalmente en la parte superficial del terreno.

En general, los contenidos de CC, PMP y Ad fueron similares en todos los rodales. No obstante, en el rodal de selección, dichas variables aumentaron 45.76, 60.53, 46.22 %, respectivamente, en comparación con el rodal de referencia. Las variaciones pueden estar relacionadas con la intensidad de corta aplicada, ya que define la apertura del dosel, modificando los niveles de intercepción de la precipitación y percolación, provocando efecto en la humedad del suelo; sin embargo, la eliminación total del arbolado aumenta la temperatura del suelo y las tasas de evaporación, lo cual puede reflejar contenidos bajos de humedad (Di Prima et al., 2017; Landini et al., 2007). Asimismo, Gaspar-Santos, González-Espinosa, Ramírez-Marcial, y Álvarez-Solís (2015) señalan que la humedad en el suelo puede estar vinculada con atributos físicos y químicos como la cantidad de humus; decrementos de este componente provocará pérdidas de humedad del suelo considerables, lo cual coincide con los resultados del rodal de matarrasa que posee contenidos bajos de este material orgánico y baja humedad del suelo.

A partir de la prueba de correlación de Spearman se puede deducir que el aprovechamiento forestal modifica principalmente las propiedades físicas del suelo. La prueba indicó que la P y Ks mostraron asociación negativa significativa con la DA. Los valores de los rodales de árboles padre y matarrasa confirman lo ya mencionado; ambos rodales, sometidos a cortas de alta intensidad, tuvieron aumentos de DA y disminuciones de P y Ks. Según Amoakwah, Frimpong, Okae-Anti, y Arthur (2017), estas variables desempeñan funciones de vital importancia para la vegetación, tales como

as the total cut. The valuation of soil properties is still scarce and should be considered a fundamental tool for forest planning and the establishment of criteria that facilitate soil sustainability.

Acknowledgements

The authors wish to express their appreciation to the Unidad de Prestación de Servicios Ejidales No. 6 El Salto, A. C., and to CONACYT for the facilities granted for the development of this research.

End of English version

References / Referencias

- Amoakwah, E., Frimpong, K. A., Okae-Anti, D., & Arthur, E. (2017). Soil water retention, air flow and pore structure characteristics after corn cob biochar application to a tropical sandy loam. *Geoderma*, 307, 189–197. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.08.025
- Archer, N. A., Otten, W., Schmidt, S., Bengough, A. G., Shah, N., & Bonell, M. (2016). Rainfall infiltration and soil hydrological characteristics below ancient forest, planted forest and grassland in a temperate northern climate. *Ecohydrology*, 9(4), 585–600. doi: 10.1002/eco.1658
- Bai, Z., Caspari, T., Gonzalez, M. R., Batjes, N. H., Mäder, P., Bünemann, E. K., ...Reintam, E. (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
- Bhattacharyya, T., & Pal, D. K. (2015). The soil: A natural resource. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/304057204_The_soil_a_natural_resource
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Pulleman, M., ...Brussaard, L. (2018). Soil quality—A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105–125. doi: 10.1016/j.soilbio.2018.01.030
- Cambi, M., Certini, G., Fabiano, F., Foderi, C., Laschi, A., & Picchio, R. (2016). Impact of wheeled and tracked tractors on soil physical properties in a mixed conifer stand. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 9(1), 89–94. doi: 10.3832/ifer1382-008
- Cambi, M., Certini, G., Neri, F., & Marchi, E. (2015). The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest Ecology and Management*, 338, 124–138. doi: 10.1016/j.foreco.2014.11.022
- Cambi, M., Hoshika, Y., Mariotti, B., Paoletti, E., Picchio, R., Venanzi, R., & Marchi, E. (2017). Compaction by a forest machine affects soil quality and *Quercus robur* L. seedling performance in an experimental field. *Forest*

la disponibilidad de nutrientes y circulación de aire y agua, y son consideradas altamente vulnerables por la acción antropogénica.

Conclusiones

Los efectos del manejo forestal en las propiedades del suelo varían de acuerdo con la corta de regeneración y la ocurrencia del incendio. Los contenidos de hojarasca y humus, resistencia mecánica a la penetración, densidad aparente, porosidad e infiltración fueron más vulnerables a los cambios en la estructura del dosel. Las cortas de matarrasa proporcionan beneficios económicos inmediatos, pero presentan desventajas como disminución de humedad y material orgánico, y compactación del suelo. Por lo anterior, el uso de matarrasa debe contemplar prácticas de manejo y conservación inmediatas a la corta; por ejemplo, el mantenimiento de residuos de aprovechamiento en el suelo que podría evitar pérdidas hídricas por precipitación y exposición directa al sol. Desde la perspectiva de conservación de las propiedades físicas e hidrológicas, las cortas de árboles padre y selección no provocaron variaciones significativas como la corta total. La valoración de las propiedades edáficas es aún escasa y debe considerarse una herramienta fundamental para la planeación forestal y el establecimiento de criterios que faciliten la sustentabilidad del suelo.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su reconocimiento a la Unidad de Prestación de Servicios Ejidales núm. 6 El Salto, A. C., y al CONACYT por las facilidades otorgadas para el desarrollo de esta investigación.

Fin de la versión en español

- Ecology and Management*, 384, 406–414. doi: 10.1016/j.foreco.2016.10.045
- Das, B. M. (2002). *Soil mechanics laboratory manual* (6th ed.). Oxford, NY: Oxford University Press.
- Di Prima, S., Bagarello, V., Angulo-Jaramillo, R., Bautista, I., Cerdà, A., Del Campo, A., ...Maetzke, F. (2017). Impacts of thinning of a Mediterranean oak forest on soil properties influencing water infiltration. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 65(3), 276–286. doi: 10.1515/johh-2017-0016
- Dueñez, A. J., Gutiérrez, J., Pérez, L., & Nívar, J. (2006). Manejo silvícola, capacidad de infiltración, escurrimiento superficial y erosión. *Terra Latinoamericana*, 24(2), 233–240. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/573/57311108010.pdf>
- Edlund, J., Keramati, E., & Servin, M. (2013). A long-tracked bogie design for forestry machines on soft and rough terrain. *Journal of Terramechanics*, 50(2), 73–83. doi: 10.1016/j.jterra.2013.02.001
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2019). Aumentan las emisiones de gases de efecto invernadero de la agricultura. Retrieved October 29, 2019 from <http://www.fao.org/news/story/es/item/218907/icode/>
- Gaspar-Santos, E. S., González-Espinosa, M., Ramírez-Marcial, N., & Álvarez-Solís, J. D. (2015). Acumulación y descomposición de hojarasca en bosques secundarios del sur de la Sierra Madre de Chiapas, México. *Bosque (Valdivia)*, 36(3), 467–480. doi: 10.4067/S0717-92002015000300013
- Ghestem, M., Sidle, R. C., & Stokes, A. (2011). The influence of plant root systems on subsurface flow: implications for slope stability. *Bioscience*, 61(11), 869–879. doi: 10.1525/bio.2011.61.11.6
- González-Elizondo, M. S., González-Elizondo, M., Tena-Flores, J. A., Ruacho-González, L., & López-Enríquez, I. (2012). Vegetación de la Sierra Madre Occidental, México: Una síntesis. *Acta Botánica Mexicana*, 100, 351–403. doi: 10.21829/abm100.2012.40
- Hernández, F. J., Deras-Ávila, A. G., Deras-Ávila, N. I., & Colín, J. G. (2019). Influence of the seed tree method on the diversity of regeneration in a mixed forest in Durango, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 25(2), 219–234. doi: 10.5154/r.rchscfa.2018.09.066
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2005. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Clave geoestadística. Pueblo Nuevo, Durango, México. Retrieved from http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/10/10023.pdf
- International Business Machines (IBM). (2013). IBM SPSS Statistics for Windows, version 22.0. Armonk, NY, USA: IBM Corp.
- IUSS Working Group WRB. (2015). *Base referencial mundial del recurso suelo 2014. Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization (FAO). Retrieved from <http://www.fao.org/3/i3794es/I3794es.pdf>
- Jain, T. B., Gould, W. A., Graham, R. T., Pilliod, D. S., Lentile, L. B., & González, G. (2008). A soil burn severity index for understanding soil-fire relations in tropical forests. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 37(7-8), 563–568. Retrieved from https://www.fs.fed.us/rm/pubs_other/rmrs_2008_jain_t001.pdf
- Karlin, S., Salazar, B. J., Cora, A., Sánchez, S., Arnulphi, S., & Accietto, R. (2019). Cambios en el uso del suelo: capacidad de infiltración en el centro de Córdoba (Argentina). *Ciencia del Suelo*, 37(2). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/338052610_CAMBIOS_EN_EL_USO_DEL_SUELO_CAPACIDAD_DE_INFILTRACION_EN_EL_CENTRO_DE_CORDOBA_ARGENTINA
- Klute, A., & Dirksen, C. (1986). Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. In A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis: part 1—physical and mineralogical methods*, (2nd ed., pp. 687–734). USA: American Society of Agronomy, Inc. doi: 10.2136/sssabookser5.1.2ed.c28
- Kopittke, P. M., Menzies, N. W., Wang, P., McKenna, B. A., & Lombi, E. (2019). Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment International*, 132. doi: 10.1016/j.envint.2019.105078
- Landini, A. M., Martínez, D., Días, H., Soza, E., Agnes, D., & Sainato, C. (2007). Modelos de infiltración y funciones de pedotransferencia aplicados a suelos de distinta textura. *Ciencia del Suelo*, 25(2), 123–131. Retrieved from http://suelos.org.ar/publicaciones/vol_25n2/25_2_landini_123_131.pdf
- Leung, A. K., Garg, A., Coe, J. L., Ng, C. W. W., & Hau, B. C. H. (2015). Effects of the roots of *Cynodon dactylon* and *Schefflera heptaphylla* on water infiltration rate and soil hydraulic conductivity. *Hydrological Processes*, 29(15), 3342–3354. doi: 10.1002/hyp.10452
- López-Hernández, J. A., Aguirre-Calderón, Ó. A., Alanís-Rodríguez, E., Monárrez-González, J. C., González-Tagle, M. A., & Jiménez-Pérez, J. (2017). Composición and diversidad de especies forestales en bosques templados de Puebla, México. *Madera y Bosques*, 23(1), 39–51. doi: 10.21829/myb.2017.2311518
- Marchi, E., Picchio, R., Mederski, P. S., Vusić, D., Perugini, M., & Venanzi, R. (2016). Impact of silvicultural treatment and forest operation on soil and regeneration in Mediterranean Turkey oak (*Quercus cerris* L.) coppice with standards. *Ecological Engineering*, 95, 475–484. doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.06.084
- Medina, G. R., Cantú, S. I., González, H., Pando, M. M., Kubota, T., & Gómez, M. M. V. (2017). Efectos del rodillo aireador y el fuego en las propiedades físicas e hidrológicas del suelo en matorrales de Coahuila, México. *Agrociencia*, 51(5), 471–485. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952017000500471
- Montanarella, L. (2015). Agricultural policy: Govern our soils. *Nature News*, 528(7580), 32. doi: 10.1038/528032a

- Muñoz-Rojas, M. (2018). Soil quality indicators: a critical tool in ecosystem restoration. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 5, 47–52. doi: 10.1016/j.coesh.2018.04.007
- Ortega, D. J. P., Ortega, J. A. S., Moncayo, P. C. C., Vargas, I. A. D., & Pompê, M. L. M. (2018). Uso del suelo y su influencia en la presión y degradación de los recursos hídricos en cuencas hidrográficas. *RIAA*, 9(1). Retrieved from <http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/2089/2377>
- Picchio, R., Magagnotti, N., Sirna, A., & Spinelli, R. (2012). Improved winching technique to reduce logging damage. *Ecological Engineering*, 47, 83–86. doi: 10.1016/j.ecoleng.2012.06.037
- Picchio, R., Neri, F., Maesano, M., Savelli, S., Sirna, A., Blasi, S., ...Marchi, E. (2011). Growth effects of thinning damage in a Corsican pine (*Pinus laricio* Poiret) stand in central Italy. *Forest Ecology and Management*, 262(2), 237–243. doi: 10.1016/j.foreco.2011.03.028
- Picchio, R., Neri, F., Petrini, E., Verani, S., Marchi, E., & Certini, G. (2012). Machinery-induced soil compaction in thinning two pine stands in central Italy. *Forest Ecology and Management*, 285, 38–43. doi: 10.1016/j.foreco.2012.08.008
- Rodríguez-Ortiz, G., Aldrete, A., González-Hernández, V. A., De los Santos-Posadas, H. M., Gómez-Guerrero, A., & Fierros-González, A. M. (2011a). ¿Afectan los aclareos la acumulación de biomasa aérea en una plantación de *Pinus patula*? *Agrociencia*, 45(6), 719–732. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952011000600007
- Rodríguez-Ortiz, G., González-Hernández, V. A., Aldrete, A., De Los Santos-Posadas, H. M., Gómez-Guerrero, A., & Fierros-González, A. M. (2011b). Modelos para estimar crecimiento y eficiencia de crecimiento en plantaciones de *Pinus patula* en respuesta al aclareo. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 34(3), 205–212. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802011000300012
- Sahagún, S. F. J., & Reyes, H. H. (2018). Impactos por cambio de uso de suelo en las áreas naturales protegidas de la región central de la Sierra Madre Oriental, México. *Ciencia UAT*, 12(2), 6–21. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-78582018000100006&script=sci_abstract&tlng=en
- Scholl, P., Leitner, D., Kammerer, G., Loiskandl, W., Kaul, H. P., & Bodner, G. (2014). Root induced changes of effective 1D hydraulic properties in a soil column. *Plant and Soil*, 381(1-2), 193–213. doi: 10.1007/s11104-014-2121-x
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2002). Norma oficial mexicana, NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. México: Diario Oficial de la Federación. Retrieved from <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf>
- Sirén, M., Ala-Ilomäki, J., Mäkinen, H., Lamminen, S., & Mikkola, T. (2013). Harvesting damage caused by thinning of Norway spruce in unfrozen soil. *International Journal of Forest Engineering*, 24(1), 60–75. doi: 10.1080/19132220.2013.792155
- Spinelli, R., Magagnotti, N., & Nati, C. (2010). Benchmarking the impact of traditional small-scale logging systems used in Mediterranean forestry. *Forest Ecology and Management*, 260(11), 1997–2001. doi: 10.1016/j.foreco.2010.08.048
- Tavankar, F., Bonyad, A. E., & Majnounian, B. (2015). Affective factors on residual tree damage during selection cutting and cable-skidder logging in the Caspian forests, Northern Iran. *Ecological Engineering*, 83, 505–512. doi: 10.1016/j.ecoleng.2015.07.018
- Torres-Rojo, J. M., Moreno-Sánchez, R., & Mendoza-Briseño, M. A. (2016). Manejo forestal sostenible en México. *Current Forestry Reports*, 2, 93–105. doi: 10.1007/s40725-016-0033-0
- Turnbull, L., Wainwright, J., & Brazier, R. E. (2010). Changes in hydrology and erosion over a transition from grassland to shrubland. *Hydrological Processes: An International Journal*, 24(4), 393–414. doi: 10.1002/hyp.7491
- Woerner, M. (1989). *Métodos químicos para el análisis de suelos calizos de zonas áridas y semiáridas*. México. Universidad Autónoma de Nuevo León
- Yáñez-Díaz, M. I., Cantú-Silva, I., González-Rodríguez, H., & Sánchez-Castillo, L. (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
- Zhang, J., Lei, T., Qu, L., Chen, P., Gao, X., Chen, C., ...Su, G. (2017). Method to measure soil matrix infiltration in forest soil. *Journal of Hydrology*, 552, 241–248. doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.06.032
- Zúñiga, R. J., Martínez, E., Navarrete, C., Luna, J. D. J. S., Ayala, D. M., & Mejía, B. C. (2018). Análisis ecológico de un área de pago por servicios ambientales hidrológicos en el ejido La Ciudad, Pueblo Nuevo, Durango, México. *Investigación y Ciencia*, 73, 27–36. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6311171>