

Formas de carbono en suelos del Parque Nacional El Chico, Hidalgo, México

Yazmín Islas-López¹, Otilio Acevedo-Sandoval^{2,3}, Enrique Cruz-Chávez², Francisco Prieto-García¹, Rodrigo Rodríguez-Laguna³

Área Académica de Química¹; Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales², Área Académica de Ciencias Agrícolas y Forestales³

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Pachuca de Soto, Hid.; México

islas_yaz@hotmail.com, [acevedo, prietog]@uaeh.edu.mx

Abstract— Carbon forms in soils were studied in different forests (Pine tree-Oak, Oyamel-Oak, Cedar, Oyamel-Tlaxcal and Oyamel) from the Parque Nacional el Chico, Hidalgo, Mexico. Carbon total content (CT), organic carbon (OC), non-oxidizable carbon (NOC) and pyrophosphate extractable carbon (PC) were quantified in each sample. The highest content of CT and OC were found in samples with Oyamel-Oak forest, significant differences in CT and OC ($p \leq 0.05$) were found in tests with Cedar, Pine tree-Oak and Oyamel forest; high stability forms (NOC) were observed in all the soils with significant differences in soils with Pine tree-Oak, Oyamel-Tlaxcal and Oyamel-Oak forest; finally, the PC content present in the soils was lower with all the kind of forest.

Keyword— *forest soil, carbon forms, carbon stability.*

Resumen— Se evaluó las formas de carbono en suelos bajo diferentes tipos de vegetación forestal (Pino-Encino, Oyamel-Encino, Cedro, Oyamel-Tlaxcal y Oyamel) del Parque Nacional El Chico, Hidalgo, México. Para cada suelo se cuantificó el contenido de carbono total (CT), carbono orgánico (CO), carbono no oxidable (CNo) y carbono extraíble con pirofosfato (CP). El mayor porcentaje de CT y CO se presentó en el suelo con vegetación Oyamel- Encino, CT y CO diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en Cedro, Pino-Encino y Oyamel, en todos los suelos se presentan formas de elevada estabilidad (CNo), con diferencias significativas en suelos con cobertura Pino-Encino, Oyamel-Tlaxcal y Oyamel-Encino, por último el contenido de CP fue bajo para todos los tipos de vegetación.

Palabras claves— *suelo forestal, formas de carbono, estabilidad del carbono.*

I. INTRODUCCIÓN

Uno de los grandes problemas que enfrenta la humanidad en la actualidad es el cambio climático, de acuerdo con estudios realizados por el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), se sabe que éste ha sido acelerado por el actuar del hombre; y está afectando a la mayoría de los ecosistemas, además de la forma de vida, la salud y la economía en muchas regiones del planeta [1].

Durante los últimos 20 años la incorporación de CO₂ a la atmósfera se ha debido en un 75% a la quema de combustibles fósiles y el resto, predominantemente, a cambios de uso de suelo y a la deforestación [2], se estima que a nivel mundial cada año, son deforestadas entre 15 y 17 millones de hectáreas [3], como consecuencia se espera que la temperatura media superficial a nivel global aumente entre 1.4 y 5.8 °C de 1990 al 2100 [4], y una disminución en la productividad y capacidad de proporcionar servicios de los ecosistemas a causa de las pérdidas de carbono (C) del suelo [5], con el objeto de mitigar el calentamiento global y minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero resultantes de las actividades antrópicas, se han incrementado los estudios sobre los sistemas edáficos como fuente y sumidero de C [6, 7].

Los suelos contienen más carbono que la vegetación y la atmósfera [8], este carbono está presente en diversas formas, con diferentes grados de estabilidad, donde algunas fracciones son especialmente recalcitrantes y escapan durante largos periodos a la actuación de los procesos bióticos y a la tendencia de oxidación impuesta por la termodinámica, llevando así a una diferencia de formas importante desde el punto de vista del cambio climático [9].

Los métodos de identificación del C orgánico de los suelos más ampliamente utilizados, se basan en su oxidabilidad, el método de mayores garantías es el de combustión a más de 1000 °C determinando así el C total (CT), el cual está compuesto principalmente de carbono orgánico (CO) [3]. El C extraíble con pirofosfato (CP) [10], altamente relacionado con las fracciones humificadas de la materia orgánica (MO) [11], formado por diferentes compuestos de C unidos a elementos metálicos e incluso a componentes minerales del suelo [9], que dan como resultado una estabilización del C. Finalmente, la diferencia entre el CT y el CO representa, en suelos libres de carbonatos, el carbono no oxidable (CNo) que son formas de C estables o más recalcitrantes que ni siquiera son oxidadas en condiciones extremadamente forzadas [9].

En México, son pocos los estudios de la distribución espacial de los almacenes de CO en el suelo a nivel local y nacional [12, 13], así como, las diversas formas en las que se encuentra presente el C en el suelo. El objetivo del presente estudio es cuantificar el contenido y presencia de las diferentes formas de carbono en función del grado de oxidabilidad en suelos bajo diferentes tipos de vegetación forestal.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Localización y caracterización del área de estudio

El Parque Nacional El Chico se localiza en la Sierra de Pachuca, ubicada en el Eje Neovolcánico Transversal [14]. Sus coordenadas 20°10'05" y 20°13'25" de latitud norte y 98°41'47" y 98°45'31" de longitud oeste, a 20 km al norte de la ciudad de Pachuca, Hidalgo, México con una extensión de 2,739 hectáreas (Ha). La poligonal abarca los municipios de Mineral del Chico, Pachuca y Mineral del Monte [15]. El clima es templado-húmedo con inviernos fríos, la temperatura varía entre 10 °C y 14 °C, con mínimas que llegan hasta -9 °C [16]. El relieve del parque es complejo, contiene pendientes abruptas y escarpadas, franjas de escaso relieve y valles de considerable extensión, su altitud varía de 2,350 a 3,090 msnm. Geológicamente se caracteriza por rocas volcánicas del Terciario, perteneciente al Grupo Pachuca [17], conformado por andesita, dacita y riolita, con numerosos intervalos de toba y rocas epiclásticas, incluye algunos horizontes de caliza lacustre, la edad se considera como oligocénica-miocénica temprana y media [17, 18], suelos de tipo Andosol [19]. La vegetación del parque está formada principalmente por bosque de Oyamel (*Abies religiosa*) y bosque de Oyamel-Encino (*Abies-Quercus affinis*, *Q. rugosa* y *Q. regulosa*), que cubren el 62.9 y el 10.55 % de su superficie respectivamente, coexisten con otros tipos de vegetación de menor importancia como pastizales, bosque de Encino, bosque Pino-Encino (*Pinus teocote-Quercus crassifolia*), bosque de Táscate o Tlaxcal (*Juniperus sp.*) y bosque de Cedro (*Cupressus lindleyi*) [20].

B. Método analítico

Se tomaron muestras de suelo forestal en 5 sitios, bajo bosque de Pino-Encino, Oyamel-Encino, Cedro, Oyamel-Tlaxcal y Oyamel, donde se realizó el muestreo de suelo a cuatro profundidades (0-5, 5-20, 20-40, 40-60 cm). Cada muestra se secó al aire, se tamizó (malla 10) y homogenizó. Los valores de pH se midieron en H₂O y KCl (relación 1:2.5) usando el potenciómetro Denver Instrument UB-10 Ultrabasic, densidad real (Dr), textura, CO y MO mediante la metodología de la NOM-021-SEMARNAT-2000, densidad aparente (Da) por el método de probeta [21], porosidad total (PT) a través de la ecuación $[1-(Da/Dr)]*100$ [22], 2000), ΔpH por diferencia entre el pH medido en KCl y pH

medido en agua, cationes intercambiables por el método de acetato de amonio [23] donde Ca y Mg se analizaron por colorimetría, K y Na en un espectrofotómetro de emisión marca Jenway, modelo PFP 7.

Para cuantificar las diferentes formas de C en los suelos del parque Nacional El Chico se desarrolló el siguiente procedimiento: CO oxidable con dicromato en medio ácido se realizó por el método de combustión húmeda de Walkley y Black [24], para determinar el CT se utilizó el equipo Solids TOC Analyzer, y CNo (determinado por diferencia entre el CT por combustión a 1000 °C y el CO, este mismo equipo se utilizó para medir CP posterior al tratamiento de la muestra con pirofosfato de sodio [10]. Los resultados se analizaron mediante un análisis de varianza ($p \leq 0.05$) y comparación de medias Tukey, utilizando el paquete IBM SPSS Statistics versión 21 [25].

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 1, muestra los valores medios de algunas propiedades físicas de los suelos forestales bajo diferentes tipos de vegetación; la Da varío de 0.58 a 1.15 kg m^{-3} , la Dr de 1.17 a 3.1 kg m^{-3} , las dos densidades aumentan con relación a la profundidad, la mayoría de los valores para la Dr son menores a 2.31 Mg m^{-3} lo que indica bajo contenidos en minerales ferromagnesianos [26].

Tabla 1. Valores medios de las propiedades físicas de los suelos forestales.

Vegetación	Profundidad	Da	Dr	PT	Arcillas	Clase
	cm	Kg m^{-3}		%	%	Textural
Pino-Encino	0-5	0.66	1.67	60.23	10	FAr
	5-20	0.94	2.02	53.54	16	FAr
	20-40	1.09	2.2	50.62	22	FCAr
	40-60	1.15	2.43	52.78	20	FAr
Oyamel-Encino	0-5	0.63	1.37	53.67	10	FAr
	5-20	0.73	2.22	67.05	10	FAr
	20-40	0.89	2	55.32	12	FAr
	40-60	0.92	2.13	56.66	10	FAr
Cedro	0-5	0.75	1.53	51.38	30	FCAr
	5-20	1.01	1.8	43.88	12	FAr
	20-40	1.04	2.03	48.77	28	FCAr
	40-60	1.05	3.1	66.15	12	FAr
Oyamel-Tlaxcal	0-5	0.6	1.63	63.33	6	FAr
	5-20cc	0.75	1.78	57.72	6	FAr
	20-40	0.74	1.9	61.19	10	FAr
	40-60	0.71	2.07	65.52	10	FAr
Oyamel	0-5	0.58	1.17	49.87	6	FAr
	5-20	0.69	1.67	58.56	6	FAr
	20-40	0.88	2.03	56.48	4	FAr
	40-60	0.86	2.07	58.27	8	FAr

Da: densidad aparente; Dr: densidad real; PT: porosidad total; FAr: franco-arenosa; FCAr: franco-arcillo-arenosa.

Los valores de PT fluctuaron de 40 a 60%, aunado con una baja Da hace referencia a suelos que poseen un menor grado de compactación [27]. Las características anteriores son propias de suelos

porosos, bien aireados, con buen drenaje y buena penetración de raíces, lo que permite un buen desarrollo de los bosques. En las diferentes capas predomina la fracción arena con porcentajes de 50 a 84%, los limos varían de 10 a 34 %, los contenidos de las arcillas representan un porcentaje bajo por lo que la textura que predomina en el suelo es Franco-arenosa a Franco-arcillo-arenosa. El análisis de varianza mostró que la mayoría de las variables no presentaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en los suelos con bosques de Pino-Encino y Cedro, pero estas si tuvieron diferencia significativa ($p \leq 0.05$) en suelos con bosque de Oyamel y sus asociaciones.

La tabla 2, muestra las propiedades químicas del suelo; la acidez activa varió de 5.23 a 6.50 y los valores de la acidez potencial oscilaron de 3.80 a 5.63; esta propiedad disminuye con la profundidad, los valores corresponden a suelos que tienden de moderadamente ácidos a fuertemente ácidos. Se presentan valores negativos de ΔpH , son suelos de carga variable [28]. Los contenidos de MO muestran valores altos en sitios con bosque de Oyamel-Encino y Oyamel, y valores bajos en sitios con Cedro, lo mismo para los contenidos de CO, altos porcentajes se presentan en la superficie del suelo (0-20 cm), disminuyen con la profundidad.

Tabla 2. Valores medios de las propiedades químicas de los suelos forestales.

Vegetación	Profundidad <i>cm</i>	pH 1:2.5		Δ pH	MO	CO	Na	K	Ca	Mg	CIC
		<i>H₂O</i>	<i>KCl</i>		----- % -----		----- <i>Cmol(+)</i> <i>kg⁻¹</i> -----				
Pino-Encino	0-5	5.83	4.87	-0.96	14.07	8.16	2.1	1.85	8.13	1.12	23.56
	5-20	5.62	4.25	-1.37	7.29	4.23	1.94	1.13	7.82	1.21	12.32
	20-40	5.3	3.87	-1.43	2.32	1.35	1.84	0.87	5.14	1.14	15.17
	40-60	5.23	3.8	-1.43	1.09	0.63	2.14	0.94	5.12	1.12	15.96
Oyamel-Encino	0-5	6.5	5.63	-0.87	16.65	9.66	2.14	2.14	7.56	1.51	28.17
	5-20	6.45	5.48	-0.97	16.55	9.44	1.67	1.16	5.18	1.18	23.43
	20-40	6.03	4.67	-1.36	8.31	4.82	2.45	1.1	5.31	1.21	16.11
	40-60	6	4.77	-1.23	4.91	2.85	2.13	0.96	4.2	1.13	15.79
Cedro	0-5	5.93	5.13	-0.8	8.58	4.98	2.54	1.35	7.03	1.15	21.6
	5-20	5.82	4.35	-1.47	1.51	0.87	2.16	1.12	7.12	1.02	27.05
	20-40	5.8	4.5	-1.3	0.64	2.37	2.14	0.65	5.21	1.12	23.64
	40-60	5.73	4.6	-1.13	0.32	0.18	1.98	0.72	3.49	0.98	22.47
Oyamel-Tlaxcal	0-5	5.57	4.7	-0.87	14.88	8.63	2.53	1.62	8.1	1.63	34.26
	5-20	5.57	4.77	-0.8	13.05	7.57	2.19	1.42	7.4	1.41	27.61
	20-40	5.6	4.5	-1.1	8.71	5.05	2.13	1.84	5.14	0.98	25.59
	40-60	5.57	4.2	-1.37	9.56	5.54	2.64	0.67	4.12	1.28	32.78
Oyamel	0-5	5.9	5	-0.9	16.85	9.77	2.54	1.74	6.5	1.81	28.97
	5-20	5.79	4.85	-0.94	14.38	8.34	2.87	1.25	5.85	1.7	23.91
	20-40	6	4.97	-1.03	11.84	6.87	2.16	0.83	5.13	1.5	23.45
	40-60	5.9	4.83	-1.07	9.71	5.63	2.35	0.76	3.21	0.96	21.99

pH (H₂O): activo; pH (KCl): potencial; MO: materia orgánica, CO: carbono orgánico; CIC: capacidad de intercambio catiónico.

La cantidad y el tipo de materia orgánica del suelo (MOS), influyen en casi todas las propiedades que contribuyen a la calidad del suelo y ha sido señalado como un indicador importante de su fertilidad y productividad, debido a su papel crucial en las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo [29],

es considerada una característica muy importante de la calidad del suelo a pesar de representar un mínimo porcentaje del volumen total del mismo, cumple funciones esenciales en la estructura y estabilidad del suelo [30].

Los contenidos de Ca variaron de 3.49 a 8.13 Cmol(+) kg⁻¹, este catión predominó entre los cationes de cambio, siguiendo Na con 1.67 a 2.87 Cmol(+) kg⁻¹, en menor cantidad K con 0.65 a 2.14 Cmol(+) kg⁻¹ y Mg con 0.98 a 1.81 Cmol(+) kg⁻¹. La CIC varió de 12.32 a 34.26 Cmol(+) kg⁻¹ los valores disminuyen con la profundidad, en general se puede considerar valores altos, lo que se atribuye, en gran parte, a la presencia de sesquióxidos [6], al contenido de materia orgánica y a la cantidad y naturaleza de las arcillas [31]. Johnson [32] reportan que en suelos forestales de Nueva Inglaterra y del noreste de USA la materia orgánica es la fuente predominante de sitios de intercambio, lo que muestra el alto grado de transformación y evolución de la materia orgánica de esos suelos. El análisis de varianza mostró que la mayoría de las variables no presentaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en los suelos con bosque de Pino-Encino y Cedro, pero estas si tuvieron con bosque de Oyamel y sus asociaciones.

A. *Fraccionamiento químico del carbono*

La tabla 3, muestra los valores para las diferentes formas de C presentes en suelos con diversos tipos de bosque.

Tabla 3. Valores medios de las formas de Carbono presentes en los suelos forestales.

Vegetación	Profundidad	CT	CO	C NO	CP
	cm	----- % -----			
Pino-Encino	0-5	9.88	8.16	1.72	1.05
	5-20	5.23	4.23	1.00	0.95
	20-40	4.12	1.35	2.77	0.39
	40-60	2.66	0.63	2.03	0.61
Oyamel-Encino	0-5	13.38	9.66	3.72	1.02
	5-20	9.91	9.44	0.47	0.82
	20-40	5.00	4.82	0.18	0.70
	40-60	3.11	2.85	0.26	0.61
Cedro	0-5	5.00	4.98	0.02	0.60
	5-20	2.48	0.87	1.61	0.30
	20-40	1.72	0.37	1.35	0.44
	40-60	1.59	0.18	1.41	0.57
Oyamel-Tlaxcal	0-5	12.21	8.63	3.58	1.62
	5-20	9.65	7.57	2.08	1.54
	20-40	7.02	5.05	1.97	1.11
	40-60	5.61	5.54	0.07	1.06
Oyamel	0-5	10.72	9.77	0.95	1.45
	5-20	8.40	8.34	0.06	1.20
	20-40	6.90	6.87	0.03	0.67
	40-60	5.70	5.63	0.07	0.65

CT: carbono total; CO: carbono orgánico; CNo: carbono no oxidable; CP: carbono extraíble.

Se encontraron importantes variaciones en la distribución de las formas de C, su concentración mostró para todos los sitios y las diversas profundidades, un comportamiento general similar al del CT, el mayor porcentaje corresponde a CO con más del 50% [3], y con menores porcentajes CNo y CP. Los

contenidos de CT y CO en la profundidad de 0 a 20 cm, supera el CO determinado a mayor profundidad, característico de los sistemas con vegetación forestal, el CO acumulado en la primera capa del suelo (0-15 cm) es el doble del determinado a mayor profundidad, lo que indica que en la primera capa se concentra el CO del suelo [33].

B. Carbono total

En la figura 1 se presentan los promedios de CT para los suelos con diferente vegetación, disminuye con relación a la profundidad, el mayor contenido de CT esta presente en suelos con vegetación Oyamel-Encino, seguido de Oyamel-Tlaxcal, Oyamel, Pino-Encino y la menor cantidad en suelos con vegetación Cedro, este último presentó diferencias significativas ($p \leq 0.05$).

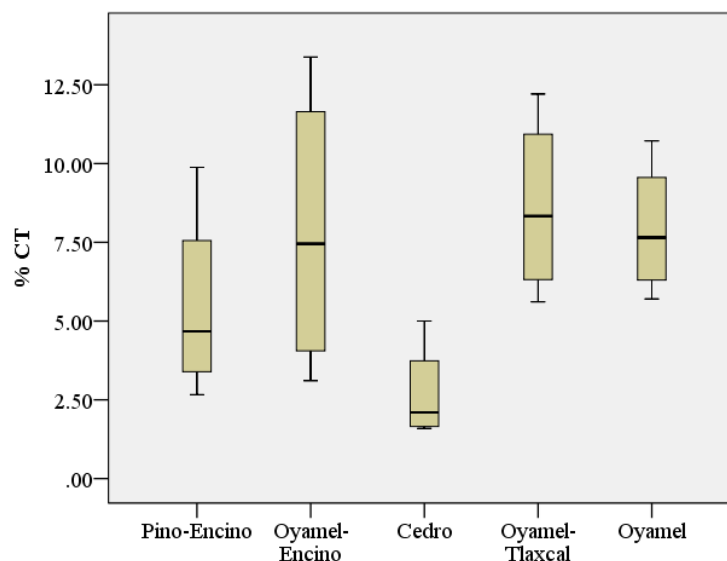


Figura 1. Contenido de CT en los suelos forestales bajo diferentes tipos de bosque, nivel de significación ($p \leq 0.05$).

C. Carbono orgánico

El contenido de CO disminuye con relación a la profundidad, donde el mayor porcentaje está presente en suelos con Oyamel-Encino y la menor cantidad en suelos con Cedro. Se presentó diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en el contenido de CO para los suelos con Cedro, Pino-Encino y Oyamel, es notorio que las formas más lábiles están relacionadas con el aporte de materia orgánica fresca [34]. El mayor porcentaje se presentó en suelos con Oyamel y sus asociaciones, seguido de Pino-Encino y los menores contenidos con Cedro (figura 2), esto se explica por las tasas de descomposición de la materia orgánica [35, 36], la composición química de la madera es un factor importante en el tiempo de residencia de C en el suelo, la lignina es un componente recalcitrante de la madera que estabiliza el CO del suelo durante décadas. Los bosques de Oyamel tienen un contenido alto de lignina que los bosques de Pino [37, 38]. En México, se han llevado a cabo estudios donde se evaluó el contenido de carbono del suelo, los resultados han evidenciado mayores contenidos de C en bosques de Oyamel que en bosques de Pino [39, 40, 41].

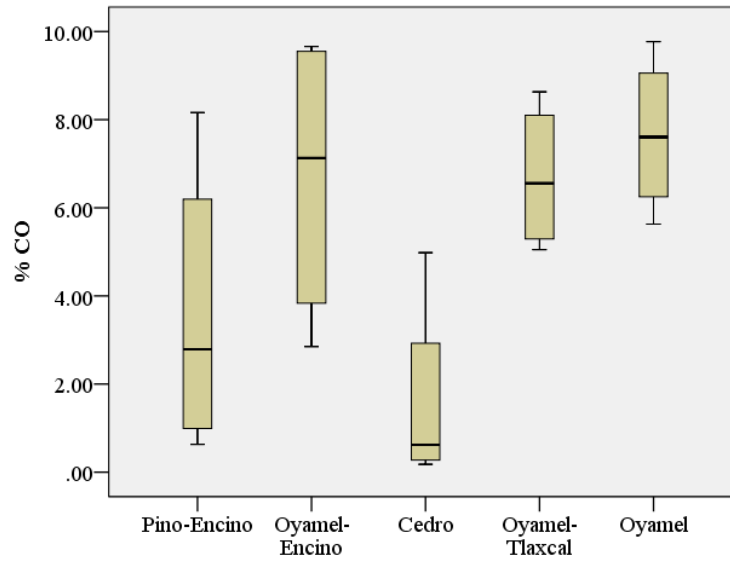


Figura 2. Contenido de CO en los suelos forestales bajo diferentes tipos de bosque.

D. Carbono no oxidable

La figura 3, muestra los promedios para el CNo en los suelos con diferente vegetación donde los mayores contenidos están presentes en suelos con Pino-Encino y Oyamel-Tlaxcal y con un bajo porcentaje en suelos con Oyamel; sin embargo, en todos los suelos aparecen estas formas recalcitrantes que son consideradas como de elevada estabilidad, que no participan en los procesos bióticos del suelo y, que por tanto, pueden mantenerse durante largos periodos de tiempo (Macias et al., 2004). Se presentó diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en el contenido de CNo para los suelos con Pino-Encino, Oyamel-Tlaxcal y Oyamel-Encino.

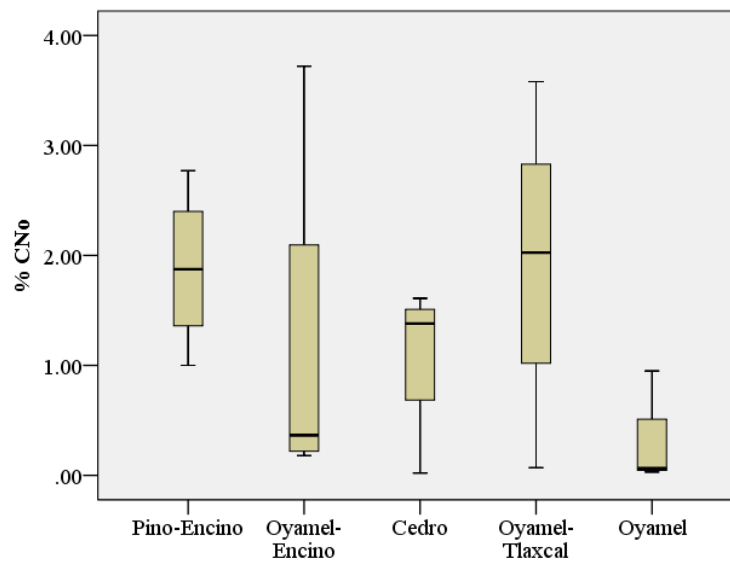


Figura 3. Contenido de CNo en los suelos forestales bajo diferentes tipos de bosque, nivel de significación ($p \leq 0.05$).

E. Carbono extraíble

El contenido de CP se presenta en menores porcentajes en los suelos forestales, no supera el 2%, la mayoría de los casos disminuye con relación a la profundidad, similares resultados se obtuvieron en otros estudios [42, 43, 44]. Se presentó diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en el contenido de CP para los suelos con vegetación Cedro y Pino-Encino. La figura 4, presenta los promedios de CP, se observó que para los cinco tipos de bosque evaluados el contenido es similar, los suelos con Oyamel-Tlaxcal presentó mayores porcentajes, aunque los porcentajes son bajos en todos los suelos, se tiene carbono asociado a la fase mineral, en particular la interacción con óxidos amorfos de hierro (Fe) y aluminio (Al), es un mecanismo importante de estabilización en suelos ácidos y neutros [45].

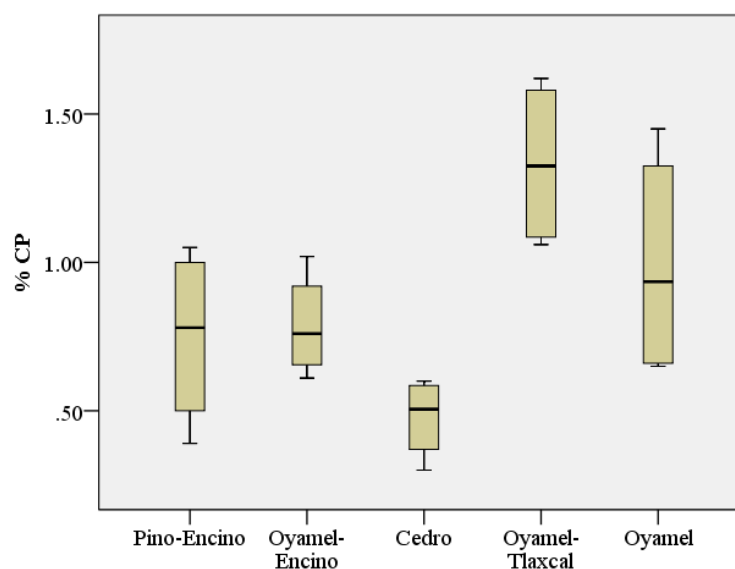


Figura 4. Contenido de CP en los suelos forestales bajo diferentes tipos de bosque, nivel de significación ($p \leq 0.05$).

IV. CONCLUSIONES

La vegetación es un factor importante en las diversas formas de carbono, interviene en los contenidos de carbono presente en los suelos forestales, los mayores porcentajes de CT y CO en suelos se presentaron con Oyamel y sus asociaciones con Encino y Tlaxcal.

Las formas de carbono en el suelo presentaron importantes variaciones según el tipo de bosque, en todos los suelos se presentan formas estables de CNo, y CP que no participan en los procesos bióticos del suelo y que por lo tanto, se mantienen estables por largos periodos de tiempo.

La fracción de CO representa más del 50% del CT en todas las zonas de estudio.

En el estudio del suelo como sumidero de carbono es importante tener en cuenta las diferentes formas de carbono presentes en él, ya que de esto depende su estabilidad y permanencia en el sistema edáfico.

REFERENCIAS

- [1] Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, IPCC. (2007) Cambio climático, informe de síntesis. http://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf, ultimo.
- [2] Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, IPCC. (2001). Third assessment report-climate change. The scientific basis: summary for policymakers. A report of working group I of the Intergovernmental.
- [3] FAO. (2002). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Captura de carbono en los suelos, para un mejor manejo de la tierra, Roma, Italia. Informes sobre recursos mundiales de suelos, p. 96.
- [4] H. I. Estrada, (2007). Carbono en biomasa aérea en suelo y su relación con la fracción fina de este reservorio, Colegio de Posgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo, de México, pp. 1-24
- [5] Z. G. Bai, D. L. Dent, L. Olsson, and M. E. Schaeppman, (2008). Proxy global assessment of land degradation. *Soil Use and Management*, vol. 24, pp. 223-234.
- [6] D. W. Johnson, J. D. Knoepp, W. T. Swank, J. Shan, L. A. Morris, D. H. Van Lear, and P. R. Kapeluck, (2002). Effects of forest management on soil carbon: results of some longterm resampling studies. *Environ. Pollut.*, vol. 116, pp. 201-208.
- [7] M. H. Gerzabek, R.S. Antil, I. Kögel Knabner, H. Knicker, H. Kirchmann, and G. Haberhauer, (2006). How are soil use and management reflected by soil organic matter characteristics: a spectroscopic approach. *Eur. J. Soil Science*, vol. 57, pp. 485-494.
- [8] H. E. Martínez, J. P. Fuentes, and H. E. Acevedo, (2008). "Carbono orgánico y propiedades del suelo", *Suelo y Nutrición Vegetal*, vol. 8 (1), pp. 68-96.
- [9] F. Macías, A. M. Campos, L. L. Rodríguez, (2005). Alternativas de secuestro de carbono orgánico en suelos y biomasa de Galicia. *IBADER. Recursos Rurais*, vol.1 (1), pp. 71-85.
- [10] B. F. L. Smith, (1994). Characterization of poorly ordered minerals by selective chemical methods. En: *Clay mineralogy spectroscopic and chemical determinative methods*. Wilson, M. J. (ed.) Chapman and Hall, London, pp. 333-357.
- [11] P. J. R. Vásquez, V. F. Macías, and F. J. C. Menjivar, (2011). Formas de carbono orgánico en suelos con diferentes usos en el departamento del Magdalena (Colombia). *Acta Agron.*, vol. 60 (4), pp. 369-379.
- [12] C. M. A. Segura, G. P. Sánchez, S. C. A. Ortiz, and C. M. C. Gutiérrez, (2005). Carbono orgánico de los suelos de México. *Terra Latinoamericana*, vol. 23, pp. 21-28.
- [13] G. Vela, J. López, and M. Rodríguez, (2012). Niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, centro de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, vol. 77, pp. 18-30.
- [14] C. F. Zavala (1995). Encinos Hidalguenses. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. 133 p.
- [15] M. Villavicencio, B. Pérez, Y. Marmolejo and F. Pérez. (1992). Programa de Manejo del Parque Nacional El Chico. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Pachuca, Hidalgo. 422 pp.
- [16] C. Galindo, S. Franco, M. Flores, C. Lazcano, S. Franco, and R. Cortés, (1988). Plan de Manejo Parque Nacional El Chico. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Pachuca, hidalgo. 55 p.
- [17] A. R. Geyne, C. Fries, K. Segerstrom, R.F. Black, and I.F. Wilson, (1963). Geology and mineral deposits of the Pachuca Real del Monte distric, state of Hidalgo, Mexico. Consejo de Recursos Naturales no Renovables, publication vol. 5E, 222 p.
- [18] D. V. S. Enciso, (1992). Propuesta de nomenclatura estratigráfica para la cuenca de México. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 10(1), pp. 26-36.
- [19] World Reference Base for Soil Resources. WRB. (1998). Report No 84. FAO-ISRIC-IUSS UISS IBU. <http://www.fao.org/waicent/faoinfo/agricult/agls/wrb/wrbdocs.htm>

- [20] M. Soto, L. Vázquez, and C. Lazcano, (2006). Programa de conservación y manejo Parque Nacional El Chico, México. CONANP. México. 236 p.
- [21] B. W. Gandoy, (1992). Manual de laboratorio para el manejo físico de suelo (temporal y riego. Parcela y cuenca) México: Universidad Autónoma de Chapingo, 20 p.
- [22] J. M. Skopp, (2000). Physical properties of primary particles A3-A17. In: SumnerME(ed). Handbook of soil science, (Ed in Chief). CRC Press USA.
- [23] N. A. Aguilar, (1987). Capacidad de intercambio catiónico. In: Aguilar, S. A., Etchevers, B. J. D. & Castellanos, R. J. Z. (eds.). Análisis Químico para Evaluar la Fertilidad del Suelo. Publicación Especial 1. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, México. pp. 93-107.
- [24] Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT 2000, Especificaciones de fertilidad, sanidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial 31 de diciembre de 2012.
- [25] SPSS Statistics versión 2,
http://www14.software.ibm.com/download/data/web/en_US/trialprograms/W110742E06714B29.html
- [26] O Acevedo-Sandoval, G. F. Prieto, and M. A. Gordillo. (2008). Identificar las fracciones de aluminio en un andosol del estado de Hidalgo, México. Revista de la Sociedad Geológica de España, vol. 21 (3-4), pp. 125-132.
- [27] E. M. Sandoval, L. N. Stolpe, E. Zagal-Venegas, M. Mardones-Flores, J. Celis-Hidalgo, (2008). Aporte de carbono orgánico de la labranza cero y su impacto en la estructura de un andisol de la precordillera andina chilena. Agrociencia, vol. 42(2), pp. 139-149.
- [28] S. Shoji, M. Nanzyo, and R. Dahlgren, (1993). Volcanic ash soils. Genesis. Properties and utilization. In: Soil Sc. 21. Elsevier. Amsterdam. 288 pp.
- [29] H. R. Chen, Y. Hou, H. L. Gong, M. Fan, and Y. Kuzyakov, (2009). Effects of 11 years of conservation tillage on soil organic matter fractions in wheat monoculture in Loess Plateau of China. Soil Till. Res. vol. 106, pp. 85-94.
- [30] J. Six, R.T. Conant, E.A. Paul, and K. Paustian, (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. Plant Soil, vol. 241, pp. 155–176.
- [31] J. B. Dixon, (2000) Functional roles of soil minerals. In R. Quintero–Lizaola, T. Reyna, T. L. Corlay, C. A. Ibáñez, H. N. E. García, C. (Eds.) 2000. La edafología y sus perspectivas al siglo XXI. Tomo I Colegio de Postgraduados en Ciencias agrícolas, Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Autónoma de Chapingo, México 434 pp.
- [32] C. E. Johnson, M. J. J. Ruiz, and G.B. Lawrence (2000) Forest soil chemistry and terrain attributes in a Catskills watershed. Soil Sci Soc. Am. J. vol. 64: pp. 1804–1814
- [33] C. M. Monreal, B. J. D. Etchevers, M. Acosta, C. Hidalgo, J. Padilla, R. M. López, L. Jiménez, and A. Velásquez. (2005). A method for measuring above-and below-ground C stocks in hillside landscapes. Can. J. Soil Sci. vol. 85, pp. 523-530.
- [34] M. M. Velazco, J. A. Almeida, T. P. Vidal, and F. Macías, (2010). Fraccionamiento químico de carbono en Acrisoles con horizontes sómbricos del Sur de Brasil. Rev. de Ciencias Agrarias. vol. 33 (1), pp. 277-286.
- [35] H. V. Avilés, M. A. Velázquez, P. G. Ángeles, B. J. D. Etchevers, P. H. de los Santos, and T. Llanderal, (2009). Variación en almacenes de carbono en suelos de una toposecuencia. Agrociencia, vol. 43, pp. 457–464.
- [36] M. S. Luis, G. A. Gómez, B. J. D. Etchevers, P. G. Ángeles, L. M. López, and W. R. Horwath, (2007). Acumulación de carbono orgánico en el suelo en reforestaciones de Pinus michoacana. Agrociencia, vol. 41, pp. 711–721.
- [37] H. D. M. Avendaño, M. M. Acosta, A. F., Carrillo, and B. J. D. Etchevers, (2009). Estimación de biomasa y carbono en un bosque de Abies religiosa. Revista Fitotecnia Mexicana, vol. 32, pp. 233–238.
- [38] J. Leifeld, and K. I. Kögel, (2005). Soil organic matter fractions as early indicators for carbon stock changes under different land-use? Geoderma, vol. 124, pp. 143–155.

- [39] M. M. Acosta, A. F. Carrillo, and L. M. Díaz, (2009). Determinación del carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Terra Latinoamericana*, vol. 27, pp. 105–114.
- [40] F. G. Cruz, & B. J. D. Etchevers, (2011). Contenidos de carbono orgánico de suelos someros en pinares y abetales de áreas protegidas de México. *Agrociencia*, vol. 45(8), pp. 849–862.
- [41] R. S. Pérez, M. I. Ramírez, L. P. F. Jaramillo, and F. Bautista, (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*, vol. 19(1), pp. 157-173.
- [42] R. Dahlgren, S. Shoji, and M. Nanzyo, (1993). Mineralogical characteristics of volcanic ash soils. In: S. Shoji, M. Nanzyo and R.A. Dahlgren, (Editors), *Volcanic ash soils: Genesis, properties and utilization. Developments in Soil Science 21*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, The Netherlands, pp. 101-143.
- [43] R.L. Parfitt, B.K.G. Theng, J.S. Whitton, and T.G. Shepherd, (1997). Effects of clay minerals and land use on organic matter pools, *Geoderma*, vol. 75, pp. 1-12.
- [44] J.S. Powers, and W.H. Schlesinger, (2002). Relationships among soil carbon distribution and biophysical factors at nested spatial scales in rain forest of northeastern Costa Rica. *Geoderma*, vol. 109, pp. 165-190.
- [45] C. Rumpel, and K. I. Kögel, (2011) Deep soil organic matter – a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. *Plant and Soil*, vol. 338, pp. 143-158.