

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**EFFECTOS DE TRATAMIENTOS SILVÍCOLAS SOBRE  
LAS CARACTERÍSTICAS ECOPEDOLÓGICAS DE UN  
UMBRISOL EN PUEBLO NUEVO, DURANGO**

**POR:**

**ERIK ORLANDO LUNA ROBLES**

Como requisito parcial para obtener el grado de  
**DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE  
RECURSOS NATURALES**

**Agosto, 2021**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**EFFECTOS DE TRATAMIENTOS SILVÍCOLAS SOBRE  
LAS CARACTERÍSTICAS ECOPEDOLÓGICAS DE UN  
UMBRISOL EN PUEBLO NUEVO, DURANGO**

**POR:**

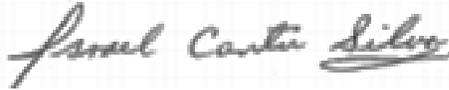
**ERIK ORLANDO LUNA ROBLES**

Como requisito parcial para obtener el grado de  
**DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE  
RECURSOS NATURALES**

**Agosto, 2021**

# EFFECTOS DE TRATAMIENTOS SILVÍCOLAS SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS ECOPEDOLÓGICAS DE UN UMBRISOL EN PUEBLO NUEVO, DURANGO

## Aprobación de Tesis



---

**Dr. Israel Cantú Silva**  
Director



---

**Dr. Humberto González Rodríguez**  
Co-director



---

**Dr. José Guadalupe Marmolejo Moncivais**  
Asesor



---

**Dra. María Inés Yáñez Díaz**  
Asesor



---

**Dr. Francisco Javier Hernández**  
Asesor externo

**Agosto, 2021**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico para realizar mis estudios.

A la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, y su personal académico, por la disponibilidad para atender mis peticiones.

Al Dr. Israel Cantú Silva, mi director de tesis, por todo su apoyo durante estos 5 años en los cuales aproveche al máximo sus consejos, experiencias y anécdotas, estoy sumamente agradecido por todo su apoyo en mi formación como profesional y persona.

Al Dr. Humberto González Rodríguez, Dr. José Guadalupe Marmolejo, a la Dra. Ma. Inés Yáñez Díaz y al Dr. Francisco Javier Hernández, por formar parte de mi desarrollo académico, por sus consejos y aportaciones durante el desarrollo de la presente investigación.

A la Unidad de Prestación de Servicios Ejidales No. 6 El Salto, A.C., por todas las facilidades otorgadas para el desarrollo de la investigación.

## DEDICATORIA

A Dios por darme la oportunidad y capacidad de lograr mis objetivos, por poner en mi vida grandes y valiosas personas que me enseñaron a ser mejor cada día.

A mi padre Jorge Eleno Luna Márquez, parte de mis éxitos son gracias a ti, agradezco demasiado tu esfuerzo y sacrificio que has hecho por mí, esas desveladas, asoleadas, fríos, golpes, caminatas y demás son cosas que valoro con todo mi corazón, eres mi ejemplo de nunca renunciar por lo que deseo.

A mi madre Manuela Robles Gallegos, muchas gracias por ser uno de los pilares fundamentales en mi desarrollo profesional y personal, agradezco todo lo que has hecho por mí y mi familia, miles de recuerdos tengo en mi mente a lado tuyo; buenos y malos, pero siempre juntos. Tu bendición a diario de mi vida siempre me ha protegido y llevado por el bien.

A mis hermanos: Armando, Jorge Alexis y Katia por ser mis primeros amigos y compañeros de vida, les agradezco de corazón por sus enseñanzas y los buenos y malos momentos que siempre nos han impulsado a ser buenas personas.

A mi esposa la Dra. Silvia Janeth Béjar Pulido, agradezco a Dios haberte conocido por que cambiaste muchas cosas en mi vida y siempre para bien, siempre me esforzare por dar lo mejor de mi para tu bienestar y de mi hijo.

A mi hijo Bruno Santiago Luna Béjar por llegar a mi vida y darle un plus, tu llegada fortaleció mis intereses por ser el mejor profesional y persona. Cada día luchare por ofrecerte lo mejor, principalmente mi amor.

A mis amigos Edgar Flores, Emanuel Junco, Nancy, Oly, Ale, Mayra, Génesis y Familia Lerma Patiño por sus enseñanzas y estar siempre cuando los necesito.

Al Dr. Israel Cantú gracias por estos años en los cuales me enseñó a ser una gran persona en todos los sentidos, por los consejos y la amistad sincera y leal.

*“La lámpara del cuerpo es el ojo. Así que, si tu ojo es bueno, todo tu cuerpo estará lleno de luz.”*

MATEO 6:22

## ÍNDICE

ÍNDICE	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN	14
JUSTIFICACIÓN	16
HIPÓTESIS	17
OBJETIVOS	17
<i>CAPÍTULO I. EFECTOS DEL MANEJO FORESTAL EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS E HIDROLÓGICAS DE UN UMBRISOL EN LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL</i>	18
Resumen	18
Abstract	19
1. Introducción	20
2. Materiales y Métodos	21
2.1. Área de estudio	21
2.2. Descripción de los rodales y tratamientos silvícolas	22
2.3. Muestreo y análisis de suelo	23
2.4. Análisis estadísticos	24
3. Resultados	25
4. Discusión	29
<i>CAPÍTULO II. AJUSTE DE MODELOS EMPÍRICOS DE INFILTRACIÓN EN UN UMBRISOL BAJO DIFERENTES TRATAMIENTOS SILVÍCOLAS EN DURANGO, MÉXICO</i>	33
Resumen	33
Abstract	34
1. Introducción	35

2. Materiales y métodos _____	36
2.1. Área de estudio _____	36
2.2. Diseño experimental _____	37
2.3. Velocidad de infiltración _____	38
2.4. Ajuste de modelos _____	39
2.5. Análisis estadísticos _____	40
3. Resultados _____	40
4. Discusión _____	44
<i>CAPÍTULO III. ESTIMACIÓN DEL CARBONO ORGÁNICO EN UN UMBRISOL BAJO DIFERENTES TRATAMIENTOS SILVÍCOLAS EN BOSQUES DE LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL, MÉXICO</i> _____	46
Resumen _____	46
Abstract _____	47
1. Introducción _____	48
2. Materiales y Métodos _____	50
2.1. Área de estudio _____	50
2.2. Diseño experimental _____	51
2.3. Carbono Orgánico en las muestras _____	51
2.4. Determinación del carbono en el suelo _____	52
2.5. Análisis estadísticos _____	52
3. Resultados _____	52
4. Discusión _____	54
<i>CAPÍTULO IV. EFECTO DEL MANEJO FORESTAL EN LA RESERVA DE NITRÓGENO Y RELACIÓN C/N EN UN UMBRISOL EN BOSQUES DE LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL, MÉXICO</i> _____	57
Resumen _____	57
Abstract _____	58
1. Introducción _____	59
2. Materiales y métodos _____	60
2.1. Descripción del área de estudio _____	60
2.2. Muestreo _____	62
2.3. Determinación del nitrógeno total y carbono orgánico del suelo (%) _____	62
2.4. Determinación de la reserva de nitrógeno en el suelo _____	62
2.5. Determinación de la relación C/N _____	63

2.6. Análisis estadísticos _____	63
3. Resultados _____	63
3.1. Nitrógeno total (%) _____	64
3.2. Carbono (%) _____	65
3.3. Relación C/N _____	65
3.4. Reserva de nitrógeno en el suelo _____	66
4. Discusión _____	67
CAPÍTULO V. EFECTOS DEL MANEJO FORESTAL EN LA EMISIÓN DE CO <sub>2</sub> DE UN SUELO UMBRISOL EN BOSQUES DE DURANGO, MÉXICO _____	70
Resumen _____	70
Abstract _____	71
1. Introducción _____	72
2. Materiales y Métodos _____	73
2.1. Descripción del área de estudio _____	73
2.2. Rodales evaluados _____	74
2.3. Metodología _____	75
2.4. Análisis estadísticos _____	75
3. Resultados _____	76
3.1. Respiración del suelo _____	76
3.2. Temperatura del suelo _____	76
3.3. Humedad del suelo _____	77
3.4. Correlación de Spearman _____	78
4. Discusión _____	78
<i>CAPÍTULO VI. EFECTOS DEL MANEJO FORESTAL EN LA COMPOSICIÓN Y DIVERSIDAD DE LA REGENERACIÓN NATURAL ARBÓREA EN BOSQUES DE LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL _____</i>	<i>81</i>
Resumen _____	81
Abstract _____	82
1. Introducción _____	83
2. Materiales y Métodos _____	84
2.1. Descripción del área de estudio _____	84
2.2. Muestreo _____	86
2.3. Análisis de la información _____	86
2.4. Análisis de diversidad _____	87
2.5. Análisis estadísticos _____	88

3. Resultados	88
4. Discusión	91
CONCLUSIONES	94
BIBLIOGRAFÍA	97

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Métodos utilizados para la evaluación de las propiedades físicas e hidrológicas.....	23
Tabla 2. Comparación de medias para variables de infiltración y capa orgánica en cinco rodales silvícolas en un Umbrisol.....	25
Tabla 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. ....	26
Tabla 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. ....	27
Tabla 5. Coeficiente de correlación de Spearman para las propiedades físicas e hidrológicas analizadas. ....	28
Tabla 6. Valores promedio de las características de la vegetación y suelos de los diferentes rodales bajo estudio. ....	38
Tabla 7. Valores medios de las variables hidrológicas en los diferentes tratamientos. ....	41
Tabla 8. Parámetros de los modelos ajustados y coeficientes de determinación (R <sup>2</sup> ) ....	42
Tabla 9. Resumen del análisis de varianza de dos factores (FA y FB) para el contenido de COS.....	52
Tabla 10. Contenido promedio de carbono orgánico en suelos almacenado en los diferentes rodales silvícolas (0-40 cm).....	54
Tabla 11. Descripción de los rodales y tratamientos silvícolas .....	61

Tabla 12. Valores medios de la densidad aparente del suelo para los rodales analizados .....	63
Tabla 13. Prueba post hoc de Kruskal Wallis con corrección de Bonferroni para las variables analizadas .....	64
Tabla 14. Valores medios de la relación C/N para ambas profundidades de los rodales investigados .....	66
Tabla 15. Valores promedio de las características de la vegetación y del suelo de los diferentes rodales silvícolas. ....	74
Tabla 16. Coeficientes de correlación de Spearman para las variables respiración, temperatura y humedad del suelo. ....	78
Tabla 17. Valores promedio de las características arbóreas post cortas de regeneración y del rodal de Referencia.....	86
Tabla 18. Lista de las especies encontradas en los rodales de Referencia, Árboles padre y Selección. ....	88
Tabla 19. Abundancia, Cobertura y Frecuencia de Índice de Valor de importancia de las especies registradas. ....	89

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio en los bosques del ejido La Ciudad, municipio Pueblo Nuevo, Durango, México. ....	22
Figura 2. Tasa de infiltración observada en los rodales silvícolas. ....	42
Figura 3. Ajuste de la tasa de infiltración a partir de los modelos de Horton, Kostiaikov y Lewis-Kostiaikov. ....	44
Figura 4. Contenido de COS para la profundidad 0-20 cm. ....	53
Figura 5. Contenido de COS para la profundidad 20-40 cm. ....	54
Figura 6. Ubicación del área de estudio.....	61
Figura 7. Valores medios de contenidos de nitrógeno total (%) de los rodales para ambas profundidades.....	65
Figura 8. Valores medios de contenidos de carbono (%) de los rodales para ambas profundidades.....	65
Figura 9. Valores medios de la reserva de nitrógeno de los rodales para ambas profundidades .....	67

Figura 10. Localización del área de estudio.....	74
Figura 11. Variación estacional de la respiración del suelo para los distintos rodales silvícolas. El valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas ( $\leq 0.05$ ), se señala para cada fecha de muestreo en negrillas.....	76
Figura 12. Variación de la temperatura del suelo para los distintos rodales silvícolas. El valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas ( $\leq 0.05$ ), se señala para cada fecha de muestreo en negrillas.....	77
Figura 13. Variación de la humedad del suelo para los distintos rodales. El valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas ( $\leq 0.05$ ), se señala para cada fecha de muestreo en negrillas.....	78
Figura 14. Localización del área de estudio.....	85
Figura 15. Abundancia y cobertura de la regeneración natural arbórea en los tres rodales silvícolas, letras diferentes indican diferencia significativa (Prueba de Tukey con $p \leq 0.05$ ).....	90
Figura 16. Índices de diversidad (Margalef y Shannon), letras diferentes indican diferencia significativa entre rodales (Prueba de Tukey con $p \leq 0.05$ ). .....	91
Figura 17. Índice de similitud de Sorensen para rodal de Referencia (RR), Árboles padre (AP), Selección (S).....	91

## RESUMEN

Las actividades ligadas al manejo forestal, en general, producen un impacto directo sobre los componentes del medio ambiente, como son el suelo, el agua, vegetación y otros componentes bióticos. Con la finalidad de entender dichos cambios es necesario evaluar si las prácticas forestales conducen a la sustentabilidad de los componentes ambientales. Por lo cual se estableció la presente investigación cuyo objetivo fue analizar los efectos de tratamientos silvícolas sobre las características ecopedológicas de un Umbrisol en Pueblo Nuevo, Durango. Específicamente la investigación se llevó a cabo en el ejido “La Ciudad”, donde se realizaron análisis *in situ* y *ex situ*, teniendo como sujetos de estudio cinco rodales con diferentes condiciones silvícolas; tres de ellos sometidos a cortas de regeneración (Árboles padre, Selección, Matarrasa), un área regenerada post-incendio y un testigo denominado rodal de Referencia. 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. Particularmente el estudio se distribuyó en la evaluación de las siguientes propiedades edáficas: a) Físicas e Hidrológicas: densidad aparente (DA), textura (arena, limo y arcilla), resistencia mecánica a la penetración (RMP), porosidad (P), humedad del suelo (H), conductividad hidráulica saturada (Ks), infiltración (inicial, básica y acumulada), agua disponible (Ad), punto de marchitez permanente (PMP) y capacidad de campo (CC); b) Químicas: materia orgánica (MOS), carbono (C), nitrógeno (N) y estimación de la relación Carbono/Nitrógeno (C/N); y c) Biológicas: respiración del suelo (flujo de CO<sub>2</sub>). Así mismo, se establecieron ocho sitios de estudio (4 m<sup>2</sup>) al azar dentro de rodales intervenidos con los métodos de Árboles padre, Selección en grupo y rodal testigo (Referencia) para evaluar el efecto del manejo forestal en la composición y diversidad de especies de la regeneración natural.

## **ABSTRACT**

Activities related to forest management, in general, produce a direct impact on the components of the environment, such as soil, water, vegetation and other biotic components. In order to understand these changes, it is necessary to assess whether forestry practices lead to the sustainability of environmental components. For this reason, the present investigation was established in order to analyze the effects of silvicultural treatments on the ecopedological characteristics of an Umbrisol in Pueblo Nuevo, Durango. Specifically, the research was carried out in the “La Ciudad” ejido, where *in situ* and *ex situ* analyzes were carried out, having as study subjects five stands with different silvicultural conditions; three of them subjected to regeneration cuts (Seed trees, Selection, Clear cutting), a Post-fire regenerated area and a witness called Reference stand. Eight composite soil samples were collected 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 study was particularly distributed in the evaluation of the following edaphic properties: a) Physical and Hydrological: apparent density (DA), texture (sand, silt and clay), mechanical resistance to penetration (RMP), porosity (P), humidity soil (H), saturated hydraulic conductivity (Ks), infiltration (initial, basic and accumulated), available water (Ad), permanent wilting point (PMP) and field capacity (CC); b) Chemicals: organic matter (MOS ), carbon (C), nitrogen (N) and estimation of the Carbon/Nitrogen (C/N) ratio; and c) Biological: soil respiration (CO<sub>2</sub> flux). Likewise, eight study sites (4 m<sup>2</sup>) were established at random within intervened stands with the methods of parent trees, group selection and control stand (reference) to evaluate the effect of forest management on the composition and diversity of species of natural regeneration.

## **INTRODUCCIÓN**

El suelo es un sistema ecológico complejo derivado de las interacciones entre el clima y diferentes tipos de rocas, sedimentos, materiales orgánicos, relieve, y organismos vivos durante un período de tiempo (Nunes et al., 2020). Proveen servicios ecosistémicos necesarios para asegurar el bienestar del ser humano, los cuales se pueden agrupar en tres categorías principales: funciones reguladoras; funciones de provisión; y culturales, por lo que se deben establecer estrategias para la gestión del mismo a través de prácticas, técnicas y herramientas sostenibles principalmente en los sectores de producción como la agricultura, silvicultura y ganadería, estas estrategias garantizarán la continuidad de dichos servicios y también permiten gestionar la resiliencia del suelo ante disturbios climáticos y antropogénicos (FAO, 2015).

A nivel mundial, el recurso suelo se encuentra sometido a diferentes presiones como urbanización, uso excesivo de productos químicos orgánicos e inorgánicos en actividades agrícolas, deforestación, silvicultura, incendios, labranza convencional, uso de maquinaria pesada, sobrepastoreo y riegos intensivos, que afectan su gestión a corto plazo, su funcionalidad y productividad de manera acelerada (Babin et al., 2019). Específicamente, los principales impactos sobre el suelo, asociados con actividades forestales, aparecen vinculados a una inadecuada planificación, construcción y mantenimiento de caminos forestales, empleo de la quema como práctica de preparación de sitios para plantar y la realización del arrastre de madera en temporada húmeda (Gayoso et al., 1991). Un aprovechamiento indiscriminado también puede afectar significativamente el recurso suelo (García, 2008). Los principales cambios en el recurso suelo pueden ser compactación y surcos por derribo y arrastre de trocería, pérdida biodiversidad, pérdida de materia orgánica, cambios en el microclima del suelo, cambios en los ciclos biogeoquímicos e hidrológicos, aumento de la erosión del suelo, entre otros. Por esta razón, el manejo forestal sustentable debe ser difundido como una estrategia importante en la restauración y preservación del suelo y la vegetación, además de proporcionar otros beneficios ambientales,

económicos y sociales (Klooster y Masera, 2000; Angelsen et al., 2010; Chhatre y Agrawal, 2009).

Existen muchas propiedades físicas, hidrológicas, químicas y biológicas del suelo que son alternativas o indicadoras para determinar si existe un manejo sustentable del mismo, por lo cual se definió como objetivo principal de investigación evaluar la respuesta del recurso suelo en rodales aprovechados a través de cortas de regeneración (Árboles padre, Selección y Matarrasa), un área regenerada post incendio y teniendo como control un rodal denominado de Referencia, considerado la masa arbórea más madura próxima a corta de regeneración.

## **JUSTIFICACIÓN**

En el suelo se llevan a cabo diferentes procesos biológicos, hidrológicos, físicos y químicos esenciales para el equilibrio de los ecosistemas forestales, así como para el bienestar del ser humano, los cuales se han ido modificándose principalmente por acciones antropogénicas, por lo que las actividades forestales no son la excepción. El manejo forestal a partir de la implementación de diferentes prácticas silvícolas provocan un cambio inevitable en la dinámica de la vegetación y del recurso suelo, dicho desequilibrio se ve influenciado principalmente por la intensidad de corta, desencadenando cambios inmediatos en la densidad de la vegetación y posteriores en las propiedades físicas, hidrológicas, químicas y biológicas del suelo.

Particularmente los Umbrisoles se desarrollan en climas húmedos; principalmente en áreas templadas o frías, en todo el mundo ocupan alrededor de 100 millones de hectáreas y muchos Umbrisoles están cubiertos de vegetación natural o casi natural (FAO, 2015b). En México, ocupan 1% de la superficie continental, el 2.91% de la superficie del estado de Durango y específicamente el 3.3% del Municipio de Pueblo Nuevo (INEGI, 2005, 2017). El Umbrisol, se concentra principalmente en los bosques del ejido La Ciudad, a pesar de su escasa distribución, son suelos ácidos que poseen altos contenidos de materia orgánica, tienen buenas propiedades físicas y un nivel de fertilidad natural moderado, consecuencia del elevado contenido de materia orgánica.

Cabe señalar que existe muy poca información para esta región, en cuanto al efecto de actividades forestales sobre las características ecopedológicas, por lo que los resultados del presente estudio permitirán dilucidar si los bosques, se encuentran o no bajo prácticas de manejo forestal sustentables.

## **HIPÓTESIS**

Las propiedades físicas, hidrológicas, químicas y biológicas del Umbrisol presentan diferencias significativas en rodales aprovechados a través de cortas de regeneración (Árboles padre, Selección y Matarrasa), un área regenerada post incendio y un control denominado Referencia.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Evaluar los parámetros físicos, químicos, biológicos e hidrológicos de un Umbrisol en rodales aprovechados a través de cortas de regeneración y realizar una comparación con rodales sin intervención y un área regenerada post incendio.

### **Objetivos específicos**

1. Caracterización física e hidrológica de un suelo Umbrisol sometido a diferentes tratamientos silvícolas y disturbios (incendio).
2. Caracterización química de un suelo Umbrisol sometido a diferentes tratamientos silvícolas y disturbios.
3. Evaluar la actividad biológica del Umbrisol mediante las emisiones de CO<sub>2</sub> en los diferentes rodales silvícolas.

# **CAPÍTULO I. EFECTOS DEL MANEJO FORESTAL EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS E HIDROLÓGICAS DE UN UMBRISOL EN LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL**

## **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 [Post-incendio] 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 bajos 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).

**Palabras clave:** cortas de regeneración; Árboles padre; Post-incendio; Matarrasa; calidad del suelo.

## **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).

**Keywords:** regeneration cuttings; Seed trees; Post-fire; Clear cutting; soil quality.

## **1. 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 y Pal, 2015; Food and Agriculture Organization [FAO], 2019; Kopittke et al., 2019; Montanarella, 2015). De acuerdo con MuñozRojas (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 y 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, y Pompê, 2018; Turnbull, Wainwright, y Brazier, 2010).

Según Edlund et al. (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 et al., 2015; Cambi et al., 2016; Cambi et al., 2017; Sirén et al., 2013).

El impacto de las actividades forestales en el ecosistema del suelo depende de factores como el sistema de cosecha (Spinelli et al., 2010), características del sitio

e intensidad de eliminación (Tavankar et al., 2015) y el grado de mecanización (Picchio et al., 2011; Picchio et al., 2012a; Picchio et al., 2012b)

En México, el aprovechamiento forestal se hace bajo dos cortas de regeneración principalmente: corta de 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 et al., 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 (Post-incendio) 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.

## **2. Materiales y Métodos**

### **2.1. Área de estudio**

El área de estudio se ubica en los bosques del ejido La Ciudad (2583 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 sideroxylo* Bonpl. (González-Elizondo et al., 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).

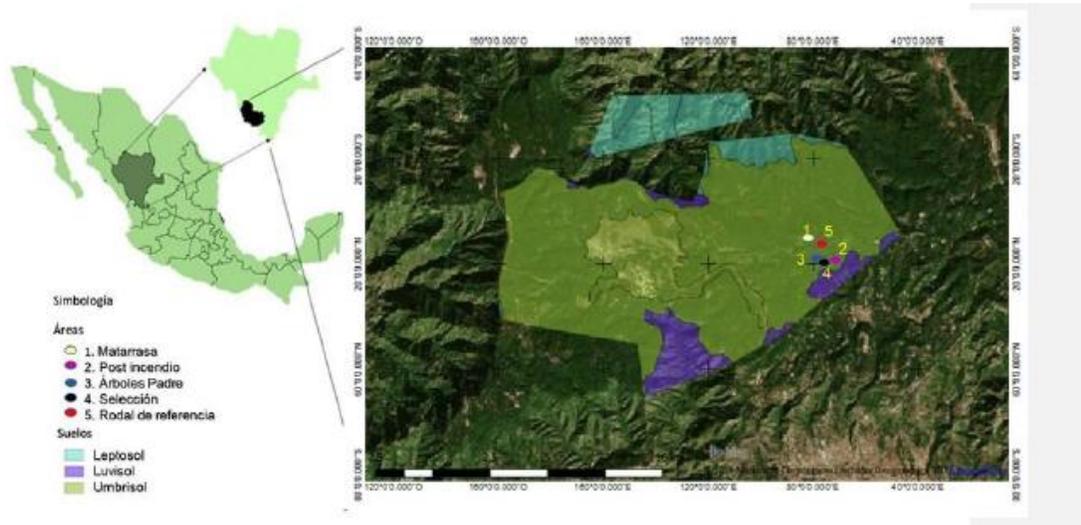


Figura 1. Área de estudio en los bosques del ejido La Ciudad, municipio Pueblo Nuevo, Durango, México.

## 2.2. Descripción de los rodales y tratamientos silvícolas

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 post-incendio 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 una densidad residual de 77 ind·ha<sup>-1</sup>; 3) Selección (S) que cuenta con 20 ha y se estableció con un volumen inicial de 223.8 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, aprovechando el equivalente a 34 % del volumen total; 4) Post-incendio (PI) de 10 ha, el cual recibió un pre-aclareo (año 2017) cuando tenía una densidad de 10,000 ind·ha<sup>-1</sup>, 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 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. 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 et al., 2019).

### 2.3. Muestreo y análisis de suelo

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 mm). En la Tabla 1 se muestran las propiedades físicas e hidrológicas, el método de 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*.

Tabla 1. Métodos utilizados para la evaluación de las propiedades físicas e hidrológicas.

Propiedad	Método	Unidad
<b>Físicas</b>		
<i>Textura</i> <sup>1,2</sup>	AS-09 de la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002)	%
<i>DA</i> <sup>1,2</sup>	Método gravimétrico (Woerner, 1989).	g cm <sup>-3</sup>
<i>RMP</i> <sup>1,2</sup>	Penetrómetro (soil hardness tester Yamanaka) (Medina et al., 2017)	Kg cm <sup>-2</sup>
<i>P</i> <sup>1,2</sup>	Estimación por medio de <i>DA</i> y tamaño de partícula	%
<b>Hidrológicas</b>		
<i>K<sub>s</sub></i> <sup>1,2</sup>	Análisis especificado por el JIS (Das, 2002)	cm s <sup>-1</sup>
<i>F<sub>b</sub></i> <sup>1</sup> <i>F<sub>0</sub></i> <sup>1</sup> <i>F<sub>a</sub></i> <sup>1</sup>	Doble anillo (Zhang et al., 2017; Yáñez, Cantú, González, y Sánchez, 2019)	mm h <sup>-1</sup>
<i>Ad</i> <sup>1,2</sup>		%
<i>PMP</i> <sup>1,2</sup> (1.5 MPa)		%

---

	Uso de la placa y la membrana de presión, con	
<i>CC</i> <sup>1,2</sup> (0.033 MPa)	extractores de placa (Soil Moisture Equipment Corp., Santa Barbara, CA) (Klute y Dirksen, 1986)	%

---

Fuente: Elaboración propia. DA = densidad aparente, RMP = resistencia mecánica a la penetración, P = porosidad, Ks = permeabilidad, F<sub>b</sub> = infiltración básica, F<sub>0</sub> = infiltración inicial, F<sub>a</sub> = infiltración acumulada, Ad = agua disponible, PMP = punto de marchitez permanente y CC = capacidad de campo. 1= 0-20 cm y 2= 20-40 cm

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<sup>-1</sup>) 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) en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Forestales, de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL).

#### **2.4. Análisis estadísticos**

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 (rodales silvícolas y profundidad;  $p \leq 0.01$ ) en las variables resistencia mecánica a la penetración, arena, arcilla, capacidad 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).

### 3. 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. La Tabla 2 muestra que, de acuerdo con las pruebas de Tukey ( $p \leq 0.05$ ), los valores promedios de humus en los rodales de Árboles padre, Selección, Post-incendio y rodal de Referencia son estadísticamente similares, en contraste con el rodal de Matarrasa que tuvo el contenido más bajo. La aplicación de la corta total tuvo un 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.

Tabla 2. Comparación de medias para variables de infiltración y capa orgánica en cinco rodales silvícolas en un Umbrisol.

Área	Variables del proceso de infiltración			Capa orgánica ( $t\ ha^{-1}$ )	
	$F_0$ (mm/hr)	$F_b$ (mm/hr)	$F_a$ (mm)	Hojarasca	Humus
Matarrasa	1000 <sup>a</sup>	214.09*	1090.49*	0.34 <sup>a</sup>	0.69 <sup>a</sup>
Selección	1080 <sup>ab</sup>	322.08*	1522.43*	0.92 <sup>a</sup>	2.34 <sup>b</sup>
Post-incendio	1120 <sup>ab</sup>	226.95*	1172.49*	2.14 <sup>ab</sup>	2.42 <sup>b</sup>
Árboles padre	1350 <sup>b</sup>	299.56*	1720.39*	0.95 <sup>a</sup>	2.46 <sup>b</sup>
Rodal de					
Referencia	2080 <sup>c</sup>	297.93*	1642.89*	1.60 <sup>b</sup>	2.28 <sup>b</sup>

Valores con letra distinta (Tukey) y con asterisco (Kruskal-Wallis) representan diferencias estadísticas significativas entre los rodales ( $p \leq 0.05$ ).  $F_0$ ,  $F_b$  y  $F_a$  = infiltración inicial, básica y acumulada, respectivamente.

Acorde con la Tabla 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.

Tabla 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 (unidad)	FA	FB	FA*FB
	F (4, 30)	F (1, 30)	F (9, 30)
RMP (kg cm <sup>-2</sup> )	13.199**	35.037**	2.333 <sup>NS</sup>
A (%)	19.641**	1.287 <sup>NS</sup>	2.954**
R (%)	9.105**	3.651 <sup>NS</sup>	1.080 <sup>NS</sup>
CC (%)	1.725 <sup>NS</sup>	0.059 <sup>NS</sup>	1.045 <sup>NS</sup>
PMP (%)	1.995 <sup>NS</sup>	0.263 <sup>NS</sup>	0.561 <sup>NS</sup>
Ad (%)	1.683 <sup>NS</sup>	1.423 <sup>NS</sup>	1.436 <sup>NS</sup>
Ks (cm s <sup>-1</sup> )	2.115 <sup>NS</sup>	0.476 <sup>NS</sup>	0.260 <sup>NS</sup>

\*\*Diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.01$ ); <sup>NS</sup> = no significativo ( $p > 0.05$ ). RMP = resistencia mecánica a la penetración, PMP = punto de marchitez permanente.

La Tabla 4 presenta la comparación de medias para las variables 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 Post-incendio.

Tabla 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	Rodal silvícola				
	0-20 cm	P-I	S	R	AP
<i>P</i> (%)	78.108*	80.815*	78.110*	72.762*	69.888*
<i>DA</i> (g cm <sup>-3</sup> )	0.580*	0.508*	0.580*	0.722*	0.798*
<i>RMP</i> (kg cm <sup>-2</sup> )	3.575 <sup>a</sup>	4.100 <sup>a</sup>	3.375 <sup>a</sup>	4.475 <sup>a</sup>	10.875 <sup>b</sup>
<i>A</i> (%)	39.920 <sup>a</sup>	44.680 <sup>b</sup>	43.660 <sup>b</sup>	40.600 <sup>a</sup>	40.260 <sup>a</sup>
<i>R</i> (%)	10.940 <sup>c</sup>	6.0867 <sup>a</sup>	7.396 <sup>ab</sup>	8.141 <sup>b</sup>	8.141 <sup>b</sup>
<i>L</i> (%)	48.440*	38.040*	40.700*	45.970*	48.560*
<i>CC</i> (%)	67.471 <sup>a</sup>	70.079 <sup>a</sup>	52.273 <sup>a</sup>	62.198 <sup>a</sup>	43.720 <sup>a</sup>
<i>PMP</i> (%)	40.990 <sup>a</sup>	35.637 <sup>a</sup>	24.312 <sup>a</sup>	43.651 <sup>a</sup>	21.326 <sup>a</sup>
<i>Ad</i> (%)	31.146 <sup>a</sup>	43.490 <sup>a</sup>	29.104 <sup>a</sup>	32.433 <sup>a</sup>	23.555 <sup>a</sup>
<i>Ks</i> (cm s <sup>-1</sup> )	0.002 <sup>a</sup>	0.002 <sup>a</sup>	0.003 <sup>a</sup>	0.002 <sup>a</sup>	0.002 <sup>a</sup>
20-40 cm	P-I	S	R	AP	M
<i>P</i> (%)	74.409*	67.969*	74.005*	67.862*	71.095*
<i>DA</i> (g cm <sup>-3</sup> )	0.678*	0.849*	0.689*	0.852*	0.766*
<i>RMP</i> (kg cm <sup>-2</sup> )	1.300 <sup>a</sup>	1.650 <sup>a</sup>	1.425 <sup>a</sup>	1.637 <sup>a</sup>	4.100 <sup>b</sup>
<i>A</i> (%)	39.580 <sup>a</sup>	44.340 <sup>b</sup>	40.600 <sup>a</sup>	41.280 <sup>a</sup>	39.580 <sup>a</sup>
<i>R</i> (%)	12.360 <sup>bc</sup>	19.460 <sup>a</sup>	19.820 <sup>a</sup>	17.180 <sup>ab</sup>	10.430 <sup>c</sup>
<i>L</i> (%)	48.060*	36.20*	39.580*	41.540*	49.990*

CC (%)	59.156 <sup>a</sup>	64.439 <sup>a</sup>	40.920 <sup>a</sup>	59.057 <sup>a</sup>	43.769 <sup>a</sup>
PMP (%)	31.170 <sup>a</sup>	30.416 <sup>a</sup>	17.431 <sup>a</sup>	30.305 <sup>a</sup>	26.222 <sup>a</sup>
Ad (%)	27.747 <sup>a</sup>	33.857 <sup>a</sup>	23.672 <sup>a</sup>	29.473 <sup>a</sup>	24.431 <sup>a</sup>
Ks (cm s <sup>-1</sup> )	0.006 <sup>a</sup>	0.004 <sup>a</sup>	0.005 <sup>a</sup>	0.001 <sup>a</sup>	0.004 <sup>a</sup>

Letras distintas (Tukey) y asteriscos (Kruskal-Wallis) representan diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ). PI = Post-incendio, 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.

El coeficiente de correlación de Spearman muestra que la DA se asocia significativa y negativamente ( $p \leq 0.01$ ) 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), F<sub>0</sub>, F<sub>b</sub>, y F<sub>a</sub> no reflejaron correlación con alguna otra propiedad a excepción de la relación positiva entre F<sub>0</sub> y F<sub>b</sub> (Tabla 5).

Tabla 5. Coeficiente de correlación de Spearman para las propiedades físicas e hidrológicas analizadas.

	DA	RMP	A	R	L	CC	PMP	Ad	Ks	P	Ho	Hu	F <sub>0</sub>	F <sub>b</sub>	F <sub>a</sub>
<b>DA</b>	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>RMP</b>	0.37	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>A</b>	<b>-.60**</b>	-0.31	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>R</b>	<b>-.72**</b>	-0.40	<b>.79**</b>	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>L</b>	<b>.68**</b>	0.32	<b>-.94**</b>	<b>-.93**</b>	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>CC</b>	-0.44	<b>-.537*</b>	0.28	0.35	-0.24	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>PMP</b>	-0.24	<b>-.531*</b>	0.01	0.30	-0.10	<b>.68**</b>	1	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Ad</b>	-0.39	-0.25	<b>.47*</b>	0.25	-0.33	<b>.68**</b>	-0.02	1	-	-	-	-	-	-	-
<b>Ks</b>	<b>-.610**</b>	-0.12	<b>.72**</b>	<b>.56*</b>	<b>-.67**</b>	0.21	-0.13	0.46	1	-	-	-	-	-	-
<b>P</b>	<b>-1.00**</b>	-0.37	<b>.60**</b>	<b>.72**</b>	<b>-.68**</b>	0.44	0.24	0.39	<b>.61**</b>	1	-	-	-	-	-
<b>Ho</b>	-0.01	-0.20	0.33	0.05	-0.19	-0.04	-0.12	0.08	0.28	0.01	1	-	-	-	-
<b>Hu</b>	0.23	0.50	-0.09	-0.37	0.28	-0.31	-0.53	-0.06	0.34	-0.23	0.46	1	-	-	-
<b>F<sub>i</sub></b>	-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	-	-

<b>F<sub>b</sub></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	<b>.74**</b>	1	-
<b>F<sub>a</sub></b>	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

\*Correlaciones significativas ( $p \leq 0.05$ ); \*\*correlaciones en negritas son 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<sub>b</sub> = infiltración básica, F<sub>0</sub> = infiltración inicial, F<sub>a</sub> = infiltración acumulada.

#### 4. Discusión

De acuerdo con los resultados, las variables hidrológicas (F<sub>0</sub>, F<sub>b</sub> y F<sub>a</sub>) que componen el proceso de infiltración, así como los contenidos de la capa orgánica, fueron afectadas directamente por la modificación de la cobertura vegetal, efecto de las cortas de regeneración. Estos resultados reafirman lo señalado por Dueñez et al. (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 et al. (2017) señalan que las tasas altas de infiltración pueden atribuirse a la formación de macroporos asociados a la 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<sub>b</sub>) 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 et al. (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 post-incendio, 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 auto-podas 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.

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 total o 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 (Landini et al., 2007; Di Prima et al., 2017). Asimismo, Gaspar-Santos et al. (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 et al. (2017),

estas variables desempeñan funciones de vital importancia para la vegetación, tales como la disponibilidad de nutrientes y circulación de aire y agua, y son consideradas altamente vulnerables por la acción antropogénica.

## CAPÍTULO II. AJUSTE DE MODELOS EMPÍRICOS DE INFILTRACIÓN EN UN UMBRISOL BAJO DIFERENTES TRATAMIENTOS SILVÍCOLAS EN DURANGO, MÉXICO

### Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo modelar el proceso de infiltración a partir de los resultados de mediciones in situ en diferentes rodales silvícolas en un suelo Umbrisol, localizados en el ejido La Ciudad, Pueblo Nuevo, Durango, México. La infiltración se realizó mediante el método del infiltrómetro de doble anillo, por un tiempo de 270 minutos con recargas variables. Se analizaron rodales silvícolas después de las cortas de regeneración (Árboles padre, Matarrasa y Selección) y se compararon con un área regenerada (post-incendio) y un rodal de Referencia (testigo). Se hizo el ajuste de los datos de 15 pruebas de infiltración a los modelos Kostiaikov, Horton y Lewis-Kostiaikov. Los resultados mostraron un decremento medio de 45 % en la infiltración inicial ( $F_i$ ), respecto al rodal de Referencia, la infiltración básica ( $F_b$ ) incrementos ligeros en Árboles padre y Selección; mientras que Matarrasa y Post-incendio presentaron reducciones de 28 y 23%, respectivamente. En relación con la infiltración acumulada ( $F_a$ ), solamente, el tratamiento de Árboles padre registró 4.7% por arriba del rodal de Referencia. El análisis de varianza evidenció diferencias significativas para  $F_i$ ; la prueba de las demostró para  $F_b$  y  $F_a$ . Los ajustes de los modelos, basados en el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), mostraron que el de LewisKostiaikov estima mejor la infiltración para las áreas de Selección y Referencia, la cual es menos afectada en comparación con los rodales de Árboles padre, Matarrasa y Post-incendio forestal, los que fueron mejor descritos por el modelo tipo Kostiaikov.

**Palabras clave:** Árboles padre, Matarrasa, modelo Lewis-Kostiaikov post-incendio, infiltración, Umbrisol.

## **Abstract**

The objective of this research was to model the infiltration process based on results obtained from measurements in situ in different silvicultural stands on an Umbrisol soil in La Ciudad, a communal area in Pueblo Nuevo, Durango. Infiltration rate was measured by using the double ring infiltrometer method, for a time of 270 minutes with variable recharges. Post-harvest regeneration silvicultural stands (Clear cutting, Seed-trees and Selection) were analyzed by comparing them with a regenerated area (Post-fire) and a Reference stand (control). Three empirical models were adapted to 15 infiltration tests that were: Kostiakov, Horton and Lewis-Kostiakov models. The results showed an average decrease of 45 % in the initial infiltration ( $F_i$ ), with respect to the Reference stand, the basic infiltration ( $F_b$ ) slight increases in Seed-trees and Selection Trees while Clear cutting and Post-fire reductions of 28 and 23%, respectively. In relation to cumulative infiltration ( $F_a$ ), only Seed-trees showed 4.7% above Reference stand. The analysis of variance showed significant differences for  $F_i$ , while the Kruskal Wallis test showed it for  $F_b$  and  $F_a$ . The results of the model fit, based on the coefficient of determination ( $R^2$ ), show that Lewis-Kostiakov is the model that best estimates the infiltration for the Selection and Reference stands, whose nature is not as affected as the stands of Seed-trees, Clear cutting and Post-fire, which are best described by the Kostiakov type model.

**Keywords:** Seed-trees, clear cutting, model Lewis-Kostiakov, post-fire, infiltration, Umbrisol.

## **1. Introducción**

Los bosques templados son ecosistemas importantes para la recarga de los mantos acuíferos, ya que se estima que estos proveen 25 % del total nacional que es de 4.8 billones de metros cúbicos de agua (Torres y Guevara, 2002). Al respecto, la Sierra Madre Occidental del estado de Durango es una región vital para las cuencas del océano Pacífico y del interior del centro norte del país (Dueñez et al., 2006).

La capacidad de infiltración es el término aplicado al proceso de entrada de agua a través de la superficie del suelo (Hillel, 1971). La estimación de la velocidad de infiltración y la lámina acumulada es de gran importancia dado que constituyen componentes clave del ciclo hidrológico; dicho cálculo permite cuantificar la escorrentía, la erosión, la disponibilidad de sedimentos, la capacidad de recarga de acuíferos, así como definir la operación de sistemas de riego y estudiar los efectos de diferentes prácticas de uso de la tierra (Grego y Vieira, 2005; Machiwal et al., 2006).

Los usos del suelo asociados con actividades antrópicas, como la agricultura, el pastoreo y manejo forestal pueden afectar negativamente a la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos y contribuyen, de manera significativa, en los procesos de cambio climático a nivel regional (Sahagún-Sánchez y Reyes-Hernández, 2018). Además, ocasionan la disminución de las aportaciones hídricas, debido a que el suelo pierde su capacidad de infiltración y de recarga de los acuíferos (Turnbull et al., 2010; Pérez et al., 2018).

El manejo forestal involucra la ejecución de un programa de prácticas silvícolas como son los métodos de regeneración: árboles padre, corta de selección, cortas sucesivas y cortas totales o matarrasa; así como, todas las actividades de cultivo o tratamientos intermedios entre los que se consideran los aclareos, reforestaciones, quemas prescritas, cortas de saneamiento y podas, que se llevan a cabo durante la gestión del bosque (Monárrez et al., 2018). Dichas prácticas son cuestionadas cuando, por la alta intensidad del aprovechamiento y de las operaciones de abastecimiento, reducen la vegetación forestal; provocan

disturbios que exponen el suelo superficial a los efectos de las lluvias, alteran y modifican sus propiedades, reducen su capacidad de infiltración e incrementan el riesgo de pérdida de suelo por erosión hídrica (Dueñez et al., 2006).

Pérez y Romance (2012) indican que para conocer el proceso de infiltración se consideran modelos que se ajustan a las mediciones de campo, debido a las diferentes condiciones de suelo, clima, vegetación y manejo. Para estimar la infiltración se han desarrollado modelos matemáticos, los cuales, en general, se dividen en tres grupos (Collis, 1977; Pérez y Romance, 2012): 1) teóricos, 2) semiempíricos, y 3) empíricos. Estos últimos fueron los empleados para la modelación de la infiltración en el presente estudio; ya que no consideran los factores que intervienen en el proceso de infiltración: la textura, el contenido de humedad o la temperatura del suelo, entre otros.

El estudio tuvo como objetivo modelar el proceso de infiltración a partir de mediciones *in situ* realizadas con la metodología del infiltrómetro de doble anillo, las cuales se ajustaron a los parámetros de los modelos de Kostiaikov, Horton y de Lewis-Kostiaikov (Weber y Apestegui, 2016), mediante el análisis de su funcionamiento en cinco diferentes rodales silvícolas (tres cortas de regeneración, un área regenerada Post-incendio y un rodal de Referencia) en bosques templados de Durango, México.

## **2. Materiales y métodos**

### **2.1. Área de estudio**

Las pruebas de infiltración se llevaron a cabo en los bosques del ejido La Ciudad, ubicado en el macizo montañoso Sierra Madre Occidental dentro del municipio Pueblo Nuevo, Durango, donde la vegetación dominante está integrada por *Pinus durangensis* Martínez, *Pinus cooperi* C.E. Blanco, *Pinus ayacahuite* Ehrenb. Ex Schltl., *Juniperus deppeana* Steud. y *Quercus sideroxyla* Bonpl. (González-Elizondo et al., 2012). El suelo predominante pertenece al tipo Umbrisol (INEGI, 2005). La precipitación media anual es de 1 200 mm, y la temperatura media anual de 18 °C, con máxima de 22 °C y mínima de 3 °C (Zúñiga et al., 2018).

## **2.2. Diseño experimental**

La evaluación se realizó en cinco sitios con diferentes condiciones silvícolas que corresponden a tres tipos de cortas, un área regenerada post-incendio y un testigo denominado rodal de Referencia. Las áreas de los tratamientos bajo estudio son rodales aprovechados mediante cortas de regeneración con una edad promedio de ocho años, los cuales se describen a continuación: 1) Matarrasa: consistió en la extracción total del arbolado; 2) Árboles padre: intensidad de corta de 80 %; 3) Selección: aprovechamiento equivalente a 34 % del volumen total; 4) Post-incendio: área regenerada de 10 ha; y 5): rodal de Referencia o testigo de 4.35 ha.

En cada tratamiento (rodal) se aplicaron tres pruebas de infiltración durante la última semana de enero de 2019; para ello se usó un infiltrómetro de doble anillo (metálico), con diámetro interior de 15 cm y 30 cm de exterior y una altura de 45 cm; el cual se enterró a una profundidad de 10 cm. Las lecturas se llevaron a cabo por un lapso de 270 minutos, por medio de la aplicación de rellenos (recargas) variables. El proceso de medición consistió en la limpieza de la hojarasca presente, enterramiento de los cilindros, se introdujo una regla en el cilindro interior, se colocaba un plástico y sobre este se vertía el agua, al igual que entre los cilindros para prevenir el flujo lateral. Iniciada la prueba se hicieron registros (en cm) por minuto durante cinco minutos, cada cinco minutos hasta completar la primera hora de evaluación; en la segunda hora, las mediciones se efectuaron cada diez minutos; en la tercera hora, a los quince minutos; y dos últimas lecturas a los treinta y sesenta minutos, para un total de 270 minutos de evaluación (4.5 horas). Cuando el nivel del agua llegaba a 8 cm, se recargaba el cilindro interior, depositando el agua lentamente; el cilindro exterior se rellenaba cuando disminuía su nivel. Cabe señalar que antes del inicio de las pruebas de infiltración se extrajeron muestras de suelo para determinar el contenido de humedad gravimétrica (Woerner, 1989).

Algunas características del suelo y la vegetación de los sitios se muestran en la Tabla 6, ya que son variables de importancia en los procesos hidrológicos

Tabla 6. Valores promedio de las características de la vegetación y suelos de los diferentes rodales bajo estudio.

Características	Vegetación			Suelo			
	Rodal	Densidad (Individuos ha <sup>-1</sup> )	DN (>7 cm)	Altura (m)	DC (m)	DA (g cm <sup>-3</sup> )	PHA (cm)
Matarrasa		160	7.72	3.21	1.92	0.51	1.05
Árboles padre		80	38.16	18.2	7.34	0.72	2.29
Selección		250	26.88	15.4	5.26	0.80	3.31
Post-incendio		6400	8.13	7.42	1.33	0.58	7.00
Rodal de Referencia		660	21.25	16.23	5.30	0.58	5.70

DN = Diámetro normal, DC = Diámetro de copa, DA = Densidad aparente, PHA = Profundidad de hojarasca acumulada.

### 2.3. Velocidad de infiltración

Con los registros se calculó la velocidad de infiltración (Zhang et al., 2017; Yáñez et al., 2019) mediante la ecuación:

$$I = \frac{HL \times 10 \times 60}{t}$$

Donde:

I: Velocidad de infiltración (mm h<sup>-1</sup>)

HL: Diferencia entre lecturas (cm)

10: Factor de conversión de cm a mm

60: Factor de conversión de minutos a horas

t = Período de tiempo (min)

La infiltración acumulada (Fa) se determinó mediante la suma total de los volúmenes de agua infiltrada, considerada como la integral de la velocidad de infiltración en esos periodos mediante la siguiente ecuación (Weber y Apestegui, 2016):

$$Fa = \int_0^t I(t) dt$$

#### 2.4. Ajuste de modelos

Una vez obtenida la curva de infiltración por prueba, se realizó el ajuste de los modelos. Para estimar los parámetros de estos se utilizó el método de mínimos cuadrados (no lineales), que minimiza los errores de ajuste del modelo con la herramienta Solver disponible en la planilla de cálculo Microsoft Excel (Weber y Apestegui, 2016). Los modelos ajustados para estimar la tasa de infiltración fueron los siguientes:

**Modelo tipo Kostiakov.** Modelo que permite y se expresa con la ecuación (Rodríguez et al., 2008):

$$I = at^b$$

Donde:

I = Tasa de infiltración ( $\text{mm h}^{-1}$ ) en un tiempo dado.

t = Tiempo (minutos)

a y b = parámetros de ajuste, el primero está asociado a la infiltración inicial y el segundo a la tasa de cambio.

**Modelo tipo Horton.** Corresponde a un modelo de tres parámetros: Fb, Fi y K (Weber y Apestegui, 2016):

$$F(t) = Fb + (Fi - Fb)e^{-Kt}$$

Donde:

F(t) = Tasa de infiltración ( $\text{mm h}^{-1}$ ) en un tiempo dado

Fi = Tasa inicial de infiltración inicial ( $\text{mm h}^{-1}$ )

Fb = Tasa básica de infiltración ( $\text{mm h}^{-1}$ )

K = Parámetro que representa una razón de cambio

t = Tiempo (minutos)

**Modelo tipo Lewis-Kostiakov.** Modificación del modelo original de Kostiakov, el cual adhiere a su fórmula el valor de infiltración básica, calculada a partir del promedio de los valores de la tasa para los últimos tres instantes (180, 210 y 270 minutos) de la prueba de infiltración (Yáñez et al., 2019):

$$F(t)=Fb+at^{-b}$$

Donde:

F(t) = Tasa de infiltración (mm h<sup>-1</sup>) en un tiempo dado

Fb = Tasa básica de infiltración (mm h<sup>-1</sup>)

a = Parámetro asociado a la infiltración inicial (mm h<sup>-1</sup>)

t = Tiempo (minutos)

b = Parámetro de ajuste

## **2.5. Análisis estadísticos**

Las variables hidrológicas infiltración inicial (Fi), infiltración básica (Fb) e infiltración acumulada (Fa), así como la humedad gravimétrica fueron sometidas a la prueba de Kolmogorov-Smirnov (Romero, 2016) para verificar los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. La variable Fi cumplió con estos supuestos, por lo que se le realizó un análisis de varianza para determinar la existencia de diferencias significativas entre los diferentes rodales, con un nivel de significancia de  $p \leq 0.05$ . A las variables de humedad gravimétrica, Fa y Fb se les aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis (Berlanga y Rubio, 2012) para determinar la existencia de diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) de cometer error tipo I. Los datos se analizaron con el paquete estadístico Statistical Package for the Social Sciences, versión 22 (IBM, 2013).

## **3. Resultados**

Los valores promedios de infiltración inicial, tasas de infiltración básica e infiltración acumulada para los diferentes rodales se muestran en la Tabla 7, en la que se observa que el rodal de Referencia (testigo) presentó un mejor

comportamiento hidrodinámico; caso contrario al tratamiento de Matarrasa, cuyos valores fueron los más bajos en  $F_i$ ,  $F_b$  y  $F_a$ . La variable de  $F_i$  registró diferencias significativas, por lo que se analizó mediante la prueba de Tukey;  $F_b$  y  $F_a$  evidenciaron diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Kruskal-Wallis.

Las pruebas de comparación permiten observar diferencias altamente significativas entre el tratamiento de Referencia y los otros rodales analizados, principalmente, en la variable  $F_i$ , la cual se redujo 45%; mientras que la  $F_b$  se incrementó ligeramente en los tratamientos Árboles padre y Selección, a diferencia de los de Matarrasa y Post-incendio en los que se determinaron decrementos de 28 y 23%, respectivamente. En tanto que,  $F_a$ , en todos los rodales se redujo, a excepción del área de Árboles padre la cual registró 4.7% por arriba del rodal de Referencia. El contenido de humedad inicial del suelo entre los rodales evidenció diferencias significativas (prueba de Kruskal Wallis,  $p \leq 0.05$ ); por lo que se considera que tiene un papel importante en las condiciones iniciales y finales de la infiltración.

Tabla 7. Valores medios de las variables hidrológicas en los diferentes tratamientos.

Tratamiento	$F_i$ (mm h <sup>-1</sup> )	$F_b$ (mm h <sup>-1</sup> )	$F_a$ (mm)	H (%)
Matarrasa	1000 <sup>a</sup>	214.09	1090.49	56.23
Árboles padre	1350 <sup>b</sup>	299.56	1720.37	77.70
Selección	1080 <sup>ab</sup>	322.08	1522.43	51.52
Post-incendio	1120 <sup>ab</sup>	226.95	1172.49	36.12
Rodal de Referencia	2080 <sup>c</sup>	297.93	1642.82	76.61

$F_i$  = Infiltración inicial,  $F_b$  = Infiltración básica,  $F_a$  = Infiltración acumulada, H = Humedad gravimétrica. Letras distintas indican diferencias significativas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

La Figura 2 describe el comportamiento de la tasa de infiltración observada en los distintos rodales. En general, se aprecian tres periodos distintos: inicialmente la velocidad de infiltración es alta y se mantiene constante por un corto tiempo (<15 min); después la tasa de infiltración baja considerablemente (15- 60 min); lo

que resulta en un tercer momento de estabilización, denominado tasa de infiltración básica, el cual tiende a apreciarse en todos los tratamientos después de los 200 minutos de aplicación de la prueba.

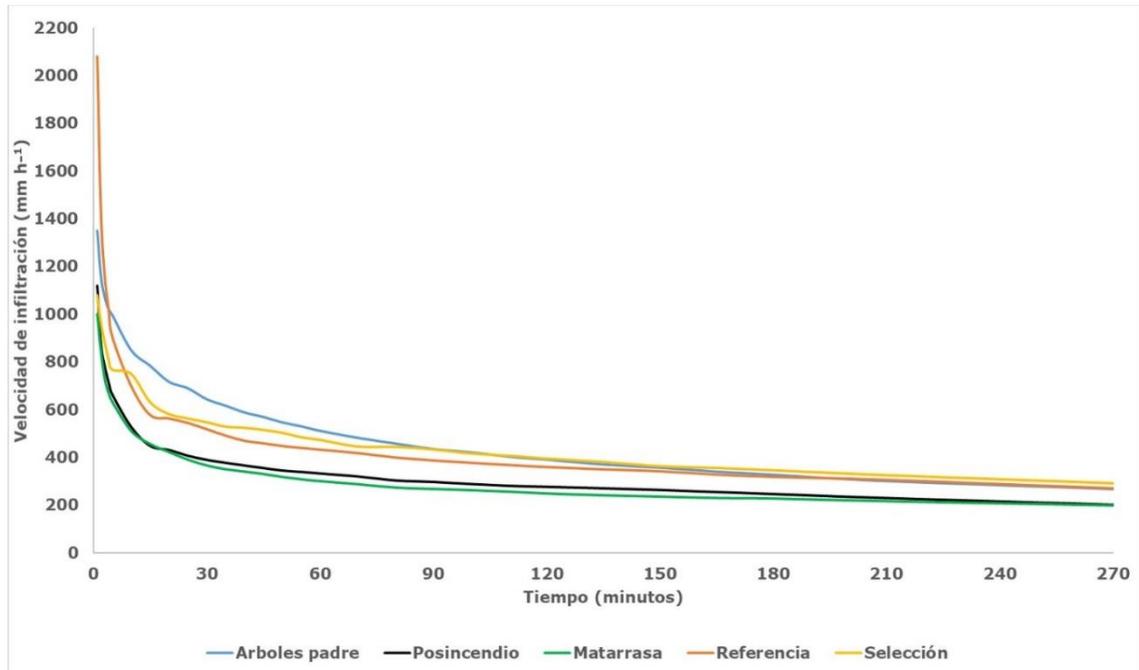


Figura 2. Tasa de infiltración observada en los rodales silvícolas.

En la Tabla 8 se resumen los parámetros de los tres modelos ajustados, así como el valor del coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el cual es una medida del grado de bondad de la ecuación empleada. En la misma Tabla puede apreciarse que en todos los casos, para los modelos Kostiakov y Lewis-Kostiakov se presentaron mayores valores de  $R^2$ , además los parámetros asociados a la infiltración inicial ( $F_i$  y  $a$ ) mostraron una tendencia similar a los observados, esto en todos los rodales analizados.

Tabla 8. Parámetros de los modelos ajustados y coeficientes de determinación ( $R^2$ )

Tratamientos	Medición	Kostiakov			Horton				Lewis-Kostiakov			
		a	b	$R^2$	Fb	$F_i$	K	$R^2$	a	b	Fb	$R^2$
Matarrasa	1a	1141	-0.27	0.96	304	993	-0.05	0.92	942	-0.48	254	0.97
	2da	759	-0.38	0.94	172	1075	-0.34	0.70	719	-0.74	137	0.92
	3a	1144	-0.28	0.96	300	996	-0.06	0.92	948	-0.48	251	0.97

Árboles padre	1a	1191	-0.34	0.95	202	977	-0.05	0.93	1081	-0.47	146	0.99
	2da	1671	-0.21	0.98	508	1392	-0.02	0.95	1266	-0.37	453	0.98
	3a	248	-0.23	0.97	93	278	-0.16	0.80	189	-0.61	85	0.92
Selección	1a	371	-0.12	0.98	111	323	-0.01	0.80	203	-0.23	168	0.99
	2da	1158	-0.25	0.97	250	926	-0.02	0.95	838	-0.42	322	0.97
	3a	308	-0.41	0.93	133	2615	-422.6	0.31	184	-0.48	93	0.95
Post-incendio	1a	714	-0.33	0.95	185	908	-0.27	0.74	644	-0.75	167	0.90
	2da	1510	-0.32	0.95	309	1263	-0.05	0.76	1346	-0.46	215	0.89
	3a	1025	-0.24	0.97	383	1262	-0.24	0.75	844	-0.56	299	0.94
Rodal de Referencia	1a	2112	-0.43	0.91	413	3244	-0.41	0.64	2076	-0.76	300	0.93
	2da	2214	-0.43	0.92	407	2973	-0.32	0.71	2130	-0.67	263	0.96
	3a	1379	-0.27	0.96	428	1387	-0.13	0.82	1177	-0.49	300	0.97

En la Figura 3, como ejemplo, se exhibe el comportamiento de la tasa de infiltración observada y estimada, a partir de los modelos ajustados de la tercera prueba para las áreas de rodal de Referencia, Selección, Matarrasa y Post-incendio; se observa claramente que desde la infiltración inicial, el modelo de Kostiakov tiene un mejor arreglo o ajuste, a diferencia de Horton el cual no estima de manera adecuada la tasa de infiltración durante los primeros momentos, y después de 30 minutos tienden a sobrestimar la infiltración.

En general, ese comportamiento se registró en la mayoría de las pruebas. No obstante, el modelo de Lewis-Kostiakov mostró un correcto desempeño en el ajuste, cuando se registraron tasas de infiltración inicial bajas ( $F_i < 300 \text{ mm h}^{-1}$ ), a diferencia de los modelos de Horton y Kostiakov, los que sobrestimaron y subestimaron la infiltración, respectivamente; lo cual se observa claramente en el área de Selección.

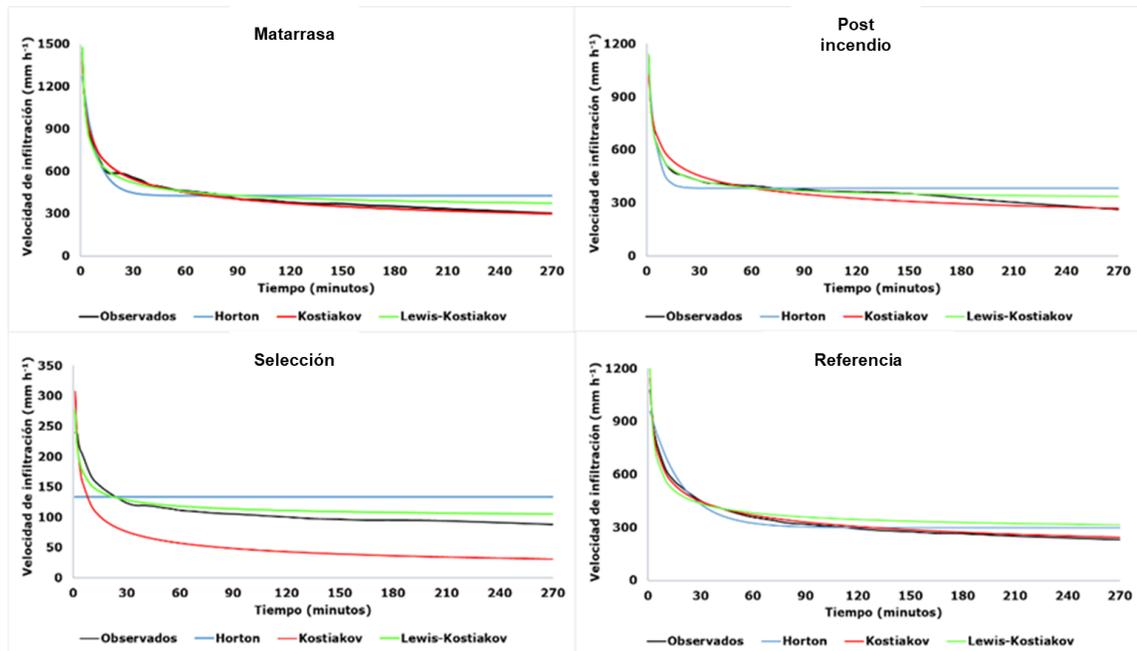


Figura 3. Ajuste de la tasa de infiltración a partir de los modelos de Horton, Kostiakov y Lewis-Kostiakov.

#### 4. Discusión

Di Prima et al. (2017) señalan que la apertura del dosel, debido a la remoción de un cierto número de árboles, es una práctica importante que influye en las relaciones entre el suelo y el agua. Con base en los resultados del presente estudio, las diferencias de la infiltración inicial, básica y acumulada en los rodales están determinadas por el tipo de disturbio o tratamiento silvícola aplicado. Dueñez et al. (2006) y Landini et al. (2007) citan que la intensidad de corta es un factor importante que define los niveles de interceptación de la precipitación, luminosidad, contenidos de humedad y profundidad de materia orgánica en el suelo, etcétera; y por tanto, provocan un efecto directo en las propiedades hidráulicas del suelo.

Bens et al. (2007), Wagner et al. (2011) y Archer et al. (2013) indican que la profundidad y la cantidad de materia orgánica contribuyen a mejorar la estructura edáfica e incrementan la capacidad de infiltración, almacenamiento de agua y la conductividad hidráulica; y a partir de los resultados de  $F_i$ ,  $F_b$  y  $F_a$ ; así como de, las características físicas del suelo y la vegetación que predominan en los rodales estudiados; lo anterior se puede corroborar, principalmente, en el rodal de

Matarrasa, cuyas propiedades fueron afectadas de manera importante por la intensidad de corta aplicada, y ello provocó disminuciones en las variables hidrológicas.

Los valores de las variables de infiltración permiten definir lo documentado por Hümman et al. (2011), Marshall et al. (2014) y Archer et al. (2016) quienes sugieren que la etapa de crecimiento del bosque es un factor relevante que determina las características hidrológicas del suelo. Esto concuerda con los resultados del estudio que aquí se presenta, en el que las áreas de Matarrasa y Post-incendio son masas forestales que presentan un estado de madurez similar, a diferencia de los rodales de Árboles padre, Selección y Referencia donde existe arbolado superior.

Respecto a los valores del estadístico  $R^2$ , se nota muy poca variación entre el modelo tipo Kostiakov y el de Lewis-Kostiakov, los cuales representan adecuadamente la evolución de la lámina infiltrada en las pruebas de infiltración de los diferentes rodales evaluados. Lo anterior se confirma con lo señalado por Návar y Synnott (2000), Weber y Apestegui (2016) y Sihag et al. (2017) quienes indican que las mejores predicciones, por lo general, se obtienen con el modelo Lewis-Kostiakov, ya que sus parámetros son más sensibles al tipo de suelos Umbrisol, que se caracteriza por presentar un horizonte superficial grueso y oscuro, insaturado de bases y rico en materia orgánica (Casanova et al., 2007).

En relación con lo anterior, disminuciones en la materia orgánica repercuten en la estabilidad de los agregados, al dispersar partículas finas texturales y con ello se favorece la disminución de la porosidad y, en consecuencia, hay decrementos en la infiltración (García-Hernández et al., 2008). Cabe señalar que la información respecto a los temas hidrológicos y su relación con el manejo forestal es escasa y limitada, con base en ello se resalta la importancia del presente estudio.

# **CAPÍTULO III. ESTIMACIÓN DEL CARBONO ORGÁNICO EN UN UMBRISOL BAJO DIFERENTES TRATAMIENTOS SILVÍCOLAS EN BOSQUES DE LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL, MÉXICO**

## **Resumen**

Para determinar los cambios de carbono orgánico del suelo (COS) en un Umbrisol en un bosque templado en el noroeste de México bajo manejo forestal, se analizaron tres rodales forestales silvícolas con cortas de regeneración (Matarrasa, Árboles padre y Selección), comparándolos con un área regenerada post-incendio y un control denominado Referencia. En cada rodal se recolectaron 4 muestras compuestas de suelo a dos profundidades (0-20 y 20-40 cm), las cuales se llevaron al laboratorio para la determinación del COS. El ANOVA factorial indicó diferencias significativas en el COS entre rodales y profundidades. El rodal Árboles Padre fue el de mayor contenido de COS a 0-20 cm, con un aumento del 63% con respecto a la Referencia. Con respecto a la profundidad 20-40 cm, el rodal Matarrasa presentó los valores más altos, con incrementos por encima del 100% con respecto a la Referencia. Las diferencias en el COS en ambas profundidades se pueden atribuir a la variada incorporación de residuos de la explotación forestal y el fuego, así como a la estructura y composición actual de los rodales. La gestión forestal contribuye a mejorar y aumentar la capacidad de los Umbrisoles como sumideros de carbono. La importancia del almacenamiento de COS en la lucha contra el cambio climático involucra aspectos como la gestión forestal, permitiendo establecer criterios y decisiones sostenibles.

**Palabras clave:** Manejo forestal, post-incendio, carbono orgánico, Umbrisol, cambio climático.

## **Abstract**

In order to determine soil organic carbon (SOC) changes in an Umbrisol in a temperate forest in Northwestern Mexico under forest management, three silvicultural forest stands with regeneration cuts were analyzed (Clear cutting, Seed trees and Selection), comparing them with a regenerated post-fire area and a control denominated Reference. In each stand, 4 composite soil samples were collected at two depths (0-20 and 20-40 cm), which were taken to the laboratory for determining SOC. The factorial ANOVA indicated significant differences in the SOC between stands and depths. The Seed Trees stand was the one with the highest content of SOC at 0-20 cm, with an increase of 63% with respect to Reference. With respect to depth 20-40 cm, the Clear Cutting stand presented the highest values, with increases by above 100% with respect to Reference. The differences in SOC at both depths can be attributed to the varied intake of residues from logging and fire, as well as the current structure and composition of the stands. Forest management contributes to improving and increasing the capacity of Umbrisols as carbon sinks. The importance of SOC storage in the fight against climate change involves aspects such as forest management, allowing to establish sustainable criteria and decisions.

**Key words:** Forest management, post-fire, organic carbon, Umbrisol, climate change.

## **1. Introducción**

El suelo es un sistema ecológico complejo derivado de las interacciones entre clima y diferentes tipos de rocas, sedimentos, materiales orgánicos, relieve, y organismos vivos durante un período de tiempo (Nunes et al., 2020). Proveen servicios ecosistémicos necesarios para asegurar el bienestar del ser humano, los cuales se pueden agrupar en tres categorías principales: funciones reguladoras, funciones de provisión y culturales (FAO, 2015b).

Cuantitativamente los suelos tienen la capacidad de almacenar carbono (1500 Pg) tres veces más que la cantidad almacenada en la vegetación terrestre (550 Pg) y el doble de lo almacenado en la atmósfera (750 Pg), por lo que desempeñan un papel clave en la mitigación del cambio climático (AEMA, 2015; Veni et al., 2020). El carbono es el elemento químico clave en los compuestos de naturaleza orgánica, entre los océanos, la atmósfera, la vegetación y el suelo conforman los reservorios de carbono (Orjuela, 2018). Sin embargo, uno de los principales factores antropogénicos que aceleran el cambio climático es el uso de suelo, puesto que genera distintas transformaciones atmosféricas y ecológicas, debido principalmente a actividades agrícolas, pecuarias y silvícolas (IPCC, 2014).

El carbono orgánico en los suelos (COS), es de suma importancia para el desarrollo de todos los ecosistemas. Los beneficios del COS van de algo particular hasta procesos complejos; un aumento en el COS mejorará la estabilidad estructural del suelo, su capacidad de retener agua, porosidad y fertilidad y permitirá el desarrollo adecuado de la vegetación, esto a su vez resulta en la mejoría de una amplia variedad de servicios ecosistémicos (Laban et al., 2018; FAO, 2019). Cabe señalar, la captura y retención de carbono en el suelo muestra variabilidad, de acuerdo al tipo de suelos, a sus características físicas, químicas y biológicas, condiciones climáticas y geográficas, vegetación, así como su manejo (Fisher, 2000; Robert, 2001; Lal, 2005).

Por lo general, las actividades ligadas al manejo forestal, como el derribo, arrastre y apilamiento, causan múltiples impactos como la compactación del suelo, formación de surcos, cambios en el microclima del suelo, daños en el arbolado

adyacente, mayor erosión del suelo, vulnerabilidad a las infecciones por hongos y pérdida de biodiversidad, materia orgánica y densidad de árboles, provocando variaciones en la dinámica y secuestro de carbono orgánico del suelo (Demir et al., 2007; Jandl et al., 2007; Jamshidi et al., 2008; Sirén, et al., 2013; Cambi, et al., 2015, 2016, 2017).

El efecto de las actividades forestales sobre el recurso suelo varía según los sistemas de aprovechamiento (Spinelli et al., 2010), características del sitio (Tavankar et al., 2015) y el grado de mecanización durante la tala y extracción (Picchio et al., 2012a, 2012b). Por otro lado, los incendios pueden ocasionar cambios en el ciclo de nutrientes, estructura del suelo (Wohlgemuth et al., 2006) y, por tanto, en el almacenamiento de COS (North y Hurteau, 2011), cabe señalar que dichas alteraciones están relacionadas con la resiliencia de los ecosistemas a los ataques de incendios forestales (Cadena et al., 2020).

En la región de Pueblo Nuevo, Durango, el manejo forestal se realiza bajo dos métodos de manejo: a) Método Mexicano de Manejo Forestal Irregular (MMOBI) donde el aprovechamiento ocurre mediante el tratamiento único de cortas de selección (López-Hernández et al., 2017); ~~y por el~~ b) Método de Desarrollo Silvícola (MDS), el cuál considera la aplicación de varios cortas de aclareo en la etapa de crecimiento del bosque, y al final del turno se aplica un corte intensivo llamado corte de regeneración (dejando en pie solo árboles semilleros denominados Árboles padre), cuyo objetivo es promover el establecimiento de la regeneración natural (Hernández-Díaz et al., 2008).

De acuerdo a Galicia (2016), los bosques templados fríos se distribuyen principalmente sobre Leptosoles, Regosoles y Luvisoles, y en menor proporción en Andosoles, Cambisoles y Umbrisoles, sin embargo, el potencial de secuestro de COS está inversamente relacionado con su superficie. Las concentraciones de Carbono en Umbrisoles, Andosoles y Cambisoles de uso forestal oscilan entre 4-8 t C ha<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup> del suelo, mientras que en estos mismos bajo manejos agrícolas se reducen considerablemente (2-3 t C ha<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup>), por lo que su potencial de secuestro es susceptible a cualquier modificación física, química y biológica del

ecosistema (Macias et al., 2005). Los Umbrisoles tienen una importante acumulación de materia orgánica en el suelo superficial mineral y una baja saturación de bases en algún lugar dentro del primer metro. Se desarrollan en climas húmedos, principalmente en áreas templadas o frías, a nivel mundial ocupan unos 100 millones de hectáreas y muchos Umbrisoles están bajo cubierta de vegetación natural o casi natural (FAO, 2015a). En México ocupan menos del 3% de la superficie continental, el 2.91% de la superficie estatal de Durango y específicamente el 3.3% del Municipio de Pueblo Nuevo (INEGI, 2005, 2017).

Con base a lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue determinar el efecto del manejo forestal y la ocurrencia de un incendio natural sobre el almacenamiento de carbono en un suelo Umbrisol, en un bosque de pino en la Sierra Madre Occidental. Cabe señalar que existe una falta de información para esta región geográfica, en cuanto al efecto de actividades forestales sobre las características ecopedológicas, principalmente en el secuestro del carbono por parte del suelo donde la mayoría de los estudios se enfocan en analizar la biomasa aérea, por lo que el aporte de esta investigación será de utilidad para establecer criterios técnicos y científicos para el manejo sustentable de los recursos suelo y vegetación.

## **2. Materiales y Métodos**

### **2.1. Área de estudio**

El área de estudio se encuentra ubicada en los bosques del ejido La Ciudad a 2583 msnm en el municipio de Pueblo Nuevo, Durango, México. La vegetación está compuesta principalmente por *Pinus duranguensis* Ehren, *Pinus cooperi* C. E. Blanco, *Pinus ayacahuite* Ehren, *Juniperus deppeana* Steud y *Quercus sideroxila* Humb. & Bonpl (González-Elizondo et al., 2012). El suelo dominante pertenece al tipo Umbrisol (INEGI, 2005). La precipitación media anual es de 1200 mm y una temperatura media anual de 18 °C (Zúñiga et al., 2018).

La evaluación se realizó en cinco rodales con diferentes condiciones; tres de ellos sometidos a cortas de regeneración, un área regenerada post-incendio y un testigo denominado rodal de Referencia.

## 2.2. Diseño experimental

En cada uno de los rodales se procedió, a coleccionar 8 muestras compuestas de suelo a dos profundidades (0-20 cm y 20-40 cm), para un total de 40 muestras compuestas. Así mismo se extrajeron 40 muestras para determinar la densidad aparente mediante el Método gravimétrico (Woerner, 1989). Posteriormente, fueron llevadas al laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Forestales, de la Universidad Autónoma de Nuevo León, donde fueron secadas al aire, tamizadas (< 2 mm) y almacenadas para su subsiguiente análisis. De acuerdo a la FAO (2015a), los Umbrisoles cuentan con un horizonte superficial profundo y son ricos en materia orgánica, siendo estas profundidades evaluadas, donde se concentra la mayor cantidad de materia orgánica y ciclaje de nutrientes.

## 2.3. Carbono Orgánico en las muestras

El carbono orgánico del suelo (COS) se estimó a partir de la materia orgánica usando el método Walkley y Black modificado (Woerner, 1989). El cual consiste en realizar una digestión húmeda con ácido sulfúrico concentrado ( $H_2SO_4$ ) y oxidación del carbono con dicromato de potasio 0.07 M ( $K_2Cr_2O_7$ ), agregando a 0.5 g de suelo, 25 mL de  $K_2Cr_2O_7$  y 25 mL de  $H_2SO_4$  y se tituló el exceso de dicromato con sulfato ferroso 0.2 M ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ).

Con base a los resultados, se procedió a calcular el porcentaje de carbono orgánico del suelo (COS), mediante la siguiente ecuación (Woerner, 1989):

$$\% \text{ Carbono Orgánico} = 0.779 * (B - M) (0.4)$$

$$0.779 = \left( \frac{12}{4000} * \frac{100}{77} * 100 \right) \div 0.5$$

*B*: Volumen (mL) de sulfato ferroso gastado para valorar el blanco (testigo) de reactivos.

*M*: Volumen (mL) de sulfato ferroso gastado para valorar la muestra.

0.4: normalidad de la solución de dicromato de potasio y de la solución del sulfato ferroso

12/4000: Peso equivalente del carbono en mg

100/77: Factor de recuperación del carbono según Walkley/Black

0.5: Peso (g) de la muestra

#### 2.4. Determinación del carbono en el suelo

Para el cálculo del COS ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ), primeramente, se obtuvo la densidad aparente (DA) ( $\text{g cm}^{-3}$ ) por el método del cilindro. Posteriormente, conociendo el porcentaje de carbono del suelo y la densidad aparente, se aplica la siguiente fórmula (González et al., 2008):

$$CS=CC*DA*P$$

Donde:

CS= Cantidad de carbono en el suelo ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )

CC= Contenido de carbono (%)

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

P= Profundidad de muestreo (cm)

#### 2.5. Análisis estadísticos

Se aplicó la prueba de normalidad y bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov para la variable carbono orgánico del suelo, realizando las transformaciones necesarias para su normalización (base de raíz cuadrada), seguido de la prueba de homogeneidad de varianza (Levene). Para establecer la existencia de diferencias estadísticas significativas ( $p \leq 0.05$ ), se realizó un ANOVA factorial para comparar entre tratamientos silvícolas (FA) y cambios por profundidad (FB), así como su interacción (FA\*FB). La comparación múltiple de las medias se realizó con la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ). Los datos se analizaron mediante el paquete estadístico SPSS versión 22 (International Business Machines [IBM], 2013).

### 3. Resultados

Los resultados del ANOVA factorial, mostraron diferencias significativas en los contenidos de COS entre los rodales silvícolas y profundidades, así como entre su interacción FA\*FB (Tabla 9).

Tabla 9. Resumen del análisis de varianza de dos factores (FA y FB) para el contenido de COS.

Fuente de Variación	Suma de cuadrados	Cuadrados Medios	Grados de libertad	Valor F
---------------------	-------------------	------------------	--------------------	---------

FA	0.216	0.054	4	26.84**
FB	0.104	0.104	1	51.47**
FA*FB	0.236	0.059	4	29.31**
Error	0.060	0.0020	30	

\*\*Diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.01$ ); FA: factor rodal silvícola, FB: factor profundidad

De acuerdo a las pruebas de Tukey ( $p \leq 0.05$ ), se detectó que los valores medios del COS son estadísticamente diferentes para las profundidades; específicamente de 0-20 cm el contenido de COS osciló entre 66 y 124.01 Mg ha<sup>-1</sup>, siendo el rodal de Árboles padre el de mayor contenido y con un aumento del 63% respecto al rodal de Referencia (Figura 4).

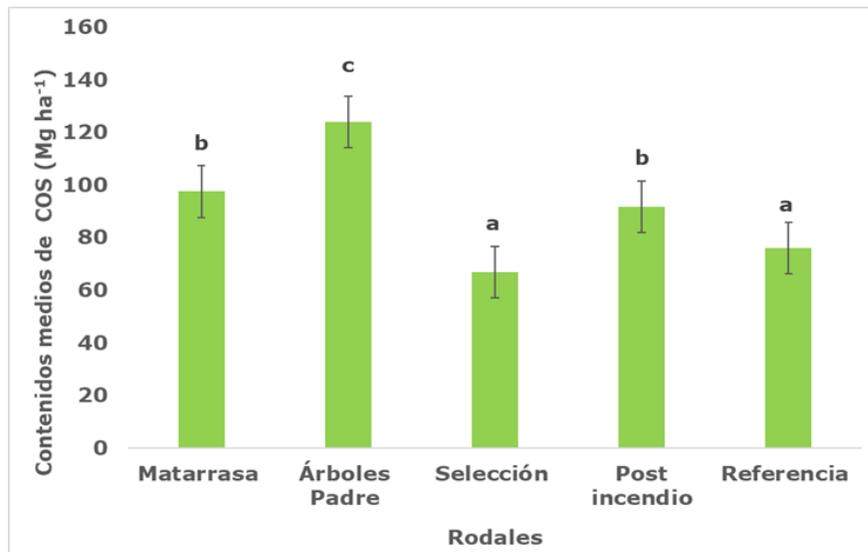


Figura 4. Contenido de COS para la profundidad 0-20 cm.

Para la profundidad de 20-40 cm los contenidos de COS presentaron fluctuaciones entre 40 y 88 Mg ha<sup>-1</sup>, donde el rodal de Matarrasa mostró los valores más altos, con incrementos por arriba del 100% respecto al rodal de Referencia (Figura 5).

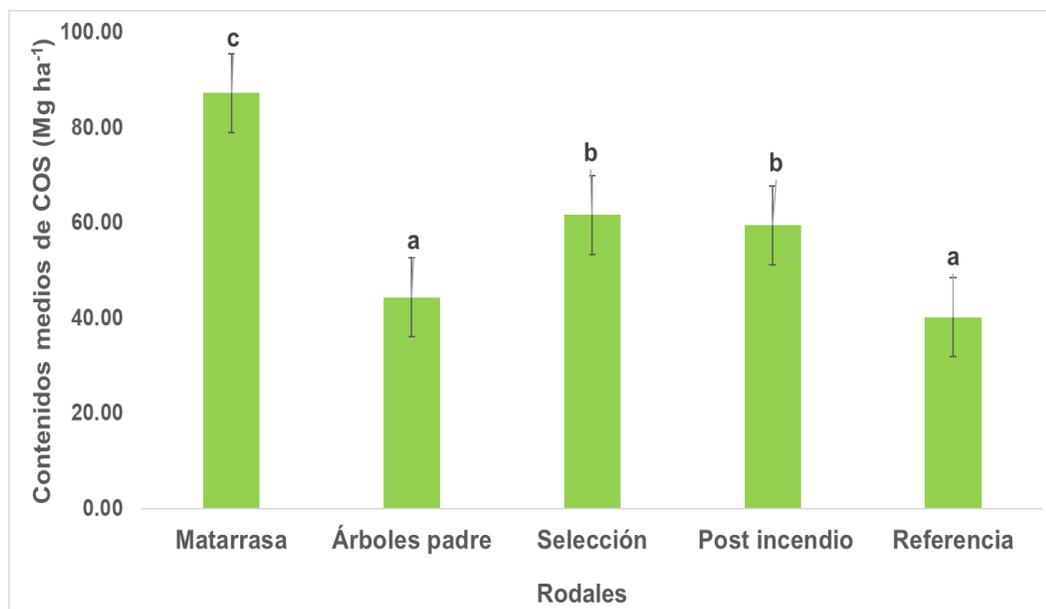


Figura 5. Contenido de COS para la profundidad 20-40 cm.

En general, el COS total se estimó en el perfil de 0-40 cm para cada rodal silvícola, para lo cual se sumaron los valores de ambas profundidades, siendo evidente que el rodal de Matarrasa presentó los mayores contenidos, pues implicó la eliminación de toda la biomasa aérea, específicamente la tendencia en el contenido promedio del COS en los rodales fue la siguiente: Matarrasa > Árboles-padre > Post-incendio > Selección > Referencia (Tabla 10).

Tabla 10. Contenido promedio de carbono orgánico en suelos almacenado en los diferentes rodales silvícolas (0-40 cm).

Rodal silvícola	Superficie (ha)	COS (Mg ha <sup>-1</sup> )
Matarrasa	10.29	184.85
Árboles padre	9.00	168.36
Post-incendio	10.00	128.62
Selección	20.00	151.28
Referencia	4.35	116.37

#### 4. Discusión

Particularmente, los Umbrisoles tienen una alta capacidad de acumular COS. Según Turrión *et al.* (2009), fluctúan entre 33 y 185 Mg ha<sup>-1</sup>, coincidiendo con los resultados del presente estudio. Cabe resaltar que la composición química de la materia orgánica de los bosques de pino juega un papel importante en el

suministro de COS, siendo la lignina uno de los principales componentes cuyas características recalcitrantes permiten estabilizar el COS durante más tiempo (Pérez *et al.*, 2013).

Por otra parte, Pimienta de la Torre *et al.* (2007) encontraron que el carbono secuestrado por la biomasa aérea en bosques de la región de El Salto, Durango fue de 51.12 Mg ha<sup>-1</sup>, contenidos por debajo del almacenado por el suelo, lo cual resalta la importancia del recurso suelo frente al cambio climático.

En general se observó una variación significativa en la respuesta del COS a las cortas de regeneración. Powers *et al.* (2005), Selig *et al.* (2008) y Noormets *et al.* (2012) señalan que el aumento de la mineralización del C en el suelo es un fenómeno común post cosecha, el cual puede deberse a los residuos del aprovechamiento, principalmente a las raíces que se incorporaron como materia orgánica al suelo, demostrando ser fuentes de impacto en el aumento del almacenamiento de COS. Por tanto, en los rodales de Árboles padre y Matarrasa cuya intensidad de corta aplicada fue 100 y 80%, respectivamente, la cantidad de raíces gruesas predominan en mayor medida que los demás rodales, siendo suministros potenciales de carbono al suelo.

Por otra parte, la extracción forestal y ocurrencia del incendio provocaron aperturas en la masa forestal permitiendo el establecimiento de arbustos y gramíneas con mayores tasas de descomposición que la vegetación arbórea, generando otro suministro extra de carbono orgánico para el suelo (Chen y Shrestha, 2012; Brassard *et al.*, 2013), lo cual pudo influir en los resultados de la investigación.

La influencia del incendio sobre el contenido de COS es evidente, apreciándose niveles por encima del rodal de Referencia. Dichos resultados concuerdan con lo establecido por Johnson y Curtis (2001), Certini *et al.* (2005), González y Almendros (2011) y de la Rosa *et al.* (2014), donde el COS puede aumentar significativamente a corto y mediano plazo en incendios de mediana y baja intensidad, debido a diversos factores como la formación de sustancias nuevas, aceleración del proceso de mineralización, transformación de la materia orgánica

a formas más recalcitrantes, incorporación masiva al suelo de necromasa y establecimiento de vegetación de rápido crecimiento post-incendio.

Los resultados del COS en ambas profundidades muestran que el rodal de Referencia se caracteriza por presentar diferencias significativas en comparación con los demás rodales, lo que concuerda con Nave *et al.* (2010) y Li *et al.* (2012) que el COS presenta sensibilidad por la presencia de actividades ligadas al aprovechamiento forestal, así como a la ocurrencia del incendio. Según Clemmensen *et al.* (2013), estas diferencias pueden atribuirse a las diferentes estructuras y composiciones de los rodales silvícolas, además de señalar que las raíces de los árboles alcanzan diferentes profundidades de suelo controlando el almacenamiento del carbono.

El presente estudio proporciona información fundamental y nueva sobre el ciclo del carbono en el suelo Umbrisol, teniendo en cuenta que en los bosques templados la mayoría de los estudios en la Sierra Madre Occidental se centran en el análisis de la biomasa aérea.

# **CAPÍTULO IV. EFECTO DEL MANEJO FORESTAL EN LA RESERVA DE NITRÓGENO Y RELACIÓN C/N EN UN UMBRISOL EN BOSQUES DE LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL, MÉXICO**

## **Resumen**

Las actividades ligadas al manejo forestal pueden influir de manera positiva o negativa sobre las propiedades y servicios ecosistémicos del recurso suelo, a través de cambios en la vegetación y el microclima. Particularmente, la remoción de biomasa altera los ciclos del carbono y nitrógeno, indicadores importantes de la salud del suelo. Por lo anterior, se estudió el efecto de tres cortas de regeneración y la ocurrencia de un incendio forestal sobre el contenido de Carbono (%), Nitrógeno (% y  $\text{Mg ha}^{-1}$ ) y la relación C/N en dos profundidades de un suelo Umbrisol, en bosques de la Sierra Madre Occidental. De acuerdo a la prueba de Kruskal Wallis, se encontraron diferencias significativas en las variables bajo las distintas condiciones forestales en dos profundidades del suelo, lo cual puede estar relacionado con cambios en los contenidos de materia orgánica del suelo. Específicamente, los resultados del contenido de nitrógeno (%) son considerados como muy bajos, atribuido principalmente a la naturaleza y calidad de la materia orgánica, influyendo sobre la relación C/N la cual se encuentra fuera de los rangos óptimos de mineralización. Por otra parte, la reserva de Nitrógeno ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) para el perfil analizado osciló entre 5.03 y 9.63. Particularmente las cortas de regeneración y ocurrencia del incendio pudieron provocar una liberación del nitrógeno secuestrado por la biomasa aumentando los niveles de nitrógeno en el suelo. La presente investigación proporciona información esencial para establecer criterios pre y post manejo forestal para conservar y mejorar la condición del suelo.

**Palabras clave:** Manejo forestal, nitrógeno, carbono, Umbrisol, relación C/N.

## **Abstract**

Activities related to forest management can have a positive or negative influence on the properties and ecosystem services of the soil resource, through changes in vegetation and microclimate. In particular, biomass removal alters the carbon and nitrogen cycles, important indicators of soil health. Therefore, the effect of three regeneration cuts and the occurrence of a forest fire on the content of Carbon (%), Nitrogen (% and  $\text{Mg ha}^{-1}$ ) and the C/N ratio at two depths of an Umbrisol soil was analyzed in forests of the Sierra Madre Occidental. According to the Kruskal Wallis test, significant differences were found in the variables under the different forest conditions at two depths of the soil, which may be related to changes in the contents of soil organic matter and biomass. Specifically, the nitrogen content (%) results are considered very low, mainly attributed to the nature and quality of the organic matter, influencing the C/N ratio, which is outside the optimal mineralization ranges. On the other hand, the nitrogen storage ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) for the analyzed profile ranged between 5.03 and 9.63. Particularly, the regeneration cuts and the occurrence of the fire could cause a release of the nitrogen sequestered by the biomass, increasing the nitrogen levels in the soil. This research provides essential information to establish pre- and post-forest management criteria to conserve and improve soil conditions.

**Keywords:** Forest management, nitrogen, carbon, Umbrisol, C/N ratio.

## 1. Introducción

Los suelos del mundo tienen la capacidad de almacenar carbono (1500 Pg) en el primer metro de profundidad del suelo, tres veces más que la cantidad almacenada en la vegetación terrestre (550 Pg) y el doble de lo almacenado en la atmósfera (750 Pg), por lo que desempeñan un papel clave en la mitigación del cambio climático (Veni et al., 2020), por otra parte se estima que las existencias de nitrógeno total (NT) del suelo oscilan entre 133–140 Pg dentro del mismo intervalo de profundidad (Batjes , 2014).

Tanto el carbono (C) como el nitrógeno (N) son indicadores importantes de la calidad del suelo debido a su capacidad de mejorar la estructura del suelo, la disponibilidad de nutrientes, la retención de agua y la actividad microbiana (Lal, 2004; Bationo et al., 2007). Específicamente el C del suelo es un componente del ciclo C global, mientras que la disponibilidad de N es la principal limitante en la productividad, ya que es un macronutriente que determina el crecimiento de la vegetación (Rincón y Gutiérrez, 2012; Yuan y Chen, 2012). Uno de los índices empleados para determinar la calidad de la materia orgánica del suelo (MOS) es la relación C:N, indicador que refleja la disponibilidad del nitrógeno para las plantas; donde proporciones altas indican que la MOS se descompone lentamente, ya que la reserva de nitrógeno es inmovilizada por los microorganismos, por lo que no puede ser utilizado por las plantas; en cambio, proporciones que fluctúen entre 10 y 14 corresponden a una mineralización rápida, generando suficiente N para los microorganismos y para la vegetación (Gamarra et al., 2017).

Sin embargo, en las últimas décadas, se ha ejercido una mayor presión sobre los recursos forestales para satisfacer las necesidades del ser humano, generando cambios en la ecología y biología del recurso suelo, repercutiendo en la calidad de sus servicios ecosistémicos (Murray y King, 2012; IPCC, 2014). Específicamente, las prácticas de manejo forestal modifican la disponibilidad de la MOS, lo cual puede ser considerado como un aspecto negativo para la productividad del sitio, particularmente en los aprovechamientos forestales con

altas intensidades de corta, los cuales provocan un mayor agotamiento de la materia orgánica y nutrientes del suelo, lo cual limita la productividad del sitio a lo largo del tiempo. (Walmsley et al., 2009; Binkley y Fisher, 2013; Kurth et al., 2014; Achat et al., 2015).

Además, las cortas de aprovechamiento pueden afectar indirectamente el medio ambiente del suelo, como las variables de la temperatura y/o contenido de humedad del mismo (Slesak, 2013; Wic et al., 2013), influyendo en la biota del suelo y por ende modificando las tasas de transformación de nutrientes y descomposición de materia orgánica (Slesak et al., 2011; Mushinski et al., 2017). Por lo tanto, cualquier perturbación puede afectar negativamente a la productividad del recurso suelo.

Los suelos tipo Umbrisoles se caracterizan por tener un alto contenido de materia orgánica dentro del primer metro de profundidad, se distribuyen principalmente en áreas templadas o frías y muchos Umbrisoles están cubiertos de vegetación natural o casi natural, ocupando en todo el mundo alrededor de 100 millones de hectáreas (FAO, 2015). En México, cubren menos del 3% de la superficie del país, el 2.91% de la superficie del estado de Durango y específicamente el 3.3% del Municipio de Pueblo Nuevo (INEGI, 2005; INEGI, 2017).

Con base en lo anterior, el objetivo de esta investigación fue determinar el efecto del manejo forestal y la ocurrencia de un incendio forestal sobre el contenido de C, N y la relación C/N en un suelo de tipo Umbrisol, en bosques de la Sierra Madre Occidental. Haciendo énfasis en que la información constituye una de las primeras investigaciones acerca de la respuesta de las actividades ligadas al manejo forestal en la región sobre las características edáficas.

## **2. Materiales y métodos**

### **2.1. Descripción del área de estudio**

El estudio se llevó a cabo en los bosques del ejido “La Ciudad” en el municipio de Pueblo Nuevo, Durango, México a 2583 msnm. La vegetación está compuesta principalmente por *Pinus duranguensis* Ehren, *Pinus cooperi* C. E. Blanco, *Pinus ayacahuite* Ehren, *Juniperus deppeana* Steud y *Quercus sideroxila*

Humb. & Bonpl (González-Elizondo *et al.*, 2012). El suelo dominante en la zona pertenece al tipo Umbrisol (Figura 6). La precipitación media anual es de 1200 mm y una temperatura media anual de 18 °C (INEGI, 2005).

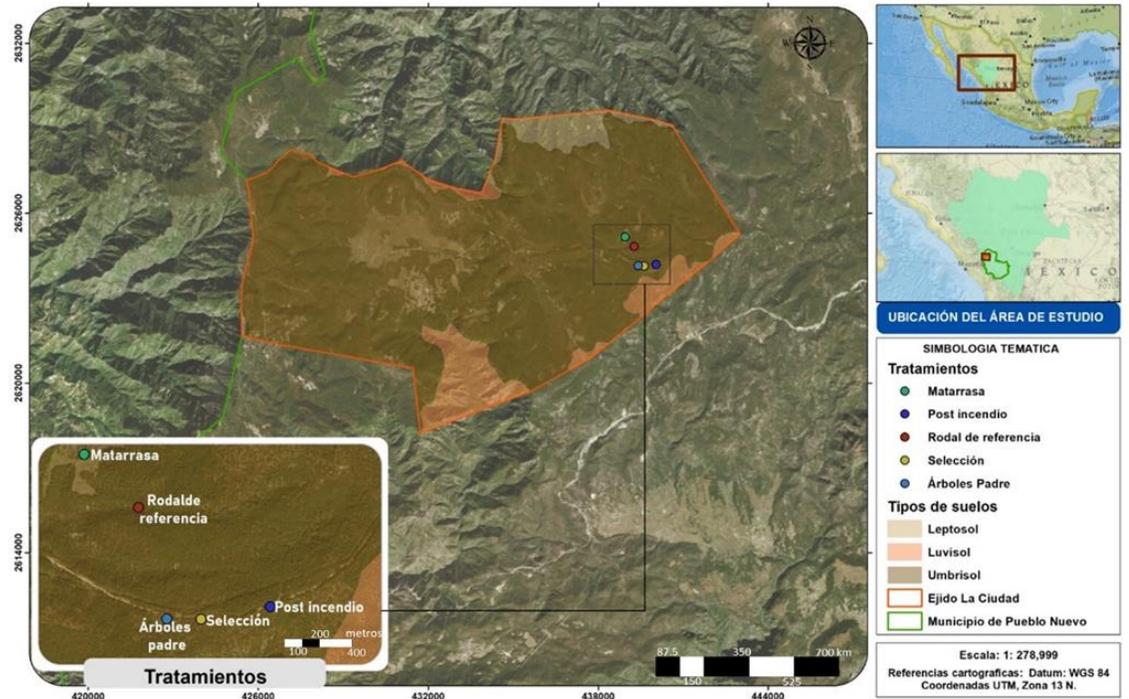


Figura 6. Ubicación del área de estudio

La investigación se llevó a cabo en tres rodales silvícolas sometidos a cortas de regeneración (Matarrosa, Árboles padre y Selección), un área regenerada post-incendio y un rodal testigo denominado Referencia, los cuales se describen en la Tabla 11.

Tabla 11. Descripción de los rodales y tratamientos silvícolas

Condición forestal	Superficie (ha)	Descripción del tratamiento
Matarrosa (M)	10.29	Extracción total del arbolado
Árboles padre (AP)	9	Intensidad de corta del 80 %. Volumen inicial y posterior de 206.8 y 41.3 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> Intensidad de corta del 34%.
Selección (S)	20	Volumen inicial y posterior de 223.8 y 147.4 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>
Post-incendio (P-I)	10	Recibió un pre-aclareo (año 2017) cuando tenía una densidad de 10,000 Ind ha <sup>-1</sup>

Referencia (R)	4.35	Masa arbórea más próxima a aplicarse corta de regeneración cuyo volumen es de 231 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> .
----------------	------	---

## 2.2. Muestreo

Considerando las características del suelo Umbrisol, los cuales cuentan con un horizonte superficial profundo y contenidos altos de materia orgánica, se procedió a colectar 8 muestras compuestas de suelo a profundidades de 0-20 cm y 20-40 cm, en cada uno de los rodales silvícolas, para un total de 40 muestras compuestas. Posteriormente, fueron llevadas al laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Forestales, de la Universidad Autónoma de Nuevo León, donde fueron secadas al aire, tamizadas (< 2 mm) y almacenadas para su subsiguiente análisis.

## 2.3. Determinación del nitrógeno total y carbono orgánico del suelo (%)

El contenido de nitrógeno total (%) del suelo se determinó con el método Kjeldahl. Empleando el equipo destilador-titulador Velp Scientifica modelo UDK159, con base en lo propuesto por Bremner y Mulvaney (1982). Mientras que el carbono orgánico del suelo se determinó a partir de la materia orgánica usando el método Walkley y Black modificado (Woerner, 1989).

## 2.4. Determinación de la reserva de nitrógeno en el suelo

En la Tabla 12 se presentan los valores de la densidad aparente (g cm<sup>-3</sup>) del suelo de los diferentes rodales analizados, utilizados para calcular la reserva de nitrógeno en Mg ha<sup>-1</sup> (Madrigal et al., 2019).

$$CN=N\%*DA*P$$

Donde:

*CN*= Cantidad de nitrógeno en el suelo (Mg ha<sup>-1</sup>)

*N%*= % de nitrógeno (%)

*DA*= Densidad aparente (g cm<sup>-3</sup>)

*P*= Profundidad de muestreo (cm)

Tabla 12. Valores medios de la densidad aparente del suelo para los rodales analizados

Rodal silvícola	Densidad aparente (g cm <sup>3</sup> )	
	0-20 cm	20-40 cm
Matarrosa	0.80	0.77
Árboles padre	0.72	0.85
Selección	0.51	0.85
Post-incendio	0.58	0.68
Referencia	0.58	0.69

### 2.5. Determinación de la relación C/N

La relación C/N se calculó a partir de los porcentajes de carbono y nitrógeno de las muestras de suelo para ambos intervalos de profundidad (0-20 y 20-40 cm), donde el resultado de la división es directamente proporcional a la disponibilidad de nitrógeno respecto a carbono, particularmente proporciones altas indicarían una baja disponibilidad de nitrógeno en el suelo.

### 2.6. Análisis estadísticos

Se aplicaron las pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov, y la de homogeneidad de varianzas (Levene), donde todas las variables rechazaron ambos supuestos. Con el fin de identificar diferencias estadísticas significativas ( $p \leq 0.05$ ) se empleó la prueba de Kruskal Wallis con corrección de Bonferroni para ambas profundidades. Todos los datos fueron analizados con el paquete estadístico SPSS versión 22 (International Business Machines [IBM], 2013).

### 3. Resultados

La prueba de Kruskal-Wallis mostró que los datos obtenidos de nitrógeno total (%), carbono (%), relación C/N y reserva de nitrógeno (Mg ha<sup>-1</sup>) fueron significativamente diferentes entre los rodales silvícolas en ambas profundidades analizadas ( $p \leq 0.05$ ).

En la Tabla 13 se muestran las comparaciones múltiples utilizando la corrección de Bonferroni para las variables. De 0-20 cm, no se presentaron diferencias significativas en nitrógeno total (%) entre los rodales, sin embargo de 20-40 cm las comparaciones de pares de Matarrosa-Referencia y Referencia-Post-incendio fueron significativas; en cuanto al carbono (%) la primer profundidad

indicó contrastes entre Matarrasa-Árboles padre y la segunda profundidad Matarrasa-Referencia y Matarrasa-Árboles padre; la variable C/N mostró la misma tendencia en ambas profundidades con solo una comparación significativa (Post-incendio-Selección de 0-20 cm y Referencia-Árboles padre de 20-40 cm). Por último, las pruebas realizadas para reserva de nitrógeno ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) presentaron diferencias de 0-20 cm entre Selección-Árboles padre y Referencia-Árboles padre y de 20-40 cm solo se presentaron entre Matarrasa-Referencia.

Tabla 13. Prueba post hoc de Kruskal Wallis con corrección de Bonferroni para las variables analizadas

Comparaciones por pareja	Nitrógeno total (%)		Carbono (%)		C/N		Reserva nitrógeno ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )	
	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm
	Matarrasa-Selección	1.000	1.000	1.000	0.727	1.000	1.000	0.422
Matarrasa-Post-incendio	1.000	1.000	0.155	1.000	0.943	1.000	1.000	0.730
Matarrasa-Referencia	0.214	<b>0.008</b>	1.000	<b>0.021</b>	1.000	1.000	1.000	<b>0.001</b>
Matarrasa-Árboles padre	0.111	0.728	<b>0.009</b>	<b>0.003</b>	1.000	0.102	1.000	0.486
Selección-Referencia	1.000	0.828	1.000	1.000	1.000	0.558	1.000	0.639
Selección-Post-incendio	0.231	1.000	1.000	1.000	<b>0.050</b>	1.000	0.168	1.000
Selección-Árboles padre	0.120	1.000	0.101	0.680	0.314	0.639	<b>0.003</b>	1.000
Referencia-Árboles padre	0.250	1.000	0.131	1.000	0.486	<b>0.002</b>	<b>0.023</b>	0.639
Referencia-Post-incendio	0.131	<b>0.034</b>	1.000	0.450	0.086	0.072	0.730	0.422
Post-incendio-Árboles padre	1.000	1.000	1.000	0.110	1.000	1.000	1.000	1.000

Valores en negritas demuestran diferencias significativas con nivel de significancia de 0.05.

### 3.1. Nitrógeno total (%)

Los resultados de la profundidad de 0-20 cm mostraron que el nitrógeno total oscila entre 0.28 y 0.46%, siendo los rodales de Árboles padre y Selección el de mayor y menor porcentaje, respectivamente. Para el segundo intervalo de profundidad (20-40 cm) fluctuó entre 0.11 y 0.27 %, donde los rodales de Referencia y Matarrasa, representaron las áreas de menor y mayor contenido. Particularmente se puede observar una disminución del nitrógeno conforme aumenta la profundidad para todos los rodales silvícolas (Figura 7).

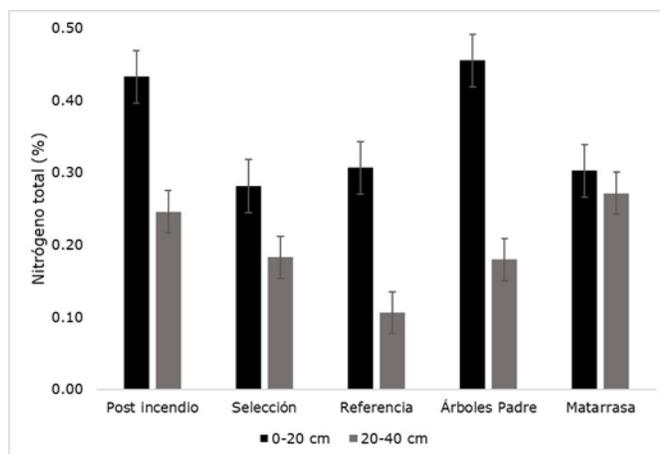


Figura 7. Valores medios de contenidos de nitrógeno total (%) de los rodales para ambas profundidades

### 3.2. Carbono (%)

Los resultados de contenido de carbono para la primera profundidad de suelo (0-20 cm) oscilaron entre 6.10 y 8.58 %, presentando el siguiente orden entre los rodales analizados: Árboles padre > Post-incendio > Selección > Referencia > Matarrasa. De 20-40 cm los resultados de carbono fluctuaron entre los valores de 2.64 y 5.72 %, donde Árboles padre y Matarrasa representaron las áreas con menor y mayor carbono (Figura 8). Al igual que el nitrógeno total, los valores de carbono manifiestan un decremento para la segunda profundidad en todos los rodales silvícolas.

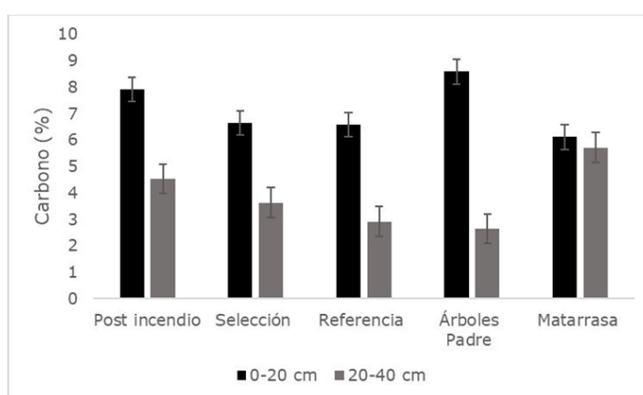


Figura 8. Valores medios de contenidos de carbono (%) de los rodales para ambas profundidades

### 3.3. Relación C/N

En general el promedio de la relación C/N del suelo en ambas profundidades fue de 20.4. Específicamente los tratamientos de Post-incendio y Árboles padre son

los rodales con la más baja relación C/N en ambas profundidades de 0-20 y 20-40 cm. Por otra parte, el área aprovechada con la corta de Selección y el rodal de Referencia presentaron una alta relación C/N respecto a los demás rodales analizados para la profundidad de 0-20, mientras que para la profundidad 20-40 cm fueron Referencia y Matarrasa (Tabla 14).

Tabla 14. Valores medios de la relación C/N para ambas profundidades de los rodales investigados

Rodal silvícola	Relación C/N	
	0-20 cm	20-40 cm
Post-incendio	18.36	18.58
Selección	24.73	19.86
Referencia	21.43	27.76
Árboles padre	18.88	14.72
Matarrasa	18.58	21.05
Promedio	20.40	20.40

### 3.4. Reserva de nitrógeno en el suelo

La reserva de nitrógeno en el suelo Umbrisol para cada uno de los rodales silvícolas se presenta en la Figura 9, es claro que la implementación de cortas como Matarrasa y Árboles padre, cuyas intensidades de corta fueron del 100 y 80 % respectivamente, así como la ocurrencia del incendio forestal tuvieron un efecto (incremento) sobre el contenido de nitrógeno para la profundidad 0-20 cm, en comparación con el rodal de Referencia (3.56), observándose incrementos en la reserva de N en Matarrasa, Árboles padre y Post-incendio del 35.65, 84.48 y 40.92 %, respectivamente. Por otra parte, Selección fue el rodal con la menor reserva de nitrógeno en los primeros 20 cm. Para la segunda profundidad las reservas de nitrógeno se redujeron en todos los rodales a excepción de Selección, el cual presentó un ligero aumento respecto a la primera profundidad, sin embargo, en general los cuatro rodales mostraron valores por encima del rodal de Referencia. Considerando la suma de ambas profundidades se obtuvo la reserva de nitrógeno expresado en Mg ha<sup>-1</sup> para todo el perfil de 0-40 cm, los rodales analizados presentaron el siguiente orden descendente: Árboles padre

(9.63) > Matarrasa (8.99) > Post-incendio (8.21) > Selección (5.95) > Referencia (5.03).  
(5.03).

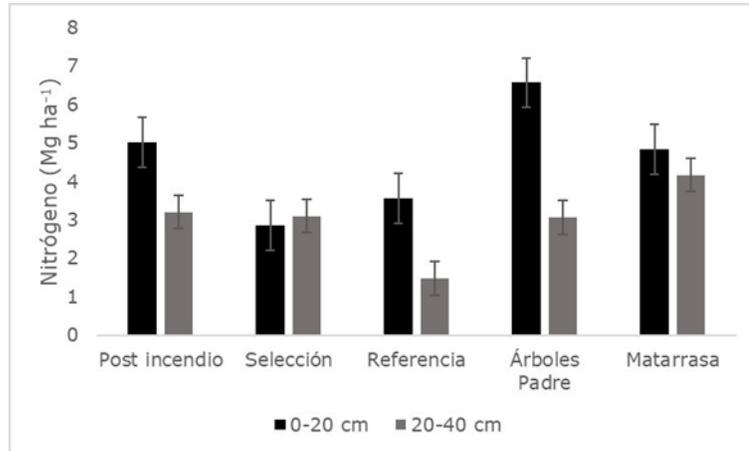


Figura 9. Valores medios de la reserva de nitrógeno de los rodales para ambas profundidades

#### 4. Discusión

De acuerdo a la valoración de la NOM-021-RECNAT-2000 (Semarnat, 2002) los resultados del nitrógeno total para el suelo tipo Umbrisol son considerados como muy bajos, atribuido principalmente a la naturaleza y calidad de la materia orgánica de los bosques de pino, siendo la lignina, resina y celulosa los principales componentes, cuyas características recalcitrantes afectan la dinámica de reciclaje del nitrógeno (Lusk et al., 2001; Pérez et al., 2013).

Particularmente las existencias de carbono y nitrógeno total presentaron variabilidad entre los rodales aprovechados con cortas de regeneración y área regenerada post-incendio con el rodal de Referencia para ambas profundidades, coincidiendo con Amundson et al. (2003), Thiffault et al. (2011), Achat et al. (2015) y Mushinski (2017), quienes señalan que a posteriori de las cortas de regeneración e incendio pueden presentarse y acelerarse diferentes transformaciones biogeoquímicas en el suelo, que pueden inferir en existencias alteradas de nitrógeno y carbono (ganancias o pérdidas). Según Steubing et al. (2002), las cortas de regeneración e incendio modifican la cobertura del suelo y estructura de la vegetación interviniendo sobre diversos factores abióticos como

la humedad del suelo, viento, radiación, intercepción y temperatura determinando finalmente los balances del C, N y C/N del suelo del presente estudio.

La ocurrencia del incendio forestal influyó significativamente sobre el contenido de nitrógeno total en los dos intervalos de profundidad, mostrando porcentajes por arriba de todos los rodales a excepción de la segunda profundidad de Matarrasa, dichos resultados concuerdan con lo establecido por Johnson y Curtis (2001), y de la Rosa et al. (2014), quienes mencionan que el incendio forestal puede aumentar la cantidad y tasa de degradación de la materia orgánica del suelo, asimismo señalan que el nitrógeno total puede resultar en ganancias posteriores debido a la incorporación de residuos no quemados incluyendo el carbón vegetal, materia orgánica hidrófoba y establecimiento de vegetación de rápido crecimiento post-incendio (herbáceas y arbustivas, principalmente).

Covington y Sackett (1992) y Certini (2005) señalan que, en la parte superficial del suelo, el amonio es la principal forma inorgánica de nitrógeno que se origina durante el incendio, después de meses o años se forma el nitrato a partir del amonio, disminuyendo entonces la disponibilidad de nitrógeno total para posteriores profundidades como consecuencia de la lixiviación, lo cual se observa en los resultados del área regenerada post-incendio del presente estudio.

Considerando el perfil de 0-40 cm nuestros resultados muestran que los impactos del manejo forestal e incendio forestal, provocaron un aumento sobre la reserva de nitrógeno del suelo respecto al rodal de Referencia, lo anterior puede estar definido por las diferentes interacciones de las condiciones edáficas con otros factores como el clima, vegetación y la influencia de los diferentes grados de intensidad de cortas (Thiffault et al., 2011), lo cual se observó particularmente en el presente estudio en las cortas de Árboles padre y Matarrasa. Por otra parte, para la segunda profundidad la reserva del nitrógeno disminuyó considerablemente, a excepción del rodal de Selección, esta misma tendencia ocurrió con los porcentajes de C para todos los rodales. Lo anterior coincide con Madrigal et al. (2019) quienes obtuvieron decrementos conforme aumenta la profundidad vinculándolo principalmente con la lixiviación de la materia orgánica.

De acuerdo con Porta et al. (2014) para indicar que la materia orgánica se encuentra en un estado dinámico, la relación C/N debe encontrarse entre un rango de 10 a 14. Particularmente los valores del presente estudio se encuentran en una proporción promedio de 20.4 para ambas profundidades, lo cual nos indica que la tasa de la mineralización es baja para el Umbrisol bajo manejo forestal.

# **CAPÍTULO V. EFECTOS DEL MANEJO FORESTAL EN LA EMISIÓN DE CO<sub>2</sub> DE UN SUELO UMBRISOL EN BOSQUES DE DURANGO, MÉXICO**

## **Resumen**

En los suelos forestales se llevan a cabo diferentes procesos biogeoquímicos, los cuales han sido modificados por acciones antropogénicas, por lo que las actividades ligadas al manejo forestal no son la excepción. Por lo cual se definió como objetivo determinar el efecto de tres cortas de regeneración (Árboles padres, Matarrasa y Selección) sobre la respiración del suelo en un Umbrisol, comparándolos con un área regenerada Post-incendio y un rodal de Referencia, en bosques templados de Durango, México. La respiración del suelo se determinó con mediciones realizadas en la tarde (12:30 a 15:00 hrs) empleando el sistema portátil EGM-4 (U.K.). Los resultados indican que las variables de temperatura y humedad del suelo se correlacionan con la respiración del suelo. Específicamente, todos los rodales presentaron tasas bajas de respiración del suelo, respecto al rodal de referencia. Los flujos de CO<sub>2</sub> fueron mayores al inicio de la temporada de lluvias. Los resultados demostraron que las prácticas silvícolas empleadas en la región de estudio, son una buena estrategia para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y así mitigar los efectos del cambio climático.

**Palabras clave:** suelo, manejo forestal, respiración del suelo, Umbrisol, cambio climático.

## **Abstract**

Different biogeochemical processes are carried out in forest soils, which have been modified by anthropogenic actions, so that activities related to forest management are not the exception. Therefore, the objective was to determine the effect of three regeneration cuts (seed trees, clear cutting and selection) on the soil respiration in an Umbrisol, comparing them with a post-fire regenerated area and a reference stand in temperate forests of Durango, Mexico. Soil respiration was determined with measurements made in the afternoon (12:30 to 15:00 hrs) using the portable EGM-4 system (U.K.). The results indicate that the variables of soil temperature and humidity are correlated with soil respiration. Specifically, all the stands presented low rates of soil respiration with respect to the reference stand. CO<sub>2</sub> fluxes were higher at the beginning of the rainy season. The results showed that the silvicultural practices used in the study region are a good strategy to reduce CO<sub>2</sub> emissions into the atmosphere and thus mitigate the effects of climate change.

**Keywords:** soil, forest management, soil respiration, Umbrisol, climate change.

## 1. Introducción

Se denomina respiración del suelo al flujo de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) emitido principalmente por los procesos metabólicos autótrofos y heterótrofos desarrollados en el interior del suelo (Vargas et al., 2010a). Esta variable ecopedológica es considerada un indicador de la actividad microbiana, dicha variable permite cuantificar el CO<sub>2</sub> emitido desde los suelos forestales hacia la atmósfera, siendo su evaluación de importancia para definir criterios de manejo del recurso suelo y vegetación respecto a problemáticas del calentamiento global (Vargas, et al., 2010b; Millan et al., 2018).

La respiración del suelo es considerada como la segunda mayor fuente de intercambio de CO<sub>2</sub> terrestre a la atmósfera, solo después de la fotosíntesis (Cueva et al., 2012). Particularmente los ecosistemas forestales desempeñan un papel clave en ciclo del carbono global, puesto que son considerados como el principal reservorio con  $681 \pm 66$  Pg de carbono, de esa cantidad alrededor del 44% se encuentra contenido por el suelo ( $383 \pm 28$  Pg C) (Pan et al., 2011). Por lo anterior, se resalta el papel de los ecosistemas forestales para la mitigación del cambio climático, por lo que la evaluación del manejo forestal sobre los sumideros de carbono amplifica su importancia (Sullivan et al, 2008).

De manera adicional, señalar que a nivel mundial los primeros antecedentes en la literatura relacionados sobre respiración del suelo datan de inicios del siglo XX principalmente en regiones europeas y norte americanas (Bond-Lamberty y Thomson, 2010), en cuanto a México a pesar de su marcada diversidad de ecosistemas se han realizado evaluaciones en regiones desérticas, boscosas y tropicales mayoritariamente a partir del siglo XXI (Cueva et al., 2012).

De acuerdo a Sahagún y Reyes (2018) existe una marcada ejecución de prácticas ligadas a la agricultura, ganadería y silvicultura que pueden influir en calidad del suelo negativamente, lo cual provoca una reacción inmediata sobre procesos de cambio climático a nivel local y/o regional. Característicamente, el manejo forestal implica la ejecución de diferentes prácticas silvícolas de variada intensidad mecanización y sistema de aprovechamiento (Monárrez et al., 2018), las cuales alteran y modifican las propiedades del suelo como la temperatura y

humedad del suelo, que son alguno de los factores que pueden influir en las tasas de respiración del suelo (Lull et al., 2020). Específicamente en la región el manejo forestal contempla dos cortas de regeneración para la cosecha de las masas forestales, las cuales son cortas de selección (individual o grupal) y árboles padre correspondientes al Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI) y Método de Desarrollo Silvícola (MDS), respectivamente (López-Hernández et al., 2017). Sin embargo, durante la última década se han implementado cortas de regeneración de corta total o matarrasa, aunque en menor extensión de terreno por la orografía de la región.

Con base a lo anterior el objetivo del presente estudio fue determinar el efecto de tres cortas de regeneración (Árboles padres, Matarrasa o corta total, y Selección) sobre el flujo CO<sub>2</sub> emitido por la respiración de un suelo tipo Umbrisol, comparándolos con un área regenerada Post-incendio y un rodal sin intervención denominado de Referencia, en bosques templados fríos de Durango, México.

## **2. Materiales y Métodos**

### **2.1. Descripción del área de estudio**

El estudio se llevó a cabo en el ejido de La Ciudad (2583 msnm), en la Sierra Madre Occidental, en el municipio de Pueblo Nuevo, Durango. El clima característico es semifrío subhúmedo con lluvias en verano con una temperatura media anual que oscila de 5 °C a 12 °C, la precipitación media anual es de 1200 mm, siendo el intervalo de julio a septiembre como el período más húmedo (García, 1973). El tipo de suelo dominante es el Umbrisol según el sistema de clasificación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2005) (Figura 10). La vegetación típica de la región corresponde a un bosque mixto, compuesto principalmente por *Pinus* y *Quercus* (González-Elizondo et al., 2012).

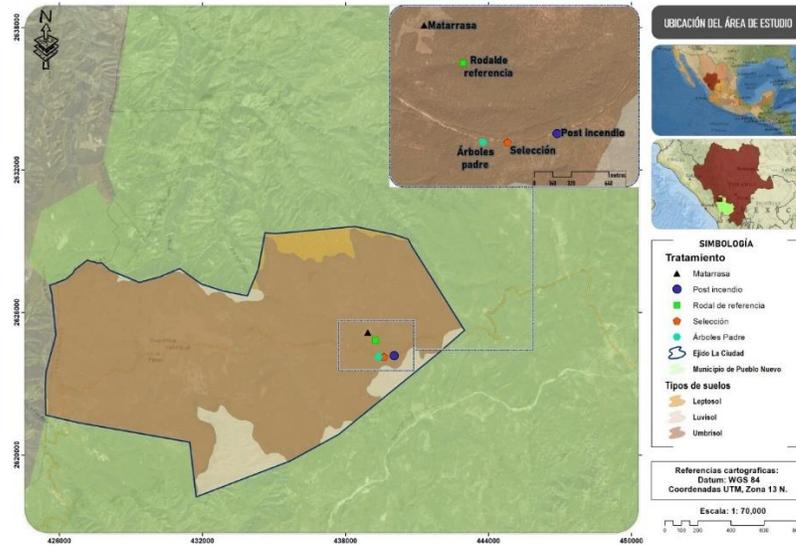


Figura 10. Localización del área de estudio

## 2.2. Rodales evaluados

Particularmente la evaluación se llevó a cabo en cinco rodales silvícolas con diferentes condiciones de manejo y perturbación, los cuales se describen a continuación: a) Matarrasa (intensidad de corta: 100%): consistió en la extracción total de la masa forestal en un área de 10.29 hectáreas (ha); b) Árboles padre (intensidad de corta: 80%): aplicada en un área de 9 ha con un volumen inicial y posterior de 206.8 y 41.3 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>; c) Selección (intensidad de corta: 34%); superficie aplicada de 20 ha, con un volumen inicial y posterior de 223.8 y 147.4 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>; 4) Área regenerada post-incendio de 10 ha; y 5): Rodal de Referencia o testigo de 4.35 ha con una masa arbórea próxima a aplicarse corta de regeneración. Algunas características de los rodales se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15. Valores promedio de las características de la vegetación y del suelo de los diferentes rodales silvícolas.

Características	Vegetación					Suelo		
	Rodal	Densidad Individuos ha <sup>-1</sup>	DN (>7 cm)	Altura (m)	DC (m)	DA (g cm <sup>3</sup> )	Ho (Mg ha <sup>-1</sup> )	Humus (Mg ha <sup>-1</sup> )
Matarrasa		160	7.72	3.21	1.92	0.51	0.34	0.69
Árboles padre		80	38.16	18.2	7.34	0.72	0.92	2.34
Selección		250	26.88	15.4	5.26	0.80	2.14	2.42
Post-incendio		6400	8.13	7.42	1.33	0.58	0.95	2.46

Referencia	660	21.25	16.23	5.3	0.58	1.60	2.28
------------	-----	-------	-------	-----	------	------	------

DN= Diámetro normal, DC= Diámetro de copa, DA= Densidad aparente, Ho= hojarasca.

### 2.3. Metodología

La respiración del suelo se determinó en cada uno de los rodales durante el periodo del 21 de diciembre de 2020 al 10 de octubre de 2021 con mediciones en la tarde (12:30 a 15:00 hrs) semanalmente, considerando este horario como el de mayor actividad de flujo de CO<sub>2</sub> (Yáñez et al., 2017). Para la medición de la respiración del suelo se utilizó el sistema portátil EGM-4 (PP-Systems, U.K.) según la metodología descrita por Cantú et al. (2010). Las lecturas se determinaron para cada rodal silvícola, con cuatro repeticiones distribuidas aleatoriamente en el área de muestreo con una distancia mínima entre ellas de 10 m, para dar un total de 20 mediciones por fecha de muestreo.

El flujo de CO<sub>2</sub> se estimó en micromoles de dióxido de carbono por metro cuadrado por segundo ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Simultáneamente con las mediciones de respiración del suelo, se midió la temperatura del suelo usando un sensor (STP-1) conectado a la sonda EGM-4 y asimismo se extrajeron muestras de suelo para determinar el contenido de humedad gravimétrica (Woerner, 1989).

### 2.4. Análisis estadísticos

Para verificar la normalidad de los datos se aplicó la prueba de Kolmogórov-Smirnov y se realizaron todas las transformaciones disponibles. Sin embargo, todos los datos de temperatura, humedad y respiración del suelo no presentaron una distribución normal. Se usó la prueba de Kruskal-Wallis para comprobar la diferencia en la temperatura, humedad y respiración promedio del suelo entre los diferentes rodales silvícolas, así como entre fechas de muestreos realizados.

Se utilizó un análisis de correlación de Spearman para verificar la relación entre la respiración del suelo, la temperatura y la humedad del suelo. Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el paquete estadístico Statistical Package for the Social Sciences, versión 22 (International Business Machines [IBM], 2013).

### 3. Resultados

#### 3.1. Respiración del suelo

En el periodo diciembre 2020 a octubre de 2021 se registraron 28 muestreos de respiración del suelo (Figura 11). De manera general la prueba de Kruskal-Wallis mostró que solo las variables de temperatura y respiración del suelo presentaron diferencias significativas entre los rodales silvícolas ( $p \leq 0.05$ ). La tasa de respiración del suelo osciló entre  $0 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (21 de diciembre de 2019, rodal de Matarrasa) y  $36.45 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (27 de julio, rodal Árboles padre).

En la Figura 11 se aprecia como la respiración del suelo se mantuvo baja durante la mayor parte del tiempo evaluado ( $0-10 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  de diciembre de 2019 a mayo de 2020), mostrando incrementos durante el periodo de julio a agosto coincidiendo con la temporada de lluvias de la región, durante los últimos muestreos (sep.-oct.) la tendencia de la respiración fue a la baja en todos los rodales silvícolas. De acuerdo con la prueba de Kruskal-Wallis, se presentaron diferencias en 13 de los 28 muestreos durante el periodo evaluado entre los rodales silvícolas.

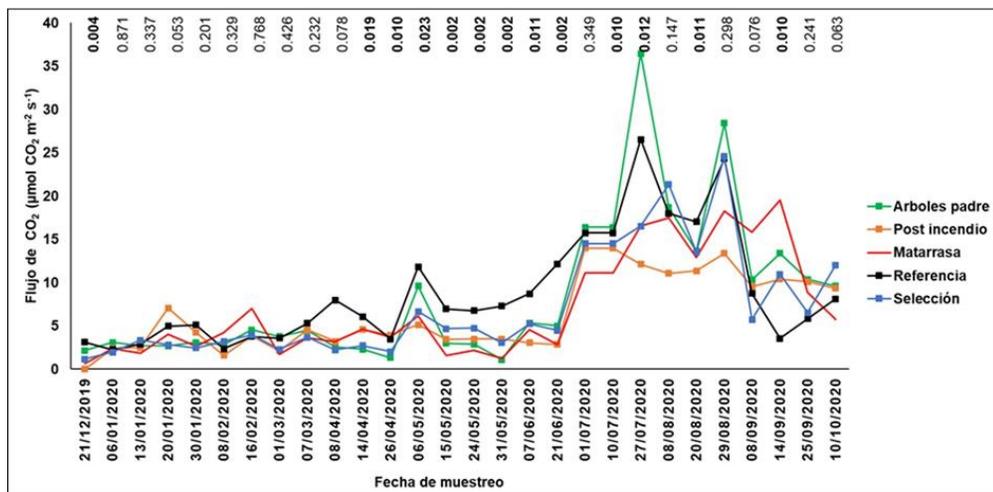


Figura 11. Variación estacional de la respiración del suelo para los distintos rodales silvícolas. El valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas ( $\leq 0.05$ ), se señala para cada fecha de muestreo en negrillas.

#### 3.2. Temperatura del suelo

El comportamiento de la temperatura del suelo siguió una misma tendencia en los distintos rodales evaluados en el área de estudio, con registros bajos durante

el muestreo de invierno, aumentos paulatinos durante primavera y estabilidad durante los muestreos correspondientes al verano y parte de otoño. La temperatura más baja registrada ocurrió en la fecha correspondiente al 21 de diciembre de 2019, variando de 3 a 6 °C y las temperaturas del suelo más altas observadas (18.5 a 34 °C) fueron durante el mes de mayo de 2020. En promedio la temperatura del suelo más baja y alta se presentaron en el área regenerada Post-incendio y Matarrasa con 16.7 y 21.4 °C, respectivamente. Los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis muestran que la temperatura del suelo presentó diferencias en 25 de los 28 muestreos realizados (Figura 12).

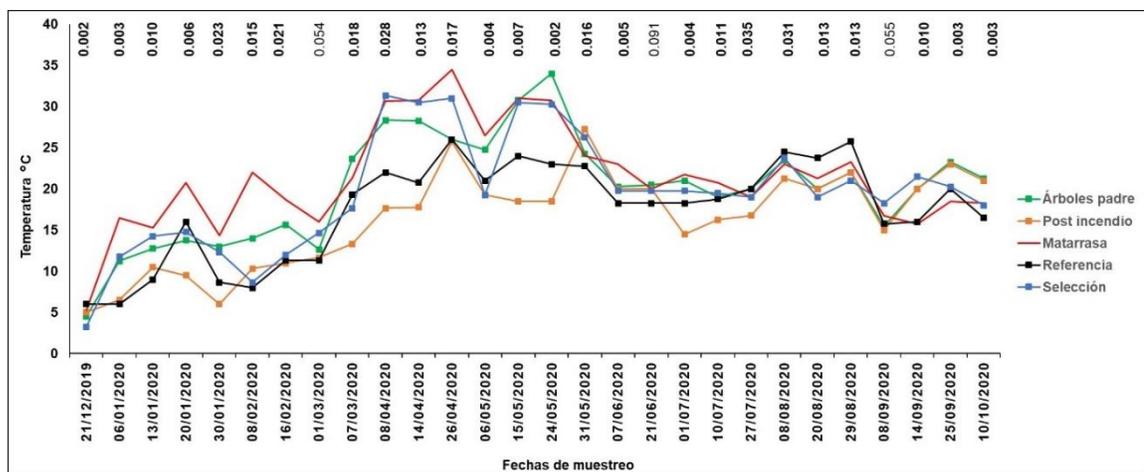


Figura 12. Variación de la temperatura del suelo para los distintos rodales silvícolas. El valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas ( $\leq 0.05$ ), se señala para cada fecha de muestreo en negrillas.

### 3.3. Humedad del suelo

Durante el periodo evaluado la humedad del suelo se comportó de manera más variable, fluctuando de manera general entre el 9 y 90 %. Los registros de mayor humedad se produjeron en verano, el cual corresponde a la temporada de lluvias en la región, en el intervalo de muestreos 7-16 la humedad del suelo presentó una notoria disminución para todos los rodales silvícolas. En promedio la humedad del suelo fue más baja en el rodal de Matarrasa (39.6 %) y más alta en el área de Árboles padre (46.5 %). La prueba de Kruskal-Wallis indicó que solo 8 muestreos presentaron diferencias significativas entre los rodales (Figura 13).

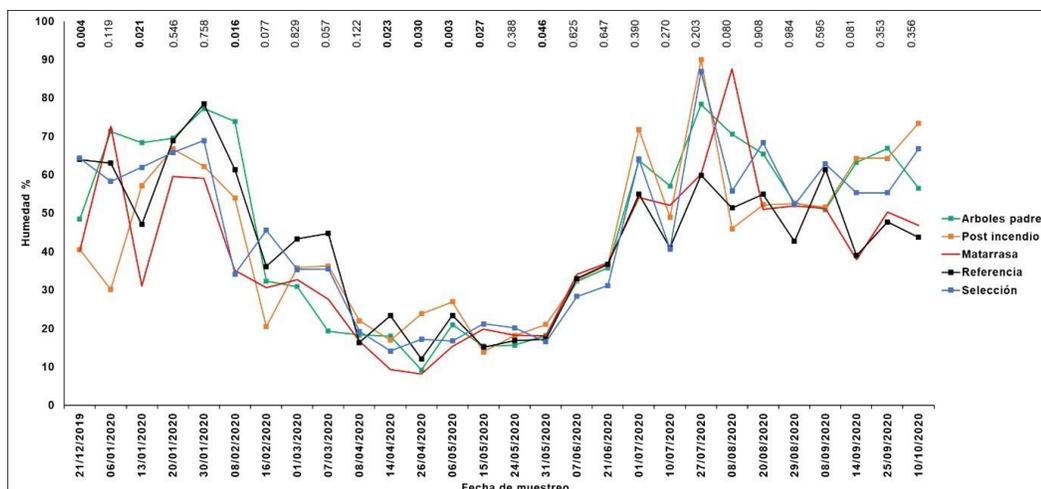


Figura 13. Variación de la humedad del suelo para los distintos rodales. El valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas ( $\leq 0.05$ ), se señala para cada fecha de muestreo en negrillas.

### 3.4. Correlación de Spearman

De acuerdo al análisis de correlación de Spearman, la respiración del suelo se correlacionó positivamente con temperatura y humedad del suelo, es importante señalar que los máximos flujos de respiración del suelo coincidieron con los valores más altos de humedad del suelo para los meses de julio-agosto (Tabla 16).

Tabla 16. Coeficientes de correlación de Spearman para las variables respiración, temperatura y humedad del suelo.

	Humedad	Temperatura	Respiración
Humedad	1.000	--	--
Temperatura	-.423**	1.000	--
Respiración	.279**	.202**	1.000

\*\* Correlación altamente significativa con un nivel de 0.01.

## 4. Discusión

En general las tasas de flujo de CO<sub>2</sub> observadas en la respiración del Umbrisol son consideradas como bajas, pudiendo atribuirse a la composición y calidad de la materia orgánica y residuos leñosos, altitud sobre el nivel del mar, cambios en

la densidad del rodal y principalmente a la temperatura y humedad del suelo (Carvalho, *et al.*, 2016; Sun *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2018).

De acuerdo a los resultados se observó una reducción de la tasa de respiración durante los meses de diciembre a mayo, atribuido por las bajas temperaturas presentadas durante los primeros meses de muestreo (diciembre-febrero) así como por los bajos contenidos de humedad durante los meses de marzo a mayo donde se presentaron las mayores temperaturas del suelo y del ambiente, concordando esto con otros estudios, que señalan que las actividades biológicas en el interior del recurso suelo se ven reducidas por bajos contenidos de humedad y/o cambios drásticos en la temperatura ambiente (Tucker *et al.*, 2019).

Por otra parte, se detectó un aumento significativo de la respiración a partir del inicio de la temporada de lluvias (junio-septiembre) en todos los rodales silvícolas evaluados, dicho comportamiento ha sido reportado por Maraños *et al.* (2009), Millan *et al.* (2018) y Lopera (2019), quienes relacionan los incrementos de los flujos de CO<sub>2</sub> con el aumento de la humedad del suelo, debido a sus efectos directos en la reactivación de los procesos metabólicos de las raíces de la vegetación y microorganismos del suelo. Además, procesos físicos como la desgasificación (efecto de la humedad del suelo que provoca la liberación de gases guardados en los poros del suelo) puede ser una fuente extra de emisión de CO<sub>2</sub> al iniciar la temporada de lluvias (Liu *et al.*, 2002; Cueva *et al.*, 2012).

En este estudio se demostró que el rodal de Matarrasa representó el área con mayor registro de temperatura promedio del suelo, posiblemente debido a la cobertura del dosel, ya que la apertura o pérdida total del dosel permitió que el suelo de la superficie recibiera mayor radiación solar en comparación con los demás rodales evaluados (Ryu *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2011). Por otra parte, los rodales no presentaron cambios significativos en la variable humedad del suelo, Simonin *et al.* (2007) y Cheng *et al.* (2015) señalan que modificaciones parciales en la densidad del rodal, aumenta la temperatura y velocidad del viento lo cual en combinación puede estimular la evaporación y mantener equilibrada la humedad del suelo.

Específicamente, todos los rodales presentaron valores bajos en la tasa de respiración promedio del suelo, respecto al rodal de referencia, dicha tendencia ha sido reportada en otros estudios sobre respiración del suelo en zonas templadas y boreales, por ejemplo, Zhang *et al.* (2018) señalan que la respiración del suelo es mayor durante los primeros dos años de recuperación de las actividades forestales, pero no en etapas posteriores, debido principalmente a cambios en el piso forestal (contenidos de materia orgánica) que provocan una activación significativa de los organismos heterótrofos, y particularmente los rodales del presente estudio cuentan con una edad promedio de ocho años de ser sometidos al aprovechamiento y, en su caso, siniestrados por el incendio, tiempo en el cual pudo haberse estabilizado la respiración del suelo.

Particularmente, los flujos de CO<sub>2</sub> promedios más bajos se encontraron en el área regenerada post-incendio, donde las tasas de respiración además de verse afectada por las condiciones climáticas, humedad y temperatura del suelo, otros factores pudieron influir significativamente como la etapa de crecimiento dinámica que experimenta el rodal así como a su alta densidad, donde existe una acelerada caída y acumulación de hojarasca en el piso forestal, lo cual provoca cambios en los procesos de los microorganismos del suelo y las raíces de las plantas principalmente por la competencia del suministro de nutrientes (Wan *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2015).

La prueba de correlación demostró que las variables de temperatura y humedad del suelo influyeron en la respiración del suelo, lo cual ha sido reportado por varios estudios en diferentes ecosistemas forestales (Cantú *et al.*, 2010; Mande *et al.*, 2014; Yáñez *et al.*, 2017), particularmente, los resultados observados en el presente estudio mostraron descensos en los flujos de CO<sub>2</sub> a temperaturas bajas, mientras que la respuesta de respiración respecto a los contenidos de humedad del suelo fue variable relacionado principalmente por la temporalidad de realización del muestreo.

# CAPÍTULO VI. EFECTOS DEL MANEJO FORESTAL EN LA COMPOSICIÓN Y DIVERSIDAD DE LA REGENERACIÓN NATURAL ARBÓREA EN BOSQUES DE LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL

## Resumen

Con el objetivo de evaluar la composición y diversidad de especies de la regeneración natural en bosques templados de la Sierra Madre Occidental, se establecieron ocho sitios de estudio (4 m<sup>2</sup>) al azar dentro de rodales intervenidos con los métodos de Árboles padre, Selección en grupo y comparados con un rodal testigo (Referencia), en total, se registraron 24 sitios de muestreo, donde las variables registradas fueron altura (m), diámetro de cuello (cm) y área de copa (m<sup>2</sup>). Se determinó el índice de valor de importancia (IVI), así como la diversidad y riqueza de especies utilizando los índices de Shannon-Wiener (H') y Margalef (DMg), respectivamente. La similitud se obtuvo con el índice Sorensen. En total se registraron 5 especies de regeneración natural, pertenecientes a 3 géneros y 3 familias, donde el género *Pinus* se vio mayormente representado por tres especies. En los rodales de Referencia y Selección en grupos la especie con mayor abundancia fue *Pinus durangensis* (10,000 y 20,000 Ind/ha, respectivamente), mientras que *Quercus sideroxylla* lo fue para el área de Árboles padre (21,250 Ind/ha). El índice de Shannon (H') y Margalef (DMg) consideran a la regeneración como de baja diversidad, mientras que los resultados del análisis de similitud indicaron que los rodales de Referencia y Selección tienen 75% en común, mientras que el área de Árboles Padre mostró una similitud ligeramente inferior (64%). El presente estudio permitirá establecer referencias para el manejo forestal a partir de los parámetros ecológicos determinados.

**Palabras clave:** Composición, diversidad, regeneración natural, Shannon, Margalef

## **Abstract**

With the objective of evaluating the composition and diversity of species of natural regeneration in temperate forests of the Sierra Madre Occidental, eight study sites (4 m<sup>2</sup>) were established at random within stands intervened with the methods of Seed Trees, Group selection and compared to a stand control (Reference), in total, 24 sampling sites were recorded, where the variables recorded height (m), neck diameter (cm) and crown area (m<sup>2</sup>). The importance value index (IVI) was determined, as well as the diversity and species richness using the Shannon-Wiener (H') and Margalef (D<sub>Mg</sub>) indices, respectively. Similarity was obtained with the Sorensen index. In total, 5 species of natural regeneration were registered, belonging to 3 genera and 3 families, where the *Pinus* genus was mostly considered by three species. In the Reference and Selection stands in groups the species with the highest fuel abundance *Pinus durangensis* (10,000 and 20,000 Ind / ha, respectively), while *Quercus sideroxylla* was for the area of seed Trees (21,250 Ind / ha). The Shannon (H') and Margalef (D<sub>Mg</sub>) index considers regeneration to be of low diversity, while the results of the similarity analysis indicate that the Reference and Selection stands have 75% in common, while the area of seed Trees showed slightly lower similarity (64%). The present study establishes to establish references for forest management based on the specified ecological parameters.

**Keywords:** Composition, diversity, natural regeneration, Shannon, Margalef

## 1. Introducción

A lo largo de la administración de un bosque se ejecutan una serie de prácticas silvícolas: cortas de regeneración, cortas intermedias y cortas de saneamiento (Monárrez et al., 2018), determinando la composición y abundancia de todos los estratos vegetales e involucrando siempre aspectos sociales, económicos y ecológicos (Aguirre-Calderón, 2015). El bosque templado se extiende en una superficie de 4.5 millones de hectáreas en el estado de Durango, equivalentes al 13.2 % de la superficie continental de México, este ecosistema forestal es considerado de gran importancia para el ser humano, ya que proporcionan múltiples beneficios ecológicos y socio-económicos (López-Hernández et al., 2017). Además de que en términos de diversidad vegetal contribuyen con alrededor de 10 000 especies, prácticamente una tercera parte de la flora nacional (Rzedowski, 1991).

En la región, el manejo forestal se hace bajo dos métodos de ordenación; a) Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI) donde el aprovechamiento se da mediante el tratamiento único de cortas de selección, en el cual se extraen árboles maduros, que proporcionan la mayoría de los productos comerciales, con el fin de mitigar competencia y propiciar condiciones de establecimiento de la regeneración y el desarrollo de los árboles más jóvenes con posibilidades de llegar a una corta final (López-Hernández et al., 2017) y b) Método de Desarrollo Silvícola (M.D.S.) el cual considera la aplicación de varias cortas de aclareo en la etapa de crecimiento rápido del bosque, y al final del turno se aplica una corta intensiva llamada corta de regeneración (dejando en pie solamente Árboles padre), para promover que se establezca la regeneración natural, misma que es liberada en el siguiente ciclo de corta (Hernández-Díaz et al., 2008), en general ambos casos modifican la composición de especies, el crecimiento y el desarrollo de un bosque (Ares et al., 2010). De importancia es recalcar que al ejecutarse las practicas silvícolas se modifica la luminiscencia, características físicas de suelo, microclima etc., afectando la densidad de la regeneración y favoreciendo el establecimiento de especies intolerantes a la sombra (Leyva-López et al., 2010; Smith et al., 1997), estudios como el de

Hernández et al. (2019), señalan que el método de árboles padre garantiza la continuidad de la diversidad de especies arbóreas, sin embargo existen lagunas de información sobre la respuesta de del establecimiento de especies diferentes a las cortas de regeneración. En tal contexto, el manejo forestal podría ocasionar modificaciones en la población efectiva que da origen a la regeneración (Barik et al., 1996). Por lo anterior, radica la importancia de evaluar los efectos sobre las características ecológicas (estructura, composición y diversidad de las especies) post-disturbios, mediante indicadores de diversidad, que permitan definir si existe un manejo forestal sustentable (Aguirre-Calderón et al., 2008).

Los objetivos de esta investigación fueron analizar el efecto del aprovechamiento forestal sobre la diversidad y composición de la regeneración natural arbórea a partir de la estimación de los índices de diversidad alfa y beta (Shannon y Margalef, respectivamente), los indicadores de abundancia, frecuencia, e índice de valor de importancia ecológica, y evaluación de la diversidad  $\beta$  mediante coeficiente de similitud de Sorensen para datos cuantitativos.

## **2. Materiales y Métodos**

### **2.1. Descripción del área de estudio**

La investigación se realizó en una zona ubicada en los bosques del ejido “La Ciudad” en el municipio de Pueblo Nuevo, Durango (noroeste de México) (Figura 14), entre las coordenadas: longitud: -105.690556 y latitud: 23.732222, situada en el macizo montañoso denominado Sierra Madre Occidental. Presenta promedios anuales de temperatura y precipitación de 18 °C y 1200 mm, respectivamente, el suelo dominante en la zona pertenece al tipo Umbrisol (Zúñiga et al., 2018). La vegetación está compuesta principalmente por *Pinus durangensis* Ehren, *Pinus cooperi* C. E. Blanco, *Pinus ayacahuite* Ehren, *Juniperus deppeana* Steud y *Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl. (González-Elizondo et al., 2012).

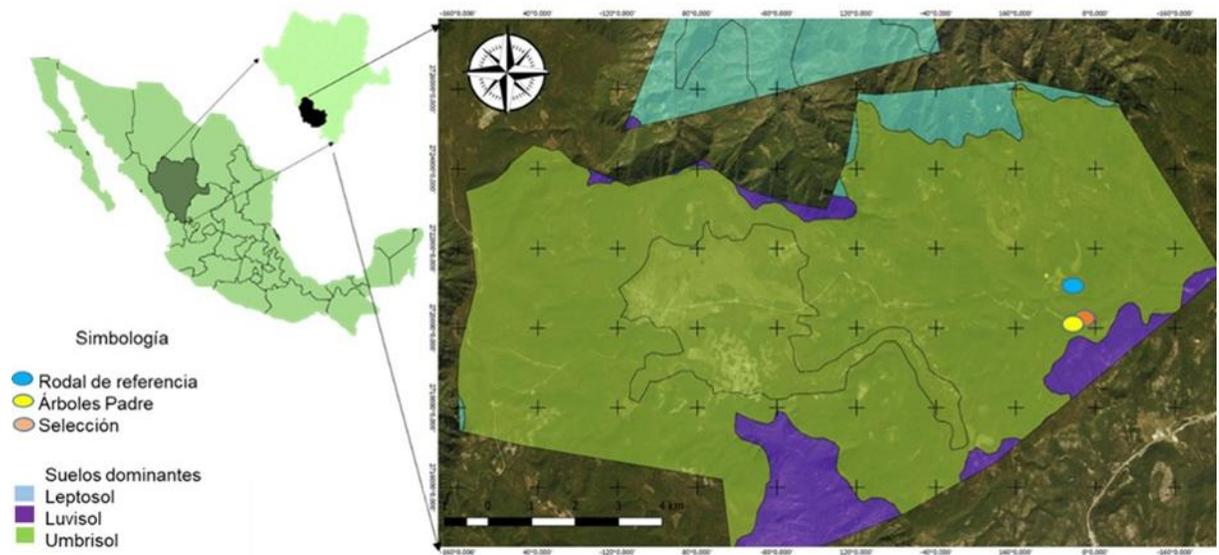


Figura 14. Localización del área de estudio

La evaluación se realizó en tres rodales silvícolas situados sobre la extensión del Umbrisol, dos de ellos sometidos a cortas de regeneración entre 2014 y 2016 ;

- 1) Árboles padre (AP): cuenta con un área de 9 ha y se aplicó una intensidad de corta del 80% cuando tenía  $206.8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , dejando una densidad residual de  $77 \text{ Ind ha}^{-1}$  y un volumen de  $41.3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , cabe señalar que se ha intervenido con el método de árboles padre para *Pinus durangensis* principalmente, por ser la especie de mayor distribución e interés económico de la región,
- 2) Selección en grupos (S): cuenta con 20 ha y fue establecido con un volumen inicial de  $223.8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , aprovechándose el equivalente al 34% del volumen total. Ambas áreas fueron comparadas con un rodal de Referencia o testigo (R), considerado así por ser la masa arbórea más próxima a aplicarse corta de regeneración, cuya superficie es de 4.35 ha y un volumen real de  $231 \text{ m}^3 \text{ ha}$ . En la Tabla 17 se muestran las características de la estructura arbórea después de ser aplicada la corta de regeneración y del rodal de Referencia (testigo), cabe señalar que se carece de información estructural anterior a las cortas.

Tabla 17. Valores promedio de las características arbóreas post cortas de regeneración y del rodal de Referencia.

Rodal	Densidad Ind/ha	DN	Altura m	DC m <sup>2</sup>	Cobertura m <sup>2</sup> /ha
Árboles padre	80	38.16	18.20	7.34	3,385
Selección	250	26.88	15.40	5.26	5,433
Rodal de Referencia	660	21.25	16.23	5.30	14,561

DN= Diámetro normal, DC= Diámetro de copa

## 2.2. Muestreo

En cada rodal se distribuyeron aleatoriamente ocho sitios de forma cuadrangular de 2 x 2 m (4 m<sup>2</sup>), en total, se levantaron 24 sitios de muestreo cubriendo los tres rodales, censando todos los individuos de regeneración natural arbórea, midiendo los diámetros de copa con orientación norte-sur y este-oeste, diámetro de cuello y altura (Caballero, 2012). Cabe señalar que otros autores han empleado muestreos similares, como Castelán-Lorenzo y Arteaga-Martínez (2009) quienes emplearon seis sitios de forma cuadrangular al azar de 5 X 5 m, equivalente a una intensidad de muestreo del 2.5 %.

## 2.3. Análisis de la información

A partir de los datos de los sitios de muestreo, se obtuvo información esencial para calcular por cada especie su abundancia, de acuerdo con el número de individuos; dominancia, en relación con el área de copa y frecuencia en función a la presencia en los sitios de muestreo, y con ello determinar el Índice de Valor de Importancia (IVI). Las fórmulas para estos cálculos se describen a continuación:

### **Abundancia:**

$$A_i = N_i/E$$

$$AR_i = \left[ A_i / \sum_{i=1...n} A_i \right] \times 100$$

Dónde:  $A_i$  es la abundancia absoluta,  $AR_i$  es la abundancia relativa de la especie  $i$  respecto a la abundancia total,  $N_i$  es el número de individuos de la especie  $i$ , y  $E$  la superficie de muestreo (ha).

Cobertura:

$$D_i = Ab_i / E(ha)$$

$$DR_i = \left[ D_i / \sum_{i=1..n} D_i \right] \times 100$$

Dónde:  $D_i$  es la cobertura absoluta,  $DR_i$  es cobertura relativa de la especie  $i$  respecto a la cobertura,  $Ab$  el área de copa de la especie  $i$  y  $E$  la superficie (ha).

Frecuencia:

$$F_i = P_i / NS$$

$$FR_i = \left[ F_i / \sum_{i=1..n} F_i \right] \times 100$$

Dónde:  $F_i$  es la frecuencia absoluta,  $FR_i$  es la frecuencia relativa de la especie  $i$  respecto a la suma de las frecuencias,  $P_i$  es el número de sitios en el que está presente la especie  $i$  y  $NS$  el número total de sitios de muestreo.

El índice de valor de importancia (IVI) se calculó de acuerdo a Whittaker (1972) y Moreno (2001), considerando valores relativos que van del 0 al 100 (Mostacedo y Fredericksen, 2000):

$$IVI = \frac{AR_i + DR_i + FR_i}{3}$$

#### 2.4. Análisis de diversidad

Para la evaluación de la diversidad de la regeneración del bosque se aplicaron los índices de Shannon [ $H'$ ] (Shannon y Warren, 1964) y Margalef [ $D_{Mg}$ ] (Margalef, 1958) que estiman la diversidad alfa y riqueza de especies, respectivamente, a partir de las siguientes ecuaciones:

$$D_{Mg} = \frac{(S - 1)}{\ln(N)}$$

$$H' = - \sum_{i=1}^s p_i \times \ln(p_i)$$

$$p_i = \frac{n_i}{N}$$

Dónde:  $S$  es el número de especies presentes,  $N$  es el número total de individuos y  $n_i$  es el número de individuos de la especie  $i$ .

Para determinar la similitud en la composición de especies de la regeneración natural arbórea, entre rodales se empleó el índice de Sorensen, el cual se considera como una medida de la diferencia entre las abundancias de cada especie presente (Moreno, 2001). Este índice estima entre 0 y 1, donde 1 significa que los dos sitios tienen la misma composición (es decir que comparten todas las especies), y 0 significa que los dos sitios no comparten ninguna especie.

### 2.5. Análisis estadísticos

Las variables índices de Shannon, Margalef, así como la sumatoria de la Abundancia y Cobertura indicaron normalidad y homogeneidad de varianzas, por lo que se procedió a realizar un análisis de varianza de un factor y prueba post hoc (prueba de Tukey) para identificar los grupos con medias distintas ( $p \leq 0.05$ ).

### 3. Resultados

En total se registraron 5 especies de regeneración natural, pertenecientes a 3 géneros y 3 familias. Pinaceae fue la familia más representada con tres especies, y el género *Pinus* el que tuvo un mayor número de especies (3) (Tabla 18).

Tabla 18. Lista de las especies encontradas en los rodales de Referencia, Árboles padre y Selección.

Familia	Nombre científico	Nombre común
Pinaceae	<i>Pinus durangensis</i>	Pino blanco
Pinaceae	<i>Pinus cooperi</i>	Pino real
Pinaceae	<i>Pinus ayacahuite</i>	Pino cahuite

Fagaceae	<i>Quercus sideroxyla</i>	Encino colorado
Cupressaceae	<i>Juniperus deppeana</i>	Táscate

En las áreas de Referencia y Selección la especie con mayor abundancia fue *Pinus durangensis* (10,000 y 20,000 Ind/ha, respectivamente), mientras que *Quercus sideroxyla* lo fue para el área de Árboles padre (21,250 Ind/ha). Sin embargo, *Pinus durangensis* fue la especie con mayor cobertura entre todas las especies de manera general, el Índice de Valor de Importancia ecológico presentó el siguiente orden por taxón para el rodal de Referencia *Pinus durangensis* > *Quercus sideroxyla* > *Juniperus deppeana* > *Pinus cooperi*. Los valores de IVI para los sitios aprovechados por cortas de Árboles Padre y Selección presentaron los siguientes patrones *Pinus durangensis* > *Quercus sideroxyla* > *Pinus ayacahuite* > *Juniperus deppeana* y *Pinus durangensis* > *Quercus sideroxyla* > *Juniperus deppeana* > *Pinus ayacahuite*, respectivamente (Tabla 19).

Tabla 19. Abundancia, Cobertura y Frecuencia de Índice de Valor de importancia de las especies registradas.

Rodal	Parámetro ecológico	Especies				
		<i>Pinus durangensis</i>	<i>Pinus cooperi</i>	<i>Pinus ayacahuite</i>	<i>Quercus sideroxyla</i>	<i>Juniperus deppeana</i>
	A (Ind./ha)	10,000	1,250	*	6,250	2,500
<u>Rodal de Referencia</u>	C (m <sup>2</sup> /ha)	2,087.50	262.50	*	1,246.88	1,106.25
	F (%)	27.27	9.09	*	36.36	27.27
	IVI	40.55	6.97	*	31.38	21.10
<u>Árboles padre</u>	A (Ind./ha)	18,750	*	1,875	21,250	1,250
	C (m <sup>2</sup> /ha)	869.46	*	48.47	751.04	83.45
	F (%)	44.44	*	22.22	22.22	11.11
	IVI	45.85	*	9.78	38.12	6.26
<u>Selección</u>	A (Ind./ha)	20,000	*	625	5,625	2,500
	C (m <sup>2</sup> /ha)	3,577.50	*	62.50	654.06	875

F (%)	36.36	*	9.09	27.27	27.27
IVI	58.38	*	4.16	19.83	17.63

A= Abundancia, C= Cobertura de copa, F= Frecuencia, IVI= Índice de Valor de Importancia,

\*Asterisco señala que esta especie no se encontró en el rodal.

En cuanto a la densidad y cobertura total de la regeneración del arbolado se obtuvieron los siguientes datos: 1) 20,000 árboles ha<sup>-1</sup> y 4,703 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>, en rodal de Referencia, 2) 43,125 árboles ha<sup>-1</sup> y 1,752 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>, en Árboles padre y, 3) 28,750 individuos ha<sup>-1</sup> y 5,199 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>, en Selección (Figura 15).

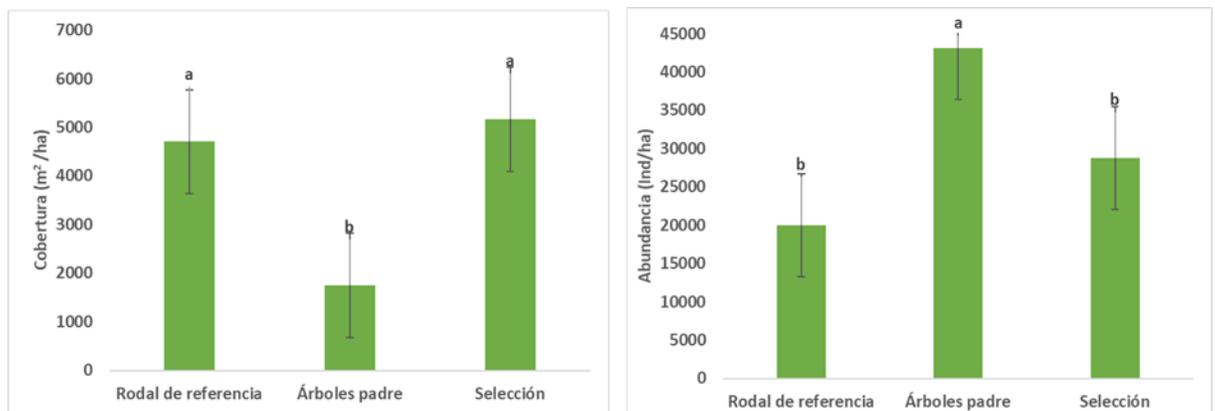


Figura 15. Abundancia y cobertura de la regeneración natural arbórea en los tres rodales silvícolas, letras diferentes indican diferencia significativa (Prueba de Tukey con  $p \leq 0.05$ ).

El índice de Shannon mostro valores que rondan del 0.81 al 1.04, donde el rodal de Selección ( $H'=0.86$ ) y Árboles padre ( $H'=0.81$ ) mostraron valores similares, mientras que el rodal de Referencia ( $H'=1.04$ ) arrojó valores mayores en contraste con los antes mencionados. En general los valores del índice de Margalef son considerados bajos, aunque el rodal de Referencia difiere con ambas cortas. Los rangos de ambos índices ecológicos son característicos para comunidades vegetales de bosque templado (Alanís-Rodríguez et al., 2012; Graciano-Ávila et al., 2017; López-Hernández et al., 2017) (Figura 16).

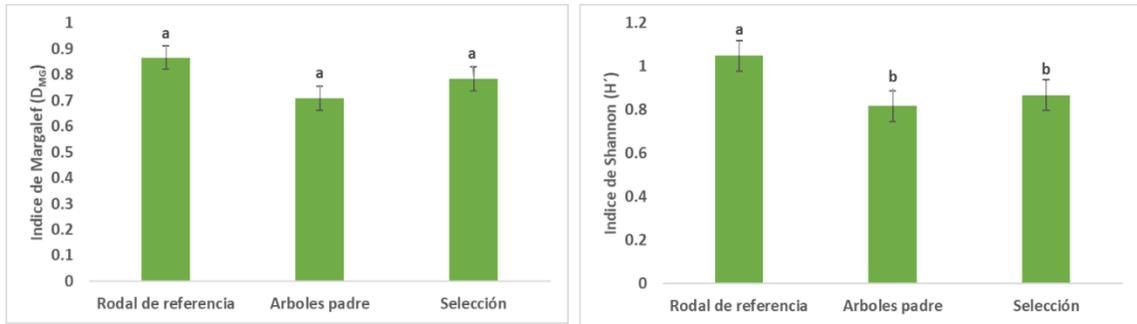


Figura 16. Índices de diversidad (Margalef y Shannon), letras diferentes indican diferencia significativa entre rodales (Prueba de Tukey con  $p \leq 0.05$ ).

En la Figura 17 se muestran los resultados del análisis de similitud, mediante la técnica de clasificación de Sorensen, mostrando la existencia de un subconjunto constituido por el rodal de Referencia y Selección con un valor de 75% en común, mientras que el área de Árboles padre mostró una similitud ligeramente inferior (64%).

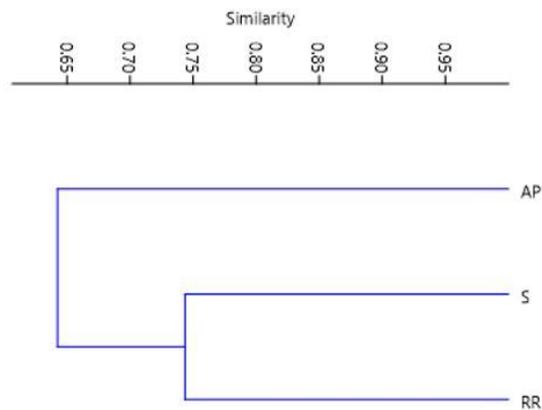


Figura 17. Índice de similitud de Sorensen para rodal de Referencia (RR), Árboles padre (AP), Selección (S).

#### 4. Discusión

De acuerdo a los resultados, el género *Pinus* representó en mayor proporción a la regeneración natural en los tres rodales investigados, Graciano-Ávila et al. (2017) ha confirmado que las pináceas son más dominantes en los bosques de Durango, igualmente Zúñiga-Vásquez et al. (2018) y Alonso-Torrens et al. (2016) reportan valores de importancia altos para el género *Pinus*. Leyva-López et al. (2010) señalan que esta dominancia no limita en gran medida el establecimiento

de otras especies, tales como *Quercus sideroxyla* y *Juniperus deppeana* encontrados en el presente estudio.

Según Zavala (2004) lo antepuesto, puede estar relacionado con la respuesta de algunas especies (capacidad de desarrollarse, competir y reproducirse) a los métodos de regeneración (disturbios). Específicamente, el método de selección permite el establecimiento y desarrollo a especies semitolerantes (Shields et al., 2007) y el de árboles padre a especies completamente intolerantes a la sombra (Smith et al., 1997).

Los resultados del presente estudio y lo señalado anteriormente, coinciden con Hernández et al. (2019) quienes atribuyen que la presencia de especies de pino y encino en la regeneración natural, se debe a su capacidad de responder favorablemente a la luz solar, así como al tipo de reproducción que tienen (pino; producción y dispersión por semilla, encino; reproducción vegetativa), esto ha sido reafirmado por otros autores en diferentes ecosistemas forestales de bosque de pino-encino sometidos a cortas y disturbios naturales (incendios) (Alanís-Rodríguez et al., 2012; Návar y González Elizondo, 2009).

El rodal intervenido con la corta de Árboles padre para *Pinus durangensis* tuvo densidades de hasta 18,750 individuos por hectárea, resultados por arriba de los obtenidos por Castelán-Lorenzo y Arteaga-Martínez (2009), quienes reportan densidades de 4,200 individuos por hectárea, establecidas a los cuatro años de la corta de árboles padre en bosques de *Pinus patula*. Estos datos refieren que las cortas de árboles padre, aseguran la regeneración del bosque y no ponen en riesgo su dinámica de crecimiento (Monárrez-González et al., 2018). Por otra parte, Basáñez et al. (2008) y Pourmajidian et al. (2010) mencionan que al modificar la estructura arbórea se derivan cambios en la luminiscencia, propiedades edáficas, relaciones hídricas, etc., afectando la densidad de la regeneración, frecuencia y cobertura.

De acuerdo a los resultados, los índices de diversidad Shannon y Margalef muestran valores superiores en el rodal de Referencia, lo cual se debe al cambio en la abundancia proporcional de individuos por especie derivado de las cortas

de regeneración Hernández et al. (2019), asimismo Hernández-López (2007) y García et al. (2019), señalan que por lo general, el objetivo de la aplicación de los tratamientos silvícolas es promover el establecimiento de las especies con mayor interés económico, derivando a tener una regeneración natural uniforme. El índice de Margalef (DMg) tuvo un valor promedio de 0.785, inferior a los reportados por Graciano-Ávila et al. (2017), y similares a los determinados por Solís Moreno et al. (2016) y Alanís et al. (2008) para bosque templado, siendo considerados como de baja diversidad.

El índice de similitud de Sorensen indica que existe alta similitud de especies entre los rodales bajo cortas de regeneración y el rodal de Referencia. Con ello se define que los tratamientos no ponen en riesgo la dinámica de la regeneración del bosque (Monárrez et al., 2018), cabe mencionar que dichas cortas no aseguran la permanencia de las especies de interés como *Pinus durangensis*.

Particularmente, la aplicación del método de árboles padre modifica la diversidad en la regeneración (Hernández-Salas et al., 2013; Leyva-López et al., 2010), mientras que la ejecución reiterada de las prácticas de manejo forestal, alteran la abundancia proporcional de las especies, modificando los indicadores de diversidad (Hernández-Salas et al., 2013).

## 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 totales o 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.

La tasa de infiltración inicial ( $2080 \text{ mm h}^{-1}$ ), básica ( $297.93 \text{ mm h}^{-1}$ ) y acumulada ( $1642.82 \text{ mm}$ ) observadas en el rodal de Referencia evidencian diferencias estadísticas significativas, respecto a los otros rodales analizados; por lo tanto, las modificaciones en la estructura forestal provocan un efecto negativo sobre las variables hidrológicas  $F_i$ ,  $F_b$  y  $F_a$ .

Las variables que componen el proceso de infiltración presentan el siguiente orden decreciente: Infiltración inicial: Referencia > Árboles padre > Post-incendio > Selección > Matarrasa; Infiltración básica: Selección > Referencia > Árboles padre > Post-incendio > Matarrasa; Infiltración acumulada: Árboles padre > Referencia > Selección > Post-incendio > Matarrasa

Los resultados del ajuste de modelos, basados en el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), muestran que los de Kostiakov y Lewis-Kostiakov son adecuados para predecir la infiltración en las diferentes condiciones del bosque estudiadas, específicamente, el modelo Lewis-Kostiakov estima mejor la infiltración para las

áreas de Selección y Referencia, y en los rodales de Árboles padre, Matarrasa y Post-incendio es mejor descrita por el modelo Kostiaikov.

Los efectos del manejo forestal e incendio provocaron cambios significativos en el almacenamiento de COS, pero en general el suelo Umbrisol presenta una alta capacidad de secuestro de carbono, en promedio  $150 \text{ Mg ha}^{-1}$ .

El almacenamiento del COS en la profundidad de 0-20 cm presenta el siguiente orden decreciente: Árboles padre > Matarrasa > Post-incendio > Referencia > Selección.

Mientras que en la profundidad de 20-40 cm el COS mostró la siguiente tendencia: Matarrasa > Selección > Post-incendio > Árboles padre > Referencia.

Todos los tratamientos silvícolas y el incendio, mostraron en el perfil de 0-40 cm un almacenamiento de COS superior al rodal de Referencia.

El manejo forestal contribuye significativamente a mejorar y aumentar la capacidad de los suelos Umbrisoles como sumideros de carbono.

La importancia del recurso suelo y vegetación ante el combate del cambio climático involucra aspectos como el manejo forestal, ya que permite establecer criterios y decisiones encaminadas a la sustentabilidad de todos los componentes de un ecosistema forestal.

En general se observó un efecto significativo en los distintos rodales sobre el contenido de C y N en el suelo y la relación C/N, lo cual puede estar relacionado principalmente con la modificación de los contenidos de materia orgánica del suelo y biomasa aérea, producto de los tratamientos silvícolas e incendio forestal.

Los contenidos de nitrógeno total y carbono (%) de los rodales mostraron descensos conforme aumenta la profundidad, atribuido principalmente a la acumulación de la materia orgánica en la parte superficial y procesos de lixiviación.

La reserva de Nitrógeno para el perfil de 0-40 cm osciló entre 5.03 (Referencia) y  $9.63 \text{ Mg ha}^{-1}$  (Árboles padre). Particularmente las cortas de regeneración y ocurrencia del incendio forestal pudieron provocar una liberación del N

secuestrado por la biomasa teniendo un efecto directo en aumentos de la reserva de N en el suelo.

De acuerdo a los resultados la relación C/N se vio incrementada por las cortas e incendio forestal para ambas profundidades (a excepción de Selección de 0-20 cm) respecto al rodal de Referencia. Sin embargo, la relación C/N promedio del suelo Umbrisol (20.4) se encuentra por encima de los rangos óptimos de C/N (10-14) por lo que el proceso de mineralización no es adecuado.

A partir de los resultados del presente estudio, se pueden establecer criterios pre y post manejo forestal (aclareos, limpiezas, podas, quemadas controladas, preparación del sitio, manejo de residuos de cortas, entre otras), para conservar y mejorar las variables C, N y C/N lo cual conducirá a mejorar la productividad y producción económica significativas de los bosques de la región.

Los resultados demostraron que el manejo forestal e incendio contribuyeron a reducir las emisiones de dióxido de carbono a través de la respiración de un suelo tipo Umbrisol.

Particularmente, la tasa promedio de respiración del suelo mostró el siguiente orden descendente en el flujo de CO<sub>2</sub> ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ):

- Referencia (8.86) > Árboles padre (8.42) > Selección (7.17) > Matarrasa (6.97) > Post-incendio (6.30)

El inicio de la temporada de lluvias provocó una reacción inmediata en el suelo provocando aumentos significativos de los flujos de CO<sub>2</sub> en todos los rodales evaluados.

Los tratamientos silvícolas y ocurrencia del incendio forestal modificaron el dosel arbóreo provocando cambios en el microclima, suelo, procesos biológicos y químicos dando como resultados variaciones espacio temporales en las tasas de respiración.

Aunque la humedad y temperatura del suelo se consideran variables importantes que influyen en la respiración del suelo, en el presente estudio se encontraron

correlaciones bajas, lo cual permite definir que existen otras variables edáficas, climáticas y bióticas que intervienen en la respiración del suelo en este tipo de ecosistema.

Los resultados demostraron que las prácticas silvícolas empleadas en la región de estudio, son una buena estrategia para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera y así ayudar a mitigar los efectos del cambio climático.

Los rodales aprovechados con las cortas de regeneración de Árboles padre y Selección, así como el rodal de Referencia presentan una dominancia del género *Pinus*, sin embargo, especies como *Quercus sideroxyla* y *Juniperus deppeana* representan una proporción significativa.

Con base a lo anterior, se puede señalar que los rodales aprovechados por cortas de Selección y Árboles padre no aseguran el establecimiento de la especie de interés, lo que implica establecer criterios de manejo forestal a corto plazo.

La diferenciación en la similitud entre Árboles padre y los otros rodales se ve marcada principalmente por la intensidad de corta, ya que se modifica en mayor medida la estructura y composición de la masa forestal incrementando los claros para el establecimiento de la regeneración natural.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Achat, D. L., C. Deleuze, G. Landman, N. Pousse, & L. Augusto. (2015). Quantifying consequences of removing harvesting residues on forest soils and tree growth—A meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 348, 124-141. DOI: 10.1016/j.foreco.2015.03.042 Get rights and content
- Agencia Europea del Medio Ambiente. [AEMA] 2015. El suelo y el cambio climático. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/downloads/6a3b20cc0bea43eaba4a0227cd7bd928/1481893708/el-suelo-y-el-cambio-climatico.pdf>
- Aguirre-Calderón, O. A. (2015). Forest management in the XXI century. *Madera Bosques*, 21, 17–28. DOI: 10.21829/myb.2015.210423

- Aguirre-Calderón, O. A., Corral-Rivas, J., Vargas-Larreta, B., & Jiménez-Pérez, J. (2008). Evaluación de modelos de diversidad-abundancia del estrato arbóreo en un bosque de niebla. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 31(3), 281–289.
- Alanís, E., Jiménez-Pérez, J., Espinoza-Vizcarra, D., Jurado-Ybarra, E., Aguirre-Calderón, O. A., & González-Tagle, M. A. (2008). Evaluación del estrato arbóreo en un área restaurada post-incendio en el Parque Ecológico Chipinque. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 14(2), 113.118.
- Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Valdecantos-Dema, A., González-Tagle, M. A., Aguirre-Calderón, O. A., & Treviño-Garza, E. J. (2012). Composición y diversidad de la regeneración natural en comunidades de Pinus- Quercus sometidas a una alta recurrencia de incendios en el noreste de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 83(4), 1208–1214. DOI: 10.7550/rmb.29708
- Alonso-Torrens, Y., Hernández Martínez, F., Barrero Medel, H., López Ibarra, G., Madanes, N., & Prieto-Méndez, J. (2016). Estructura y composición de la vegetación de pinares de Alturas de Pizarras en la Empresa Agroforestal Minas, Cuba. *Madera y Bosques*, 22, 75–86.
- 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
- Amundson, R., A. T. Austin, E. A. G. Schuur, K. Yoo, V. Matzek, C. Kendall, A. Uebersax, D. Brenner, & W. T. Baisden. (2003). Global patterns of the isotopic composition of soil and plant nitrogen, *Global Biogeochem. Cycles*, 17(1), 1031. DOI:10.1029/2002GB001903.
- Archer, N. A. L., M. Bonell, N. Coles, A. M. MacDonald, C. A. Auton, & R. Stevenson. (2013). Características del suelo y relaciones de cobertura del suelo en la conductividad hidráulica del suelo a escala de ladera: una visión

- hacia el manejo local de inundaciones *Journal of Hydrology*, 497, 208-222.  
DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.05.043
- 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
- Ares, A., Neill, A. R., & Puettmann, K. J. (2010). Understory abundance, species diversity and functional attribute response to thinning in coniferous stands. *Forest Ecology and Management*, 260(7), 1104–1113. DOI: 10.1016/j.foreco.2010.06.023
- 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
- Barik, S. K., Tripathi, R. S., Pandey, H. N., & Rao, P. (1996). Tree Regeneration in a Subtropical Humid Forest: Effect of Cultural Disturbance on Seed Production, Dispersal and Germination. *The Journal of Applied Ecology*, 33(6), 1551. DOI: 10.2307/2404793
- Basáñez, A. J., Alanís, J. L., & Badillo, E. (2008). Composición florística y estructura arbórea de la selva mediana subperennifolia del ejido “El Remolino”, Papantla, Veracruz. *Avances En Investigación Agropecuaria*, 12(2), 3–22.
- Bationo, A., J. Kihara, B. Vanlauwe, B. Waswa, & J. Kimetu. (2007). Soil organic carbon dynamics, functions and management in West African agro-ecosystems. *Agricultural systems*, 94(1), 13-25. DOI: 10.1016/j.agry.2005.08.011
- Batjes, N. H. (2014). Total carbon and nitrogen in the soils of the world, *Eur. European journal of soil science*, 65(1), 10-21. DOI: 10.1111/ejss.12114\_2
- Bens, O., N. A. Wahl, H. Fischer, & R. F. Hüttl. (2007). Water infiltration and hydraulic conductivity in sandy cambisols: impacts of forest transformation

- on soil hydrological properties. *European Journal of Forest Research*, 126(1), 01-109. DOI: 10.1007/s10342-006-0133-7.
- Berlanga, V., & H. M. J. Rubio. 2012. Clasificación de pruebas no paramétricas. Cómo aplicarlas en SPSS. *REIRE. Revista d'Innovació i Recerca en Educació*, 2012, vol. 5, num. 2, p. 101-113. DOI:
- Bhattacharyya, T., & Pal, D. (2015). The soil: A natural resource. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/304057204\\_The\\_soil\\_a\\_natural\\_resource](https://www.researchgate.net/publication/304057204_The_soil_a_natural_resource)
- Binkley, D., & R.F. Fisher. (2013). *Ecology and management of forest soils*. 4th ed. John Wiley & Sons, Chichester, UK. 456 p.
- Bond-Lamberty, B., & Thomson, A. (2010). Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature*, 464(7288), 579-582. DOI: 10.1038/nature08930.
- Brassard, B.W., Chen, H.Y.H., Cavard, X., Laganier, J., Reich, P.B., Bergeron, Y., Pare, D. & Yuan, Z. (2013). Tree species diversity increases fine root productivity through increased soil volume filling. *J. Ecol.* 101, 210–219.
- Bremner, J. M. & C. S. Mulvaney. (1982). Nitrogen-Total. In: *Methods of soil analysis part 2: chemical and microbiological properties*. 2nd ed. American Society of Agronomy and Academic Press. Madison, WI, USA. pp. 595-624.
- 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
- Caballero, M. (2012). Evaluación de regeneración natural de *Clarisia racemosa* Ruiz & Pavon en bosques intervenidos de la Comunidad Nativa Chamiriari - Satipo [Universidad Nacional del Centro de Perú]. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/2612>
- Cadena, D. A., Flores-Garnica, J. G., Flores-Rodríguez, A. G. & Lomelí-Zavala, M. E. (2020). Efecto de incendios en la vegetación de sotobosque y propiedades químicas de suelo de bosques templados. *AgroProductividad*, 13(4).

- 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/ifor1382-008
- 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 Ecology and Management*, 384, 406-414. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.10.045
- Cantú, S. I., González, R. H., & Gómez, M. M. V. (2010). CO<sub>2</sub> efflux in vertisol under different land use systems. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 12(2), 389-403.
- Carvalho Gomes, L., Cardoso, I. M., de Sá Mendonça, E., Fernandes, R. B. A., Lopes, V. S., & Oliveira, T. S. (2016). Trees modify the dynamics of soil CO<sub>2</sub> efflux in coffee agroforestry systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 224, 30-39. DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.05.001
- Casanova, M., W. Luzio, & Maldonado, R. (2007). Correlación entre World Reference Base y Soil Taxonomy para los suelos de la VII Región del Maule de Chile. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 7(2), 14-21. DOI: 10.4067/S0718-27912007000200002
- Castelán-Lorenzo, M., & Arteaga-Martínez, B. (2009). ESTABLECIMIENTO DE REGENERACIÓN DE *Pinus patula* Schl. et Cham., EN CORTAS BAJO EL MÉTODO DE ÁRBOLES PADRES. *Revista Chapingo: Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 15(1), 49–57.
- Certini, G. (2005). Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia* 143, 1-10. DOI: 10.1007 / s00442-004-1788-8
- Chen, H. Y. & Shrestha, B. M. (2012). Stand age, fire and clearcutting affect soil organic carbon and aggregation of mineral soils in boreal forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 50, 149-157.

- Cheng, X., Kang, F., Han, H., Liu, H., & Zhang, Y. (2015). Effect of thinning on partitioned soil respiration in a young *Pinus tabulaeformis* plantation during growing season. *Agricultural and Forest Meteorology*, 214, 473-482. DOI: 10.1016/j.agrformet.2015.09.016
- Clemmensen, K.E., Bahr, A., Ovaskainen, O., Dahlberg, A., Ekblad, A., Wallander, H., Stenlid, J., Finlay, R.D., Wardle, D.A. & Lindahl, B.D. (2013). Roots and associated fungi drive long-term carbon sequestration in boreal forest. *Science* 339, 1615– 1618.
- Collis, G., N. (1977). Infiltration equations for simple soil systems. *Water resources research*, 13(2), 395-403. DOI: 10.1029/WR013i002p00395
- Covington, W.W., & Sackett S.S. (1992). Soil mineral nitrogen changes following prescribed burning in ponderosa pine. *Forest Ecology and Management*, 54(1-4), 175-191. DOI: 10.1016/0378-1127(92)90011-W.
- Cueva, R. A., Yépez, E. A., Garatuza-Payán, J., Watts, C. J., & Rodríguez, J. C. (2012). Diseño y uso de un sistema portátil para medir la respiración de suelo en ecosistemas. *Terra Latinoamericana*, 30(4), 327-336.
- Das, B. M. (2002). *Soil mechanics laboratory manual* (6th ed.). Oxford, NY: Oxford University Press.
- de la Rosa, J. M., Knicker, H., González-Pérez, J. A., Vila, F. J. G., Morillo, N. T. J. & Martín, G. A. (2014). Revisión de las investigaciones a nivel molecular sobre el impacto del fuego en la materia orgánica del suelo: Progresos en el siglo XXI. *Cuadernos de investigación geográfica/Geographical Research Letters*, (40), 387-402.
- Demir, M., Makineci, E. & Yilmaz, E. (2007). Investigation of timber harvesting impacts on herbaceous cover, forest floor and surface soil properties on skid road in an oak (*Quercus petraea* L.) stand. *Building and Environment*, 42(3), 1194-1199. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.11.008
- 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., & Návar, J. (2006). Manejo silvícola, capacidad de infiltración, escurrimiento superficial y erosión. *Terra Latinoamericana*, 24(2), 233–240.
- 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
- FAO (Food and Agriculture Organization). (2015a). 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. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. Disponible en: <http://www.fao.org/3/i3794es/l3794es.pdf>
- FAO. (2015b). 5 razones por las que el suelo es clave para el futuro sostenible del planeta. Disponible en: <http://www.fao.org/sustainable-development-goals/news/detail-news/es/c/277124/>
- FAO. (2019). Aumentan las emisiones de gases de efecto invernadero de la agricultura. Disponible en: <http://www.fao.org/news/story/es/item/218907/icode/>
- Fisher, M. J. (2000). Sistemas de uso de la tierra en los trópicos húmedos y la emisión y secuestro de CO<sub>2</sub>. Roma, Italia: Centro Internacional de Agricultura Tropical, FAO. Disponible en: <ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/wsrr88.pdf>
- Galicia, L., Gamboa Cáceres, A. M., Cram, S., Chávez Vergara, B., Peña Ramírez, V., Saynes, V. & Siebe, C. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 1-29.
- Gamarra, L.C. C., M. I. Díaz L., M. Vera de Ortiz, M. Galeano D. P., & A. J. N Cabrera C. (2018). Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(46), 4-26. DOI: 10.29298/rmcf.v9i46.134

- García M., E. (1973). Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). UNAM. Instituto de Geografía. México, D. F., México. 246 p.
- García, A. (2008). La materia orgánica (MOS) y su papel en lucha contra la degradación del suelo. In Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Quito, Ecuador, Memorias (Vol. 18).
- García, H. M. A., H. M. A. García, V.I. Castellanos, S.Z. Cano, & R.C.M. Rocha. (2008). Variación de la velocidad de infiltración media en seis ecosistemas inalterados. *Terra Latinoamericana*, 26(1), 21-27.
- García, S., Narváez Flores, R., Olivas García, J., & Hernández Salas, J. (2019). Artículo Diversidad y estructura vertical del bosque de pino – encino en Guadalupe y Calvo , Chihuahua Diversity and vertical structure of the pine-oak forest in Guadalupe y Calvo , Chihuahua Introducción En la Sierra Madre Occidental ( SMO ) se distribuy. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(53), 41–63. DOI: 10.29298/rmcf.v10i53.173
- 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., & 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 M., L., Etchevers B. & Hidalgo M. (2008). Carbono en suelos de ladera: factores que deben considerarse para determinar su cambio en el tiempo. *Agrociencia* 42(7): 741-751.
- González, F. J., & Almendros, M.G. (2011). El controvertido efecto de los incendios. El fuego en el ciclo del carbono en los ecosistemas mediterráneos. *Revista Metode* No. 70. 132p.
- 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
- Graciano-Ávila, G., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís-Rodríguez, E., & Luján-Soto, J. E. (2017). Composición, estructura y diversidad de especies arbóreas en un bosque templado del Noroeste de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4(12), 535. DOI: 10.19136/era.a4n12.1114
- Grego, C. R., & S. R. Vieira. (2005). Variabilidad espacial de propiedades físicas do solo em uma parcela experimental. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.29, n.2, p.169-77.
- 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
- Hernández-Díaz, J.C., Corral-Rivas, J.J., Quiñones-Chávez, A., Bacon-Sobbe, J.R., & Vargas-Larreta, B. (2008). Regular and irregular forest management evaluation of the sierra madre occidental forests | Evaluación del manejo forestal regular e irregular en bosques de la Sierra Madre Occidental. *Madera Bosques*, 14(3), 25–41.
- Hernández-López, I. (2007). Cambios en la estructura y composición del bosque bajo dos tratamientos silviculturales en la Comunidad de Capulálpam de Méndez, Ixtlán, Oaxaca, México. 103.
- Hernández-Salas, J., Aguirre-Calderón, Ó. A., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., González-Tagle, M. A., Luján-Álvarez, C., Olivas-García, J. M., & Domínguez-Pereda, L. A. (2013). Efecto del manejo forestal en la diversidad y composición arbórea de un bosque templado del noroeste de México. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 19(2), 189–199. DOI: 10.5154/r.rchscfa.2012.08.052
- Hillel, D. (1971). *Soil and Water*. Academic Press. New York. E.U.A. 131-153 pp.
- Hümann, M., G. Schüler, C. Müller, R. Schneider, M. Johst, & T. Caspari. (2011). Identification of runoff processes—The impact of different forest types and

- soil properties on runoff formation and floods. *Journal of Hydrology*, 409(3-4), 637-649. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.08.067
- INEGI [Instituto Nacional de Estadística y Geografía]. (2005). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos*. Pueblo Nuevo, Durango, 10023.
- INEGI. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Durango 2016*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2014). *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability*. URL <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>.
- 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*, 563-568.
- Jamshidi, R., Jaeger, D., Raafatnia, N. & Tabari, M. (2008). Influence of two ground-based skidding systems on soil compaction under different slope and gradient conditions. *International journal of forest engineering*, 19(1), 9-16. DOI: 10.1080/14942119.2008.10702554
- Jandl, R., Lindner, M., Vesterdal, L., Bauwens, B., Baritz, R., Hagedorn, F., Johnson, D. W., Minkinen, K. & Byrne, K.A. (2007). How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma* 137, 253–268.
- Johnson, D.W. & Curtis P.S. (2001). Effects of forest management on soil C and N storage: metaanalysis. *Forest Ecology and Management* 140, 227-238. DOI: 10.1016/S0378-1127(00)00282-6
- 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](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
- Kurth, V. J., D'Amato A. W., Palik B. J., & Bradford J. B. (2014). Fifteen-Year Patterns of Soil Carbon and Nitrogen Following Biomass Harvesting. *Soil Science Society of America Journal*, 78(2), 624-633. DOI:10.2136/sssaj2013.08.0360
- Laban, P., Metternicht, G. & Davies, J. (2019.) *Biodiversidad de suelos y carbono orgánico en suelos: cómo mantener vivas las tierras áridas*. Gland, Suiza: UICN. viii + 24p. Recuperado de [http://catalogue.unccd.int/1027\\_2018-004-Es.pdf](http://catalogue.unccd.int/1027_2018-004-Es.pdf)
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security, *Science*, 304, 1623– 1627. DOI: 10.1126/science.1097396
- Lal, R. (2005). Soil erosion and carbon dynamics. *Soil and Tillage Research*, 81, 137–142. DOI: 10.1016/j.still.2004.09.002
- 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](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

- Leyva-López, J. C., Velázquez-Martínez, A., & Ángeles-Pérez, G. (2010). Patrones De Diversidad De La Regeneración Natural En Rodales Mezclados De Pinos. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, XVI (2), 227–240. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.06.038>
- Li, C. F., Yue, L. X., Kou, Z. K., Zhang, Z. S., Wang, J. P. & Cao, C. G. (2012). Short-term effects of conservation management practices on soil labile organic carbon fractions under a rape–rice rotation in central China. *Soil and Tillage Research*, 119, 31-37.
- Liu, X., Wan, S., Su, B., Hui, D., & Luo, Y. (2002). Response of soil CO<sub>2</sub> efflux to water manipulation in a tallgrass prairie ecosystem. *Plant and soil*, 240(2), 213-223. DOI: 10.1023/A:1015744126533
- Lopera, M. C. (2019). Flujo de CO<sub>2</sub> del suelo bajo diferentes coberturas de la Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 43(167), 234-240. DOI: 10.18257/issn.0370-3908
- 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
- Lull, C., Bautista, I., Lidón, A., del Campo, A. D., González-Sanchis, M., & García-Prats, A. (2020). Temporal effects of thinning on soil organic carbon pools, basal respiration and enzyme activities in a Mediterranean Holm oak forest. *Forest Ecology and Management*, 464, 118088. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118088
- Lusk, C. H., Donoso C., Jiménez M., Moya C., Oyarce G., Reinoso R., & Matus F. (2001). Descomposición de hojarasca de *Pinus radiata* y tres especies arbóreas nativas. *Revista chilena de historia natural*, 74(3), 705-710. DOI: 10.4067/S0716-078X2001000300016
- Machiwal, D., M. K. Jha, & B. C. Mal. (2006). Modelling Infiltration and quantifying spatial soil variability in a Wasteland of Kharagpur, India. *Biosystems*

- Engineering, United Kingdom, v.95, n.4, p.569-582, 2006. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2006.08.007
- Macías, F., Arbestain, M. C., & Lado, L. R. (2005). Alternativas de secuestro de carbono orgánico en suelos y biomasa de Galicia. *Recursos rurales*, (1), 71-85.
- Madrigal, R. S., C. Acevedo D., E. Hernández A., & J. L. Romo L. (2019). Influencia de la cobertura, pendiente y profundidad, sobre el carbono y nitrógeno del suelo. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 10(51), 201-223. DOI: 10.29298/rmcf.v10i51.113
- Mande, K. H., Abdullah, A. M., Nuruddin, A. A., Bose, M. M., Binyehmed, F. M., Ben Youssef, K. A., & Gabriel, E. (2014). Forest Recovering and Soil Respiration Rate. *Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*. (8):12, 44-49. DOI: 10.9790/2402-081244449
- Marañón, S., Castro, J., Kowalski, A., Serrano, P., Sánchez, E., & Zamora, R. (2009). Efecto de los tratamientos forestales post-incendio sobre los flujos de CO<sub>2</sub> de respiración del suelo. 5° congreso Forestal Español. Sociedad española de Ciencias Forestales: España. Retrieved from <https://www.congresoforestal.es/fichero.php?t=12225&i=128&m=2185>
- 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
- Margalef, R. (1958). Information theory in ecology. *General Systematics*, 3, 36–71.
- Marshall, M. R., C. E. Ballard, Z. L. Frogbrook, I. Solloway, N. McIntyre, B. Reynolds, & H. S. Wheeler. (2014). The impact of rural land management changes on soil hydraulic properties and runoff processes: results from experimental plots in upland UK. *Hydrological Processes*, 28(4), 2617-2629. DOI: 10.1002/hyp.9826

- 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](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952017000500471)
- Millan, R. E., Salcedo, M. L., & Millan, C. (2018). Soil Respiration for Four Vegetation uses in the University of Sucre-Colombia. *Indian Journal of Science and Technology*, 11, 40. DOI: 10.17485/ijst/2018/v11i40/130132
- Monárrez, G. J. C., V. G. Pérez, G. C. López, L. M. A. Márquez, & M. D. S. G. Elizondo. (2018). Efecto del manejo forestal sobre algunos servicios ecosistémicos en los bosques templados de México. *Madera y Bosques*, 24(2), 1-16. DOI: 10.21829/myb.2018.2421569
- Montanarella, L. (2015). Agricultural policy: Govern our soils. *Nature News*, 528(7580), 32. DOI: 10.1038/528032a
- Moreno, C. (2001). Métodos para medir la biodiversidad. M&T–Manuales y Tesis SEA, Vol. 1. (CYTED (ed.); España). <http://entomologia.rediris.es/sea/manytes/metodos.pdf>
- Mostacedo, B., & Fredericksen, T. (2000). Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal. (E. País (ed.)). <http://www.bionica.info/biblioteca/mostacedo2000ecologiavegetal.pdf>
- 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
- Murray, J., & King, D. (2012). Climate policy: Oil's tipping point has passed. *Nature*, 481, 433–435. DOI: 10.1038/481433a
- Mushinski, R. M., Boutton T. W., & Scott D. A. (2017). Decadal-scale changes in forest soil carbon and nitrogen storage are influenced by organic matter removal during timber harvest. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 122(4), 846-862. DOI: 10.1002/2016JG003738

- Návar, J., & González Elizondo, M. (2009). Diversidad, estructura y productividad de bosques templados de Durango, México. *Polibotánica*, 27, 71–87.
- Návar, J., & T. J. Synnott. (2000). Soil infiltration and land use in Linares, NL, Mexico. *Terra Latinoamericana*, 18(3): 255-262.
- Nave, L. E., Vance, E. D., Swanston, C. W. & Curtis, P. S. (2010). Harvest impacts on soil carbon storage in temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 259(5), 857-866.
- Noormets, A., McNulty, S. G., Domec, J. C., Gavazzi, M., Sun, G. & King, J. S. (2012). The role of harvest residue in rotation cycle carbon balance in loblolly pine plantations. Respiration partitioning approach. *Global change biology*, 18(10), 3186-3201.
- North, M.P. and Hurteau, M. D. (2011). High-severity wildfire effects on carbon stocks and emissions in fuels treated and untreated forest. *Forest Ecology and Management* 261: 1115–1120.
- Nunes, F. C., de Jesus Alves, L., de Carvalho, C. C., Gross, E., de Marchi Soares, T. & Prasad, M. N. (2020). Soil as a complex ecological system for meeting food and nutritional security. In *Climate Change and Soil Interactions* (pp. 229-269). DOI:10.1016/B978-0-12-818032-7.00009-6
- Orjuela, H. B. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Rev. De. Cienc. Agric.* 35(1), 82-96. DOI:10.22267/rcia.183501.85
- 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).
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., ... & Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988-993. DOI: 10.1126/science.1201609
- Pérez, E. G., & A. M. Romance. (2012). Modelación de la infiltración en un campo agrícola de la cuenca del río Chirgua, estado Carabobo, Venezuela. *Revista Científica UDO Agrícola*, 12(2), 365-388.
- Pérez, R. S., Ramírez, M. I., P. F. Jaramillo L., & Bautista F. (2013). Contenido de carbono orgánico en el suelo bajo diferentes condiciones forestales:

- reserva de la biosfera mariposa monarca, México. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 19(1), 157-173. DOI: 10.5154/r.rchscfa.2012.06.042
- Picchio, R., Magagnotti, N., Sirna, A. & Spinelli, R. (2012a). 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
- Pimienta de la Torre, D. D. J., Domínguez Cabrera, G., Aguirre Calderón, Ó., Javier Hernández, F. & Jiménez Pérez, J. (2007). Estimación de biomasa y contenido de carbono de *Pinus cooperi* Blanco, en Pueblo Nuevo, Durango. *Madera y bosques*, 13(1), 35-46.
- Porta, J., Poch R. M., & M. López A. (2019). *Edafología: uso y protección de suelos*. Ed. Mundi-Prensa Libros. España. 624 p.
- Pourmajidian, M. R., Jalilvand, H., Fallah, A., Hosseini, S. A., Parsakhoo, A., Vosoughian, A., & Rahmani, A. (2010). Effect of shelterwood cutting method on forest regeneration and stand structure in a Hyrcanian forest ecosystem. *Journal of Forestry Research*, 21(3), 265–272. DOI: 10.1007/s11676-010-0070-7
- Powers, R. F., Scott, D. A., Sanchez, F. G., Voldseth, R. A., Page-Dumroese, D., Elioff, J. D. & Stone, D. (2005). The North American long-term soil productivity experiment: findings from the first decade of research. *Forest Ecology and Management*, 220(1-3), 31-50.

- Rincón, L. E. C., & A. A. Gutiérrez F. (2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. *Revista colombiana de Biotecnología*, 14(1), 285-295. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=77624081026>. (1 de enero de 2021)
- Robert, M. (2001). Soil carbon sequestration for improved land management. Disponible en: <ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/wsrr96e.pdf>
- Rodríguez, V. A. F., C. A. M. Aristizábal, & J. H. Camacho-Tamayo. (2008). Variabilidad espacial de los modelos de infiltración de Philip y Kostiakov en un suelo Ándico. *Engenharia Agrícola*, 28(1), 64-75. DOI: 10.1590/S0100-69162008000100007
- 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.
- 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.
- Romero, S. M. (2016). Pruebas de bondad de ajuste a una distribución normal. *Enfermería del Trabajo*, 6(3), 105-114.
- Ryu, S. R., Concilio, A., Chen, J., North, M., & Ma, S. (2009). Prescribed burning and mechanical thinning effects on belowground conditions and soil respiration in a mixed-conifer forest, California. *Forest Ecology and Management*, 257(4), 1324-1332. DOI: 10.1016/j.foreco.2008.11.033
- Rzedowski, J. (1991). Diversidad y Orígenes de la Flora Fanerogámica de México. *Acta Botánica Mexicana*, 14, 3–21. DOI: 10.1007/BF00489298
- 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.
- 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.
- Selig, M.F., Seiler, J.R. & Tyree, M.C. (2008). Soil carbon and CO<sub>2</sub> efflux as influenced by the thinning of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantations on the piedmont of Virginia. *For. Sci.* 54, 58–66.
- Shannon, E., & Warren, W. (1964). The mathematical theory of communication. In Univ. of Illinois Press Urbana (Ed.), *The mathematical theory of communication*. (pp. 29–125).
- Shields, J. M., Webster, C. R., & Nagel, L. M. (2007). Factors influencing tree species diversity and *Betula alleghaniensis* establishment in silvicultural openings. *Forestry*, 80(3), 293–307. DOI: 10.1093/forestry/cpm013
- Sihag, P., N. K. Tiwari, & S. Ranjan. (2017). Estimation and inter-comparison of infiltration models. *Water Science*, 31(1): 34-43. DOI:10.1016/j.wsj.2017.03.001
- Simonin, K., Kolb, T. E., Montes-Helu, M., & Koch, G. W. (2007). The influence of thinning on components of stand water balance in a ponderosa pine forest stand during and after extreme drought. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143(3-4), 266-276. DOI: 10.1016/j.agrformet.2007.01.003
- 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
- Slesak, R. A., S. H. Schoenholtz, T. B. Harrington, & N. A. Meehan. (2011). Initial response of soil carbon and nitrogen to harvest intensity and competing vegetation control in Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) plantations of the Pacific Northwest. *Forest Science*, 57(1), 26-35. DOI: 10.1093/forestsience/57.1.26

- Slesak, R.A. (2013). Soil temperature following logging-debris manipulation and aspen regrowth in Minnesota: Implications for sampling depth and alteration of soil processes. *Soil Science Society of America Journal*, 77(5), 1818-1824. DOI:10.2136/sssaj2013.01.0022
- Smith, D., Larson, B., Kelty, M., Ashton, P., & Bowersox, T. (1997). *The practice of silviculture: applied forest ecology*. (I. John Wiley & Sons (ed.); (Vol. 9).).
- Solís Moreno, R., Aguirre Calderón, Ó. A., Treviño Garza, E. J., Jiménez Pérez, J., Jurado Ybarra, E., & Corral-Rivas, J. (2016). Efecto de dos tratamientos silvícolas en la estructura de ecosistemas forestales en Durango, México. *Madera y Bosques*, 12(2), 49–64. DOI: 10.21829/myb.2006.1221242
- 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
- Steubing, L., R. Godoy & M. Alberdi. (2002). *Métodos de ecología vegetal*. Editorial Universitaria, Santiago, Chile. 345 pp.
- Sullivan, B. W., Kolb, T. E., Hart, S. C., Kaye, J. P., Dore, S., & Montes-Helu, M. (2008). Thinning reduces soil carbon dioxide but not methane flux from southwestern USA ponderosa pine forests. *Forest Ecology and Management*, 255(12), 4047-4055. DOI: 10.1016/j.foreco.2008.03.051
- Sun, Q., Wang, R., Hu, Y., Yao, L., & Guo, S. (2018). Spatial variations of soil respiration and temperature sensitivity along a steep slope of the semiarid Loess Plateau. *PloS one*, 13(4). DOI: 10.1371/journal.pone.0195400
- 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
- Thiffault, E., K. D. Hannam, D. Pare, B. D. Titus, P. W. Hazlett, P. G. Maynard, & S. Brais. (2011). Effects of forest biomass harvesting on soil productivity in boreal and temperate forests—A review. *Environmental Reviews*, 19(NA), 278-309. DOI: 10.1139/a11-009

- Torres, R., J. M., & S. A. Guevara. (2002). El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico. *Gaceta Ecológica* 63: 40–59.
- 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/s40725-016-0033-09
- Tucker, C. L., Ferrenberg, S., & Reed, S. C. (2019). Climatic sensitivity of dryland soil CO<sub>2</sub> fluxes differs dramatically with biological soil crust successional state. *Ecosystems*, 22(1), 15-32. DOI: 10.1007/s10021-018-0250-4
- Turnbull, L., Wainwright, J., & Brazier, R. (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
- Turrión, M. B., Schneider, K. & Gallardo, J. F. (2009). Carbon accumulation in Umbrisols under *Quercus pyrenaica* forests: Effects of bedrock and annual precipitation. *Catena*, 79(1), 1-8.
- Vargas, R., Baldocchi, D. D., Allen, M. F., Bahn, M., Black, T. A., Collins, S. L., ... & Tang, J. (2010b). Looking deeper into the soil: biophysical controls and seasonal lags of soil CO<sub>2</sub> production and efflux. *Ecological Applications*, 20(6), 1569-1582. DOI: 10.1890/09-0693.1
- Vargas, R., Detto, M., Baldocchi, D. D., & Allen, M. F. (2010a). Multiscale analysis of temporal variability of soil CO<sub>2</sub> production as influenced by weather and vegetation. *Global Change Biology*, 16(5), 1589-1605. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.02111.x
- Veni, V. G., Srinivasarao, C., Reddy, K. S., Sharma, K. L. & Rai, A. (2020). Soil health and climate change. In *Climate Change and Soil Interactions* (pp. 751-767). DOI: 10.1016/B978-0-12-818032-7.00026-6
- Wagner, S., H. Fischer, & F. Huth. (2011). Canopy effects on vegetation caused by harvesting and regeneration treatments. *European Journal of Forest Research*, 130(1), 17-40.

- Walmsley, J.D., D.L. Jones, B. Reynolds, M.H. Price, & J.R. Healey. (2009). Whole tree harvesting can reduce second rotation forest productivity. *For. Ecol. Manage.* 257:1104–1111. DOI:10.1016/j.foreco.2008.11.015
- Wan, S., Norby, R. J., Ledford, J., & Weltzin, J. F. (2007). Responses of soil respiration to elevated CO<sub>2</sub>, air warming, and changing soil water availability in a model old-field grassland. *Global Change Biology*, 13(11), 2411-2424. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2007.01433.x
- Wang, M., Liu, X., Zhang, J., Li, X., Wang, G., Li, X., & Chen, W. (2015). Soil respiration associated with plant succession at the meadow steppes in Songnen Plain, Northeast China. *Journal of Plant Ecology*, 8(1), 51-60. DOI: 10.1093/jpe/rtu006
- Wang, X., Zhao, J., Wu, J., Chen, H., Lin, Y., Zhou, L., & Fu, S. (2011). Impacts of understory species removal and/or addition on soil respiration in a mixed forest plantation with native species in southern China. *Forest Ecology and Management*, 261(6), 1053-1060. DOI: 10.1016/j.foreco.2010.12.027
- Weber, J. F. y L. Apestegui. (2016). Relaciones entre parámetros de los modelos de infiltración de Kostiakov y Lewis-Kostiakov. Córdoba, Argentina. *Tecnología y Ciencias del Agua* 7(2): 115-132.
- Whittaker, R. H. (1972). Evolution and Measurement of Species Diversity. *Taxon*, 21(2), 213–251.
- Wic, B. C., A. Abellán M., L. Borja M., E. Martínez G., F. García M., Rubio E., F. & López S. (2013). Thinning and recovery effects on soil properties in two sites of a Mediterranean forest, in Cuenca Mountain (South-eastern of Spain). *Forest ecology and management*, 308, 223-230. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.06.065
- Woerner, M. (1989). Métodos químicos para el análisis de suelos calizos de zonas áridas y semiáridas. México. Universidad Autónoma de Nuevo León
- Wohlgemuth, P. M., Hubbert, K. & Arbaugh, M.J. (2006). Fire and physical environment interactions. Pages 75– 93 in N. G. Sugihara, J. W. van Wagendonk, K. E. Shaffer, J. Fites-Kaufman, and A. E. Thode, editors. *Fire*

in California's ecosystems. University of California Press, Berkeley, California, USA.

- Yáñez, D. M. I., Cantú, S. I., González, H., Marmolejo, J. G., Jurado, E., & Gómez, M. V. (2017). Respiración del suelo en cuatro sistemas de uso de la tierra. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(42), 123-149.
- Yáñez, 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
- Yuan, Z. Y., & Chen H. Y. H. (2012). A global analysis of fine root production as affected by soil nitrogen and phosphorus. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279, 3796–3802. DOI: 10.1098/rspb.2012.0955
- Zavala, F. (2004). Desecación de bellotas y su relación con la viabilidad y germinación en nueve especies de encinos mexicanos. *CIENCIA Ergo-Sum*, 11(2), 177–185.
- 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
- Zhang, X. Z., Guan, D. X., Li, W. B., Sun, D., Jin, C. J., Yuan, F. H., Wang, A. Z., & Wu, J. B. (2018). The effects of forest thinning on soil carbon stocks and dynamics: A meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 429, 36– 43. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.06.027
- Zúñiga Vásquez, J. M., Martínez López, E. A., Navarrete Gallardo, C., Graciano Luna, J. J., Maldonado Ayala, D., & Cano Mejía, B. (2018). Análisis ecológico de un área de pago por servicios ambientales hidrológicos en el ejido La Ciudad, Pueblo Nuevo, Durango, México. *Investigación y Ciencia de La Universidad Autónoma de Aguascalientes*, Número 73, 27–36.