



Terra Latinoamericana

ISSN: 0187-5779

ISSN: 2395-8030

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.

Ortiz Torres, César; Gómez Díaz, Jesús David; Domínguez
Álvarez, Francisco Alberto; Villanueva Morales, Antonio
Influencia de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh y *Opuntia ficus-
indica* L. Mill en las propiedades físicas y químicas del suelo
Terra Latinoamericana, vol. 36, núm. 3, 2018, Julio-Septiembre, pp. 275-285
Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.

DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.199>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57357279007>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org



Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Influencia de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh y *Opuntia ficus-indica* L. Mill en las propiedades físicas y químicas del suelo

Influence of *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh and *Opuntia ficus-indica* L. Mill in physical and chemical soil properties

César Ortiz Torres², Jesús David Gómez Díaz^{1‡},
Francisco Alberto Domínguez Álvarez² y Antonio Villanueva Morales²

¹ Departamento de Suelos, ² División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. 56230 Chapingo, Estado de México, México.

[‡] Autor responsable (dgomez@correo.chapingo.mx)

RESUMEN

Las plantaciones forestales son una opción viable para la forestación de áreas con suelos degradados, la utilización de especies con características de rápido crecimiento y fácil adaptabilidad permiten acelerar los procesos para mejorar algunas características físicas, químicas y biológicas del suelo. El estudio se desarrolló en la plantación “Mario Ávila Hernández”, en terrenos de la Universidad Autónoma Chapingo, misma que se estableció entre 1960 y 1962 con fines de rehabilitar suelos erosionados en ladera. Se seleccionaron tres rodales con una superficie de una hectárea, en donde inicialmente se estableció sobre tepetates roturados la especie *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh a una distancia de tres metros, y posteriormente se presentó la especie *Opuntia ficus-indica* L. Mill como especie invasora. Dos rodales tuvieron la presencia de *Opuntia* y un tercero solo contó con *E. camaldulensis* Dehnh. Las propiedades del suelo evaluadas para determinar el impacto de las plantaciones en estas fueron las siguientes: densidad aparente (DAP), estabilidad de agregados (EA) y profundidad, en las propiedades físicas, mientras que las propiedades químicas fueron nitrógeno total (Nt), fósforo (P), potasio (K), materia orgánica (MO) y pH. La plantación de *E. camaldulensis* ha mejorado la condición de los tepetates roturados, principalmente con la protección que se tiene del suelo por la cobertura vegetal y a través del aporte de residuos vegetales como hojarasca, ramas y corteza desprendida, propiciando una mejora en las propiedades físicas

y químicas de los suelos evaluadas. Los resultados no muestran diferencias en las propiedades físicas y químicas de los suelos cuando se establece solo el *E. camaldulensis* o donde se tienen esta especie junto a la *O. ficus-indica*, solo hubo diferencias significativas del rodal con una especie comparado con los rodales donde se tiene las dos especies para el contenido de potasio que fue más alto y el pH más bajo en el rodal con solo el *Eucalyptus*.

Palabras clave: rehabilitación de tepetates, asociación Eucalyptus-Opuntia, suelos degradados.

SUMMARY

Forest plantations are a viable option for the afforestation of areas with degraded soils. Use of fast-growing species that adapt easily can accelerate the processes of recovering some physical, chemical and biological characteristics of the soil. The study was carried out in the plantation “Mario Ávila Hernández” established between 1960 and 1962 on land pertaining to Chapingo Autonomous University with the objective of rehabilitating eroded soils on the slopes of a hillside. To evaluate the impact of *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh and *Opuntia ficus-indica* L. Mill, which were established for rehabilitation purposes, on the recovery of some soil properties, three one-hectare stands were selected. Initially, the species *E. camaldulensis* Dehnh was established three meters apart on ruptured tepetates, and later, the species *O. ficus-indica* L.

Cita recomendada:

Ortiz Torres, C., J. D. Gómez Díaz, F. A. Domínguez Álvarez y A. Villanueva Morales. 2018. Influencia de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh y *Opuntia ficus-indica* L. Mill en las propiedades físicas y químicas del suelo. Terra Latinoamericana 36: 275-285.
DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.199>

Recibido: junio de 2017. Aceptado: mayo de 2018.
Publicado en Terra Latinoamericana 36: 275-285.

Mill appeared as an invasive species. The species was present in two stands and a third stand had only eucalyptus. The physical properties evaluated were bulk density (DAP), stability of aggregates (EA) and depth, while the chemical properties were total nitrogen (Nt), phosphorus (P), potassium (K), organic matter (MO) and pH. The plantation of *E. camaldulensis* has improved the condition of the ruptured tepetates, mainly through protection of the soil by the plant cover and the contribution of plant residues such as leaves, branches and detached bark, favoring an improvement in the physical and chemical soil properties evaluated. The results do not show differences in the physical and chemical properties of the soils when only *E. camaldulensis* is established or where this species is in association with *O. ficus-indica*. There were significant differences in potassium content only between the stand with one species and those with the two species; K was higher and pH lower in the stand with only *Eucalyptus*.

Index words: *rehabilitation of tepetates, association Eucalyptus-Opuntia, degraded soils.*

INTRODUCCIÓN

Una de las principales funciones del suelo es la producción de biomasa al proporcionar agua, nutrientes, aire y la base física para el crecimiento de las plantas, lo que influye directamente en la cadena alimentaria. Todos los procesos de este sistema dependen en gran medida de sus propiedades físicas y químicas, de la temperatura, la disponibilidad de agua y, especialmente, de las actividades biológicas, que determinan las características de los suelos y sus funciones para las sociedades humanas y el medio ambiente (Zhang y Nearing, 2005). El mantener en buenas condiciones las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos determinan su capacidad para producir alimentos saludables, resistir la erosión y el impacto de estrés ambiental de las plantas (Miralles *et al.*, 2002). Diversas amenazas influyen en las funciones de los suelos provocando disminución en su capacidad productiva, almacenamiento de biomasa, filtración y transformación de nutrientes, erosión, pérdida de materia orgánica, contaminación,

salinización, compactación y pérdida de biodiversidad (Camps-Arbestain *et al.*, 2008).

En el municipio de Texcoco, México, uno de los principales factores en la pérdida de suelo han sido las actividades agrícolas intensivas en zonas no aptas, principalmente de laderas, provocando afloramientos de tepetates (Rey, 1987). Dentro de las principales acciones que se han realizado en este municipio para contrarrestar la erosión están las reforestaciones, entre los años de 1973 y 1976 se llevaron a cabo en gran escala estas actividades con fines de recuperación y protección de los suelos (Pedraza, 1987). Entre 1960 y 1962 en terrenos de la Escuela Nacional de Agricultura, hoy Universidad Autónoma Chapingo, se estableció la plantación “Mario Ávila Hernández” con fines de rehabilitación de suelos erosionados, introduciendo las especies de *Pinus montezumae* Lamb; *P. michoacana* Martínez; *Eucalyptus camaldulensis* var. *brevirostis*, Dehnh; *E. resinifera* Sm y *Schinu molles* L., de las cuales el *Eucalyptus* fue el que más efectividad tuvo en su establecimiento (Ávila, 1963)¹.

La rehabilitación de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo en espacios degradados es prioridad para mejorar la capacidad productiva de los suelos y con ello el impacto positivo en los demás componentes del medio natural, para que los ecosistemas puedan recuperar en parte sus funciones ecológicas después de haber sido impactados por usos insostenibles de la tierra como son la transformación de áreas forestales no aptas a tierras de cultivo, sobrepastoreos, sobre explotación de masas forestales etc. (Williams-Linera *et al.*, 2011). El uso de árboles con fines de rehabilitación de áreas degradadas, contribuye al mejoramiento de las propiedades del suelo y a incrementar la presencia de herbáceas, así como en la producción de biomasa (Weltzin y Coughenour, 1990). Esto debido a que la descomposición de los residuos de la vegetación, de la parte aérea y de la subterránea, es una fuente de nutrientes y de acumulación de las fracciones más estables de la materia orgánica en el suelo, lo que ayuda en el mejoramiento de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos (Mishra *et al.*, 2003).

Con el establecimiento de plantaciones forestales en zonas degradadas se puede influir sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos, ya que,

¹ Ávila H., M. 1963. Recuperación de suelos erosionados de Chapingo, México con plantaciones forestales. Tesis de Maestría. Colegio de Posgraduados, Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, México.

de acuerdo a la tasa de descomposición de los residuos de los árboles, así como por las diversas interacciones de los árboles con el suelo, se pueden generar cambios en el pH, el contenido de materia orgánica, nitrógeno, fósforo, densidad aparente, formación y estabilidad de agregados (Osman, 2013a).

Las especies del género *Eucalyptus* poseen plasticidad genética-ecológica para colonizar ambientes con suelos pobres en nutrientes, estrés hídrico y alta insolación (Granados-Sánchez y López-Ríos, 2007), por lo cual, han sido utilizados en conjunto con otras especies con fines de rehabilitación, debido a que protegen el suelo y pueden aumentar el contenido de materia orgánica y nutrientes (Harmand *et al.*, 2004). Por otro lado, las especies de *Opuntia* spp. son ampliamente utilizadas para combatir la desertificación debido a su capacidad de adaptación a diferentes climas, sobre todo a los secos, y a la facilidad de su crecimiento sobre suelos con degradación extrema (Reynolds y Arias, 2001) así como a su alta capacidad de dispersión promoviendo el crecimiento de otras especies (Asteinza y Rey, 1987).

La presencia de más de una especie en plantaciones forestales puede influir positivamente en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, además de acelerar los procesos sucesionales de la vegetación (Suárez y Equihua, 2009). El establecimiento de plantaciones de varias especies combinadas o ensambles, cuyos atributos sean complementarios para su mejor desarrollo en ambientes degradados, se construyen como versiones simplificadas de los modelos de comunidades que han evolucionado naturalmente (Temperton *et al.*, 2004).

El objetivo de este estudio fue evaluar el impacto en las propiedades del suelo de una plantación de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh y *Opuntia ficus-indica* L. Mill establecida con fines de rehabilitación en el predio Mariano Ávila Hernández, a partir de la determinación de algunas propiedades físicas y químicas del suelo, para conocer la influencia de la asociación de estas dos especies en el mejoramiento de las propiedades del mismo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en la plantación “Mario Ávila Hernández”, establecida entre 1960 y 1962, en terrenos de la Escuela Nacional de Agricultura hoy Universidad Autónoma Chapingo, ubicada en

las coordenadas geográficas 19° 28' 18.30" y 19° 27' 41.00" N y 98° 50' 45.92" y 98° 51' 28.17" O. La zona está conformada por abanicos aluviales de cenizas volcánicas, así como algunos flujos de lava basáltica, en la superficie se encuentra tova volcánica de naturaleza ácida (Ortiz y Cuanalo, 1977). El clima es templado con verano fresco largo, el más seco de los subhúmedos, con régimen de lluvias de verano y un porcentaje de precipitación invernal menor a 5%, con poca oscilación anual de las temperaturas medias mensuales y con marcha anual de la temperatura del tipo Ganges (Cb(w_o)(w)(i')g) (García, 1988).

Muestreo

De la plantación fueron seleccionados tres rodales con una superficie de una hectárea cada uno en donde inicialmente se estableció la especie *E. camaldulensis* Dehnh a una distancia de tres metros, sobre tepetates roturados que constituyen suelos someros degradados. La presencia de la especie *O. ficus-indica* L. Mill en los rodales ha sido invasiva y no planeada, por lo cual, se estableció el criterio de que dos rodales tuvieran la presencia de esta especie (rodal 1 y rodal 2) y un tercer rodal donde no estaba presente la especie (rodal 3). En cada rodal se delimitaron tres áreas de muestreo, un cuadrado con una superficie de 25 m² cada uno, en las que a su vez se dividieron en cuatro cuadrantes, en cada cuadrante se tomaron tres muestras de suelo para cada criterio de muestreo (cercas de *Eucalyptus*, cercas de *Opuntia*, y entre las hileras de árboles y *Opuntia*). Con las muestras de dos cuadrantes opuestos (superior derecho con inferior izquierdo y superior izquierdo con inferior derecho) se conformaron dos muestras compuestas por área de muestreo para cada criterio señalado, teniendo 18 muestras compuestas en cada uno de los rodales 1 y 2, y 12 muestras compuestas en el rodal 3. Las muestras de suelo señaladas como cercas de los individuos se tomaron a una distancia de 50 cm de la base de *Eucalyptus* y de *Opuntia*, las indicadas como entre las hileras de los individuos se tomaron en el punto medio entre las hileras de árboles y de *Opuntia*, que en general están a una separación de tres metros o más. Las muestras para evaluar las propiedades químicas y estabilidad de agregados fueron compuestas recolectadas en pozos de un volumen de 20 × 20 cm de largo y ancho y 20 cm de espesor a partir de la superficie o la profundidad que tenía el suelo, para la densidad aparente las muestras fueron

inalteradas tomadas con una barrena de dos cilindros, y la profundidad del suelo se midió con una barrena metálica de 1m de longitud. Se realizó el conteo de todos los árboles con diámetro a la altura del pecho mayor a 10 cm por cada rodal y de los nopales que presentaran una altura mayor a un metro.

Las propiedades físicas evaluadas fueron: estabilidad de agregados (EA) por el método de Yoder por un solo tamiz (Amézketa, 1999); densidad aparente (DAP) por método del cilindro (Sarkar y Haldar, 2005) y profundidad del suelo de acuerdo a la NOM-021-RECENAT-2000 (Norma Oficial Mexicana, 2000). Mientras que las propiedades químicas se evaluaron en laboratorio bajo la NOM-021-RECENAT-2000: materia orgánica (MO) por el método Walkley y Black; pH en proporción 1:2 con H₂O; fósforo extractable (P) por método Olsen; nitrógeno total (Nt) por método semimicro-Kjeldahl (no incluye nitratos) y potasio intercambiable (K) por flamometría.

Análisis Estadístico

El análisis estadístico se realizó para identificar en primera instancia los efectos que puede tener la cercanía de *Eucalyptus* o de *Opuntia* en las propiedades del suelo en comparación con las zonas más retiradas como son entre las hileras en los rodales 1 y 2, en cambio en el rodal 3 se analizó solo cercas de *Eucalyptus* y entre las hileras de los árboles. El modelo estadístico usado fue el observacional con tres tratamientos ($Y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij}$), llevando a cabo un análisis de varianza (ANOVA) para cada una de las variables de respuesta consideradas (propiedades físicas y químicas del suelo en las diferentes localizaciones de las muestras), con una confiabilidad de $\alpha < 0.05$, se aplicó el procedimiento de comparaciones múltiples con la prueba de Tukey para comparaciones entre pares de medias. Este mismo análisis se realizó para comparar los valores de las variables entre los tres rodales del estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Del conteo individual de *Eucalyptus* y *Opuntia* presentes en cada rodal, el rodal 1 fue el que presentó la mayor cantidad de individuos con 29 de *E. camaldulensis* con un diámetro normal mayor a 10 cm y 41 de *O. ficus-indica* mayores a 1 m de altura, en el rodal 2 el número de individuos de *E. camaldulensis*

fue de 16 y 21 de *O. ficus-indica* y en el rodal 3 hubo solo 20 individuos de *E. camaldulensis* y la ausencia de *O. ficus-indica*.

Efecto de la Distribución de las Especies en las Propiedades del Suelo en cada Rodal

No se detectaron diferencias significativas ($P > 0.1$) en el efecto en las propiedades físicas de los suelos evaluadas de las dos especies establecidas, tampoco entre los diferentes criterios de muestreo, cercas de los árboles de *Eucalyptus* y de *Opuntia* y entre las hileras de estos individuos para los rodales 1 y 2 y cercas de los árboles de *Eucalyptus* y entre las hileras de estos individuos en el rodal 3 (Cuadro 1).

En el rodal 1 los valores de la densidad aparente fueron de 1.30-1.43 g cm⁻³, para la estabilidad de agregados los valores estimados fueron de 27.04-69.04%, en cuanto a la profundidad del suelo se encontraron valores de 19-32 cm. Para el rodal 2, la densidad aparente presentó valores de 1.04-1.43 g cm⁻³, la estabilidad de agregados también presentó un rango amplio de valores que fue de 25.91-76.18%, la profundidad del suelo en este rodal fue de 0 cm a 17.3 cm. En el rodal 3, los valores de la densidad aparente fueron similares a los del rodal 2 (1.04-1.33 g cm⁻³), de la estabilidad de agregados los valores medidos fueron similares a los otros dos rodales (27.04-69.04%) y la profundidad del suelo fue de 10-32 cm.

La similitud en las propiedades físicas de los suelos entre los rodales y criterios de muestreo puede atribuirse a los altos coeficientes de variación de las propiedades medidas, particularmente para la estabilidad de agregados y profundidad de los suelos (Cuadro 1). La dispersión de los valores de la estabilidad de agregados en los tres rodales para los diferentes criterios de muestreo, puede deberse a los cambios en el contenido de la MO (Pulido-Moncada *et al.*, 2009), así como a la abundancia de fragmentos de tepetate roturado que permanecen sin romperse cuando se realiza el procedimiento de evaluar la estabilidad de agregados. También, se encontró que en el rodal 2 los valores del coeficiente de variación fueron mayores respecto a los otros dos rodales, expresando una heterogeneidad importante en las profundidades del suelo, por lo que puede ser necesario aplicar otro tipo de muestreo que permita homogenizar las muestras a través de la descripción de los distintos tipos de microhábitats

Cuadro 1. Propiedades físicas de cada rodal y criterios de muestreo.

Rodal	Tipo de muestra	DAP	EA	Profundidad
		g cm ⁻³	%	cm
Rodal 1	<i>O. ficus-indica</i>	1.36 a ± 0.02	63.04 a ± 10.21	20.80 a ± 3.67
	CV	1.43	16.20	17.66
	<i>E. camaldulensis</i>	1.36 a ± 0.04	59.94 a ± 15.23	21.88a ± 2.59
	CV	3.31	25.41	11.82
	Entre individuos	1.37 a ± 0.03	64.22 a ± 11.33	21.34 a ± 2.43
	CV	2.35	17.64	11.39
Rodal 2	<i>O. ficus-indica</i>	1.21 a ± 0.17	52.87 a ± 11.50	9.04 a ± 6.71
	CV	14.36	21.75	74.16
	<i>E. camaldulensis</i>	1.26 a ± 0.15	57.72 a ± 14.93	6.89 a ± 4.22
	CV	12.07	25.86	61.20
	Entre individuos	1.25 a ± 0.15	48.67 a ± 19.29	7.29 a ± 6.14
	CV	11.96	39.63	84.24
Rodal 3	<i>E. camaldulensis</i>	1.26 a ± 0.05	50.36 a ± 10.26	22.08 a ± 8.50
	CV	4.38	20.38	38.49
	Entre individuos	1.19 a ± 0.08	43.83 a ± 17.07	17.00 a ± 5.44
	CV	6.90	38.93	32.00

DAP = densidad aparente; EA = estabilidad de agregados; CV = coeficiente de variación.

(áreas tepetatasas, suelos de profundidad media, áreas sin vegetación, etc.) que puedan influir sobre las propiedades del suelo (Yunchao *et al.*, 2010).

Los datos de densidad aparente, del rodal 2 presentaron una mayor dispersión, lo cual puede asociarse a una mayor presencia de material tepetatoso fragmentado, producto del proceso de roturación del suelo para el establecimiento de la plantación. Blanco-Sepúlveda (2009), menciona que las gravas (pedregosidad o fragmentos cementados) presentes en los suelos pueden influir en los resultados de las muestras de la DAP debido a la densidad mayor de éstas.

Se ha reportado que el uso de *E. camaldulensis* en procesos de rehabilitación de suelos degradados ayuda en el mejoramiento de las propiedades físicas del mismo, ya sea en la densidad aparente, agregados estables y en la profundidad, esto por medio de la protección del suelo y reducción de la erosión, así como del aporte de residuos vegetales al suelo (Seenivasan *et al.*, 2015), pero en este caso, no se apreció una diferencia entre los criterios de cercas de los árboles de *Eucalyptus*, cercas de *O. ficus-indica*, y entre las hileras de individuos.

Respecto a las propiedades químicas, en los rodales 1 y 2 no se encontraron diferencias significativas ($P > 0.1$) entre los diferentes criterios de muestreo, solo en el rodal 3 se presentaron diferencias significativas para nitrógeno total (Cuadro 2).

En el rodal 1, no se presentaron diferencias significativas (Tukey, para un $\alpha < 0.05$) entre las medias de los tres criterios de muestreo para las cinco propiedades químicas estudiadas. El Nt, P, MO y pH obtuvieron un nivel de significancia $P > 0.1$, mientras que el K mostró diferencia en las medias según el ANOVA ($P < 0.1$), pero al aplicar la prueba de Tukey no hubo diferencia significativa. El coeficiente de variación en Nt fue bajo, encontrándose relativa homogeneidad de esta propiedad del suelo en las tres ubicaciones de la muestra, la cantidad de Nt expresada en porcentaje fue de 0.06-0.08%. En el pH los valores encontrados fueron de 5.7-7.8, aunque no se estimaron diferencias significativas entre las medias del terreno, este parámetro presenta cambios que van de suelos ligeramente ácidos a ligeramente alcalinos, lo cual sí tiene una repercusión biológica en el crecimiento de algunas especies vegetales, sin embargo, estos valores

están en los rangos en que las especies establecidas en el terreno prosperan. Para la materia orgánica del suelo los valores oscilaron entre 1.61-3.76%, con una variabilidad alta en el terreno para cada criterio de selección de la muestra, con mayor variación en la condición de muestreo entre especies, lo que se asocia a que el aporte de residuos al suelo es heterogéneo en el área del rodal, pero no se tienen diferencias significativas entre los diferentes criterios de muestreo. En el K el rango de valores fue alto, de 0.15-0.50 me 100g⁻¹ de suelo, con la mayor variabilidad también en la condición de muestreo entre las especies, sin presentar diferencias significativas entre los criterios de muestreo. Para el caso del P mostró también alta variabilidad en los valores encontrados (1.12-9.94 mg kg⁻¹), con mayor variabilidad en las muestras entre las especies. A pesar de no encontrarse diferencias significativas de las propiedades químicas del suelo evaluadas en los diferentes criterios de muestreo en este rodal, hay mayor homogeneidad de estas en las cercanías de los individuos que mayor distancia de estos.

En el rodal 2 los rangos de los valores de Nt para los tres criterios de muestreo mostraron poca variación. Los valores de pH presentaron menos variabilidad que

en el rodal 1 y los suelos se clasificaron como neutros a casi neutros (6.05-7.71) (Cuadro 2). En el caso del P, la mayor variabilidad se presentó en la condición de muestras en las cercanías de *Opuntia* y entre las especies. Resultados similares se encontraron para la MO en las diferentes condiciones de muestreo y la mayor variabilidad también fue en las muestras cerca de la *Opuntia* y entre las especies. Los valores de K presentaron mayor variabilidad que en el anterior rodal. Este rodal tiene los suelos más someros de los tres evaluados y al igual que en el rodal 1, tiene las mismas especies establecidas.

En el rodal 3, el Nt si presentó diferencias significativas entre los criterios de muestreo, con muy poca variabilidad en la condición cercana a los eucaliptos y mayor entre las hileras de estos. La baja variabilidad en la primera condición de muestreo puede ser la razón para que se determinara la diferencia estadística significativa. Para las otras cuatro propiedades químicas de los suelos no se estimaron diferencias estadísticas significativas. En el pH los rangos de los valores de las muestras en los dos criterios de muestreo (cercas de los individuos y entre las hileras) fueron de 5.24-6.44, que es la menor

Cuadro 2. Comparación entre tipos de muestras de las propiedades químicas por cada rodal.

Rodal	Tipo de muestra	Nt	P	K	MO	pH
		%	mg kg ⁻¹	me 100g ⁻¹	%	
Rodal 1	<i>O. ficus-indica</i>	0.07 a ± 0.01	5.18 a ± 1.40	0.33 a ± 0.08	2.51 a ± 0.43	7.42 a ± 0.35
	CV	10.59	27.01	25.33	17.16	4.70
	<i>E. camaldulensis</i>	0.06 a ± 0.00	5.03 a ± 2.71	0.20 a ± 0.05	2.82 a ± 0.68	6.77a ± 0.61
	CV	4.07	53.85	23.22	24.09	9.05
	Entre individuos	0.06 a ± 0.00	4.86 a ± 3.34	0.30 a ± 0.13	2.17 a ± 0.67	7.10 a ± 0.79
	CV	6.14	68.71	43.12	30.66	11.19
Rodal 2	<i>O. ficus-indica</i>	0.06 a ± 0.00	8.90 a ± 4.24	0.49a ± 0.34	5.67 a ± 3.35	7.30 a ± 0.38
	CV	2.59	47.66	69.16	59.06	5.22
	<i>E. camaldulensis</i>	0.06 a ± 0.00	5.47 a ± 1.61	0.37 a ± 0.23	4.68 a ± 1.66	7.25 a ± 0.47
	CV	4.34	29.41	61.53	35.40	6.43
	Entre individuos	0.07 a ± 0.01	10.71 a ± 5.15	0.36 a ± 0.18	4.33 a ± 2.21	7.18 a ± 0.59
	CV	16.77	48.08	49.86	51.06	8.21
Rodal 3	<i>E. camaldulensis</i>	0.06 b ± 0.00	7.79 a ± 2.66	0.59a ± 0.19	2.13 a ± 0.10	5.84 a ± 0.44
	CV	0.00	34.16	32.51	4.75	7.56
	Entre individuos	0.07 a ± 0.01	4.46 a ± 2.77	0.58a ± 0.23	3.00 a ± 1.22	5.94 a ± 0.32
	CV	10.59	62.14	40.56	40.71	5.31

Nt = nitrógeno total; P = fósforo; K = potasio; MO = materia orgánica; CV = coeficiente de variación.

variabilidad de los tres rodales evaluados. Para el P los valores encontrados fueron de 1.24-11.18 mg kg⁻¹, en el K los valores fueron de 0.29-0.89 me 100g⁻¹, y de la MO de 1.61-5.11%, las muestras de la condición entre las hileras de eucalipto tuvieron una mayor variabilidad que las ubicadas cercanas a los individuos.

En general, se apreció que los suelos son homogéneos en sus propiedades químicas en cada rodal y que no hubo diferencias estadísticas entre los criterios de muestreo, salvo la del Nt en el rodal 3, la diferencia de este rodal con los otros dos es la ausencia de la especie *O. ficus-indica*. La cual, tiene una alta demanda nutrimental de nitrógeno (Nobel *et al.*, 1987) y la ausencia de esta especie en el rodal favoreció una mayor uniformidad en los contenidos de Nt del suelo. Eldridge y Wong (2005), reportaron un gradiente para el Nt en donde esta propiedad es más alta cuando se encuentra más cercana al tronco (ya sea en árboles agrupados, aislados y muertos) y disminuye al alejarse, sin embargo, en este estudio en el rodal 2 y en el 3 fue ligeramente mayor su contenido alejado de los troncos de *Eucalyptus* y *Opuntia*.

De acuerdo con Zuo *et al.* (2009), mientras existan mayores cantidades de pequeños parches sin vegetación, las cantidades de Nt y MO serán más heterogéneas respecto a las áreas que tengan menores parches sin vegetación, lo cual se ve reflejado en los resultados de las muestras del rodal 3, donde las muestras cercanas a *E. camaldulensis* tuvieron mayor homogeneidad en el contenido de Nt respecto a las muestras entre los individuos que incluía varios parches sin vegetación. La utilización de *E. camaldulensis* en otras rehabilitaciones ha sido capaz de aumentar los niveles de Nt, como también del P disponible y del K (Seenivasan *et al.*, 2015). También, este árbol tiene una demanda nutrimental (de acuerdo al siguiente orden) de N, P, K y Mg, elementos que son retenidos principalmente en sus hojas y tallos, retornándolos al suelo por medio de sus residuos (Harmand *et al.*, 2004) y que al ser mineralizados son liberados influyendo de manera importante en las aportaciones de MO y del fósforo disponible, presentando valores que pueden ser comparados con especies fijadoras de nitrógeno como lo son *Acacia farnesiana* y *Acacia salicina*, información encontrada en evaluaciones similares para suelos deteriorados de acuerdo a Sayad *et al.* (2010).

Los diferentes niveles del pH en el suelo que se presentaron en los rodales pueden influir ligeramente en la disponibilidad de nutrientes, ya que en condiciones

ácidas se ve reducida la disponibilidad de Ca, Mg, Mo y P, e incrementa para Fe, Mn, B y Zn, también, el N es más disponible entre los rangos pH de 6 y 7 (Jones, 2003). Lo cual influirá en las especies que se establezcan durante la rehabilitación, esto de acuerdo a sus necesidades nutrimentales y al pH en que se desarrollan mejor.

Efecto de las Especies en las Propiedades Físicas y Químicas del Suelo entre los Rodales

Las propiedades físicas fueron estadísticamente diferentes ($P < 0.1$) entre algunos rodales. La DAP, en la prueba de comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$) fue significativamente muy alta ($P < 0.001$); entre el rodal 1 y los rodales 2 y 3 en donde no hubo diferencias significativas entre ellos. El rodal 1 presentó valores mayores de esta propiedad del suelo y la menor variabilidad. La variación que se presentó en los tres rodales fue baja (Cuadro 3). Ávila (1963)¹, reportó para los primeros 20 cm del suelo de estos rodales valores medios de DAP que iban de 1.35-1.47 g cm⁻³, los cuales después de más de 50 años de establecida la plantación han disminuido, principalmente en los rodales 2 y 3, lo que indica que el aporte de materia orgánica ha mejorado el estado de agregación del suelo y con ello una disminución en la DAP. Osman (2013b), señala que la DAP es inversamente proporcional a la porosidad por lo que una disminución en el valor de la DAP conlleva al aumento en la porosidad, lo cual puede asociarse también con una mejora en la estructura del suelo. El aumento de la MO del suelo como consecuencia de los residuos aportados por la vegetación establecida en las plantaciones y las herbáceas que crecen

Cuadro 3. Propiedades físicas de los tres rodales estudiados.

Rodal	DAP	EA	Profundidad
	g cm ⁻³	%	cm
Rodal 1	1.36 a ± 0.03	62.40 a ± 11.84	21.34 a ± 2.81
CV	2.36	18.97	13.15
Rodal 2	1.24 b ± 0.15	52.82 ba ± 15.08	7.74 b ± 5.52
CV	12.20	28.54	71.32
Rodal 3	1.22 b ± 0.08	47.10 b ± 13.85	19.54 a ± 7.30
CV	6.29	29.41	37.37

DAP = densidad aparente; EA = estabilidad de agregados; CV = coeficiente de variación.

estacionalmente, permitió mejorar la estructura y aumentar la porosidad, existe una relación inversa entre la DAP y los contenidos de MO (Salamanca-Jiménez y Sadeghian-Khalajabadi, 2005). Broquen *et al.* (1995), han reportado para una plantación de coníferas, que la DAP no cambia con la edad de esta, resultado similar al rodal 1 (con *E. camaldulensis* y *O. ficus-indica*) pero el contrario al rodal 2 (con *E. camaldulensis* y *O. ficus-indica*) y al 3 (solo con *E. camaldulensis*) en donde disminuyó el valor de esta propiedad.

Para la EA se encontraron diferencias significativas ($P < 0.1$) entre los rodales 1 y 3. El rodal 1 presentó la mayor media con $62.40 \pm 11.84\%$ mientras que el rodal 3 registró la menor con $47.10 \pm 13.85\%$. En los tres rodales hubo una variabilidad moderada en los datos analizados, con valores que oscilaron de 25.91-78.67%. Destacando que solo cuando se tomaron en cuenta todos los datos, se pudieron detectar mejor las diferencias estadísticas en esta propiedad, lo cual explica que disminuye el coeficiente de variación y al aumentar en número de observaciones se pueden detectar mejor las diferencias. El rodal que contó con la menor proporción de estabilidad de agregados fue el que presentó una sola especie. Esta propiedad es relacionada inversamente con la DAP, ya que cuando sus valores aumentan, la densidad aparente tiende a disminuir (Gutiérrez *et al.*, 2015), sin embargo, en este caso varios de los agregados que se definieron como estables se componen de fragmentos de tepetate roturado y por la cementación por sílice permanecen unidas las partículas, incluyéndose en la determinación como agregados estables. La incorporación de más materia orgánica al suelo ya sea por estiércoles o compostas, que es una técnica de rehabilitación, en los rodales con poca agregación por materia orgánica

puede ayudar en el mejoramiento de la estabilidad de los agregados (Chirinos, 2007).

Para el caso de la profundidad, las diferencias significativas fueron entre el rodal 2 con los rodales 1 y 3, estos dos últimos presentaron valores en sus medias más altos que en el rodal 2. Los bajos valores encontrados en el rodal 2, se deben a que en este se encontró un suelo muy heterogéneo con zonas donde afloraba el tepetate y con profundidades que variaron de 0 a 17.33 cm; contrario a la moderada variación en las profundidades de los otros rodales, en donde el tepetate no se presentaba superficialmente. El espesor del suelo es una propiedad que es importante en el diseño y aplicación de tratamientos agronómicos puntuales para mejorar el potencial productivo de cada tipo de suelo (Frolla *et al.*, 2015), sin embargo, en el rodal 2, la roturación de los tepetates fue heterogénea, dejando áreas sin roturar.

Las propiedades químicas del suelo presentaron diferencias significativas entre algunos rodales para P, K, MO y pH (Cuadro 4). El P fue significativamente diferente entre el rodal 1 y 2. En el rodal 1 se presentaron los menores contenidos de este elemento y en el rodal 2 los mayores. En general, los tres rodales presentaron una variabilidad alta y los datos analizados estuvieron en el rango de 1.24-17.39 mg kg⁻¹. Ávila (1963)¹, reportó para esta zona al inicio del establecimiento de la plantación valores de 5.95-8.05 mg kg⁻¹ que en general son ligeramente menores a los encontrados en esta evaluación, lo que indica que ha habido un ligero incremento en el contenido del P del suelo en estos últimos 50 años, estos resultados tienen una tendencia similar a los valores reportados por Seenivasan *et al.* (2015), quienes registraron leves aumentos en el P al rehabilitar suelos sódicos, y aunque Jaiyeoba (2001),

Cuadro 4. Propiedades químicas del suelo de los diferentes rodales estudiados.

Rodal	Nt	P	K	MO	pH
	%	mg kg ⁻¹	me 100g ⁻¹	%	
Rodal 1	0.07 a ± 0.01	5.02 b ± 2.46	0.28 b ± 0.10	2.50 b ± 0.63	7.10 a ± 0.64
CV	7.70	48.90	37.80	25.14	8.99
Rodal 2	0.06 a ± 0.01	8.53 a ± 4.40	0.41 b ± 0.25	4.90 a ± 2.46	7.24 a ± 0.46
CV	11.32	51.54	61.28	50.26	6.34
Rodal 3	0.06 a ± 0.01	6.13 ab ± 3.12	0.58 a ± 0.20	2.57 b ± 0.94	5.89 b ± 0.37
CV	11.41	50.93	35.00	36.81	6.28

Nt = nitrógeno total; P = fósforo; K = potasio; MO = materia orgánica; CV = coeficiente de variación.

reporta que no hubo cambios en una plantación de *E. camaldulensis* a través del tiempo, los cambios encontrados en este estudio son muy ligeros.

Para el K se encontraron diferencias estadísticas muy altas ($P < 0.001$) entre el rodal 3, con los valores más altos, en comparación con los rodales 1 y 2, con valores menores. Los rangos del total de datos analizados fueron de 0.12-0.99 me 100g⁻¹. La variación que se identificó en los resultados registrados hace 50 años para esta propiedad fue de 0.08 - 0.16 me 100 g⁻¹ (Ávila, 1963)¹, lo que indica que ha habido un ligero incremento en el contenido de K. Esto concuerda con otros resultados en donde se reportan incrementos (después de 25 años) en las propiedades químicas del suelo en plantaciones de *E. camaldulensis* (Jaiyeoba, 2001), en rehabilitaciones de suelos sódicos con 3 años de establecida la plantación (Seenivasan *et al.*, 2015), así como en plantaciones con *E. tereticornis* con 9 años de edad en donde también hubo un incremento del contenido de este nutriente en el suelo (Mishra *et al.*, 2003). Además, se destaca que en los rodales donde se presentaron menores cantidades de este elemento son los que tienen presencia de la *O. ficus-indica*, mientras que el que tiene mayor cantidad no presenta esta especie, lo que puede asociarse a que *Opuntia* tiene mayor demanda de este nutriente que *Eucalyptus*.

El rodal 2 presentó el mayor porcentaje de MO, con diferencias significativas con los rodales 1 y 3 ($P < 0.0001$), esto a pesar de que la variabilidad fue alta. El total de los valores analizados fueron de 1.61-11.56% de MO del suelo. El rodal 2 pudo beneficiarse con el mejoramiento de algunas propiedades físicas como por ejemplo su estabilidad estructural (Betancourt *et al.*, 1999), ya que la materia orgánica influye en la agregación del suelo (Osman, 2013b). Las medias encontradas en este estudio en los tres rodales fueron considerablemente mayores a las reportadas al inicio de la plantación por Ávila (1963)¹, quien obtuvo valores que oscilaban de 0.20-0.37%, lo que se explica por la cantidad de residuos aportados al suelo por la plantación establecida, las herbáceas que crecen en los rodales y la disminución de la erosión. Mishra *et al.* (2003), indican que en plantaciones que contienen *E. tereticornis* la materia orgánica es la principal fuente de nitrógeno para el suelo, además de que está directamente relacionada con el incremento de P disponible y K. Para este estudio que integra al *E. camaldulensis*, se observó que esta relación se presentó principalmente

en el P, pues en los rodales donde hubo altas cantidades de MO también se presentaron altas cantidades de P.

Para los valores de pH también se encontraron diferencias estadísticas significativas muy altas ($P < 0.0001$) entre el rodal 3 con los rodales 1 y 2. En los tres rodales la variabilidad fue baja. El rodal 3 presentó los valores más bajos que lo caracterizan como moderadamente ácido y los otros dos como neutros a ligeramente alcalinos. Los rodales con pH neutro fueron los que tienen *O. ficus-indica*, por lo que la acidez moderada puede asociarse a la naturaleza de los residuos que aporta el *E. camaldulensis* como especie arbórea única en la plantación. Jaiyeoba (2001), reporta que el pH en un suelo con plantación de *E. camaldulensis* (de 27 años de edad) se incrementó con el paso del tiempo. Sin embargo, en el rodal 3 de este estudio donde solo se tenía la presencia de *E. camaldulensis*, se generó una disminución en el pH, pasando de una media reportada por Ávila (1963)¹ al inicio del establecimiento de la plantación de 7.3, a la actual de 5.89, mientras que en los rodales donde se tenía *O. ficus-indica* se mantuvo casi igual. El mantenimiento de los valores de pH con el tiempo ha sido registrado en plantaciones de *Pinus ponderosa* (de 17 a 52 años de edad) donde no se registraron incrementos en la acidez (Broquen *et al.*, 1995). La presencia de un pH 7 en los rodales 1 y 2, ayuda en el mantenimiento de los ácidos húmicos, los cuales influyen en el incremento de la estabilidad de agregados (Gutiérrez *et al.*, 2015).

El Nt, no presentó diferencias estadísticas significativas ($P > 0.1$), la variabilidad en los datos es relativamente baja. Ávila (1963)¹ reportó al inicio del establecimiento de la plantación que este elemento fue extremadamente pobre, con valores de 0.03-0.04%, mientras que para este estudio se encontraron medias que los duplicaron, aunque aún son valores bajos para este elemento. Jaiyeoba (2001) reportó ligeros aumentos de esta propiedad a través del tiempo (25 años) en una plantación de *E. camaldulensis*, de la misma forma, Mishra *et al.* (2003), registró un aumento de N para el caso de una plantación de *E. tereticornis* con una edad de 9 años. Para este estudio, independientemente de la presencia o no de la especie *O. ficus-indica*, la concentración de este elemento fue relativamente homogénea en los tres rodales y su incrementó con respecto a los niveles originales, lo cual se puede asociar con el incremento de la materia orgánica en donde, al ser mineralizados los residuos, se tiende a la liberación de nitrógeno.

En general, se observó que en la mayoría de las propiedades (tanto físicas como químicas) se presentó variabilidad importante en los valores medidos bajo los criterios de muestreo, con excepción del pH, Nt y DAP que tuvieron menor variabilidad. La gran variabilidad puede atribuirse a la preparación del terreno para el establecimiento de las plantaciones para rehabilitar los tepetates, en donde la roturación no dejó una capa homogénea en profundidad y en condición de roturación del tepetate, por lo que a pesar de la influencia positiva de las plantaciones de los árboles de *E. camaldulensis* y de la introducción posterior de *O. ficus-indica*, las propiedades del suelo presentaron heterogeneidad entre los diferentes rodales. Las propiedades en los suelos rehabilitados suelen ser muy variables cuando estos tienen poco tiempo de haber sido recuperados (Gasch *et al.*, 2014), sin embargo, en este caso tienen ya 50 años de establecidas las plantaciones, por lo que el cambio ligero en las propiedades del suelo comparadas con las condiciones originales de hace 50 años puede asociarse a lo somero de los suelos derivados de la profundidad de roturación del tepetate.

CONCLUSIONES

- La plantación de *Eucalypto camaldulensis* Dehnh establecida hace cincuenta años con fines de rehabilitación en el predio Mariano Ávila Hernández ha mejorado la condición de los tepetates roturados donde se establecieron estas especies, principalmente con la protección que se tiene del suelo por la cobertura vegetal y a través del aporte de residuos vegetales como la hojarasca, ramas y corteza desprendida, propiciando una mejora en las propiedades físicas y químicas de los suelos como son la estabilidad de agregados, densidad aparente, el espesor del suelo, el contenido de nitrógeno, fósforo y potasio.
- La especie *Opuntia ficus-indica* L. Mill se ha establecido con éxito en asociación con el *E. camaldulensis* Dehnh en los suelos desarrollados a partir de la roturación de los tepetates.
- Los resultados no muestran diferencias en las propiedades físicas y químicas de los suelos cuando se establece solo el *E. camaldulensis* Dehnh o donde se tienen esta especie junto a la *O. ficus-indica* L. Mill. Con excepción del contenido de potasio que es significativamente mayor en el rodal con solo

el eucalipto, lo que puede asociarse a que *Opuntia* tiene mayor demanda de este nutriente que *Eucalyptus* y donde están estas especies asociadas hay mayor remoción del elemento. En el pH también hubo diferencias significativas entre los rodales, con valores más bajos en el rodal con solo el *Eucalyptus*, lo que puede asociarse a que los residuos de esta especie tienen un efecto acidificante y se expresa más claramente cuando la especie se establece sola.

LITERATURA CITADA

- Amézketa, E. 1999. Soil aggregate stability: A review. *J. Sust. Agric.* 14: 83-150. doi: 10.1300/J064v14n02_08.
- Asteiza B., G. y J. A. Rey C. 1987. Evaluación ecológica de la plantación de nopal (*Opuntia ficus-indica*) en la zona de tepetates de San Pablo Ixayoc, Estado de México. pp. 172-178. *In:* J. F. Ruiz F. (ed.). Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Betancourt Y., P., J. González, R., B. Figueroa, S. y F. González C. 1999. Materia orgánica y caracterización de suelos en proceso de recuperación con coberturas vegetativas en zonas templadas de México. *Terra* 17: 139-148.
- Blanco-Sepúlveda, R. 2009. La relación entre la densidad aparente y la resistencia mecánica como indicadores de la compactación del suelo. *Agrociencia* 43: 231-239.
- Broquen, P., J. L. Girardin y M. C. Frugoni. 1995. Evaluación de algunas propiedades de suelos derivados de cenizas volcánicas asociadas con forestaciones de coníferas exóticas (S.O. de la provincia de Neuquén - R. Argentina). *Bosque* 16: 69-79.
- Camps-Arbestain, M., F. Macías V., and W. Chesworth. 2008. Soil. pp. 629-633. *In:* W. Chesworth (ed.). *Encyclopedia of soil science*. Springer. Dordrecht, The Netherlands. ISBN: 978-1-4020-5127-2.
- Chirinos, I. J. 2007. Evaluación de la estabilidad de agregados de dos suelos de Masquefa como respuesta a diferentes dosis de material orgánico compostado. *Ciencia* 15: 47-53.
- Eldridge, J. D. and V. N. L. Wong. 2005. Clumped and isolated trees influence soil nutrient levels in an Australian temperate box woodland. *Plant Soil* 270: 331-342. doi: 10.1007/s11104-004-1774-2.
- Frolla, F. D., J. P. Zilio y H. Kruger. 2015. Variabilidad espacial de la profundidad del suelo. Métodos de interpolación para el sudoeste bonaerense. *Rev. Invest. Agropec.* 41: 309-316.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía UNAM. México, D. F.
- Gasch, C., S. Huzurbazar, and P. Stahl. 2014. Measuring soil disturbance effects and assessing soil restoration success by examining distributions of soil properties. *Appl. Soil Ecol.* 76: 102-111. doi: 10.1016/j.apsoil.2013.12.012.
- Granados-Sánchez, D. y G. F. López-Ríos. 2007. Fitogeografía y ecología del género *Eucalyptus*. *Rev. Chapingo Serie Cienc. For. Amb.* 13: 143-156.

- Gutiérrez C., J. L., G. González C., M. A. Segura C., I. Sánchez C., J. A. Orozco V. y M. Fortis H. 2015. Efecto de ácidos húmicos de Leonardita en la estabilidad de agregados del suelo y raíces de melón en condiciones de invernadero. *Phyton* (B. Aires) 84: 298-305.
- Harmand, J. M., C. Forkong Njiti, F. Bernhard-Reversat, and H. Puig. 2004. Aboveground and belowground biomass, productivity and nutrient accumulation in tree improved fallows in the dry tropics of Cameroon. *For. Ecol. Manage.* 188: 249-265. doi: 10.1016/j.foreco.2003.07.026.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2000. Base de Datos Geográficos: Diccionario de Datos Geológicos escala 1:50 000 (vectorial). INEGI. Dirección General de Geografía. Aguascalientes, Ags., México.
- Jaiyeoba, I. A. 2001. Soil rehabilitation through afforestation: Evaluation of the performance of Eucalyptus and pine plantations in a Nigerian Savanna environment. *Land Degradat. Dev.* 12: 183-194. doi: 10.1002/ldr.447.
- Jones, J. B. 2003. *Agronomic handbook: Management of crops, soils, and their fertility*. CRC Press LLC. Boca Raton, FL, USA.
- Miralles, I., R. Ortega, Y. Cantón y C. Asensio. 2002. Degradación del suelo por exceso de sales y su relación con la topografía en un suelo del sur de España. *Agrichimica* 46: 270-279.
- Mishra, A., S. D. Sharma, and M. K. Gupta. 2003. Soil rehabilitation through afforestation: Evaluation of the performance of *Prosopis juliflora*, *Dalbergia sissoo* and *Eucalyptus tereticornis* plantations in a sodic environment. *Arid Land Res. Manage.* 17: 257-269. doi: 10.1080/15324980301597
- Nobel, P. S., C. E. Russell, P. Felker, J. G. Medina, and E. Acuña. 1987. Nutrient relations and productivity of prickly pear cacti. *Agron. J.* 79: 550-555. doi: 10.2134/agronj1987.00021962007900030030x.
- Norma Oficial Mexicana (NOM-021-RECNAT-2000). 2000. Que establezca las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial. SEMARNAT. México, D. F.
- Ortiz Solorio, C. A. y H. E. Cuanalo de la C. 1977. Levantamiento fisiográfico del área de influencia de Chapingo para la cartografía de tierras erosionadas. Colegio de Postgraduados, Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, México.
- Osman, K. T. 2013a. *Forest soils: Properties and management*. Springer. Heidelberg, Germany. ISBN: 978-33-190-2540-7.
- Osman, K. T. 2013b. *Soils: Principles, properties and management*. Springer. Dordrecht, The Netherlands. ISBN: 978-94-007-9679-9.
- Pedraza, C. L. 1987. Síntesis del proceso de establecimiento y construcción de los trabajos de conservación de suelos, agua y reforestación, en áreas erosionadas de la cuenca oriental del ex-lago de Texcoco. pp. 182-190. *In*: J. F. Ruiz F. (ed.). *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Pulido-Moncada, M. A., D. Lobo-Luján y Z. Lozano-Pérez. 2009. Asociación entre indicadores de estabilidad estructural y la materia orgánica en suelos agrícolas de Venezuela. *Agrociencia* 43: 221-230.
- Rey C., J. A. 1987. Estimación de la erodabilidad de los tepetates en la cuenca del río Texcoco en base al factor K. pp. 78-84. *In*: J. F. Ruiz F. (ed.). *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Reynolds, S. G. and E. Arias. 2001. Introduction. pp. 1-4. *In*: C. Mondragón-Jacobo and S. Pérez-González (eds.). *Cactus (Opuntia spp.) as forage*. FAO. Rome, Italy.
- Salamanca-Jiménez, A. y S. Sadeghian-Khalajabadi. 2005. La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé* 56: 381-397.
- Sarkar, D. and A. Haldar. 2005. Soil physics. pp. 34-41. *In*: D. Sarkar and A. Haldar (ed.). *Physical and chemical methods in soil analysis: Fundamental concepts of analytical chemistry and instrumental techniques*. New Age International Publishers. India. ISBN-13: 978-8122415735.
- Sayad, E., S. M. Hosseini, V. Hosseini, and G. Jalali. 2010. The influence of eight tree plantations on soil in Southwestern of Iran. *Silva Balcanica* 11: 33-44.
- Seenivasan, R., V. Prasath, and R. Mohanraj. 2015. Restoration of sodic soils involving chemical and biological amendments and phytoremediation by *Eucalyptus camaldulensis* in a semiarid region. *Environ. Geochem. Health* 37: 575-586. doi: 10.1007/s10653-014-9674-8.
- Suárez G., A. I. y M. Equihua. 2009. Rehabilitación de algunas propiedades químicas de los suelos y del bosque de niebla en Veracruz, México con ensambles experimentales de leñosas nativas y *Casuarina equisetifolia* L., Amoen. *Interciencia* 34: 471-478.
- Temperton, V. M., R. J. Hobbs, T. Nuttle, and S. Halle. 2004. *Assembly rules and restoration ecology*. Island Press. Washington, DC, USA. ISBN: 9781559633758.
- Weltzin, J. F. and M. B. Coughenour. 1990. Savanna tree influence on understory vegetation and soil nutrients in northwestern Kenya. *J. Veget. Sci.* 1: 325-334. doi: 10.2307/3235707.
- Williams-Linera, G., C. Alvarez-Aquino, A. Suárez, C. Blundo, C. Smith-Ramírez, C. Echeverría, E. Cruz-Cruz, G. Bolados, J. J. Armesto, K. Heinemann, L. Malizia, P. Becerra, R. F. del Castillo y R. Urrutia. 2011. Análisis experimental de técnicas de restauración de los bosques secos. pp. 135-190. *In*: A. C. Newton y N. Tejedor (eds.). *Principios y práctica de la restauración del paisaje forestal: Estudios de caso en las zonas secas de América Latina*. UICN, Fundación Internacional para la Restauración de Ecosistemas. Madrid, España. ISBN: 978-2-8317-1394-6.
- Yunchao, Z., W. Shi-jie, L. Hong-mei, X. Liping, and X. De'an. 2010. Forest soil heterogeneity and soil sampling protocols on limestone outcrops: Example from sw China. *Acta Carsologica* 39: 115-122. doi: 10.3986/ac.v39i1.117.
- Zhang, X. C. and M. A. Nearing. 2005. Impact of climate change on soil erosion, runoff, and wheat productivity in central Oklahoma. *Catena* 61: 185-195. doi: 10.1016/j.catena.2005.03.009.
- Zuo, X., X. Zhao, H. Zhao, T. Zhang, Y. Guo, Y. Li, and Y. Huang. 2009. Spatial heterogeneity of soil properties and vegetation-soil relationships following vegetation restoration of mobile dunes in Horqin Sandy Land, Northern China. *Plant Soil* 318: 153-167. doi: 10.1007/s11104-008-9826-7.