

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SAN LUIS POTOSI
FACULTAD DE AGRONOMIA Y VETERINARIA**



**VARIACIÓN DEL CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS
DEL ALTIPLANO POTOSINO OESTE**

Por:

Víctor Alfonso Villegas García

**Tesis presentado como requisito parcial para obtener el título de
Ingeniero Agrónomo Zootecnista**



**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SAN LUIS POTOSI
FACULTAD DE AGRONOMIA Y VETERINARIA**



**VARIACIÓN DEL CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS
DEL ALTIPLANO POTOSINO OESTE**

Por:

Víctor Alfonso Villegas García

**Tesis presentado como requisito parcial para obtener el título de Ingeniero
Agrónomo Zootecnista**

Asesor. Dr. Jorge Alberto Flores Cano

Asesor. MC. Felipe de Jesús Morón Cedillo

Asesor. Dr. Cesar Posadas Leal

Asesor externo. Dr. Juan Felipe Montoya Martínez

Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P.

Septiembre 2014

La Tesis Profesional titulada **“VARIACIÓN DEL CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS DEL ALTIPLANO POTOSINO OESTE”** fue realizada por Víctor Alfonso Villegas García, como requisito parcial para obtener el título de Ingeniero Agrónomo Zootecnista, fue revisado y aprobado por el suscrito Comité de Tesis.

Dr. Jorge Alberto Flores Cano

Asesor

MC Felipe de Jesús Morón Cedillo

Asesor

Dr. Cesar Posadas Leal

Asesor

Ejido Palma de la Cruz, Municipio de Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P. a los 21 días del mes de Agosto del 2014.

DEDICATORIAS

Para:

Sofía García Bermúdez

Zito Villegas Espinosa

Neftalí

Juan José

Salvador

Norma

Rocío

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

A la Facultad de Agronomía y Veterinaria.

A el Colegio de Posgraduados Campus San Luis.

A los asesores de este trabajo:

Dr. Jorge Alberto Flores Cano

MC. Felipe de Jesús Morón Cedillo

Dr. Cesar Posadas Leal

Dr. Juan Felipe Martínez Montoya

Dr. Genaro Olmos Oropeza

CONTENIDO	Pág.
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
CONTENIDO.....	v
ÍNDICE DE CUADROS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN.....	viii
SUMMARY.....	ix
INTRODUCCIÓN.....	1
Hipótesis.....	2
Objetivos.....	2
REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
Ciclo del Carbono.....	3
Captura de Carbono en los Ecosistemas.....	4
Materia Orgánica del Suelo (MOS).....	6
Estabilización del Carbono en el Suelo.....	7
Reservas de Carbono en el Suelo.....	8
Factores que Intervienen en la Captura de Carbono en el Suelo.....	10
Cuantificación de Carbono Orgánico en Suelo.....	11
MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
Área de Estudio.....	13
Metodología.....	14
Análisis Estadístico.....	15
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	17
Comparación entre Métodos de Determinación.....	17
Carbono en Suelo por Vegetación.....	20
Carbono en Suelo por Topografía.....	22
Características Físico-Químicas del Suelo.....	24
Carbono Orgánico del Suelo y Propiedades del Suelo.....	24
CONCLUSIONES.....	28
LITERATURA CITADA.....	29

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Contenido promedio de Carbono Orgánico en Suelo (COS) por entidad federativa.....	9
2	Contenidos de carbono en suelo (% y T ha ⁻¹) estimado por los métodos de ignición, oxidación, autoanalizador y total, en el Altiplano Potosino Oeste, S. L. P.....	17
3	Contenido de carbono en suelo (% y T ha ⁻¹) estimado por tres métodos, por tipo de vegetación del Altiplano Potosino Oeste, S. L. P.....	21
4	Contenido de carbono en suelo (% y T ha ⁻¹) estimado por tres métodos, por tipo de topografía del Altiplano Potosino Oeste, S. L. P.....	23

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Diagrama del Ciclo del Carbono en un agrosistema (Àlvarez, 2006).....	4
2	Relación entre los porcentajes de carbono determinados por los métodos de autoanalizador (TOC) e ignición, para los suelos del Altiplano Potosino Oeste, S. L. P.....	19
3	Relación entre los porcentajes de carbono determinados por los métodos de autoanalizador (TOC) y Walkley y Black (oxi) para los suelos del Altiplano Potosino Oeste, S. L. P..	19
4	Profundidad y densidad aparente promedio en suelos de los distintos tipos de vegetación del Altiplano Potosino Oeste, S. L. P.....	22
5	Propiedades físico-químicas de los suelos del Altiplano Potosino Oeste, S. L. P.....	24

RESUMEN

Los suelos de regiones áridas representan un almacén importante de carbono orgánico e inorgánico, por lo que es necesario contar con los mejores medios para su determinación (Burgos *et al.*, 2012). Para medir el carbono en suelos, tradicionalmente se utilizan las técnicas analíticas de ignición, de Walkley-Black y mediante un autoanalizador. Este último consiste en la combustión seca de una muestra a 900-1000°C en un sistema cerrado, considerándose el método de referencia para medir este elemento en materiales sólidos como el suelo (Padilla *et al.*, 2011). Considerar los factores que alteran las estimaciones de carbono en un suelo, como lo pueden ser las determinaciones por diferentes métodos, la topografía y la vegetación, representan acciones para el mejor uso del recurso. El objetivo de este trabajo fue estimar los contenidos de carbono orgánico por tres métodos (ignición, Walkley y Black y autoanalizador) y carbono total, en suelos del Altiplano Potosino Oeste para varias topoformas y tipos de vegetación. Asimismo, representar la relación del carbono con las propiedades físicas y químicas del suelo, en ecuaciones de predicción. No existió diferencia significativa ($p>0.05$) entre las determinaciones medias para los métodos Walkley y Black y de autoanalizador, esto en relación con las diferentes condiciones de muestreo; pero al momento de correlacionar las determinaciones 1:1 de los métodos, se encontró una relación baja ($r^2= 0.48-0.46$). La variable independiente físico-química que más influyó en las ecuaciones de predicción fueron los carbonatos de calcio ($p<0.0001$).

SUMMARY

The soils of arid regions are an important store of organic and inorganic carbon, so it is necessary to have the best means for determining (Burgos *et al.*, 2012). For measuring soil carbon traditionally been used analytical techniques ignition, Walkley-Black and using an autoanalyzer. The latter consists on the combustion dried of the sample at 900-1000°C in a closed system, it is considered the reference method for measuring this element in solid materials such as soil (Padilla *et al.*, 2011). Consider factors that alter the estimates of carbon in soil; as can be determinations by different methods, topography and vegetation, represent actions for the best use of the resource. So the objective was to estimate the organic carbon content of three methods (ignition, Walkley and Black and autoanalyzer) and total carbon in soils of the Western Altiplano Potosi for several topography and vegetations. Besides representing the relation of carbon to the physical and chemical soil properties in the prediction equations. There was no significant difference ($p > 0.05$) between the mean determinations for Walkley and Black autoanalyzer methods and this for different sampling conditions; but at the time correlate 1:1 determinations methods, a low relation ($r^2 = 0.48$ to 0.46) was found. The independent variable physicochemical that most influenced in the prediction equations were carbonates of calcium ($p < 0.0001$).

INTRODUCCIÓN

El carbono en los suelos se torna importante en los últimos años, tanto en relación con la concentración del CO₂ atmosférico y sus implicaciones en el cambio climático (Lal *et al.*, 2007), o como indicador de sustentabilidad (Cruz y Etchevers, 2011). Para proponer estrategias viables respecto al manejo de los recursos naturales y del suelo, principalmente, es indispensable conocer la dinámica del carbono. Un primer paso para lograr este objetivo, es contar con la información básica sobre los contenidos de carbono en el ecosistema (Ordóñez y Masera, 2001).

En México existen estudios del contenido de carbono a escala regional y local, sin embargo, éstos se refieren al presente en la vegetación y pocos toman en cuenta el del suelo (Segura *et al.*, 2005). El que se estudie poco al carbono orgánico en el suelo quizás se deba a que su inventario a escala de país, es una tarea extremadamente difícil de realizar, dada las limitaciones de disponibilidad de muestreos extensivos (Paz *et al.*, 2010).

Para estimar el potencial de secuestro de carbono en el suelo, es necesario distinguir dos aspectos: la reserva del carbono y sus cambios (FAO, 2002), reservas que son variables en el tiempo y en el espacio (Post *et al.*, 2001). La cantidad de carbono edáfico depende principalmente de la humedad edáfica, la temperatura del aire y la edáfica, que a su vez está relacionada con la radiación solar incidente, la exposición, de la pendiente, de la cobertura vegetal, tipo de vegetación y época del año (Gómez *et al.*, 2003). La FAO (2002) recomienda que los datos de suelo, deberían servir para determinar las existencias de carbono en el suelo, mientras que los factores del suelo y los climáticos son importantes para explicar el almacenamiento de carbono a largo plazo; los cambios de vegetación o uso de la tierra determinan los cambios en el secuestro de carbono en períodos más cortos.

La determinación del carbono orgánico en el suelo (COS) se realiza por diversos métodos: por combustión húmeda utilizando el método de Walkley y Black (García *et al.*, 2006), por ignición (Davis, 1974) o mediante el uso de un autoanalizador (Avilés *et al.*, 2009), siendo este último el más preciso (Videla *et al.*, 2008).

Para conocer la cantidad de carbono en el suelo a cierta profundidad se usa la densidad aparente y la profundidad (González *et al.*, 2008). Con base en lo anterior, los objetivos fueron determinar la cantidad de carbono orgánico en suelos (COS) del Altiplano Potosino Oeste, considerando su uso; y conocer la relación del COS con algunas propiedades físicas y químicas como el pH _(1:2) _(CaCl₂), conductividad eléctrica (dS/m _(1:2) _(H₂O)), densidad aparente (g/cm³) y carbonatos (%).

Hipótesis

La cantidad de carbono orgánico del suelo no varía con la topoforma y ni con el tipo de vegetación.

La cantidad de carbono orgánico no se relaciona con ninguna de las propiedades físico-químicas del suelo.

Objetivos

Estimar el contenido de carbono orgánico en suelo del Altiplano Potosino Oeste en varias topoformas y tipos de vegetación.

Conocer la relación del carbono orgánico con varias propiedades físicas y químicas del suelo.

REVISIÓN DE LITERATURA

Los flujos de carbono orgánico entre el suelo y la atmósfera, pueden ser positivos bajo la forma de captura o negativos como emisión de CO₂ (FAO, 2002). Una contribución importante, para reducir el CO₂ en la atmósfera, es incrementar los reservorios de carbono edáfico, el cual tiene tiempos medios de residencia más prolongados que la vegetación (Céspedes *et al.*, 2012). La toma de acción para la captura de carbono bajo el Protocolo de Kyoto, u otro tratado, no sólo estimulará cambios importantes en el manejo de los suelos, sino que también, por medio de un incremento en el contenido de materia orgánica, tendrá efectos significativos directos en sus propiedades y un impacto positivo sobre las cualidades ambientales (FAO, 2002). Pequeños cambios en la tasa de secuestro de carbono (C) en los suelos por unidad de área, puede tener un impacto significativo en el balance a nivel global (Almendros, 2004).

Ciclo del Carbono

El carbono es el cuarto elemento de mayor abundancia en la Tierra (Harrison, 2003) y se estima que constituye aproximadamente el 50% de peso seco de cualquier organismo (Schimel, 1995); además, se encuentra en el agua como compuestos carbónicos disueltos y en el aire como dióxido de carbono (Ordóñez, 1999; Zamora, 2003).

El ciclo del C en un agrosistema inicia cuando este ingresa en el proceso de fotosíntesis y sale del mismo por la respiración radical y microbiana; la diferencia entre la cantidad que ingresa al suelo como residuos vegetales y la que se genera por respiración microbiana representa el balance del mismo. Durante la descomposición de la biomasa, además de nutrientes, se libera CO₂, mismo que también es emitido por el proceso de mineralización de la materia orgánica humificada. La suma de la emisión de CO₂ por descomposición y mineralización constituye la respiración microbiana del suelo. El carbono que no es emitido como CO₂ durante la descomposición pasa a formar parte de la biomasa microbiana en un primer momento y luego se integra a sustancias

orgánicas más estables y se denomina carbono humificado (Figura. 1) (Ibañez *et al.*, 2004; Sosa, 2012).

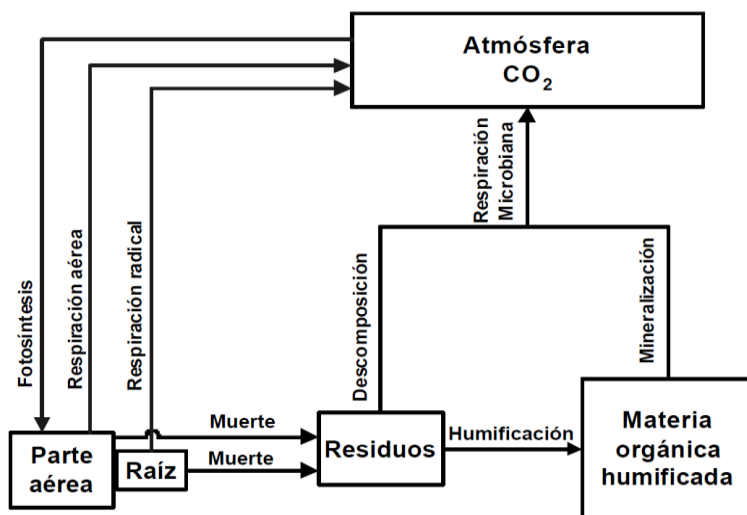


Figura 1. Diagrama del Ciclo del Carbono en un agrosistema (Álvarez, 2006)

Captura de Carbono en los Ecosistemas

El concepto de captura o secuestro de carbono integra la idea de conservarlo donde es inminente su pérdida (Tipper, 2000). Los ecosistemas que retiran dióxido de carbono de la atmósfera se conocen bajo el nombre de sumideros (Becerril *et al.*, 2007), y son los bosques los que almacenan la mayor cantidad de carbono tanto a nivel de vegetación como de suelo; un estudio en Michoacán demostró que las existencias de carbono total en bosques de pino y encino ($222.9-266.9 \text{ T ha}^{-1}$) fueron mayores que en áreas agrícolas ($82.7-90.8 \text{ T Cha}^{-1}$) (Casanova *et al.*, 2011). Zambrano *et al.* (2004), mencionan que los bosques cubren el 29% de las tierras y contienen el 60% del carbono de la vegetación terrestre, siendo estos ecosistemas los que más carbono secuestran por unidad de superficie, conteniendo cerca del 40% del total de carbono. Los bosques de México representan un almacén de carbono aproximado a 685 T C ha^{-1} (Masera *et al.*, 1997). Aunque las tasas de captura de carbono, dependen de la edad, la composición, la estructura de la vegetación (Schulze *et al.*, 2000), y del ecosistema (Masera *et al.*, 2001; Casanova *et al.*, 2011), los bosques naturales pueden considerarse en equilibrio

dinámico en relación con el carbono bajo ciertas condiciones climáticas, para ciertas concentraciones atmosféricas de CO₂ (FAO, 2002), y en ausencia de deforestación.

Para las áreas agrícolas, que podrían cubrir el 50% del planeta en el año 2040, se tiene una tasa de ganancia de carbono de 0.32 T C ha⁻¹ año⁻¹ para países industrializados y de 0.36 T C ha⁻¹ año⁻¹ para países en desarrollo. Las tierras de pastoreo tienen una tasa de ganancia de 0.80 T C ha⁻¹ año⁻¹ (Watson *et al.*, 2000), y los sistemas agroforestales tienen el potencial de almacenamiento de carbono de entre 12 y 228 T C ha⁻¹ teniendo mayor potencial en las zonas del trópico húmedo (Dixon, 1995); tienen la capacidad de almacenar en la biomasa aérea 70 T C ha⁻¹ y 25 T C ha⁻¹ en los primeros 20 cm de profundidad del suelo (Mutuo *et al.*, 2005). En tierras de cultivo degradadas las tasas promedio de captura de carbono son de 3.1 T C ha⁻¹ año⁻¹ con agroforestería permanente y 0.7 T C ha⁻¹ año⁻¹ para el manejo de pastizales (Watson *et al.*, 2000). Los humedales que sólo cubren el 5% de la superficie terrestre, constituyen importantes sumideros de carbono contribuyendo en un 40% en la captura de CO₂; los humedales estuarinos tienen una capacidad de secuestro de carbono por unidad de área mucho mayor que otros sistemas de humedales y almacenan carbono con una liberación mínima de gases de efecto invernadero (GEI) debido a la inhibición de la metano-génesis por los sulfatos (Magenheimer *et al.*, 1996; Mitsch y Gosselink, 2000; Bridgham *et al.*, 2006; citados por Moreno *et al.*, 2010).

Becerril *et al.* (2012), al estimar el contenido de carbono en biomasa aérea para un matorral espinoso en una unidad de escurrimiento en donde se realizan prácticas de conservación de suelos, retención de humedad y extracción de madera, encontró que para tres sitios (con vegetación, con poca cobertura vegetal y sin vegetación), la captura de carbono fue de 42.40, 20.53 y 4.87 T C ha⁻¹, respectivamente. Valores por debajo de los 69 T C ha⁻¹ en promedio estimadas en un bosque en Michoacán, México, con especies vegetales con potencial de almacenaje en *Quercus*, 6.58 T C ha⁻¹, *Abies* 35.07 T C ha⁻¹ y *Pinus* 28.85 T C ha⁻¹ (Zamora, 2003). Sin embargo, debido a la gran extensión que representan las zonas áridas y semiáridas, dentro de las que se localizan los matorrales, representan también un gran potencial para secuestrar y almacenar carbono, entre otros beneficios ambientales, como retención de humedad, regulación del clima, etcétera (Becerril *et al.*, 2012). Otro factor a considerar es que los suelos de tierras áridas tienen

menor probabilidad de perder carbono que los suelos húmedos (Glenn *et al.*, 1992), en consecuencia el tiempo medio de residencia del carbono en las tierras áridas es largo, algunas veces más que en los suelos de los bosques (FAO, 2007).

Materia Orgánica del Suelo (MOS)

Diversos estudios coinciden en que la materia orgánica (MO) es el indicador que posee la influencia más significativa sobre la calidad de suelo y su productividad (Gregorich *et al.*, 1994). Además, es un indicador clave en las funciones agrícolas (producción y economía), así como en funciones ambientales como la captura de carbono (FAO, 2002), e inmovilización de metales pesados (Siebe, 1999). El carbono orgánico, al ser el principal componente de la materia orgánica del suelo, se utiliza como un indicador de calidad del suelo relacionándolo con la sustentabilidad de los ecosistemas, cantidad y disponibilidad de nutrientes del suelo (Martínez *et al.*, 2008). También se utiliza como un indicador sensitivo en la selección de sitios para el establecimiento de plantaciones (Bautista *et al.*, 2011), y en los últimos años se ha puesto especial interés en el suelo, como reservorio de carbono a escala global (Batjes, 1996).

La MOS puede ser dividida en: “viva” y “no viva”. (Skjemstad *et al.*, 1998). La biomasa edáfica, que no representa más de un 5% de la MOS (Sosa, 2012), y las raíces de la planta podrían asimilarse como la fracción “viva” de la MOS; por su parte, la fracción “no viva” constituye la mayor parte de la MOS (más del 95%), y es la que contribuye a la estructura del suelo y en gran número de funciones físicas, químicas y biológicas (Skjemstad *et al.*, 1998). Aunque es indudable que la mayoría, si no es que todas las fracciones de la MO, habrían de estar involucradas en la agregación, y secuestro de carbono en el suelo pero en grados y escalas diferentes dependiendo del suelo, tipo de clima y condiciones de cultivo (García, 2007). El conocimiento y la predicción del tiempo de renovación de la MOS es esencial para prever la evolución de los flujos de carbono orgánico y de las funciones ambientales de los suelos. En los modelos de dinámica del carbono orgánico en el suelo se distinguen frecuentemente tres compartimentos: el carbono lábil, con un tiempo de residencia de algunos días o algunos años; el carbono intermedio, con un tiempo de residencia de algunos decenios; y el

carbono estable, con un tiempo de residencia de algunos siglos a millares de años (Parton *et al.*, 1987).

Estabilización del Carbono en el Suelo

Para la formación de agregados, y con ello la protección del carbono orgánico en el suelo (COS), se requiere la floculación de material coloidal como la arcilla y la posterior protección ya sea: a) física: por contacto con raíces (Betancourt *et al.*, 1999), encapsulado de los fragmentos de la MO por partículas de arcilla o por los macro y microagregados; b) química: uniones especiales de la MO con constituyentes del suelo, coloides o arcillas (FAO, 2002) y c) bioquímica: considerada como la estabilización debido a su composición química (compuestos recalcitrantes como lignina o polifenoles). Los tres reservorios de la MOS son: MOS protegida por limo y arcilla (complejo órgano-mineral) <53 μ m; MOS protegida en microagregados (53-250 μ m) y macroagregados (>250 μ m); pero Noordwijk *et al.* (1997) sugirieron que debido a la diversidad de los componentes de la MO, no debe de generalizarse su influencia en las propiedades físicas y químicas del suelo. Por su parte Hassink y Whitmore (1997) propusieron un modelo para la protección de la MOS basado en el déficit de saturación de carbono del suelo el cual representa la capacidad limitada de un suelo para proteger el carbono y la fracción del suelo ocupada con MO, indicando que la tasa de MOS protegida es proporcional al déficit de saturación e inversamente proporcional a la tasa de mineralización de carbono. Matus y Maire (2000), determinaron algo similar, donde la acumulación de la MO depende de la tasa de mineralización que está relacionada con el grado de saturación de carbono en las partículas de arcillas y limo, así como del contenido de carbono en el suelo, más que del contenido de arcillas o del contenido de MO.

El impacto de la MO sobre la estructura del suelo, relacionada con el número y estabilidad de los agregados, es frecuentemente descrito por el contenido de carbono orgánico (Uriostegui, 2006) ya que el COS actúa como un núcleo central en la formación de los agregados (Chan *et al.*, 2003). Por ejemplo, la estabilidad decrece cuando los contenidos de COS se ubican por debajo de 1.2-1.5%, se sugiere un nivel crítico de 2%, debajo del cual se da un deterioro de la estructura del suelo especialmente

cuando no es suficiente el contenido de CaCO_3 (Kemper y Koch, 1966; Greenland *et al.*, 1975). Por otra parte, se dice que la estabilidad de los agregados del suelo tiene más relación con la naturaleza química de la MO que con la cantidad de COS (Doormar, 1983; citado por Uriostegui, 2006). Por ejemplo, a mayor contenido de lignina mayor cantidad de humus producido; y la naturaleza de las sustancias húmicas producidas tiene relevancia, ya que los ácidos fúlvicos tienen una estructura más sencilla que los hace más solubles en comparación que los ácidos húmicos (Labrador, 2001).

Reservas de Carbono en el Suelo

La cantidad de carbono almacenada en suelos es alta, ya que contienen 1 500 Pg a un metro de profundidad, alrededor de tres veces más C que la vegetación (650 Pg de C) y dos veces más que la presente en la atmósfera (750 Pg de C) (FAO, 2007), siendo los océanos los que más carbono contienen 38 000 Pg de C (FAO, 2002). Además, el potencial del suelo para secuestrar C es alto a través de los procesos de humificación y de formación de complejos órgano-minerales (Sales, 2006). Estimaciones de carbono inorgánico en suelo establecen reservas alrededor de 1 700 Pg (FAO, 2002).

Los suelos que acumulan la mayor cantidad de COS corresponden al orden Histosol (357 Pg) aun cuando son los de menor superficie con respecto a otros órdenes, ya que su relación COS/Área es de $0.205 \text{ Pg } 10^{-3} \text{ km}^2$ (Martínez *et al.*, 2008). Segura *et al.* (2005), en 4 583 muestras de suelo (0-20 cm de profundidad), determinaron el COS; y concluyeron que en esa profundidad en promedio existe en total 10.5 Pg de COS (Cuadro 1). Respecto al carbono inorgánico en suelo, estimaciones de la FAO (2002) establecen reservas aproximadas de 1 700 Pg. Según Bouwman y Sombroek (1990), a nivel mundial la formación de tepetate puede suponer un sumidero de carbono relativamente pequeño pero de cierta importancia. En México más del 11% de la superficie presenta algún tipo de tepetates (Etchevers *et al.*, 2006). Aunque el tepetate no es suelo, si se habilita artificialmente para la agricultura, especialmente el tepetate tipo fragipán que se reblandece cuando está húmedo, tiene potencial para la acumulación de COS estimado en $90 \text{ T de C ha}^{-1}$ en los primeros 20 cm de profundidad; sin embargo, su acumulación decrece rápido hasta alcanzar un equilibrio. En su condición natural los tepetates tipo fragipán contienen sólo trazas de COS 0.11%, pero con un manejo

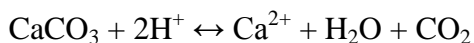
agronómico alcanzan valores cercanos a 1.5%; comparado con tepetates con sistemas de labranza convencional los que alcanza valores de 0.5-0.6% de COS (Báez *et al.*, 2010).

Cuadro 1. Contenido promedio de Carbono Orgánico en Suelo (COS) por entidad federativa.

Estado	(Pg)	Contribución total (%)
Aguascalientes	0.01	0.09
Baja California	0.14	1.32
Baja California Sur	0.11	1.04
Campeche	0.66	6.24
Coahuila	0.42	3.97
Colima	0.03	0.28
Chiapas	0.7	6.62
Chihuahua	0.93	8.79
Distrito Federal	0.01	0.09
Durango	0.59	5.58
Guanajuato	0.13	1.23
Guerrero	0.36	3.40
Hidalgo	0.16	1.51
Jalisco	0.43	4.06
Estado de México	0.11	1.04
Michoacán	0.36	3.40
Morelos	0.02	0.19
Nayarit	0.11	1.04
Nuevo León	0.23	2.17
Oaxaca	0.48	4.54
Puebla	0.16	1.51
Querétaro	0.13	1.23
Quintana Roo	0.73	6.90
San Luis Potosí	0.5	4.73
Sinaloa	0.18	1.70
Sonora	0.5	4.73
Tabasco	0.15	1.42
Tamaulipas	0.5	4.73
Tlaxcala	0.01	0.09
Veracruz	0.57	5.39
Yucatán	0.89	8.41
Zacatecas	0.27	2.55

1 Pg = 10¹⁵g; 1 Gg = 10⁹g; 1 Tg = 10¹²g 1 Mg = 1000000 g (Segura *et al.*, 2005).

Aunque el carbono inorgánico del suelo es relativamente estable puede liberar CO₂ en cantidades estimadas de 0.2 a 0.4 Kg C ha⁻¹, cuando los carbonatos están expuestos a la erosión (Lal, 2001). En teoría la emisión es resultado de la disolución de los CaCO₃ vía reacción (Serna *et al.*, 2006):



Sin embargo, Báez *et al.* (2006), determinaron que la tasa de emisión de CO₂ es proporcional al contenido de COS. Como sucede en los suelos agrícolas donde se ha perdido 30-75% de su COS (Lal *et al.*, 2007), especialmente los tropicales, por efecto antropogénico, calculando que se han perdido 20-80 Mg ha⁻¹ de C; que en su mayoría es liberado a la atmosfera, ya que en la capa arable la MO disminuye por el incremento de la temperatura superficial, la falta de su restitución y la destrucción de macro y microagregados (Trumper *et al.*, 2009).

Factores que Intervienen en la Captura de Carbono en el Suelo

Álvarez *et al.* (2013) al considerar la altitud, determinaron que los almacenes de C (220 Mg C ha⁻¹) se mantenían constantes en los primeros 1500-2000 m, pero a partir de los 2400-2500 metros la capa orgánica disminuyó drásticamente a 158 Mg C ha⁻¹. Contrario a lo anterior, Carvajal (2008) encontró que en la capa 20-30 cm del suelo el COS no se correlacionó con la altura sobre el nivel del mar.

El COS parece presentar una correlación positiva y altamente significativa con la capacidad de intercambio catiónico del suelo, seguido por la altitud y en menor medida por el calcio, el aluminio y el limo (Ochoa *et al.*, 2000). La glomalina, proveniente de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA), puede tener estrecha correlación ($r=0.91$) con la acumulación de C en suelos de origen volcánico, aportando en promedio el equivalente al 15% del COS, aunque las acumulaciones siguen una tendencia logarítmica (Báez *et al.*, 2010). En este contexto la glomalina puede participar en el recubrimiento de los residuos orgánicos, debido al alto contenido de C (30-50%), recalcitrancia, hidrofobicidad y fácil producción, representando una fuente de secuestro de C en el suelo (González *et al.*, 2004). En suelos de origen volcánico Betancourt *et al.* (1999), hallaron correlación significativa entre la densidad de las raíces y la estabilidad de los agregados, y no hubo relación con la materia orgánica, nitrógeno total ni con conductividad eléctrica.

La influencia de la época del año (lluvias y secas), parece afectar el contenido de COS (Beteta, 2012) y donde la vegetación tiene un rol importante; por ejemplo, cuando disminuye la cobertura de *Acacia caven* a un rango de 25-50% se reduce un 41% el C

almacenado a los 40 cm de profundidad (Muñoz, 2006). Respecto al pH Leifeld *et al.* (2008), establecen que su influencia sobre el CO se debe a su relación con la actividad biológica, disminuyendo las tasas de descomposición de la MO en condiciones de acidez. Bai *et al.* (2012), determinaron una correlación negativa y significativa entre el COS y el pH y densidad aparente; por otro lado existió una correlación positiva con la humedad; investigaciones, citadas por el mismo autor (Mitsch y Gosselink, 2000; Sparks, 2003), reportan que el pH del suelo y la salinidad tienen mayor influencia en la estructura del suelo.

Por otra parte, Moreno *et al.* (2010), en un bosque de manglar, no encontraron correlación entre el carbono con la humedad del suelo, la conductividad eléctrica, el pH, densidad aparente, ni con el contenido de nitrógeno; solamente con la MO. También reportan que la MO fue más alta en los primeros 30 cm de profundidad y fue afectada por la edad del bosque y la estación del año, siendo más alta en la estación seca. Otros factores determinantes son la etapa de desarrollo del suelo, el tamaño de los agregados, contenido de arena, nivel de complejos organo-minerales, eventos naturales como inundaciones, textura (Sánchez *et al.*, 2011; Ćirić *et al.*, 2013), profundidad del suelo (Pulido *et al.*, 2010), origen geológico del suelo, CaCO₃, relación C:N (Cruz y Etchevers, 2011), efecto del pastoreo (Céspedes *et al.*, 2012) y topografía (Avilés *et al.*, 2009).

Cuantificación de Carbono Orgánico en Suelo

La determinación de carbono orgánico se puede realizar por diversos métodos: a) combustión seca en un analizador automático tal como el equipo Shimadzu 5050 (Echevers *et al.*, 2001), b) con el analizador elemental de gases CHON (Jurado *et al.*, 2013), c) por digestión húmeda utilizando la técnica de Walkley y Black (Segura *et al.*, 2005) quizá la más utilizada; para expresar los resultados por este método se debe tener presente que las distintas fracciones poseen diferente composición porcentual de CO, considerando una composición errónea puede subestimarse del orden del 38% (Galantini *et al.*, 1994), d) por ignición (Davis, 1974), e) espectroscopía ultravioleta, visible (UV-VIS) e infrarroja (IR) (Labrador, 2001).

Para transformar los valores de CO a MO se utilizan factores de conversión de 1.72 a 2.0, el factor de conversión usado está determinado por la proporción de carbono en la MO del suelo, asumiendo un rango de 50-58% (García, 2007), pero debido a que existe una considerable variación entre diferentes suelos y horizontes, es preferible informar el valor de COS sin transformar (Allison, 1965). En general el COS se puede calcular considerando la densidad aparente (D_a , g/cm), la profundidad (Pr , cm) y de la cantidad de CO del suelo (C , %), según la fórmula que menciona González *et al.* (2008):

$$COS = D_a * Pr * C$$

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El área de estudio comprende la Región Altiplano específicamente la microrregión Altiplano Potosino Oeste, integrada por los municipios de Salinas, Villa de Ramos y Santo Domingo (8869 000 Ha). La población total es de 80 161 habitantes; Salinas tiene 30 190 habitantes, Villa de Ramos tiene 37 928 habitantes y Santo Domingo tiene 12 043 habitantes (INEGI, 2010). Los municipios se encuentran dentro de la unidad fisiográfica denominada Llanuras y Sierras Potosino-Zacatecanas, con extensos terrenos áridos, el área presenta pequeñas mesetas y cerros aislados. La vegetación corresponde a matorralmicrofilo, pastizal halófilo, matorral crasicaule, matorral rosetófilo, vegetación halófito y pastizal natural, además de vegetación secundaria. El clima corresponde a los secos y dentro de estos los que caracterizan la microrregión son: seco templado (BS_oKw) con lluvias en verano y verano cálido con temperatura entre $12^{\circ}C$ y $18^{\circ}C$, la precipitación total anual es entre 300 mm y 400 mm; otro clima presente es el semi-seco templado (BS_1kw), con temperatura de $16^{\circ}C$ a $18^{\circ}C$ y la precipitación entre 400 mm a 600 mm; y el clima seco templado ($BS_oKw [x]$), donde las temperaturas son del rango de $12^{\circ}C$ a $18^{\circ}C$ y la precipitación total anual varía de 300 mm a 400 mm distribuida a lo largo de todo el año (INEGI, 2002).

En cuanto a relieve dominan colinas muy ligeramente inclinadas (76.7%), colinas ligeramente inclinadas (4%) planicie aluvial (7.8%), planicie lacustre (2.5%), planicie eólica (0.7%), valle acumulativo (5.4%), lomeríos medianamente ondulados (1.7%), ligeramente ondulados (0.6%) y fuertemente inclinados (0.5%). Los suelos predominantes son los Xerosoles (X) de textura media con subunidades: háplico (Xh) (45.8%), lúvico (Xl) (1.3%) y cálcico (Xk) (5.8%) y Litosoles (I) (36.6%). Otras unidades de suelo son: Castañozemháptico (3.2%) Regosol (R), con subunidad predominantemente calcárico (Rc , 1.3%); Planosoleútrico (1.3%). La litología corresponde principalmente a material Aluvial (84.5%), Caliza (4.3%), Lutita-Arenisca (3.8%), Conglomerado (3.3%), Basalto (1.2%); con menos del uno por ciento: Esquisto, Riolita, Riolita-Toba ácida, Lacustre, Caliza-Lutita, Toba ácida, Granito y Andesita (INEGI, 2002).

Metodología

Se realizó un muestreo 41 sitios, donde se consideró: topografía (planicie lacustre, planicie aluvial, loma, ladera y bajío), vegetación (zacatal, zacatal salino, zacatal-gobernadora, nopalera, gobernadora, gobernadora-izotal y barbecho). Se tomaron muestras del primer horizonte de cada sitio, donde la profundidad varió de 15 a 35 cm. Las muestras de suelo se secaron al aire y se tamizaron en malla número 100, para el análisis de carbono orgánico por autoanizador y en mufla. Para las determinaciones de pH $(1:2)_{(CaCl_2)}$, conductividad eléctrica $(dS/m)_{(1:2)_{(H_2O)}}$, densidad aparente (g/cm^3) y carbonatos (%), las muestras se tamizarón en malla 2 mm.

Los análisis realizados fueron: a) Carbón orgánico total (COS TOC %); determinado con el analizador automático, Shimadzu TOC 5050 en el laboratorio de fertilidad de suelos del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo; b) materia orgánica por el método Walkley y Black (1934) (COS oxi), el carbono orgánico se obtiene al dividir el porcentaje de materia orgánica entre 1.724, suponiendo que el 58% de la MO es carbono $(1/0.58)$; c) Carbono orgánico por ignición (COS Ignición), en el cual ≈ 1 g de suelo fue secado en horno (Felisa ®) a $105^\circ C$ durante 24 horas, para después calcinarse a $650^\circ C$ por 8 horas en mufla (Novatech® Mod.12) y así obtener la pérdida de peso del material calcinado, que corresponde a la MO, y realizar la estimación según la fórmula que mencionan Steubing *et al.* (2001); este porcentaje de MO, se multiplica por el factor de conversión 0.58 o dividido entre 1.724, para obtener el porcentaje de carbono orgánico del suelo, en este caso se multiplicó; d) Carbono inorgánico se estimó a partir de los carbonatos de calcio ($\% \text{ Carbonatos} * 12 / 100$), en el laboratorio de fertilidad de suelos del COLPOS, éstos se obtienen por el método de neutralización con HCl, considerando que el C inorgánico es proveniente de los carbonatos de calcio; sin embargo es necesario considerar que pueden haber otros carbonatos como de Na y Mg que pueden interferir en las cuantificaciones, por lo que para una medición más precisa es necesario su determinación; e) Carbono total (COS oxi + Carbono inorgánico); f) pH con potenciómetro, según la norma NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2000), en una relación suelo/agua destilada, 1:2, y en relación 1:2 suelo: Cloruro de calcio ($CaCl_2$) a 0.01 M; el uso de $CaCl_2$ se fundamenta en que el resultado obtenido es independiente de

la concentración de sales. En suelos no salinos, la lectura se estabiliza más rápido, el resultado de pH no es afectado por el tiempo de almacenaje del suelo seco y el valor de pH casi no es afectado por la relación suelo: solución en un intervalo amplio; g) Conductividad eléctrica (dS/m), utilizando las muestras preparadas para pH, se determinó la Conductividad eléctrica (CE) del suelo; aquí se midió la conductividad eléctrica de cada muestra en las relaciones suelo: agua 1:2 (40 g: 80 ml), y 1:5 (40 g: 200 ml); h) Densidad aparente (g/cm^3), por el método de la parafina (Gabriels y Lobo, 2011), calculada a partir de: la masa del suelo y el volumen total, es decir el volumen de los sólidos y el volumen ocupado por el espacio poroso. En el caso de la masa, se conoce pesando la muestra después de ser secada a 105°C (terron), y el volumen, se determinó de manera indirecta recubriendo el terrón con una capa de parafina y pesándolo sumergido en un líquido (agua destilada); i) Carbonatos (%), de acuerdo a la norma mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2000), los carbonatos de metales alcalino-térreos que se encuentran en cantidades notables en el suelo provienen de la calcita (CaCO_3) y/o de la dolomita (CaMgCO_3) principalmente, debido a la baja precipitación en regiones áridas y semiáridas casi siempre se encuentran formando parte de la fase sólida del suelo.

Análisis Estadístico

Para evaluar la variación de las concentraciones de C expresadas en % y las reservas (T ha^{-1}), estimadas con los diferentes métodos, fueron sometidas a un análisis de varianza utilizando el procedimiento PROC GLM (SAS, 9.3), donde el modelo estadístico utilizado para los análisis fue:

$$Y_{ij} = \mu + \text{método}_i + e_{ij}$$

Y= COS y C Total

μ = media global

método_i = efecto de método, es la variación que se atribuye a los factores de control

e_{ij} = error experimental, es la variación de los factores no controlados

i= i-ésimo tratamiento

j= j-ésima repetición de cada tratamiento

Al hacer la comparación entre los métodos el modelo matemático utilizado fue $\text{COS\%} = \text{determinaciones de los métodos}$; igual modelo fue utilizado para las reservas.

Las concentraciones y reservas obtenidas en diferentes tipos de vegetación y topografía fueron sometidas a un análisis de varianza utilizando el procedimiento PROC GLM (SAS 9.3), el modelo matemático utilizado fue: $\text{COS\%} = \text{vegetación}$ y $\text{COS\%} = \text{topografía}$; donde el efecto fue significativo ($p \leq 0.05$) se realizó la comparación entre medias utilizando la diferencia mínima significativa (lsmeans/pdiff) (SAS 9.3); iguales modelos se utilizaron para las reservas. Además se realizó un análisis de regresión lineal simple, entre los valores determinados por los métodos autoanalizador, oxidable e ignición, utilizando el procedimiento PROC REG de SAS 9.3 para Windows; el modelo fue: $[\text{COS\% (TOC)} = \text{COS\% (oxi)}] / \text{P CLM}$ y $[\text{COS\% (TOC)} = \text{COS (Ignición)}] / \text{P CLM}$.

Las concentraciones de C obtenidas por cada método se correlacionaron con las propiedades físico-químicas del suelo, mediante un análisis de regresión múltiple (Herrera y García, 2010), utilizando el procedimiento STEPWISE (SAS 9.3); donde el modelo matemático fue: $\text{COS} = \text{Densidad aparente (Da g cm}^{-3}\text{), Carbonatos de Calcio \% (CaCO}_3\text{), pH}_{(1:2) \text{ (H}_2\text{O)}, \text{Conductividad eléctrica (Ce dS m}^{-1}\text{)}$. El mismo modelo fue utilizado para C Total, en concentraciones y reservas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comparación entre Métodos de Determinación

Los contenidos de carbono (% y T ha⁻¹) en suelo estimados por tres métodos se muestran en el Cuadro 2. Las concentraciones medias, de carbono orgánico, más altas ($p < 0.05$) fueron obtenidos por el método de ignición 5.52%, seguido por el autoanalizador (TOC) 1.42% y el método de oxidación (Walkley y Black) 1.40%. Estos dos últimos no fueron diferentes ($p > 0.05$).

Cuadro 2. Contenidos de carbono en suelo (% y T ha⁻¹) estimado por los métodos de ignición, oxidación, autoanalizador y total, en el Altiplano Potosino Oeste, S.L.P.

Método	%	T ha ⁻¹
Carbono orgánico por ignición	5.52 a	148.09 a
Carbono orgánico oxidable	1.40 b	37.18 b
Carbono orgánico (TOC)	1.42 b	38.10 b
EEM	1.48	38.01
C total (inorgánico + orgánico)	2.31	61.15

a b; medias en las misma columna con distinta letra son diferentes ($p < 0.05$). EEM; error estándar de la media.

El método Walkley y Black (1934) es uno de los más utilizados para la determinación de carbono orgánico, es sencillo y económico, en comparación con el empleo de autoanalizador que entre sus principales limitaciones están la elevada inversión para su adquisición y el requerimiento de personal calificado para su manejo y mantenimiento (Cambardella *et al.*, 2001). Limitaciones que son más marcadas al momento de contrastar las determinaciones por ambos métodos; ya que por ejemplo, los valores de carbono total por autoanalizador contra el carbono total obtenido por métodos tradicionales, se puede esperar correlaciones de 94%; y al comparar los valores de carbono orgánico obtenidos por autoanalizador y el carbono orgánico por Walkley y Black, cabe esperar una correlaciones entre 88%-98% (Burgos *et al.*, 2012), lo que indica que los valores obtenidos por ambos métodos son más o menos equivalentes y posiblemente evalúan componentes similares (Wang *et al.*, 2012). Sin embargo el

método de Walkley y Black puede sobreestimar el carbono orgánico ya que algunos componentes con cloruros, hierro y manganeso, pueden consumir dicromato de potasio; en el caso del autoanalizador efectúa una sobreestimación por los contenidos de carbonatos en el suelo (De Vos *et al.*, 2007). Padilla *et al.* (2011) al correlacionar los valores obtenidos en suelos ácidos por autoanalizador, ignición y Walkley y Black; en donde determinaron correlaciones altas entre autoanalizador vs ignición ($r = 0.98$) y autoanalizador vs Walkley y Black ($r = 0.99$); pero en suelos con carbonatos no encontró relación entre los métodos.

Lo que se demuestra en este trabajo, al correlacionar directamente los métodos autoanalizador (TOC) vs ignición ($r = 0.48$, Figura 2) y Walkley y Black (oxi) vs autoanalizador (TOC) ($r = 0.46$, Figura 3). En estos dos últimos métodos a pesar de sus limitantes inherentes y su baja correlación, sus resultados entre diferentes topoformas y vegetación fueron estadísticamente similares, en comparación con el método de ignición (650°C , durante ocho horas), con el que se obtuvieron los mayores valores debido a que pudo existir volatilidad de componentes del suelo como CaCO_3 , H_2O higroscópica, NaCl , formas condensadas de humus, residuos orgánicos poco alterados, oxidación del ión ferroso y descomposición de sales hidratadas lo que sobreestima el carbono orgánico; por lo que el uso de este método no es recomendable para suelos calcáreos (Aguirre *et al.*, 2003; Carreira, 2005; La Manna *et al.*, 2007; García 2007). Debido a las diferencias entre el método de ignición y los métodos de oxidación y autoanalizador, los valores por ignición se excluyeron de posteriores análisis estadísticos. Valores intermedios fueron se obtuvieron por el método de carbono total, no existiendo punto de comparación contra los otros tres métodos, ya que el carbono total considera tanto la parte orgánica como la inorgánica del suelo.

La cantidad y reservas de carbono orgánico en suelo, excepto los valores por el método de ignición, son similares a las reportadas por Jurado *et al.* (2013) para matorrales y pastizales de Chihuahua; pero menores a las determinadas por Nívar (2008) en matorrales del noreste de México.

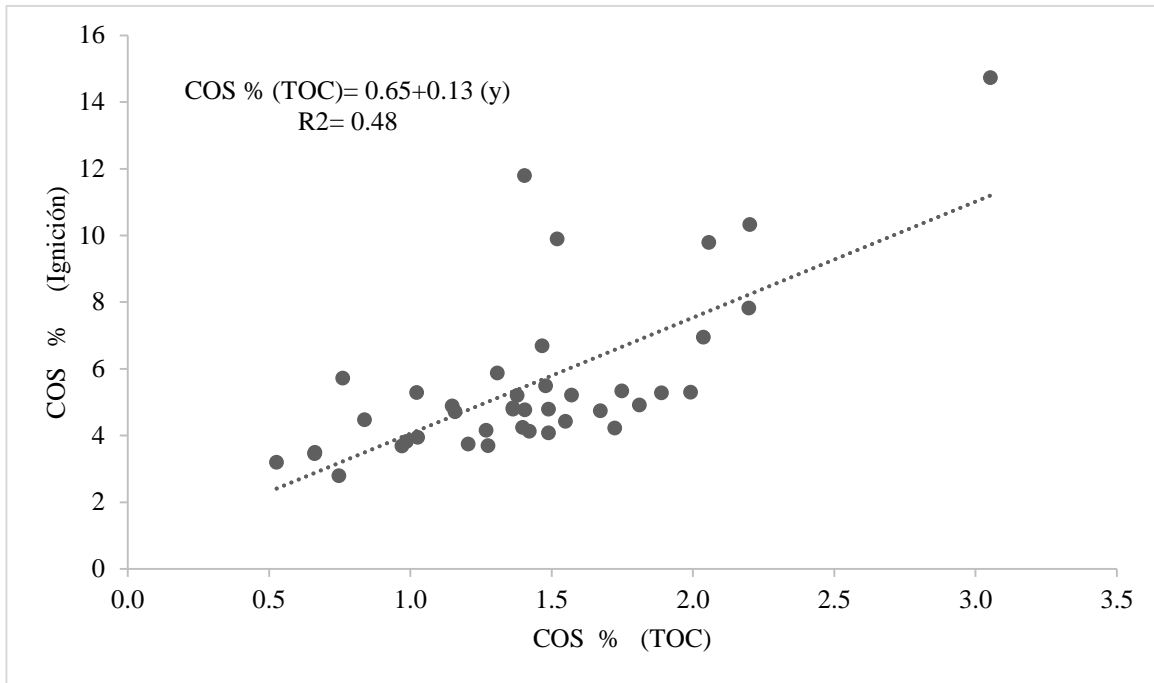


Figura 2. Relación entre los porcentajes de carbono determinados por los métodos de autoanalizador (TOC) e Ignición, para los suelos del Altiplano Potosino Oeste, S.L.P.

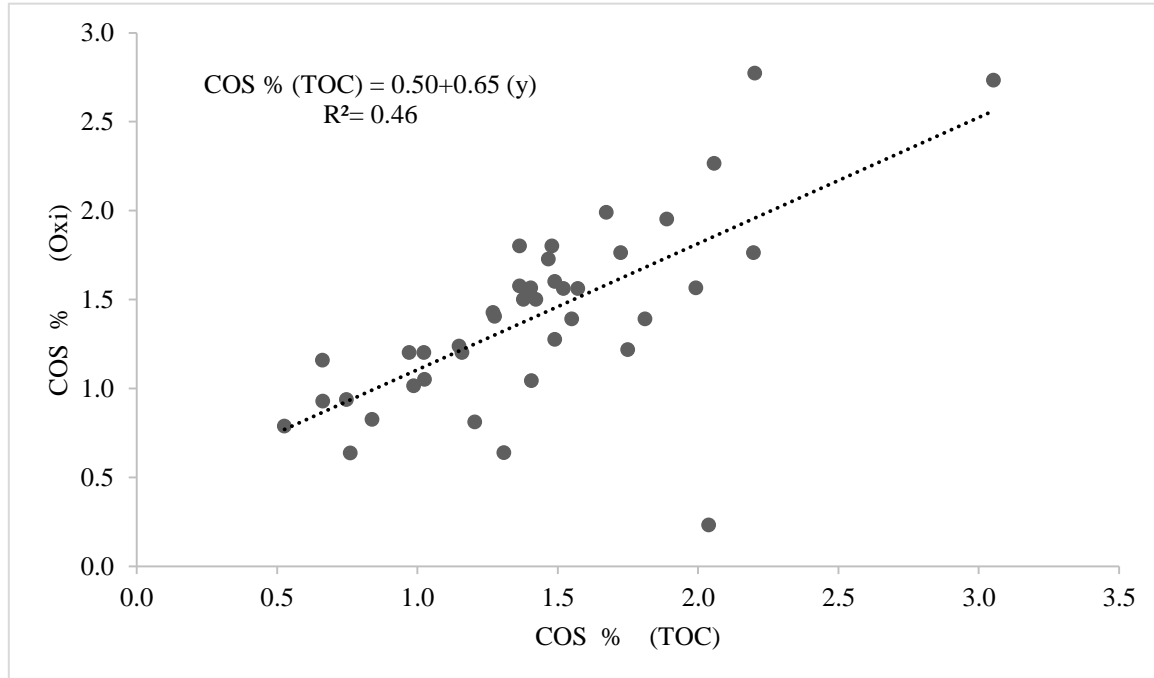


Figura 3. Relación entre los porcentajes de carbono determinados por los métodos de autoanalizador (TOC) y Walkley y Black (oxi), para los suelos del Altiplano Potosino Oeste, S.L.P.

En un estudio en ecosistemas semiáridos del altiplano norte de México, que reporta valores similares a los determinados en este trabajo; determinaron el COS en dos profundidades 0-30 cm y 30-60 cm, pero en dos sitios la mayor acumulación ocurrió en la segunda profundidad con 72.9 T ha^{-1} y 91.4 T ha^{-1} (Hernández *et al.*, 2013) contrario a trabajos donde la mayor reserva se encuentra en los primeros centímetros del suelo decreciendo con la profundidad (Bernoux *et al.*, 1998; Jobbágy y Jackson, 2000; Céspedes *et al.*, 2012). Sin embargo, la variación vertical del carbono orgánico depende del ecosistema, ya que en los bosques el 50% del carbono se encuentra en los primeros veinte centímetros del suelo; en los pastizales está menos estratificado con un 42% en el estrato superficial; en los matorrales un 33% se aloja en los primeros veinte centímetros (Berhongaray, 2007). En este trabajo solamente se muestreó el primer horizonte y la profundidad promedio fue de 0-20 cm, por lo que no es posible conocer la variación de COS con la profundidad.

Carbono en Suelo por Vegetación

Los resultados de reserva y concentración de carbono orgánico se muestran en el Cuadro 3, donde los resultados con el método de analizador automático (TOC), expresado en porcentaje, no se ven influidos por la vegetación ($p = 0.0566$); ya que en apariencia la acumulación de carbono orgánico en suelo está más relacionada con la profundidad del suelo que con el tipo de vegetación que sustenta (Etchevers *et al.*, 2001; Martín *et al.*, 2008). Lo anterior se explica, en parte por las fracciones húmicas, las que se relacionan más con las características del suelo, que con la vegetación (Moyano *et al.*, 2004). En Colombia diferentes tipos de cobertura vegetal, no presentaron diferencias en los contenidos de COS, reportan 52.3 T ha^{-1} para bosque, 68 T ha^{-1} para pasturas degradadas, 63 T ha^{-1} en sistema silvopastoril y 81 T ha^{-1} en pasturas mejoradas; al igual que en Costa Rica donde seis diferentes coberturas vegetales no presentaron diferencias significativas (Ibrahim *et al.*, 2007). Por otra parte, existen reportes donde relacionan la vegetación con la capacidad de acumulación de carbono orgánico en el suelo (Franzmeier *et al.*, 1985; Hontoria *et al.*, 2004; Berhongaray, 2007; Sánchez *et al.*, 2011).

Cuando las concentraciones de COS (TOC) se expresaron en reservas, cambiaron ($p=0.0464$) con el tipo de vegetación; contrario a lo que sucedió en el método de Walkley y Black (COS oxi), donde la concentración de carbono orgánico tuvo significancia ($p\leq 0.05$) con la vegetación, pero no al momento de expresarlo en reservas. Las concentraciones y reservas obtenidas por el método de carbono total, no se relacionaron ($p\geq 0.05$) con la vegetación.

Cuadro 3. Contenido de carbono en suelo (% y T ha⁻¹) estimado por tres métodos, por tipo de vegetación del Altiplano Potosino Oeste, S.L.P.

<u>Método</u>	<u>COS (TOC)</u>		<u>COS (oxidable)</u>		<u>C Total</u>	
	%	T/ha	%	T/ha	%	T/ha
<u>Vegetación</u>						
Zacatal	1.45	41.92 a	1.17 bc	33.71	1.66	47.96
Zacatal Salino	1.58	48.10 a	1.02 bc	29.98	2.26	69.64
Zacatal-Gobernadora	1.67	40.93 a	1.73 a	42.55	3.44	83.01
Nopalera	1.13	30.63 ab	1.27 ab	34.33	1.79	46.44
Gobernadora	1.43	37.50 a	1.53 ab	40.65	2.17	56.96
Gobernadora-Izotal	1.71	42.01 a	1.95 a	48.05	3.24	79.88
Barbecho	0.80	21.03 b	1.16 b	29.14	1.66	43.67

a b c; medias en las misma columna con distinta letra son diferentes ($p<0.05$).

Método: COS TOC: carbono orgánico total; COS oxi: carbono orgánico oxidable (Walkley y Black) y C Total: carbono total (orgánico más inorgánico).

La diferencia ($p< 0.05$) del COS en toneladas entre tipos de vegetación, puede ser engañosa, ya que entre estas existió diferencia solamente al considerar el suelo desnudo (barbecho), que aunque no es un tipo de vegetación, en este trabajo se tomó como referencia para observar las variaciones entre coberturas vegetales. Esto alteró el análisis estadístico marcando ahora las diferencias, ya que como es de esperar el suelo barbechado fue el que tuvo la concentración más baja de carbono orgánico, consecuentemente las reservas más bajas. El que se haya tenido diferencias estadísticas ($p< 0.05$) en el COS por el método oxidable y no con las reservas se puede deber a que el Zacatal y Zacatal Salino, que aunque teniendo las concentraciones más bajas, tienen los promedios de densidad aparente más altos (Figura 4); elevando así sus reservas de carbono. Contrario a lo que sucede con la vegetación de Gobernadora-Izotal que aunque

tiene la concentración más alta de COS, por su baja densidad, disminuyen sus reservas. Otro punto importante es que el método oxidable en comparación con el método de autoanalizador, puede ser más sensible a las diferencias de concentraciones entre tipos de vegetación.

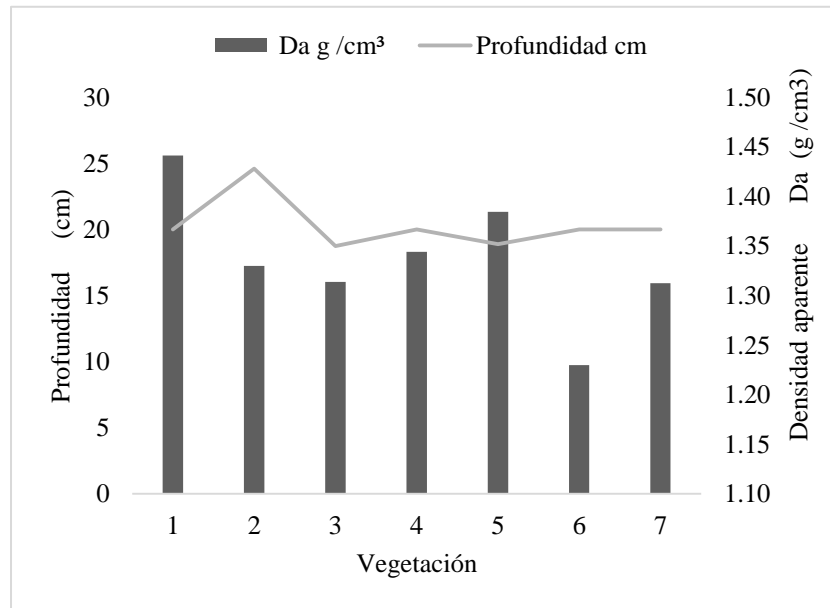


Figura 4. Profundidad y densidad aparente promedio en suelos de los distintos tipos de vegetación del Altiplano Potosino Oeste, S. L. P.

Vegetación: 1: Zacatal; 2: Zacatal Salino; 3: Zacatal-Gobernadora; 4: Nopalera; 5: Gobernadora; 6: Gobernadora-Izotal y 7: Barbecho.

Carbono en Suelo por Topoforma

El COS, en porcentaje ($p = 0.7706$) y en toneladas por hectárea ($p = 0.1727$), fueron similares en las diferentes topoformas. Los resultados son similares a los encontrados por Avilés *et al.* (2009), que al utilizar el analizador automático, encontraron que los valores de COS de 11.8, 8.38, 9.4 y 11.67% no mostraban una variación significativa entre cresta, ladera, valle y planicie respectivamente; pero al transformar los valores a toneladas por hectárea, encontraron una diferencia significativa entre las diferentes geoformas, presentándose la mayor reserva en la planicie con 208 T C ha⁻¹, siguiendo el valle con 186 T C ha⁻¹, la ladera con 164 T C ha⁻¹ y la menor reserva en la cresta con 159 T C ha⁻¹.

En epipedones Ruíz *et al.* (1997), determinaron algo similar, debido a que los porcentajes de COS disminuían cuando se pasaba de la posición más baja hacia la parte más alta; pero en los endopedones a medida que se pasa de la zona más alta a la zona más baja disminuye el carbono orgánico, atribuyendo el efecto a una condición de drenaje del suelo, ya que en otro sitio muestreado no existieron diferencias significativas entre las condiciones topográficas, lo que sugiere que es mayor la influencia de las características edáficas en la concentración de COS, que la posición topográfica.

Trabajos donde relacionan la concentración y reservas de carbono con la altitud indican que la concentración de COS se ve afectada negativamente con la altitud (Castillo *et al.*, 2009); todo lo contrario a esta tendencia fue encontrado por Cunalata *et al.* (2013) y Carvajal (2008), donde el aumento en el gradiente altitudinal incrementaba las reservas de carbono. El hecho de que no exista diferencia significativa entre COS y topografía en el Altiplano Potosino Oeste, puede deberse a que en comparación con otros trabajos donde se distingue una zona alta de una zona baja, en este trabajo las topografías son muy similares, por ejemplo Planicie Aluvial, Planicie Lacustre y Bajío, en un grupo; y en otro Loma y Ladera, es decir no existe un gradiente altitudinal marcado.

Cuadro 4. Contenido de carbono en suelo (% y T ha⁻¹) estimado por tres métodos, por tipo de topografía del Altiplano Potosino Oeste, S.L.P.

<u>Método</u>	<u>COS (TOC)</u>		<u>COS (oxidable)</u>		<u>C Total</u>	
	%	T/ha	%	T/ha	%	T/ha
<u>Topografía</u>						
Bajío	1.61	45.79	1.49	42.23	2.16	61.09
Ladera	1.28	28.10	1.32	29.34	1.90	42.42
Loma	1.49	36.20	1.54	38.11	2.61	64.27
Planicie aluvial	1.39	36.94	1.52	40.63	2.49	65.13
Planicie lacustre	1.59	48.10	1.02	29.97	2.25	69.63

Método: COS TOC: carbono orgánico total; COS oxi: carbono orgánico oxidable (Walkley y Black) y C total: carbono total (orgánico más inorgánico).

Características Físico-Químicas del Suelo

Con base a la reacción del suelo, estos se clasifican como medianamente alcalinos con base al pH en agua 7.72 (6.36-8.76 pH) y neutros 7.20 con el pH en cloruro de calcio (5.57-8.49 pH). Con un efecto despreciable de salinidad tanto en la relación 1:2 (0.09-12.83 dS/m) y 1:5 (0.06-9.39 dS/m); con un contenido medio de materia orgánica de 2.42% (0.40-4.78%); medio de carbonatos 7.56% (0.41-38.77%) y una densidad aparente de 1.3 g cm^{-3} en promedio ($1.10\text{-}1.64 \text{ g cm}^{-3}$) (Figura 5).

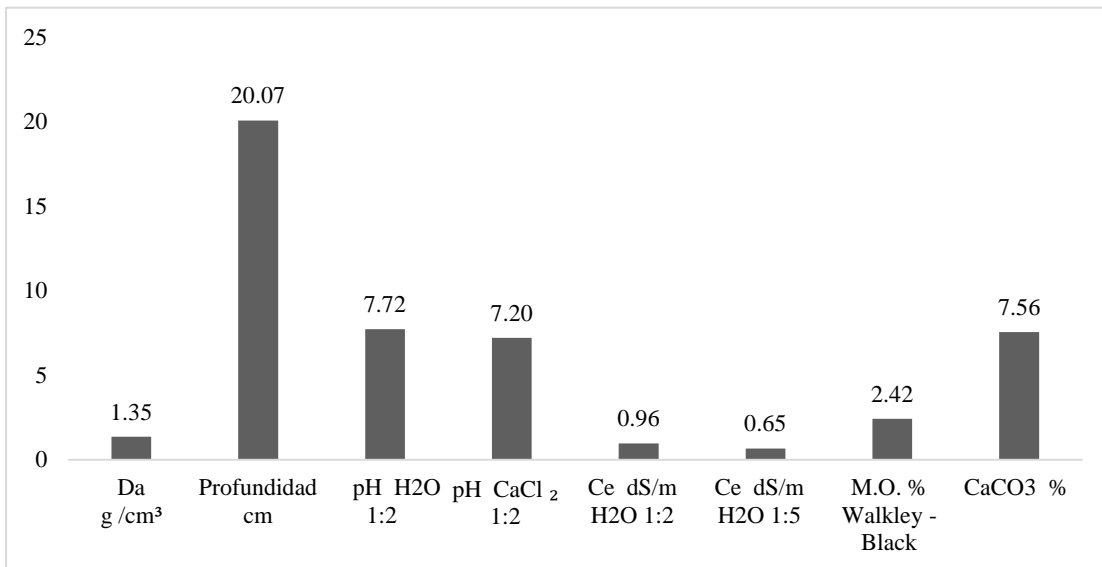


Figura 5. Propiedades físico-químicas de los suelos del Altiplano Potosino Oeste, S.L.P.

Carbono Orgánico del Suelo y Propiedades del Suelo

De las propiedades físico-químicas (densidad aparente, profundidad, pH, conductividad eléctrica, carbonatos de calcio), que se relacionaron con el COS, determinado por el método de autoanizador, solamente el CaCO_3 ($p < 0.0001$) resultó significativo, explicando el 44% de la variación de la concentración de COS. Los contenidos de COS (TOC) incrementan 0.0405% por cada 1% de incremento de CaCO_3 , si se mantienen constantes el resto de las variables. Cuando la concentración de carbono se expresa en reservas (T ha^{-1}), la densidad aparente resulta significativa ($p < 0.0035$) junto con los carbonatos de calcio ($p < 0.0003$), explicando el 45% de la variación de las reservas del suelo. Las ecuaciones de predicción son:

$$\text{COS \% (TOC)} = -1.39 + 0.77(\text{Da}) + 0.209(\text{pH}_{1:2 \text{ CaCl}_2}) - 0.037(\text{Ce}_{1:2}) + 0.0405(\text{CaCO}_3)$$

$$\text{COS T ha}^{-1} \text{ (TOC)} = -76.019 + 53.28(\text{Da}) + 4.73(\text{pH}_{1:2 \text{ CaCl}_2}) + 0.45(\text{Ce}_{1:2}) + 1.0(\text{CaCO}_3)$$

Donde:

Da= Densidad aparente (g cm^{-3})

$\text{pH}_{1:2 \text{ CaCl}_2}$ = pH con relación 1:2 (suelo: cloruro de calcio)

$\text{Ce}_{1:2}$ = Conductividad eléctrica (dS/m) con relación 1:2 (suelo: agua)

CaCO_3 = Carbonatos de calcio (%)

La variación del carbono orgánico, determinado por el método Walkley y Black (COS oxi), es explicada en un 57% por las variables del modelo, resultando significativas, el $\text{pH}_{1:2 \text{ CaCl}_2}$ ($p < 0.0252$), la $\text{CE}_{1:2}$ ($p < 0.0001$) y los carbonatos de calcio ($p < 0.0004$). Únicamente la variable que no resultó significativa fue la densidad aparente ($p > 0.88$). Por lo que los contenidos de COS (oxi) incrementan 0.27% cuando incrementa el $\text{pH}_{1:2 \text{ CaCl}_2}$, decrece 0.125% cuando incrementa la conductividad eléctrica y aumenta 0.03% cuando incrementan los carbonatos, siempre que se mantenga constante la densidad aparente. Cuando las concentraciones se expresan en reservas de carbono, las variables que se correlacionaron significativamente fueron el $\text{pH}_{1:2 \text{ CaCl}_2}$ ($p < 0.048$), la conductividad eléctrica ($p < 0.0007$) y los carbonatos de calcio ($p < 0.0035$), explicando el 40% de la variación de las reservas. Las ecuaciones de predicción son:

$$\text{COS \% (oxi)} = -0.591 - 0.081(\text{Da}) + 0.27(\text{pH}_{1:2 \text{ CaCl}_2}) - 0.125(\text{Ce}_{1:2}) + 0.033(\text{CaCO}_3)$$

$$\text{COS T ha}^{-1} \text{ (oxi)} = -56.15 + 28.23(\text{Da}) + 7.19(\text{pH}_{1:2 \text{ CaCl}_2}) - 2.72(\text{Ce}_{1:2}) + 0.79(\text{CaCO}_3)$$

Donde:

Da= Densidad aparente (g cm^{-3})

$\text{pH}_{1:2 \text{ CaCl}_2}$ = pH con relación 1:2 (suelo: cloruro de calcio)

$\text{Ce}_{1:2}$ = Conductividad eléctrica (dS/m) con relación 1:2 (suelo: agua)

CaCO_3 = Carbonatos de calcio (%)

La variación del carbono en suelo, expresada como carbono total, es explicada en un 93% por las variables del modelo, ya que el $\text{pH}_{1:2 \text{ CaCl}_2}$ resultó significativo ($p < 0.024$), al igual que la $\text{Ce}_{1:2}$ ($p < 0.0001$) y los carbonatos de calcio ($p < 0.0001$). La única variable

que no resulto significativa fue la densidad aparente ($p>0.87$). Por lo que los contenidos de carbono total (C Total) incrementan 0.27% cuando incrementa el pH $_{1:2 \text{ CaCl}_2}$, decrece 0.126% cuando incrementa la conductividad eléctrica y aumenta 0.15% cuando incrementan los carbonatos de calcio, siempre que se mantenga constante la densidad aparente. Al expresar el carbono total en reservas (T ha^{-1}), las variables independientes que se correlacionaron significativamente y que explicaron el 85% de la variación del carbono total del suelo son la densidad aparente ($p<0.03$) y los carbonatos de calcio ($p<0.0001$), las variables restantes no influyeron significativamente. Las ecuaciones de predicción son:

$$\text{C Total (\%)} = -0.59 - 0.088(\text{Da}) + 0.275(\text{pH}_{1:2 \text{ CaCl}_2}) - 0.126(\text{Ce}_{1:2}) + 0.153(\text{CaCO}_3)$$

$$\text{C Total (T ha}^{-1}\text{)} = -68.84 + 42.49(\text{Da}) + 6.38(\text{pH}_{1:2 \text{ CaCl}_2}) - 0.83(\text{Ce}_{1:2}) + 3.62(\text{CaCO}_3)$$

Donde:

Da= Densidad aparente (g cm^{-3})

pH $_{1:2 \text{ CaCl}_2}$ = pH con relación 1:2 (suelo: cloruro de calcio)

Ce $_{1:2}$ = Conductividad eléctrica (dS/m) con relación 1:2 (suelo: agua)

CaCO $_3$ = Carbonatos de calcio (%)

La única variable que no fue significativa en los tres modelos fue la densidad aparente, cuando se expresó en concentraciones; pero al transformarlas a toneladas por hectárea, influye significativamente, similar a lo encontrado por Florencia (2010), quien evaluó las propiedades del suelo y su influencia en el COS en varios lotes, donde las variables se comportan de manera diferente en cada lote, un ejemplo se dio en el Totoral, Argentina, a una profundidad de 0-20 cm la mayor influencia positiva es con la densidad aparente y el pH; sin embargo en otro lote con la misma profundidad evaluada las únicas interacciones entre variables fueron humedad y densidad aparente, afectando negativamente los niveles de COS; se concluye que a menores niveles de estas variables provocan mayores niveles de carbono orgánico en el suelo. En todos los modelos generados en este trabajo, los carbonatos de calcio afectaron los contenidos de carbono, contrario a lo que reporta Nieto (2011) que no encontró relación debido a que los

carbonatos aumentan con la profundidad y el carbono orgánico tiene valores más altos en la superficie.

La correlación con los carbonatos de calcio posiblemente se debió a que estos pueden bloquear la humificación de la materia orgánica, contribuyendo a una fuerte incorporación en el perfil de humus poco evolucionado (Cruz y Etchevers, 2011); y con ello agrega significancia a variables como el pH, debido a que a mayores contenidos de carbonatos mayor es el pH.

CONCLUSIONES

La concentración (%) de carbono orgánico varia con la vegetación, específicamente el método Walkley y Black (COS% oxi) fue más sensible, en comparación con los otros métodos. Además las concentraciones (%) y las reservas ($T\ ha^{-1}$) de carbono, no se afectaron por la topografía. Los carbonatos de calcio del suelo, fue la propiedad que se relacionó positivamente con los contenidos de carbono orgánico e inorgánico del suelo. Y la única propiedad del suelo que no se relacionó con los contenidos de COS y C total, fue la densidad aparente; aunque esto debe tomarse con reserva, ya que con un mayor número de muestras se altera la correlación. Los valores medios obtenidos por los métodos autoanalizador (COS% TOC) y Walkley y Black (COS% oxi) fueron similares, aunque la comparación 1:1 entre las determinaciones se obtuvo una baja correlación ($r^2=0.46$). Se pueden usar ambos métodos (TOC y oxi), para estimar el promedio de CO por tipo vegetación y topografía. El método de ignición sobrestimó los contenidos de CO, debido a los contenidos de carbonatos en el suelo.

LITERATURA CITADA

- Aguirre A., F. León, A. Aguilar. 2003. Estudios de optimización de la oxidación crómica del carbono orgánico de los suelos. *Revista Terra Latinoamericana*. 21 (1): 21-30 pp.
- Almendros C. 2004. Investigaciones básicas sobre el origen y la estructura molecular de las formas estables de materia orgánica relacionadas con el proceso de secuestro de carbono en los suelos. *Revista Edafología* 11 (2): 229-248 pp.
- Álvarez R. 2006. Balance de carbono en los suelos. Información técnica de trigo campaña 2006. Publicación miscelánea N. 105. INTA. 36-43 pp.
- Álvarez G., N. García, P. Krasilnikov, F. García. 2013. Almacenes de carbono en bosques montanos de niebla de la sierra norte de Oaxaca, México. *Revista Agrociencia* 47: 171-180 pp.
- Allison L. 1965. Organic Carbon. Chemical and microbiological properties. (9): 1367-1378 pp.
- Avilés V., A. Velásquez, G. Angeles, J. Etchevers, H. De los Santos, T. Llanderal. 2009. Variación en los almacenes de carbono en suelos de una toposecuencia. *Revista Agrociencia* 43: 457-464 pp.
- Báez A., J. Etchevers, C. Hidalgo, C. Prat. 2006. Emisión de CO₂ en tepetates (materiales volcánicos endurecidos) habilitados para la agricultura en Tlaxcala (México). IV Congreso Iberoamericano de Física y Química ambiental. Acata de resúmenes. (Ed.) J. Gallardo. México. 229-230 pp.
- Báez A., A. González, J. Etchevers, C. Prat, C. Hidalgo. 2010. Glomalina y secuestro en tepetates cultivados. *Revista Agrociencia* 44: 517-529 pp.
- Bai J., R. Xiao, K. Zhang, H. Gao, B. Cui, X. Liu. 2012. Soil organic carbon as affected by land use in Young and old reclaimed regions of a coastal estuary wetland, China. *Soil Use and Management*. British Society of Soil Science. pp. 8
- Bautista A., F. de León, R. Carillo, C. Robles. 2011. Identification of soil quality indicators for maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw.) plantations in southern, México. *African Journal of Agricultural Research*. 6(20):4795-4799 pp.
- Batjes N. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*. 47: 151-163.

- Becerril R., E. González, L. Hernández. 2007. El semiárido mexicano como sumidero de carbono. Estudio de caso Microcuenca "El Carmen". Congreso Nacional y Reunión Mesoamericana de Manejo de Cuencas Hidrográficas. pp. 8
- Becerril R., E. González, C. Mastachi. 2012. Sumidero de carbono: la región semiárida de Guanajuato. En: La Biodiversidad en Guanajuato: Estudio de Estado. Vol. I. México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO)/Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato (IEE). (1): 218-220 pp.
- Berhongaray G. 2007. Carbono en suelos pamperos: efectos de la vegetación y el uso. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de la Pamapa, Argentina. 100 pp.
- Bernoux M., D. Arrouays, C. Cerri, H. Bourennane. 1998. Modeling vertical distribution of carbon in oxisols of the western Brazilian amazon (rondonia). *SoilScience*. 163: 941-951 pp.
- Betancourt P., J. González, B. Figueroa, F. González. 1999. Materia orgánica y caracterización de suelos en proceso de recuperación con coberturas vegetativas en zonas templadas de México. *Revista Terra latinoamericana* 17(2): 139-148 pp.
- Beteta O. 2012. Caracterización y dinámicas de carbono y nitrógeno de suelos forestales, en Santa María Yavesia, Oaxaca. Tesis de Licenciatura. Universidad de la Sierra Juárez, México. pp.73
- Bouwman A. y W. Sombroek. 1990. Inputs to climate change by soil and agricultura related activities. *Developments in Soil Science* 20: 15-30 pp.
- Burgos D., A. Cerda, J. Cueto, J. Muñoz, A. Gándara. 2012. Determinación de carbón total y carbón orgánico en diferentes suelos usando método de combustión seca. *Educación y Asistencia Técnica Agrofaz*. 12 (3): 143-151 pp.
- Cambardella C., A. Gajda, J. Doran, B. Wienhold, T. Kettler. 2001. Estimation of particulate and total organic matter by weight loss-on-ignition. In: Lal R., J. Kimble, F. Follett, B. Stewart (Eds). *Assessment methods for soil carbon*. CRC Press, Boca Raton, Florida. 349-359 pp.
- Carvajal A. 2008. Relación del carbono y nitrógeno del suelo con usos y coberturas del terreno en Alcalá, Valle del Cauca. Tesis de Maestría. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. pp. 77
- Carreira D. 2005. Carbono oxidable. Una forma de medir la materia orgánica del suelo. En: (Eds) Marbán L. y S. Ratto. *Tecnologías en Análisis de Suelos*. 1 edición. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. 91-102 pp.

- Casanova F., J. Petit, J. Solorio. 2011. Los sistemas agroforestales como alternativa a la captura de carbono en el trópico mexicano. *Revista Chapingo serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 17 (1):133-143 pp.
- Castillo M., G. Linares, M. Valera, N. García, O. Acevedo. 2009. Modelación de la materia orgánica en suelos volcánicos de la región de Teziutlán, Puebla, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*. 5 (2): 148-154 pp.
- Céspedes F., J. Fernández, J. Gobbi, A. Bernardis. 2012. Reservorio de carbono en suelos y raíces de un pastizal y una pradera bajo pastoreo. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 35 (1): 79-86 pp.
- Cunalata C., C. Inga, G. Alvarez, C. Recalde, M. Echeverría. 2013. Determinación de carbono orgánico total presente en el suelo y la biomasa de los páramos de las comunidades de Chimborazo y shobollinllin en Ecuador. *Bol Grupo Español Carbón*. (27): 10-13 pp.
- Chan K., D. Heenan, H. So. 2003. Sequestration of carbon and changes in soil quality under conservation tillage on light textured soils in Australia: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 43: 325-334 pp.
- Cruz G. y J. Etchevers. 2011. Contenidos de carbono orgánico de suelos someros en pinares y abetales de áreas protegidas de México. *Revista Agrociencia* 45: 849-862 pp.
- Ćirić V., M. Manojlović, M. Belić, L. Nešić, S. Šermešić. 2013. Effects of land use conversion on soil aggregate stability and organic carbon in different soils. *Revista Agrociencia* 47: 539-552 pp.
- Davis B. 1974. Loss on ignition as an estimate of soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal*. 38: 150-151 pp.
- Dixon R. 1995. Agroforestry system: source or sinks of greenhouse gases?. *Agroforestry System* 31: 99-116 pp.
- De Vos B., S. Lettens, B. Muys, J. Deckers. 2007. Walkley-Black analysis of forest soil organic carbon: recovery, limitations and uncertainty. *Soil Use and Management*. 23: 221-229 pp.
- Etchevers J., M. Acosta, C. Monreal, K. Quednow, L. Jiménez. 2001. Los stocks de carbono en diferentes compartimentos de la parte aérea y subterránea en sistemas forestales y agrícolas de ladera en México. *Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*. Valdivia, Chile. 1-19 pp.
- Etchevers J., A. Báez, C. Prat, C. Hidalgo. 2006. Distribución de C en fragmentos y agregados de materiales volcánicos endurecidos habilitados para la agricultura.

- IV Congreso Iberoamericano de Física y Química ambiental. Acata de resúmenes. (Ed.) J. Gallardo. México. 233-234 pp.
- FAO. 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informes sobre recursos mundiales de suelos. (96): pp. 61
- FAO. 2007. Secuestro de carbono en tierras áridas. Informes sobre recursos mundiales de suelos. (102): pp. 107
- Florencia M. 2010. Evolución del carbono en suelos provenientes de monte bajo siembra directa del área subhúmeda templada y subtropical de Argentina. Tesis de Doctorado. Universidad Católica de Córdoba. pp.110
- Franzmeier D., G. Leme, R. Miles. 1985. Organic carbón in soils of north central united states. Soil Science Society of America Journal. 49: 702-708 pp.
- Gabriels D. y D. Lobo. 2011. Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo. Revista Venesuelos. 14: 37-48 pp.
- García R., D. Espinosa, B. Figueroa, N. García, J. Gallardo. 2006. Reservas de carbono orgánico y de fracciones húmicas en un Vertisol sometido a siembra directa. Revista Terra Latinoamericana. 24 (2): 241-251 pp.
- García B. 2007. Redistribución del carbono orgánico en diferentes manejos agrícolas y su efecto en la estructuración del suelo. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. pp. 177
- Galantini J., R. Rosell, J. Iglesias. 1994. Determinación de materia orgánica empleando el método de walkley y black en fracciones granulométricas del suelo. Revista Ciencia del Suelo 12: 81-83 pp.
- Glenn E., L. Pitelka, M. Olsen. 1992. The use of halophytes to sequester carbon. R. Water Air SoilPollution 64: 251-263 pp.
- Gómez A., Y. Chávez, L. Morales, E. Díaz, A. Gómez, H. Zepeda. 2003. Predicción espacial de carbono orgánico edáfico superficial en zonas forestales mediante análisis digital de terreno y sig: uso de la radiación solar potencial. Revista Forestal Veracruzana. 5 (2): 49-56 pp.
- González L., J. Etchevers, C. Hidalgo. 2008. Carbono en suelos de ladera: factores que deben considerarse para determinar su cambio en el tiempo. Revista Agrociencia 42: 741-751 pp.
- González M., M. Gutiérrez, S. Wright. 2004. Hongos micorrízicosarbusculares en la agregación del suelo y su estabilidad. Revista Terra Latinoamericana 22 (4): 507-514 pp.

- Gregorich E., M. Carter, D. Angers, C. Monreal, B. Ellert. 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Journal Soil Science* 74: 367-385 pp.
- Greenland D., D. Rimmer, D. Payne. 1975. Determination of the structural stability class of English and Welsh soil, using a water coherence test. *Journal Soil Science* 26: 294-303 pp.
- Herrera J. y C. García. 2010. Bioestadística en ciencias veterinarias. Procedimientos de análisis de datos con SAS. Universidad Computense de Madrid. p 200-203.
- Hassink J. y A. Whitmore. 1997. A model of the physical protection of soil organic matter in soils. *Soil Science Society of America Journal* 61: 131-139 pp.
- Hernández M., M. Pando, R. Mata, J. Jiménez. 2013. Servicios ambientales de los ecosistemas de pastizales semiáridos del altiplano del norte de México. IV Simposio Internacional del Carbono en México.
- Harrison J. 2003. El ciclo del ácido carbónico: siempre de ida y vuelta. *Visionlearning EAS-2 (3s)* (en línea) <http://www.visionlearning.com/es/library/Ciencias-de-la-Tierra/6/El-Ciclo-Carb%C3%B3nico/95>. (26 de Mayo de 2014).
- Hontoria C., J. Rodríguez, A. Saa. 2004. Contenido de carbono orgánico en el suelo y factores de control en la España peninsular. *Edafología* 11 (2): 149-157 pp.
- Ibañez C., S. Palomeque, F. Fontúrbel. 2004. Elementos principales del suelo, geodinámica y dinámica de los principales componentes del suelo. Estudio del carbono de la biomasa microbiana en suelos alterados. 29: 117-123 pp.
- Ibrahim M., M. Chacón, C. Cuartas, J. Naranjo, G. Ponce, P. Vega, F. Casasola, J. Rojas. 2007. Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes gaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforestería en las Américas* (45):27-36 pp.
- INEGI. 2002. Síntesis de Información Geográfica del Estado de San Luis Potosí.
- INEGI. 2010. Censo de población y vivienda 2010. <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/Proyectos/ccpv/> (consultado el 15 de Mayo de 2014).
- Jurado P., R. Saucedo, C. Morales, M. Martínez. 2013. Almacén y captura de carbono en pastizales y matorrales de Chihuahua. Centro de Investigación Regional Norte-Centro. Sitio Experimental “La Campana”. INIFAP. Folleto Técnico N. 38: pp. 32
- Jobbágy E. y R. Jackson. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecology Applied Soil*. 10:423-436 pp.

- Kemper W. y E. Koch. 1966. Aggregate stability of soil from the wetern portions of the United States and Canada. Tech Bull. 1355.
- Labrador J. 2001. La materia orgánica en los agrosistemas. Aproximación al conocimiento de la dinámica, la gestión y la reutilización de la materia orgánica en los agrosistemas. 2ª edición. Ed. Mundiprensa. pp. 279
- Lal R. 2001. Potential of desertification control to sequester carbón and mitigate the Green house effect. Climatic Change 51: 35-72 pp.
- Lal R., R. Follet, B. Stewart, J. Kimble. 2007. Soil carbon sequestration to mitigate climate change and advance food security. Soil Science 172: 943-956 pp.
- Leifeld J., M. Zimmermann, J. Fuhrer. 2008. Simulating decomposition of labile soil organic carbon: effects of pH. Soil Biology and Biochemistry 40: 2948-2951 pp.
- La Manna L., C. Buduba, V. Alonso, M. Davel, C. Puentes, J. Irisarri. 2007. Comparación de métodos analíticos para la determinación de materia orgánica en suelos de la región andino-patagónica: efectos de la vegetación y el tipo de suelo. Ciencia Suelo (Argentina) 25 (2): 179-188 pp.
- Martín J., E. Adema, A. Silva, F. Babinec. 2008. Efecto del rolado sobre propiedades fisicoquímicas del suelo en el ecotono Caldenal-Monte Occidental. EEA INTA. Publicación Técnica (76): pp. 30
- Martínez E., J. Fuentes, E. Acevedo. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. Journal Soil Science Plant Nutrition. 8 (1): 68-68 pp.
- Masera O., J. Ordoñez, R. Dirzo. 1997. Carbon emissions from Mexican forests: current situation and long-term scenarios. Climatic Change 35: 265-295 pp.
- Masera O., A. Cerón, A. Ordoñez. 2001. Forestry mitigation options for México: Finding synergies between national sustainable development priorities and global concerns. Mitigation and Adaption Strategies for Global Change 6: 291-312 pp.
- Matus F y C. Maire. 2000. Relación entre la materia orgánica y textura del suelo y tasas de mineralización de carbono y nitrógeno. Revista Agricultura Técnica 60: 112-126 pp.
- Moreno G., J. Cerón, R. Cerón, J. Guerra, L. Amador, E. Endañu. 2010. Estimación del potencial de captura de carbono en suelos de manglar de Isla del Carmen. Revista Tecnociencia UNACAR. 4 (1): 23-39 pp.
- Moyano A., J. Gallardo, E. Charro. 2004. Comportamiento del carbono orgánico en dos suelos forestales de la sierra de Gata (provincia de Salamanca). Sociedad. Española Ciencia Forestal. 20: 245-250 pp.

- Muñoz V. 2006. Dinámica del carbono orgánico del suelo en ecosistemas de la zona mediterránea de Chile. Tesis Doctoral. Universidad de la Frontera. Temuco, Chile. pp. 126
- Mutuo P., G. Cadish, A. Albrecht, C. Palm, L. Verchot. 2005. Potential of agroforestry for carbón sequestration and mitigation of greenhouse gas emissions from soils in the tropics. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 71: 43-54 pp.
- Návar J. 2008. Carbon fluxes resulting from land-use changes in the Tamaulipan thornscrub of northeastern Mexico. *Carbon Balance and Management* 3:6.
- Nieto O. 2011. Propiedades de los suelos de olivar con diferentes manejos. Simulación del carbono orgánico fijado aplicando el modelo RothC. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. pp. 235
- Noordwijk M., C. Cerri, P. Woomer, K. Nugroho, M. Bernoux. 1997. Soil carbon dynamics in the humid forest zone. *Geoderma* 79: 187-225 pp.
- Ochoa G., J. Oballos, J. Sánchez, J. Sosa, J. Manrique, J. Velásquez. 2000. Variación del carbono orgánico en función de la altitud. Cuenca del río Santo Domingo. Mérida-Barinas, Venezuela. *Revista Geog. Venez.* 41 (1): 79-87 pp.
- Ordóñez A. 1999. Estimación de la captura de carbono en un estudio de caso. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAP. p 13.
- Ordóñez J. y O. Maser. 2001. Captura de Carbono ante el cambio climático. *Revista Madera y Bosques*. 7 (1): 3-12 pp.
- Padilla J., J. Etchevers, R Gomora, C. Hidalgo, M. Carrasco, V. Saynes. 2011. Relación entre los métodos TOC, LOI, Walkley y Black y NIR para determinar carbono en suelos. In: Paz F. y R. Cuevas (Eds). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México, Síntesis 2011*. 169-176 pp.
- Parton W., C. Schimel, C. Cole, D. Ojima. 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plain grasslands. *Soil Science Society of America Journal* 51: 1173-1179 pp.
- Paz F., C. Balbontin, J. Etchevers, M. Martínez, C. Ortiz. 2010. Análisis multifactorial del carbono en los suelos 3. Estimación escalantes. *Revista Terra Latinoamericana*. 28 (1): 89-95 pp
- Pulido M., B. Flores, T. Rondón, R. Hernández, Z. Lozano. 2010. Cambios en fracciones dinámicas de la materia orgánica de dos suelos, inceptisol y ultisol, por el uso con cultivo de cítricas. *RevistaBioagro* 22 (3): 201-210 pp.

- Post W., R. Izaurralde, L. Mann, N. Bliss. 2001. Monitoring and verifying changes of organic carbon in soil. *ChangeClimatic* 51 (5): 73-99 pp.
- Ruíz M., G. Elizalde, J. Paolini. 1997. Distribución de la materia orgánica asociada a microagregados de suelo de dos toposecuencias. *Agronomía Tropical* 47 (4): 489-506 pp.
- Sales B. 2006. Caracterización de la materia orgánica de suelos representativos de ecosistemas amazónicos del Perú, departamento de Ucayali e influencias de su uso y manejo en el secuestro del carbono. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla. pp.162
- Sánchez R., R. Ramos, V. Geissen, J. Mendoza, E. de la Cruz, E. Salcedo, D. Palma. 2011. Contenido de carbono en suelos con diferentes usos agropecuarios en el trópico mexicano. *Revista Terra latinoamericana* 29 (2): 211-219 pp.
- Schimel D. 1995. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology*: 77-91 pp.
- Schulze D., C. Wirth, M. Heimann. 2000. Climate change: managing forest after Kyoto. *Science* 289 (5487): 2058-2059 pp.
- Segura M., P. Sánchez, C. Ortiz, M. Gutiérrez. 2005. Carbono orgánico de los suelos de México. *Revista Terra Latinoamericana*. 23 (1): 21-28 pp.
- Serna A., H. Curtis, J. Herrick, L. Murray. 2006. Carbon dioxide emissions from exhumed petrocalcic horizons. *Soil Science Society of America Journal* 70: 795-805 pp.
- SEMARNAT. 2000. Norma oficial mexicana. NOM-021-SEMARNAT-2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de los suelos, estudio, muestreo y análisis. Diario oficial, 29 de Enero de 2010. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Siebe C. 1999. Monitoreo edafo-ecológico multiescalar. En: *Conservación y restauración de suelos*. Eds. C. Siebe., H. Rodarte., G. Toledo., J. Etchevers y K. Oleschko. México. 264-278 pp.
- Skjemstad J., L. Janik, A. Tylor. 1998. Non-living soil organic matter: what do we know about it?. *Australian Journal of Experimental Agriculture*: 667-800 pp.
- Sosa V. 2012. Efecto de la adición de vermicomposta en la mineralización de carbono y biomasa microbiana en un suelo agrícola. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional. México. pp.67
- Steubing L., R. Godoy, M. Alberdi. 2001. *Métodos de ecología vegetal*. Editorial Universitaria. Santiago de Chile, Chile. 121 p.

- Tipper R. 2000. Carbon offsets from forestry projects in developing countries. Report commissioned by the department of the environment transport and regions. ECCM Edimburgo 27 pp.
- Trumper K., M. Bertky, B. Dickson, G. Van der Heijden, M. Jenkis, P. Manning. 2009. ¿La solución Natural?, El papel de los ecosistemas en la mitigación del cambio climático. Informe del programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente. pp. 76.
- Uriostegui Y. 2006. Efecto del carbono orgánico y la textura del suelo sobre la estabilidad de los agregados en los suelos de una zona cafetalera de la sierra sur de Oaxaca. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de México. Facultad de Ciencias. pp. 67.
- Videla L., C. Rostagno, M. Toyos. 2008. La materia orgánica particulada: comparación de métodos para su determinación y su valor como indicadores de calidad de suelos de Chubut. *Revista Ciencia Suelo (Argentina)* 26 (2): 219-227 pp.
- Walkley A. y Black I. 1934. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37: 29-38 pp.
- Watson R., I. Noble, B. Bolin, N. Ravindranath, C. Verardo, D. Dokken. 2000. Land use, land use-change, and forestry: a special report of the IPCC. Cambridge University Press. 377 pp.
- Wang J., L. Zhu, Y. Wang, S. Gao, G. Daut. 2012. A comparasion of different methods for determining the organic and inorganic carbon contenet of lake sediment from two lakes on the Tibetan Plateau. *Quaternary International* 250: 49-54 pp.
- Zambrano A., F. Franquis, A. Infante. 2004. Emisión y captura de carbono en los suelos en ecosistemas forestales. *Revista Forestal Latinoamericana* (35): 11-20 pp.
- Zamora J. 2003. Estimación del contenido de carbono en biomasa aérea en el bosque de pino del ejido “La Majada” municipio de Periban de Ramos, Michoacán. Tesis de licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. pp. 47.