



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN
PARA EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
UNIDAD OAXACA

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN
Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES

PROTECCIÓN Y PRODUCCIÓN VEGETAL

**EMISIONES DE CO₂ Y PROPIEDADES BIOQUÍMICAS
EN SUELOS BAJO DIFERENTES CUBIERTAS VEGETALES
EN LA ZONA DE CONSERVACIÓN DEL DISTRITO FEDERAL.**

TESIS

**PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS**

PRESENTA

TANIA LEYVA PABLO

DIRECTORES DE TESIS

**DRA. MARTHA ANGÉLICA BAUTISTA CRUZ
DR. FERNANDO DE LEÓN GONZÁLEZ**

Oaxaca, México, Diciembre, 2015



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 26 del mes de noviembre del 2015 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA)** para examinar la tesis de grado titulada: "Emisiones de CO₂ y propiedades bioquímicas en suelos bajo diferentes cubiertas vegetales en la zona de conservación del Distrito Federal"

Presentada por la alumna:

Leyva Apellido paterno	Pablo materno	Tania nombre(s)
Con registro:		
B	1	3 0 1 0 3

aspirante al grado de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

Dra. Martha Angélica Bautista Cruz

Dr. Fernando de León González

Dr. Gabino Alberto Martínez Gutiérrez

Dr. Celserino Robles Pérez

Dr. Teodulfo Aquino Bolaños

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dr. José Rodolfo Martínez y Cárdenas



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACION PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.I.D.I.R.
UNIDAD OAXACA
I.P.N.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día 26 del mes de noviembre del año 2015, el (la) que suscribe **Tania Leyva Pablo** alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro B-130103 adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de la Dra. Martha Angélica Bautista Cruz y el Dr. Fernando de León González y cede los derechos del trabajo titulado, "**Emisiones de CO₂ y propiedades bioquímicas en suelos bajo diferentes cubiertas vegetales en la zona de conservación del Distrito Federal**", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, e-mail: posgradoax@ipn.mx ó tanialeyvapablo@gmail.com se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Tania Leyva Pablo



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.D.I.R.
UNIDAD OAXACA
IPN

Resumen

El cambio de uso del suelo reduce las reservas naturales de materia orgánica y cambia su dinámica, lo cual impacta el cambio climático. El CO₂ es el gas de efecto invernadero más abundante en la atmósfera y un componente importante en el ciclo del carbono.

La zona de conservación ecológica del Distrito Federal es afectada por actividades antropocéntricas lo cual acentúa la necesidad de realizar estudios que favorezcan la protección y el buen manejo del suelo en esta zona. Por ello, en este trabajo se determinó (i) la tasa de respiración del suelo en un ciclo anual; (ii) las propiedades físicas, químicas y bioquímicas del suelo bajo diferentes tipos de manejo en el suelo de conservación del Distrito Federal. Se incluyeron dos sistemas de cultivo con roturación del suelo: maíz (*Zea mays* L.) en monocultivo (M_{mono}) y maíz asociado a leguminosa (M_{asoc}), dos sistemas perennes sin roturación: nopal (*Opuntia* sp.) con acolchado (N_{acol}) y nopal sin acolchado (N_{sacol}) a base de composta de estiércol, suelo sin cultivar (SD) durante cuatro años, y suelo bajo bosque secundario de pino-encino (SB). En cada sistema se realizaron mediciones de respiración del suelo cada 15 días durante un año y se hicieron muestreos bimensuales de cinco muestras individuales de suelo rizosférico a 15 cm de profundidad para los análisis de propiedades físicas, químicas y bioquímicas.

De noviembre a abril predominaron valores de respiración de 100-300 g C-CO₂ m⁻² h⁻¹, mientras que de mayo a octubre se presentó ese mismo intervalo de valores, alternado con picos entre 600 y 1200 g C-CO₂ m⁻² h⁻¹. Los valores promedio de respiración de los sistemas de manejo se ordenaron así: SB > N_{sacol} > N_{acol} > SD > M_{mono} > M_{asoc}. Los suelos se clasificaron como franco-arenosos, su clase de estabilidad se catalogó como estable con un riesgo ocasional de encostrado y un riesgo limitado de escorrentía y erosión difusa. El valor de pH varió de moderadamente ácido a neutro. La actividad de carboximetilcelulasa y celobiohidrolasa no cambió en los sistemas estudiados. La actividad de β-glucosidasa fue más alta en N_{acol} y en SD, mientras que la actividad de arilesterasa fue mayor en N_{acol}. El cambio de uso de suelo de forestal a agrícola redujo el contenido de carbono orgánico total, especialmente la fracción recalcitrante.

Abstract

The change in land use reduces the natural reserves of organic matter and change its dynamic, which impacts on climate change. CO₂ is the most abundant greenhouse gas effect in the atmosphere and a major component of the carbon cycle.

The area of ecological conservation in the Federal District is affected by activities, which emphasizes the need for studies that promote the protection and good soil management in this area. Therefore, in this study it was determined (i) the rate of soil respiration in an annual cycle; (ii) physical, chemical and biochemical properties of soil under different types of management on soil conservation in the Federal District. Two systems of crop land clearing included: corn (*Zea mays* L.) in monoculture (M_{mono}) and maize associated with legume (M_{asoc}), two perennial systems without plowing: nopal (*Opuntia* sp) with padding (N_{acol}) and unpadded nopal (N_{sacol}) with compost manure, soil uncultivated (SD) for four years, and secondary forest soil under pine-oak (SB). In each system soil respiration measurements were performed every 15 days for a year and bimonthly sampling of five individual samples of rhizosphere soil in 15 cm deep for the analysis physical, chemical and biochemical properties.

From november to april breathing values prevailed 100-300 g CO₂-C m⁻² h⁻¹, while from may to october showed the same range of values, alternating with peaks between 600 and 1200 g C-CO₂ m⁻²h⁻¹. The means values of breath management systems are ordered as follows: SB> N_{sacol}> N_{acol}> SD> M_{mono}> M_{asoc}. The soils are classified as sandy loam, its kind of stability was classified as stable with an occasional risk and a limited risk of runoff and diffuse erosion. The pH ranged from moderately acidic to neutral. The carboximetilcelulasa and cellobiohydrolase activity did not change in the systems studied. The β-glucosidase activity was higher in N_{acol} and SD while arylesterase activity was higher in N_{acol}. The change in land use from forest to agriculture reduced the total organic carbon, especially the recalcitrant fraction.

DEDICATORIA

*A mis padres Juan y Luz
los guías de mi vida y mi más grande tesoro...*

AGRADECIMIENTOS

A mis padres **Juan** y **Luz** quienes sin escatimar esfuerzos fueron el impulso que necesitaba y el empujón para terminar este proyecto de vida.

A la **Dra. Martha Angélica Bautista Cruz**, gracias por aceptarme en este gran proyecto y confiar desde el primer momento en mí, por sus valiosas enseñanzas, consejos, sugerencias y correcciones, por guiarme en todo momento en mi formación profesional, por todo su apoyo y por todos los momentos compartidos. Gracias.

Al **Dr. Fernando de León Gonzáles**, gracias por todas sus enseñanzas, por los aportes y consejos recibidos, por ser un guía importante de mi formación profesional, por la calidez humana con la que siempre nos recibió. Gracias.

Al **Dr. Raúl Zornoza Belmonte** gracias por aceptarme y hacerme sentir un miembro más de su grupo de investigación GARSA en la UPCT, España. Por sus valiosas enseñanzas, por ese ejemplo de trabajo y esa calidez humana con la que fui recibida por todo el equipo. Gracias.

Al **Dr. Celerino Robles Pérez, Dr. Gabino Alberto Martínez Gutiérrez, Dr. Teodulfo Aquino Bolaños y Dra. Mariela Fuentes** por sus atinados consejos y aportaciones recibidas desde el inicio del trabajo de investigación que fueron pieza clave para la estructuración del mismo.

A la **M.C Verónica del Carmen Martínez Gallegos**, gracias por ser mi guía en todas las enseñanzas recibidas en el laboratorio, por ser un pilar importante en mi formación profesional, por todos los momentos compartidos en las salidas de campo y laboratorio, por su valiosa amistad. Gracias.

Al **Sr. Arnulfo Melo Rosas**, gracias por permitirnos trabajar en los campos de cultivo a su cargo, por el apoyo en la realización de muestreos, por los aportes en la información, por esa calidez humana con la que siempre nos recibió, y por todos los buenos momentos compartidos. Gracias

A mi familia **Dulce** y **Ever**, gracias por acogerme en su hogar, por todo su apoyo no solo al inicio de este proyecto, sino porque siempre que los he necesitado siempre han estado ahí para apoyarme. A **Alex** y **Mercedes** porque son una parte muy importante de mi vida, a los sobrinitos por alegrarnos nuestros días. A mi abuelita **Anastasia** que aunque ya no estás aquí, siempre seguiste mis pasos a donde fuera, y te preocupaste tanto por mí, siempre vivirás en mi corazón.

A mis amigos **Yazmín, Alicia, Melki, Janna, Zohra, Estefanía, Elia Virginia**, que durante el paso en este proyecto siempre tuvieron palabras para animarme y alegraron mis días. A mis amigos del laboratorio **Estefani, Brenda, Luz, Reinier, Miriam, Jose Luis, Gustavo, Nelly**, quienes alegraron mis días en las largas jornadas de trabajo. Gracias

Al **Instituto Politécnico Nacional CIIDIR Oaxaca**, al **CONACYT** y al proyecto **Propiedades biológicas y emisiones de CO₂ en a rizósfera de diferentes cubiertas vegetales del suelo de conservación en el Distrito Federal**, por las becas otorgadas, sin dicho apoyo no hubiese sido posible la culminación de la tesis

A todas las personas que directa o indirectamente participaron para la realización de la tesis, muchas gracias.

INDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN GENERAL	1
ANTECEDENTES	3
CAPÍTULO 1	5
DIFERENTES PATRONES EN LA RESPIRACIÓN DEL SUELO PARA EL SISTEMA DE PLANTAS ANUAL Y PERENNE EN LA ZONA DE CONSERVACIÓN DEL DISTRITO FEDERAL	5
<i>Resumen</i>	5
<i>Introducción</i>	6
<i>Materiales y métodos</i>	9
<i>Sitio de estudio, clima y suelo</i>	9
<i>Tratamientos de sistemas de manejo del suelo</i>	10
<i>Mediciones de C-CO₂ del suelo</i>	12
<i>Métodos estadísticos</i>	12
<i>Resultados</i>	14
<i>Flujos de C-CO₂ de acuerdo con el sistema de manejo del suelo</i>	14
<i>Tendencia de la respiración del suelo por sitio</i>	16
<i>Asociación entre la humedad y la respiración del suelo a través del año</i>	17
<i>Discusión</i>	19
<i>Efecto de la fecha de muestreo y de la humedad del suelo en la respiración del suelo</i>	19
<i>Niveles de flujo de C-CO₂ de acuerdo al sistema de manejo de las tierras</i>	22
<i>Conclusiones</i>	25
<i>Referencias</i>	25
CAPITULO 2	33
DINÁMICA DEL CARBONO Y ACTIVIDADES ENZIMÁTICAS EN BOSQUE, MAÍZ Y NOPAL EN EL SUELO DE CONSERVACIÓN DEL DISTRITO FEDERAL	33
<i>Resumen</i>	33
<i>Introducción</i>	34
<i>Materiales y Métodos</i>	37
<i>Área de estudio</i>	37
<i>Muestreo y análisis de suelo</i>	37
<i>Análisis estadístico</i>	39
<i>Resultados y Discusión</i>	39

<i>Propiedades físicas, químicas y biológicas y su variación respecto al uso del suelo y al tiempo de muestreo</i>	39
<i>Relación entre la tasa de emisión de CO₂ del suelo y las variables edáficas analizadas....</i>	48
Conclusiones	49
Referencias	50

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. <i>Localización de los sitios de estudios</i>	11
Cuadro 2 <i>Descripción de los sitios de estudio</i>	11
Cuadro 3. <i>Descripción edáfica geológica y climática de los sistemas de manejo.....</i>	12
Cuadro 4. <i>Fechas de muestreo y observaciones de campo para cada evento de medición de CO₂</i>	13
Cuadro 5. <i>Niveles de probabilidad de los efectos del uso del suelo y tiempo de muestreo sobre algunas propiedades físicas, químicas y biológicas en Suelos de Conservación del D. F.</i>	39
Cuadro 6. <i>Valor medio de las propiedades físicas en los diferentes usos del suelo en el Suelo de Conservación del Distrito Federal.</i>	41

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Localización de Santa Ana Tlacotenco, México, D.F.</i>	10
Figura 2. <i>Flujos de respiración para cada parcela de observación en Santa Ana Tlacotenco. .</i>	14
Figura 3. <i>Tendencia en la emisión de C-CO₂ y humedad del suelo de acuerdo al sistema de manejo y datos de muestreo.</i>	15
Figura 4. <i>Humedad del suelo (media de mínimos cuadrados) para cada sistema de manejo en Santa Ana Tlacotenco.</i>	16

Figura 5. <i>Variabilidad de los flujos de C-CO₂ y humedad del suelo en el muestreo de datos...</i>	17
Figura 6. <i>Relación entre el cuadrado de la humedad del suelo y la respiración.</i>	18
Figura 7. <i>Temperatura del aire y lluvia. Valores medios mensuales reportados desde 1981. ...</i>	20
Figura 8. <i>Contenido de carbono orgánico total (COT) en diferentes usos del suelo en la zona de Conservación del Distrito Federal.....</i>	42
Figura 9. <i>Contenido de carbono lábil y recalcitrante en diferentes usos del suelo en la zona de Conservación del Distrito Federal.....</i>	43
Figura 10. <i>Contenido de carbono asociado las fracciones físicas en diferentes usos del suelo en la zona de Conservación del Distrito Federal.....</i>	44
Figura 11. <i>Actividad de carboximetilcelulasa (endo-β-glucanasa) en diferentes usos del suelo en la zona de Conservación del Distrito Federal.....</i>	46
Figura 12. <i>Actividad de celobiohidrolasa (β-1,4-exoglucanasa) en diferentes usos del suelo en la zona de Conservación del Distrito Federal.....</i>	46
Figura 13. <i>Actividad de β-glucosidasa en diferentes usos del suelo en la zona de Conservación del Distrito Federal.</i>	47
Figura 14. <i>Actividad de arilesterasa en diferentes usos del suelo en la zona de Conservación del Distrito Federal.....</i>	48
Figura 15. <i>Carbono de la biomasa microbiana (CBM) en diferentes usos del suelo en la zona de Conservación del Distrito Federal.....</i>	49

INTRODUCCIÓN GENERAL

El cambio climático es considerado el desafío ambiental más serio de este siglo que amenaza con el bienestar de las próximas generaciones (Denman *et al.*, 2007; FAO, 2015), las predicciones de los impactos ambientales colocan este tema como parte importante de las agendas gubernamentales a nivel internacional (Jong *et al.*, 2015).

Los efectos del cambio climático son evidentes en todo el mundo, siendo la actividad humana la principal precursora. Los rápidos cambios en los regímenes climáticos son impulsados por el calentamiento global causados por los gases de efecto invernadero (GEI) (FAO, 2013).

El dióxido de carbono (CO₂) es el GEI más abundante en la atmósfera (IPCC, 1996) y un componente importante en el ciclo del carbono (C), en este proceso el suelo desempeña una función fundamental, siendo el mayor reservorio de carbono en los ecosistemas terrestres (Lal *et al.*, 1990; Lal, 1997) y una importante fuente de CO₂ hacia la atmósfera (Wang *et al.*, 2002; Chris *et al.*, 2005) mediante la respiración edáfica (Bremer *et al.*, 2002).

El grado y velocidad de degradación de la materia orgánica (MO) definen las tasas de respiración del suelo, siendo el evento central y crítico de los cambios ecológicos globales (Moore y Knowles, 1989; Giardina y Ryan 2000), la cual puede sufrir grandes modificaciones por las actividades antropogénicas (uso e intensidad agrícola, forestal, industrial, urbanística entre otras) (IPCC, 2007), originando elevadas tasas de respiración del suelo (Schlesinger y Andrews, 2000).

La conversión de pastizales y bosques a tierras de cultivo es un evento que se ha dado durante los últimos siglos (FAO, 2015), sin embargo el contrastante desarrollo económico en México ha provocado en algunos lugares el abandono de tierras de cultivo y en otros el crecimiento desmedido de los mismos, aunado al crecimiento de la mancha urbana. El cambio de uso de suelo forestal hacia tierras de cultivo y de pastoreo ha resultado en pérdidas de C edáfico, sin embargo, mediante la restauración de suelos degradados y la adopción de prácticas de conservación del suelo, existe un gran potencial para disminuir la emisión de GEI procedentes de la agricultura, mejorar la retención de C

y aumentar la resiliencia ante el cambio climático (FAO, 2015). Otros factores que influyen significativamente en el ciclo del C son el clima, la temperatura, la humedad edáfica, el tipo de vegetación, la cubierta vegetal y el uso o manejo del suelo (cantidad y tipo de residuos orgánicos), haciendo variables los flujos de C, aún en cortos periodos (Davidson *et al.*, 1995; Li *et al.*, 2005). La actividad biológica del suelo está relacionada con la cantidad y la disponibilidad de C en el suelo, por ende la actividad microbiana constituye una medida de importancia ecológica. La actividad biológica tiene una relación directa con la mineralización del componente lábil de la MO y con los factores ambientales que influyen sobre ella (Alvear *et al.*, 2007; FAO, 2015).

La estabilización del C se consideró como uno de los puntos centrales en el protocolo de Kioto en 1992, mediante la protección de la fracción de la MO susceptible de ser mineralizada (Lützow *et al.*, 2006), debido a que el almacenamiento de MO en el suelo representa una de las mayores reservas de C orgánico a escala global (Schlesinger, 1995).

En este trabajo se determinó la dinámica anual del carbono propiedades bioquímicas y propiedades edáficas bajo diferentes tipos de manejo en el suelo de conservación del Distrito Federal.

ANTECEDENTES

En la actualidad en México no existe información detallada sobre la dinámica de los almacenes de C, de los flujos netos de C y actividad enzimática por tipo de ecosistema y uso del suelo. Hasta el momento son pocos los estudios existentes, la gran mayoría de ellos se han concentrado en los ecosistemas tropicales y es especialmente deficiente para los bosques templados del centro y sur de México (Maser, 1996; Ordóñez, 1998 y 1999; Hughes *et al.*, 1999 y 2000; Ahedo, 2000, Vela, 2009).

En el 2001 la Comisión de Recursos Naturales determinó el proyecto “Estimación del contenido de C en la biomasa en el área del Suelo de Conservación del Distrito Federal”, cuyo objetivo fue determinar el contenido de C total en el mantillo por tipo de vegetación con el siguiente orden de importancia *Abies religiosa* sp 6 ton ha⁻¹ < *Pinus* sp. 5.03 ton ha⁻¹ < *Quercus* sp. 3.91 ton ha⁻¹ < *Alnus jorullensis* sp. 3 ton ha⁻¹ < vegetación introducida 1.03 ton ha⁻¹.

Vela (2009) reportó que los mayores resultados para el C orgánico total corresponden al suelo de bosque en el siguiente orden *Abies religiosa* 155 ton ha⁻¹ < *Pinus cupressus* 139.7 ton ha⁻¹ < *Pinus* sp. 136 ton ha⁻¹ < *Quercus* sp. 124.84 ton ha⁻¹ < matorral 104.33 ton ha⁻¹ < pastizal 90 ton ha⁻¹ < suelo bajo avena 42.6 ton ha⁻¹ < suelo bajo maíz (*Zea maíz* L.) 32.9 ton ha⁻¹.

Vela (2009) también determinó el contenido medio de C en suelo de las delegaciones que conforman la zona del Suelo de Conservación, y encontró la siguiente tendencia: < Magdalena Contreras 182.5 ton ha⁻¹, < Cuajimalpa 146.4 ton ha⁻¹, < Tlalpan 115.4 ton ha⁻¹, < Milpa Alta 114.5 ton ha⁻¹, < GAM 104.8 ton ha⁻¹, < Tláhuac 98.6 ton ha⁻¹ y < Xochimilco 77.8 ton ha⁻¹.

En la delegación de Milpa Alta en una sección transversal del volcán Tulmeac, con suelos en proceso de erosión hídrica superficial, caracterizada por su uso forestal y presencia de bosques de *Abies religiosa* a una altitud de 2800-3305 m, el contenido de C del suelo fue de 79.1 ton ha⁻¹ y en pastizales *Mulhembergia macro aura* y *Stipa* sp. a una altitud de 2810-3000 m el contenido de C del suelo estimado fue de 42.6 ton ha⁻¹ (Vela, 2009).

Estudios Técnicos (2010) determinó la cantidad de C almacenado mediante el estudio denominado “Evaluación de la vulnerabilidad ambiental que presenta el Suelo de Conservación por la pérdida de servicios ecosistémicos a consecuencia del cambio de uso de suelo”, la mayor cantidad de C corresponde al bosque de Oyamel con 772,336 ton de C en un superficie de 9,357.60 ha; le sigue el bosque de pino con 778,362 ton de C en una superficie de 19,529.96 ha y por último los bosques mixtos con 192,539 ton de C en una superficie de 5,737.85 ha.

Vela *et al.* (2012) determinaron el contenido de C en el Suelo de Conservación por tipo de vegetación y uso describiéndose de la siguiente forma < bosque de *Abies religiosa* 145.6 $\mu\text{g ha}^{-1}$, < bosque de *Quercus* sp. 121.3 $\mu\text{g ha}^{-1}$, < bosque de *Pinus* sp. 119.4 $\mu\text{g ha}^{-1}$, < matorral 11.7 $\mu\text{g ha}^{-1}$, < pastizal 90 $\mu\text{g ha}^{-1}$, < suelo agrícola 46.1 $\mu\text{g ha}^{-1}$ >. Para los suelos con actividad agrícola el promedio resultó ser de 46.1 $\mu\text{g ha}^{-1}$. El contenido de C en suelos cultivados con maíz fue de 32.9 $\mu\text{g ha}^{-1}$ y para el suelo con avena forrajera fue de 42.6 $\mu\text{g ha}^{-1}$. La delegación de Milpa Alta presentó un promedio de 106.9 $\mu\text{g ha}^{-1}$.

Para el Suelo de Conservación del Distrito Federal, son pocos los estudios respecto a las emisiones de CO₂ por el suelo o la vegetación. Los inventarios de emisiones de GEI para el Distrito Federal descritos por la Secretaría del Medio Ambiente mediante diferentes fuentes, carecen de los datos correspondientes al suelo o vegetación, restando la importancia que representan estos sistemas. La mayoría de los estudios se concentran en la zona metropolitana del Valle de México (Alvear *et al.*, 2007; FAO, 2015).

En el Distrito Federal se producen 36.2 millones de toneladas de CO₂, equivalentes a 61% de las emisiones que se generan en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), (SMA, 2007).

Según datos recopilados por la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal (2006), para la zona metropolitana del Valle de México se emitieron para el año 2000 54.1 millones de ton de CO₂ y para el 2004, cerca de 35.8 millones de ton de CO₂ por diferentes fuentes de emisión, en ambos años no se contó con datos de emisiones de CO₂ ocasionados por la vegetación y los suelos.

CAPÍTULO 1

DIFERENTES PATRONES EN LA RESPIRACIÓN DEL SUELO PARA EL SISTEMA DE PLANTAS ANUAL Y PERENNE EN LA ZONA DE CONSERVACIÓN DEL DISTRITO FEDERAL.

Resumen

Se reportan flujos de emisiones de C-CO₂ para un estudio observacional de seis manejos de suelos en un ecosistema en el cual se alternan zonas de cultivo de temporal con áreas de bosque de *Pinus* sp.-*Quercus* sp. Objetivos: 1. Conocer la tendencia de la respiración del suelo durante mediciones periódicas a lo largo de un año, 2. Comparar los niveles de emisiones de C-CO₂ para los diferentes manejos de suelo, y 3. Determinar la asociación entre humedad del suelo y la tasa de respiración. Los tratamientos incluyeron dos sistemas de cultivo con roturación del suelo (maíz en monocultivo, y maíz asociado a leguminosa), dos sistemas perennes sin roturación (*Opuntia* sp., con y sin acolchado a base de composta de estiércol); suelo sin cultivar durante cuatro años, y suelo bajo bosque secundario. En los meses de noviembre a abril predominaron valores de respiración de 100-300 g C-CO₂ m⁻² h⁻¹, mientras que en los meses de mayo a octubre se presentó ese mismo intervalo de valores, alternado con picos entre 600 y 1200 g C-CO₂ m⁻² h⁻¹. La respiración del suelo mostró patrones diferentes para cada sistema de manejo del suelo (P<0.05). Los sistemas perennes (bosque *Opuntia* sp.) y el suelo en descanso mostraron una mayor estabilidad en las tasas de respiración tanto en la época seca como en la de lluvias a lo largo del año, mientras que los dos tratamientos con roturación del suelo de maíz presentaron los picos más altos registrados en el estudio así como una caída durante los meses en los cuales los campos se encontraban sin plantas sembradas. Los valores promedio de respiración de los sistemas de manejo se ordenaron así: bosque > *Opuntia* sp. sin acolchado > *Opuntia* sp. con acolchado > suelo en descanso > maíz en monocultivo > maíz asociado a leguminosa.

Palabras clave: CO₂, emisiones, respiración autótrofa, respiración heterótrofa, suelo.

Introducción

La concentración de GEI ha aumentado gradualmente a nivel mundial en las últimas décadas, considerado uno de los más sugestivos y principales retos científicos para los investigadores (Christopher y Lal, 2007). El suelo es una fuente significativa del flujo de CO₂ entre los ecosistemas terrestres y la atmósfera. Las emisiones por CO₂ corresponden a la respiración autotrófica, a cargo de las raíces de las plantas, además de la respiración heterotrófica que llevan a cabo los microbios y macrofauna en el suelo (Trumbore, 2006).

La materia orgánica (MO) en el suelo es un complejo de pools de diferente edad y niveles de recalcitrancia. El origen del CO₂ que respiran los suelos proviene de fuentes de rápida descomposición como puede ser la MO de las raíces finas, las hojas que caen al suelo y los polisacáridos producidos por las bacterias del suelo (Trumbore, 2006). La MO con mayor tiempo de residencia en el suelo (pool pasivo) permanece protegida por procesos químicos y físicos durante décadas, siglos y hasta milenios (Schmidt *et al.*, 2011; Stockmann *et al.*, 2013).

Los factores que afectan los procesos de acumulación o pérdida de C almacenado en suelos forestales son los incendios, las tasas de acumulación de materia seca de la vegetación natural o cultivada, el grado de agregación del suelo, la interacción de la MO con la fracción fina del suelo y la estructura de la comunidad microbiana, entre otros (Trumbore, 2006). Las variaciones en dichos factores, pueden influir enormemente en la concentración del C atmosférico y en el balance calórico (Veenendaal *et al.* 2004, Kane *et al.* 2005), estas variaciones determinarán si un ecosistema o agroecosistema se comporta como fuente o sumidero de CO₂ (Davinson *et al.*, 2006; Jassal *et al.* 2007).

La persistencia de la MO en el suelo se debe a un balance entre su descomposición y los procesos de estabilización de la misma, sin que exista todavía un modelo que explique y prediga su evolución (Moyano *et al.*, 2013; Stockmann *et al.*, 2013). La estabilización de la MO por procesos físicos ocurre principalmente por la adsorción de compuestos orgánicos a las superficies de los minerales, y dicho fenómeno no depende de la actividad enzimática y es menos sensible a cambios en la temperatura del suelo (Thornley y Canell, 2001). Se ha reportado que como resultado de la interacción entre la

fracción arcillosa del suelo y moléculas de tipo proteico se forman parches de alta concentración de C orgánico adheridos a los minerales (Kleber *et al.*, 2007).

Los ecosistemas parecen alcanzar estados de equilibrio en cuanto a tasas de respiración, las cuales dependen de la pendiente del terreno, su exposición, las interacciones entre los pools activos y pasivos de C orgánico, la profundidad del suelo, los sistemas de manejo utilizados en el pasado, y la diversidad de la microbiota (Schmidt *et al.*, 2011). El solo aumento de la temperatura en los ecosistemas del mundo no se traduce automáticamente en aumentos de la respiración del suelo (Giardina y Ryan, 2000). Una de las principales intervenciones humanas que contribuyen con el incremento de las emisiones es la elevada tasa de deforestación (Galford *et al.*, 2010).

Los suelos que cambian de forestales a agrícolas están sometidos a condiciones que favorecen la exposición de la MO a procesos de respiración que podrían significar una pérdida de su capacidad para almacenar C (Paustian *et al.*, 2000). Sin embargo, está demostrado que bajo manejos que impliquen restituciones constantes de biomasa de residuos vegetales y aportaciones suplementarias de tipo orgánico o no orgánica (fertilizantes), se puede asegurar la conservación de MO en el suelo o incluso revertir la tendencia de pérdida de C (Janzen, 2006; Johnston *et al.*, 2009). Se acepta que el paso de tierras forestales a parcelas agrícolas incrementa sus tasas de respiración debido a que la MO de más fácil descomposición es más fácilmente oxidada por los microbios del suelo (Paustian *et al.*, 2000; Paustian *et al.*, 1997).

Debido al incremento poblacional y la demanda de espacios y alimentos, la conversión de sistemas forestales a sistemas agrícolas o urbanos a escala global, irá en aumento. Se sabe que en las últimas décadas los suelos agrícolas han perdido almacenes de C orgánico contribuyendo con emisiones de CO₂ por lo que será necesario implementar sistemas de manejo basados en prácticas que contribuyan a revertir esta tendencia (Schmidt *et al.*, 2011). Dichas prácticas incluyen para suelos agrícolas cero o mínima labranza, incorporación de residuos de cosecha, rotaciones con leguminosas, incremento de la flora y fauna del suelo que interviene en el ciclo de nutrimentos, entre las más importantes (Stockman *et al.*, 2013). Para el caso del Centro de México se han reportado mejoras sustanciales en la estructura del suelo mediante la rotación de maíz-trigo,

eliminación de la labranza profunda e incorporación de residuos de cosecha (Fuentes *et al.*, 2012).

La medición de parámetros relacionados con el ciclo de C es una necesidad para regiones agroproductoras en diferentes ecosistemas del mundo (Stockman, 2013). Además de la temperatura y la incidencia de luz, la humedad del suelo es uno de los factores principales que afectan la acumulación de C orgánico. El agua es esencial para la producción de biomasa vegetal la cual se reincorpora al suelo a través de la descomposición de las raíces y de una parte de la biomasa aérea de los cultivos. De igual forma el agua en el suelo se requiere para el crecimiento de las comunidades microbianas las cuales participan en la fertilidad de los sistemas a través de la mineralización y relaciones simbióticas que favorecen la acumulación de C en el suelo (Moyano, 2013).

A nivel global la acumulación de stocks de C está positivamente correlacionada con la precipitación anual de tal forma que se encuentran mayores cantidades de C en ecosistemas con humedad elevada (Jobbagy y Jackson, 2000; Moyano *et al.*, 2013). A pesar de su importancia para la respiración del suelo, la humedad es un factor que ha recibido una menor atención en los estudios empíricos a nivel mundial en comparación con la temperatura (Moyano *et al.*, 2013). Conforme la humedad del suelo disminuye la actividad microbiana tiende a decrecer incluso a niveles muy bajos cuando se alcanza el punto de marchitez permanente del suelo.

La pérdida de continuidad de humedad en el sistema de poros interconectados del suelo afecta la difusión de solutos necesaria para la actividad de los microorganismos del suelo (Moyano *et al.*, 2013). En estas condiciones los microorganismos deben emplear energía para establecer el equilibrio osmótico con su microambiente. En el otro extremo (exceso de agua en el suelo), la saturación hídrica de los poros implica una menor difusión de oxígeno lo que afecta la actividad de los microorganismos aerobios. De tal forma que la relación entre humedad y respiración del suelo influye en los procesos físicos de difusión de solutos y agua, procesos fisiológicos (osmoregulación) y bioquímicos (dinámica enzimática) (Moyano *et al.*, 2013).

El presente trabajo se enfocó a comparar las tasas de respiración del suelo en un ciclo de un año y para condiciones de manejo que son representativas de una amplia región del Centro de México caracterizada por un clima con una larga temporada de bajas

precipitaciones (noviembre a abril) y otra con lluvias (mayo a octubre). El sitio bajo estudio se localiza al sur de la Ciudad de México en la zona denominada Suelo de Conservación, destinada para el amortiguamiento ecológico de la megalópolis.

Se estima que esta zona representa 59% del territorio de la ciudad (1485 km²; Centro GEO, 2010). Debido a sus características geomorfológicas y ambientales la zona aporta agua de lluvia a los almacenes freáticos del Valle de México (Rodríguez y Blanco, 2006). El Suelo de Conservación de la Ciudad de México ha perdido en los últimos 20 años una superficie de vegetación forestal de aproximadamente 10000 ha (Centro GEO, 2010) y se han abierto parcelas de cultivos de autoconsumo (maíz en monocultivo o asociado) y algunas especies perennes destinadas a generar ingresos adicionales a la agricultura familiar, como es el caso de *Opuntia*. OJETIVO

Materiales y métodos

Sitio de estudio, clima y suelo

La localidad (Santa Ana Tlacotenco, México D.F.) se localiza a 19°10'31'' (latitud N) y 98°59'53''O (longitud W), a una altitud de 2700 m (CONAGUA, 2015), asentada en suelos de conservación de origen volcánico (Figura 1). El clima de la zona es templado subhúmedo C(w1) y semifrío subhúmedo Cb (w2) con lluvias en verano y una temperatura media anual de 15.5 °C, posee una precipitación anual de 704.6 mm. Los meses con precipitaciones > 50 mm van de mayo a octubre.

La topografía es accidentada, sus pendientes varían entre 15 a 30%. La geología de formación se denomina ígnea extrusiva basáltica, formada por plagioclasa, piroxeno y magnetita, la topografía es montañosa con un intervalo altitudinal que va de los 2,230 a los 3,680 m, con pendientes de 1 hasta 30°. Los suelos son de origen volcánico poco intemperizados y alto contenido de arena y limo, los suelos dominantes son Feozem (INEGI 2015).

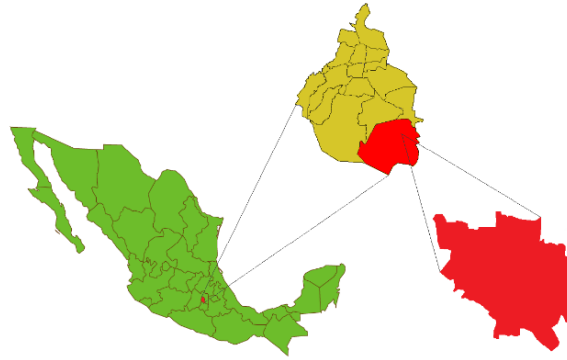


Figura 1. Localización de Santa Ana Tlacotenco, México, D.F.

Tratamientos de sistemas de manejo del suelo

Los sistemas de manejo seleccionados para el estudio observacional fueron: 1. Maíz asociado a leguminosa (*Phaseolus vulgaris* sp., *Vicia faba* L., *Vicia* sp.) y con aporte intermedio de MO «M_{asoc}» con abonado continuo desde hace 5 años, compuesto de estiércol de borrego (95%) y cerdo (5%). 2. Maíz en monocultivo con labranza y fertilización convencional «M_{mono}» con abonado continuo desde hace 5 años con aplicación de fertilizantes y herbicidas esporádicamente con composición orgánica de residuos de la planta de maíz (70%) y estiércol de caballo (30%). 3. *Opuntia* sp. con acolchado «N_{acol}» con abonado continuo desde hace 9 años, compuesto de estiércol de vaca (70%), caballo (10%), aserrín y paja de avena (20%). 4. *Opuntia* sp. sin acolchado «N_{sacol}» con ligero abonado continuo desde hace 9 años, compuesto de estiércol de caballo (30%), borrego (30%), puerco (30%), aves de corral (5%). 5. Suelo agrícola en descanso sin aporte orgánico ni control de maleza «SD». 6. Suelo bajo bosque de encino pino «SB» desde hace más de 50 años.

Los aportes orgánicos en M_{asoc} y N_{sacol} se han mantenido durante los últimos 5 años previos a base de aportes de estiércoles de borrego y de cerdo, obtenidos en la unidad familiar del propietario. Las parcelas de maíz y el área de bosque se encuentran en terrenos a 4 km del asentamiento humano principal a mayor altitud, mientras que las de *Opuntia* están en la vecindad del área habitada a menor altitud. La información recabada de los sitios de estudio proviene de los propietarios de las parcelas observacionales y se localizan en las coordenadas descritos en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Localización de los sitios de estudios

Sitio	Localización geográfica		Altitud (m)
M _{asoc}	19°09'02.4''N	98°58'29.5''O	2736
M _{mono}	19°09'03.4''N	98°58'26.2''O	2738
N _{acol}	19°10'47.5''N	98°59'27.9''O	2553
N _{sacol}	19°10'47.6''N	98°59'28.2''O	2552
SD	19°08'59.0''N	98°58'29.5''O	2737
SB	19°09'38.5''N	98°59'04.9''O	2728

En el Cuadro 2 se muestra información sobre el manejo para cada uno de los seis tratamientos. Las labores de preparación del terreno en M_{mono} se realizaron con arado de disco (20 cm de profundidad), mientras que en M_{asoc} la roturación se hizo con arado de vertedera y tracción animal (20 cm de profundidad).

Cuadro 2 Descripción de los sitios de estudio

Parcelas	Superficie (ha)	Años	Uso de suelo	Arado	Control en malezas
(1) M _{mono}	1.0	5	Agrícola	Tracción animal	Tracción animal
(2) M _{asoc}	1.0	20	Agrícola	Tracción animal	Tracción animal
(3) N _{sacol}	0.1	25	Agrícola	Ausente	Arado de vertedera
(4) N _{acol}	0.1	25	Agrícola	Ausente	Arado de vertedera
(5) SD	0.5	5	Agrícola	Ausente	Tracción animal
(6) SB	1.0	> 50	Bosque	Ausente	Ausente

M_{mono}= labranza convencional y uso de fertilizantes; M_{asoc}= maíz asociado a *Vicia faba*, N_{acol}= acolchado, N_{sacol}= sin acolchado, SB= suelo de bosque de encino pino, SD= Suelo en periodo de descanso.

En el Cuadro 3 se muestra información edáfica, geológica y climática de cada uno de los sistemas de manejo, del suelo de Santa Ana Tlacotenco en el suelo de conservación en el Distrito Federal.

Cuadro 3. Descripción edáfica geológica y climática de los sistemas de manejo.

Sitio	Precipitación media anual (mm)	Suelo	Geología	Clima	Uso del suelo
<i>M_{asoc}</i>	800 a 1000	Feozem	IEB	Cb'(w2)	ATA
<i>M_{mono}</i>	800 a 1000	Feozem	IEB	Cb'(w2)	ATA
<i>N_{acol}</i>	600 a 800	Feozem	IEB	C(w1)	ATA y Per.
<i>N_{sacol}</i>	600 a 800	Feozem	IEB	C(w1)	ATA y Per.
<i>SD</i>	800 a 1000	Feozem	IEB	Cb'(w2)	ATA
<i>SB</i>	800 a 1000	Feozem	IEB	Cb'(w2)	Bosque de pino

ATA= Agricultura de temporal anual; Per= Permanente; IEB= Ígnea extrusiva basáltica.

Mediciones de C-CO₂ del suelo

Las mediciones de flujo de CO₂ se realizaron cada 15 días en 5 puntos de cada parcela y en los cuales siempre se hicieron las mediciones en las 22 fechas. La primera fecha de muestreo fue el 1 de diciembre de 2013 y la última el 21 de diciembre de 2014 (Cuadro 4). Todas las mediciones se realizaron por las mañanas, entre 9 y 12 h. Se utilizó un medidor portátil de análisis infrarojo (EGM-4; PP Systems, Hitchin, UK) y una cámara de respiración de suelo provisto de una bomba de succión. La cámara se colocó sobre suelo desnudo con mediciones en intervalos de 30 s. La tasa de flujo se registró en g C-CO₂ m⁻² h⁻¹. Para el SB y N_{acol} previo a cada medición se retiró la hojarasca y el acolchado respectivamente, colocando el medidor sobre la superficie del suelo. Las determinaciones de humedad en el suelo (cm³ 100 cm⁻³) se realizaron una vez obtenida la tasa de emisión de CO₂ y se hicieron con un aparato TDR (marca mini-Trace®).

Métodos estadísticos

Los datos fueron procesados con el programa JMP (Ver. 7.0 para Windows). Las variables bajo estudio fueron C-CO₂ y humedad del suelo, los cuales fueron replicados en 5 puntos y medidos en 22 fechas.

Cuadro 4. Fechas de muestreo y observaciones de campo para cada evento de medición de CO₂.

No.	Fecha	Estación	Días ¹	Días ²	Prácticas agrícolas	Clima
1	01/12/2013	I	0	0		Hielo(todas las parcelas)
2	15/12/2013	I	14	14		Hielo(campos de maíz)
3	26/01/2014	I	56	42		Hielo (campos de maíz)
4	09/02/2014	I	70	14	Surcos+arado (Maíz)	Hielo (SD)
5	23/02/2014	I	84	14		Hielo (todas las parcelas)
6	16/03/2014	I	105	21	Arado	
7	06/04/2014	P	126	21	Siembra(Maíz)	lluvia (todas las parcelas)
8	20/04/2014	P	140	14		lluvia (todas las parcelas)
9	09/05/2014	P	159	19	Estiércol composteado (N _{sacol})	lluvia (todas las parcelas)
10	01/06/2014	P	182	23		lluvia (todas las parcelas)
11	15/06/2014	P	196	14	Control de malezas (M _{asoc}) cosecha (Nacol).	lluvia (todas las parcelas)
12	30/06/2014	P	211	15	Abundantes malezas(M _{mono} , N _{acol})	lluvia (todas las parcelas)
13	13/07/2014	P	225	14	Abundante maleza (<i>Opuntia</i>)	lluvia (todas las parcelas)
14	26/07/2014	V	238	13	Abundante maleza (M _{mono})	Superficie del suelo seco
15	07/08/2014	V	250	12	Denso follaje del cultivo (Maíz)	Lluvia (todas las parcelas)
16	21/09/2014	O	295	45	Cosecha (Nacol)	Lluvia (todas las parcelas)
17	07/10/2014	O	311	16	Denso follaje del cultivo (Maíz)	Superficie del suelo humedo
18	19/10/2014	O	323	12	Denso follaje del cultivo (Maíz)	Lluvia (todas las parcelas)
19	02/11/2014	O	337	14	Denso follaje del cultivo (Maíz)	Suelo compactado (superficie)
20	18/11/2014	O	353	16	Cosecha (Maíz)	
21	07/12/2014	O	372	19		
22	21/12/2014	I	396	14		

Días (1) = Días acumulados contado del primer día del muestreo, Día (2)= Días entre dos fechas; I=Invierno; P= Primavera; V=Verano; O= Otoño.

Para el análisis se empleó un modelo lineal mixto donde la variable de respuesta fue tanto el logaritmo natural de C-CO₂ como el de humedad. Los efectos fijos considerados en el modelo fueron el tratamiento y la fecha de medición, mientras que los aleatorios fueron repetición y el residuo. Las medias de los tratamientos fueron comparadas con la prueba de Tukey (P<0.05). Se realizó un análisis de regresión lineal para estimar el grado de asociación entre la humedad del suelo y las emisiones de CO₂, y entre la humedad del suelo y la fecha de muestreo.

Resultados

Flujos de C-CO₂ de acuerdo con el sistema de manejo del suelo

En la Figura 2 se muestran los promedios de C-CO₂ para las diferentes coberturas vegetales; las diferencias entre fechas fueron significativas ($P < 0.05$). El bosque secundario fue el que mostró el promedio más alto. Los tratamientos de Nacol, SD y Nsacol tuvieron valores muy similares entre ellos y cercanos al del bosque. Los valores de C-CO₂ para los dos tratamientos con maíz fueron similares entre ellos y estuvieron por debajo de los otros cuatro tratamientos. El intervalo de variación de todos los promedios mínimos cuadráticos se ubicó entre 180 y 240 g C-CO₂ m⁻² h⁻¹, aproximadamente.

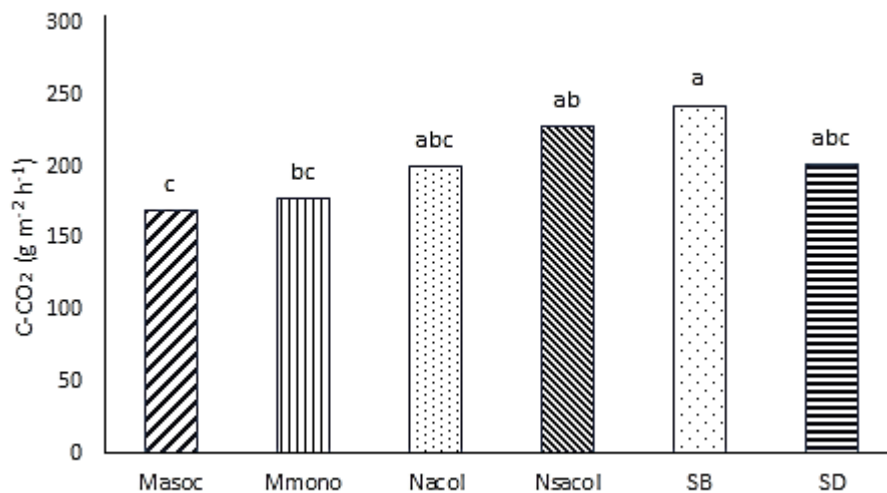


Figura 2. *Flujos de respiración para cada parcela de observación en Santa Ana Tlacotenco. Valores de la media de los mínimos cuadrados.*

La variación del flujo C-CO₂ a lo largo de las 22 mediciones aparece en la Figura 3 para cada cobertura vegetal. El M_{mono} y M_{asoc}, presentaron algunos picos de respiración por arriba de 1000 g C-CO₂ m⁻² h⁻¹ sin que dichos picos coincidieran en las fechas. Los dos sistemas bajo maíz fueron los que presentaron la mayor variabilidad de emisiones de C-CO₂ (Coeficientes de variación de 126.5 y 95.8 para M_{asoc} y M_{mono}, respectivamente).

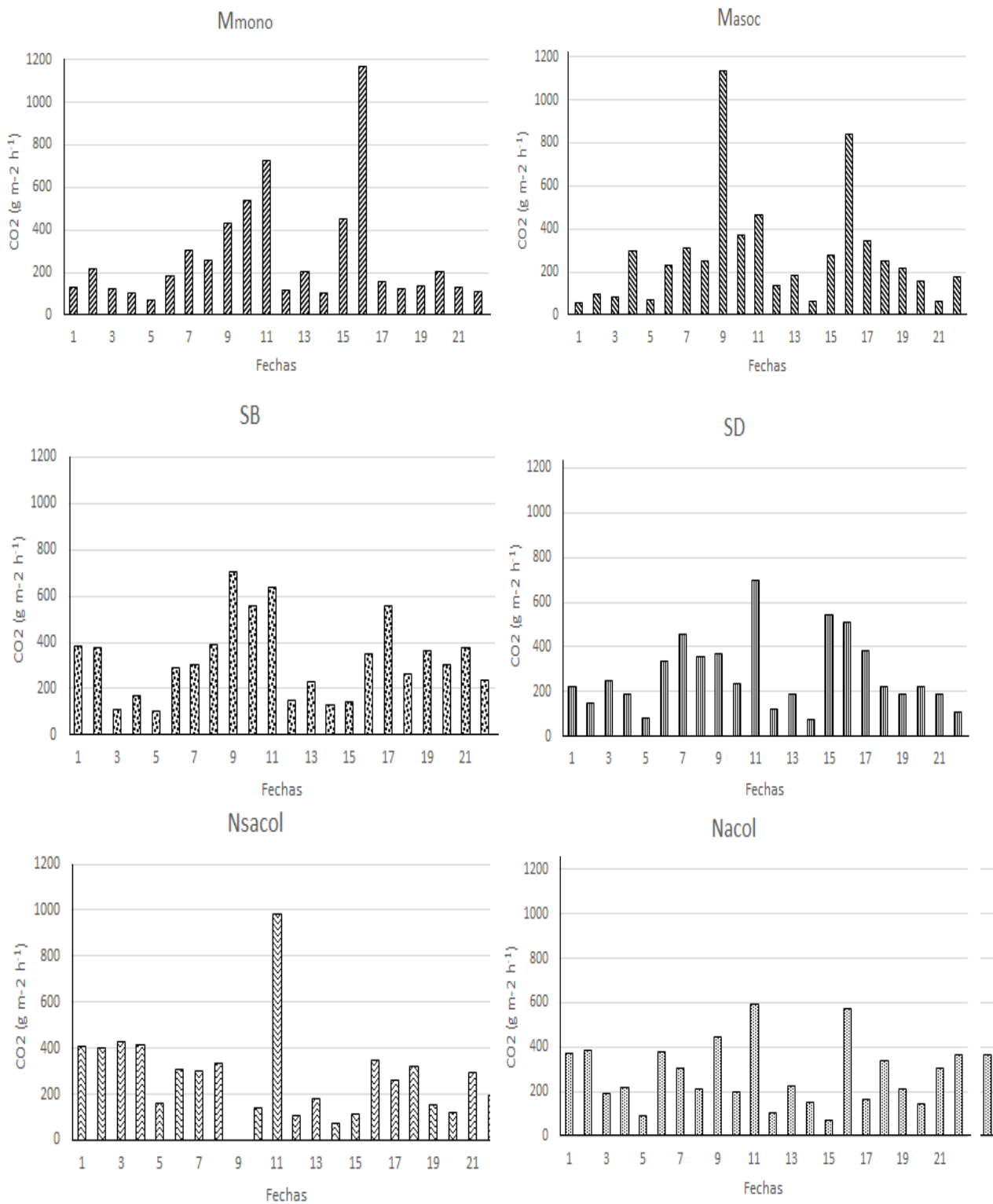


Figura 3. Tendencia en la emisión de C-CO₂ y humedad del suelo de acuerdo al sistema de manejo y datos de muestreo. Datos no normalizados

En cambio, los sistemas que mostraron una mayor estabilidad en los valores de respiración fueron el bosque, seguido por SD y N_{acol} (CV de 52.7, 74.7 y 76.3, respectivamente). Ninguno de estos tres sistemas tuvo picos de respiración como los encontrados en los dos sistemas de maíz. N_{sacol} tuvo un comportamiento intermedio, con un pico ligeramente inferior a $1000 \text{ g C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ en la fecha 11. Durante la época de secas no se presentaron picos de respiración para ninguno de los sistemas de manejo (Figura 3).

Los promedios de humedad en el suelo en cada una de las coberturas vegetales se presentan en la Figura 4. El sistema de N_{acol} presentó el valor más alto, lo cual confirma la función del acolchado como una práctica que disminuye la evaporación del agua en el suelo. El tratamiento con el contenido de humedad más bajo correspondió a N_{sacol} . El comportamiento de los dos tratamientos de maíz en cuanto a humedad fueron similares al de N_{acol} mientras que el bosque y el suelo en descanso fueron cercanos al promedio de N_{sacol} .

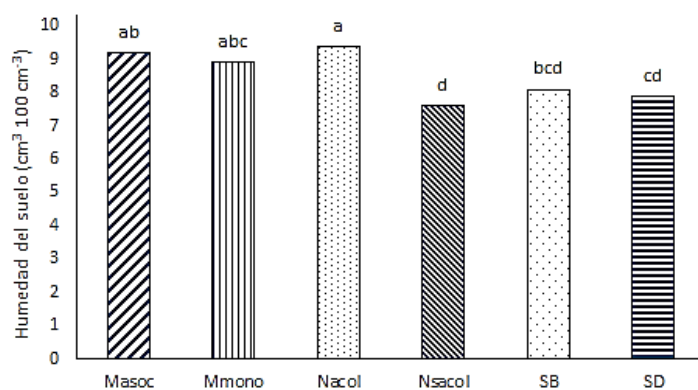


Figura 4. Humedad del suelo (media de mínimos cuadrados) para cada sistema de manejo en Santa Ana Tlacotenco.

Tendencia de la respiración del suelo por sitio

En la Figura 5 se presentan los valores promedio de flujo de C-CO_2 para cada fecha de muestreo, incluyendo en el análisis los seis sistemas de manejo ($n=665$). El análisis estadístico arrojó diferencias significativas ($P<0.05$). En 16 de 22 fechas los valores promedio de respiración se ubicaron entre 100 y $300 \text{ g C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ mientras que en tres fechas (5, 12 y 14) se presentaron los valores promedio más bajos. Se registraron tres

fechas con picos de respiración (los promedios variaron entre 500-650 g C-CO₂ m⁻² h⁻¹, los cuales correspondieron a la época de lluvias en primavera-verano (días 9, 11 y 16).

Los resultados de esta gráfica pueden servir como referencia de la tendencia de la respiración promedio del ecosistema local, el cual incluye los sistemas de manejo más representativos del sitio aquí analizados. Debe considerarse que se trata de una base de datos correspondiente a la medición de un solo año, por lo que no es válido tomarlas todavía como representativas del sitio.

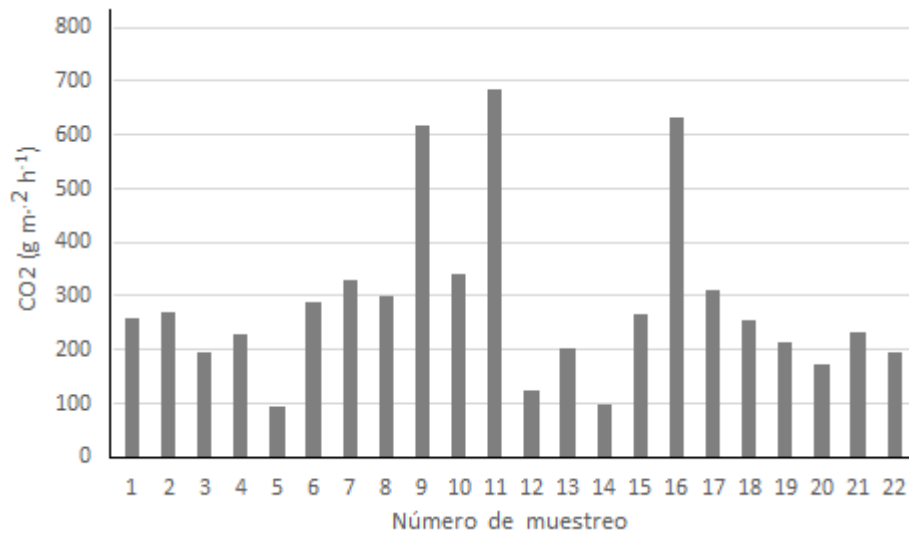


Figura 5. Variabilidad de los flujos de C-CO₂ y humedad del suelo en el muestreo de datos. (Media de valores n= 660).

Asociación entre la humedad y la respiración del suelo a través del año

La asociación entre la humedad del suelo y flujo de C-CO₂ analizada para todo el conjunto de datos fue baja ($r^2=0.023$) pero significativa ($P<0.0005$) (Figura 6). Cuando la regresión se analizó por separado para cada una de las fechas se encontraron asociaciones significativas en las fechas 12 ($r^2=0.32$; $P<0.0009$), 16 ($r^2= 0.14$; $P<0.03$) y 18 ($r^2=0.19$; $P<0.01$).

En cuanto al análisis de las curvas de humedad del suelo y flujos de C-CO₂ para cada sistema de manejo (Figura3) destacan las siguientes tendencias: (1) en las fechas previas a la siembra (1-6) los campos de maíz (M_{acol} y M_{sacol}), mostraron tasas muy bajas de respiración a pesar de la presencia de una humedad en el suelo por arriba de 5%; (2) los

dos tratamientos con la especie cultivada perenne (*Opuntia*) y el suelo bajo bosque mantuvieron en la época seca del año niveles de humedad cercanos a 5% y tasas de

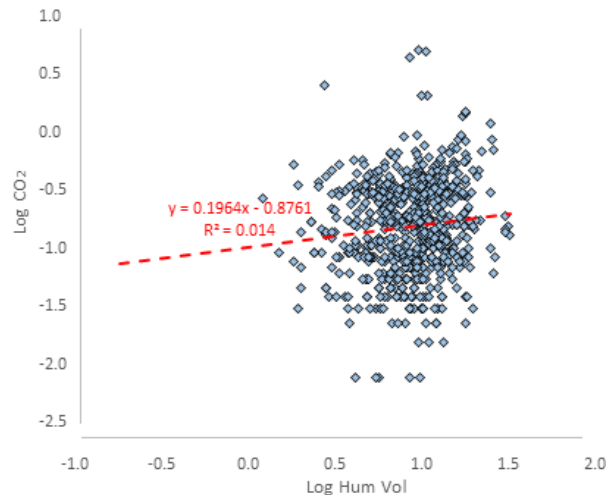


Figura 6. Relación entre el cuadrado de la humedad del suelo y la respiración. Valores de \log_{10} ($n=655$)

respiración igual o por arriba a $200 \text{ g C-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (Figura3) lo cual sugiere una activa respiración de la comunidad microbiana y las raíces.

El SD presentó un patrón de humedad similar al SB y un comportamiento de respiración en la época seca del año similar a *Opuntia* y SB. Este conjunto de tendencias sugieren que para mantener tasas de respiración intermedias en la época sin lluvias, como las observadas en el presente estudio, se requiere la presencia de raíces vivas. Se ha reportado que la dinámica de producción de exudados e incorporación de osmolitos (Moyano *et al.*, 2013) podría favorecer la actividad microbiana en condiciones de baja humedad y bajas temperaturas en ambientes mésicos como el del presente estudio. Con las lluvias y el humedecimiento del suelo se presentó una tendencia de incremento en las emisiones de CO_2 para los campos bajo maíz así como los picos más altos encontrados en el estudio.

En las mediciones de junio (12) a septiembre (15), a pesar de que el suelo presentaba una humedad por arriba de 8% se observaron dos fechas con emisiones de $\text{C-CO}_2 \leq 100 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ lo cual indica que en esta temporada otros factores, además de la humedad en el suelo, influyeron en la caída de la respiración. La temperatura del suelo (no medidas en el presente estudio) así como la disponibilidad de sustratos para ser

degradados por los microorganismos del suelo pudieron intervenir en estas caídas de la respiración.

Discusión

Efecto de la fecha de muestreo y de la humedad del suelo en la respiración del suelo

El presente trabajo reporta la variabilidad de flujos de C-CO₂ medida a través de 22 días espaciados a lo largo de un año, para seis sistemas de manejo en suelos con bajo contenido de arcilla, en un ambiente localizado a una altitud de 2700 m en el Centro de México. El clima de la región presenta seis meses de bajas precipitaciones (noviembre-abril).

Los resultados mostraron una prevalencia de tasas intermedias de respiración en 16 de 22 fechas lo cual pudo deberse a que incluso durante los dos períodos secos del año el suelo presentó humedades alrededor de 5 % (invierno e inicio de primavera) y 10 % (en otoño) (Figura 5), las cuales fueron suficientes para mantener la actividad microbiana en el suelo. En la época de lluvias aparecieron picos de respiración 2-3 veces mayores que el nivel intermedio más frecuente registrado durante el estudio. Estos picos dentro del período de lluvias se alternaron con caídas en la respiración como se indican en la Figura 4. Moyano *et al.* (2013) señalan que en la relación entre humedad del suelo y flujo de C-CO₂ ocasionada por la respiración heterótrófica intervienen un conjunto de factores con múltiples interacciones entre ellos, siendo crucial la difusión de sustratos y de agua utilizables por las bacterias y hongos que viven en el suelo.

La difusión de sustratos orgánicos disponibles para la descomposición microbiana disminuye cuando la humedad del suelo es decreciente, mientras que la concentración de oxígeno aumenta en el sistema poroso del suelo. En un modelo hipotético de curva de respiración (SR) en función de la humedad volumétrica (θ), bajo condiciones de incubación de corto plazo en laboratorio, se establecen tres zonas de respiración del suelo en una curva de tipo campana: el punto (A) corresponde a tasas muy bajas de SR cuando θ tiende a cero, (B) es la zona de incremento de SR en la curva, y se alcanza el pico más

alto de SR cuanto θ aumenta sin alcanzar la saturación de los poros; (C) es la zona de la curva en la que decrece SR cuando se alcanza la saturación de agua en los poros del suelo, con una caída tal en la concentración de oxígeno que afecta a la población microbiana (Moyano *et al.*, 2013).

Los resultados del presente estudio realizado en condiciones de campo sugieren que la humedad del suelo fue lo suficientemente alta para permitir una actividad microbiana a lo largo de todo el año sin que el punto A del modelo antes descrito se refleje en una SR nula o cercana a cero. Es sabido que bajo condiciones de campo el humedecimiento del perfil del suelo es altamente variable debido a cambios en el microrrelieve, heterogeneidades físicas y químicas en el terreno y variabilidad del volumen de agua de lluvia que recibe la superficie del suelo. Los resultados del presente trabajo mostraron una alternancia de subidas y caídas de SR durante los meses de mayo a octubre, comparadas con las precipitaciones históricas más altas del sitio, mostrados en la Figura 7.

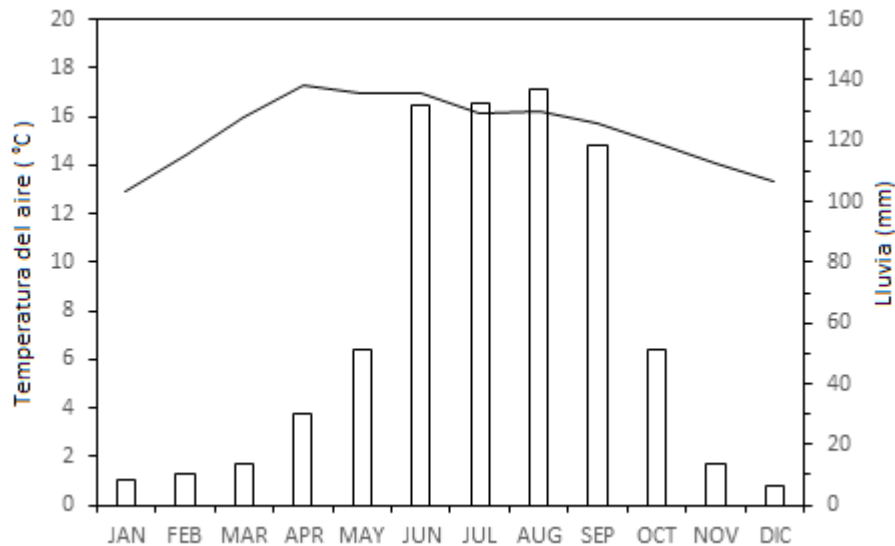


Figura 7. Temperatura del aire y lluvia. Valores medios mensuales reportados desde 1981 por el Servicio Meteorológico Nacional (CONAGUA, México, 2015).

Las dos caídas en la respiración del suelo a su nivel más bajo durante los meses de mayo a octubre, indica que además de la humedad del suelo intervienen otros factores en la caída de la respiración en las fechas junio (12) y julio (14) (Figura 7), como puede ser la

disponibilidad de sustratos aprovechables por las comunidades bacterianas o las raíces de las plantas (cultivadas y malezas).

Se ha reportado que la transición de estado seco a húmedo del suelo se traduce en picos de CO₂ (efecto Birch) debido a que los sustratos orgánicos quedan disponibles para ser degradados por las comunidades microbianas del suelo (Carbone *et al*, 2011; Moyano *et al*, 2013). Aunque los mecanismos no son del todo claros se ha señalado que durante el humedecimiento del suelo ocurre muerte de masa microbiana, liberación de osmolitos celulares, destrucción de agregados del suelo así como una mayor actividad exoenzimática, lo cual en conjunto se traduce en una mayor cantidad de sustratos respirables (Moyano *et al*, 2013).

Los picos observados en el presente trabajo ocurrieron en los meses de junio a octubre, con humedades del suelo > 8 % y en suelos sometidos a la labranza (los dos tratamientos de maíz). Los resultados del presente trabajo basado en un muestreo de 22 días del año confirman que los picos de respiración pueden representar una proporción importante de la respiración total del suelo como ha sido señalado por Moyano *et al*. (2013).

Respecto a otros trabajos realizados en ambientes mésicos en México, se reportó recientemente para un ecosistema forestal y campos bajo agricultura en tierras de altitud, clima más frío (9.4 °C, promedio anual) y mayores precipitaciones (1670 mm) respecto al sitio de la presente investigación, que la respiración tuvo una tendencia a incrementarse en la primavera tardía y en verano, coincidiendo con la estación de lluvias (Campos, 2014). El análisis estadístico demostró que en un modelo de regresión el 58% de la variación en la respiración del suelo fue explicada por la temperatura y humedad del suelo. Los autores concluyeron que la respiración del suelo es coregulada por la temperatura y humedad del suelo y señalan que las condiciones de cambio climático con disminuciones en la precipitación entrañaría una disminución en la respiración del suelo (Campos, 2014).

Los valores de respiración del suelo medidos en el presente trabajo son menores a los reportados para un clima similar y ligeramente más cálido en el centro de México (Texcoco, 2259 m de altitud, Fuentes *et al.*, 2010, ubicado aproximadamente a 50 km de distancia del sitio estudio aquí reportado). En este caso el suelo tiene un contenido de arcilla de 38%, comparado con 10% del suelo del presente trabajo. Conforme el contenido

de arcilla aumenta también la capacidad para retener humedad disponible para la actividad microbiana y por tanto los niveles de respiración serán mayores respecto a una textura dominada por partículas gruesas (Moyano, 2012).

El hecho de que el suelo bajo estudio tenga un contenido de intermedio a alto de materia orgánica (Tabla 3) es consistente con los valores intermedios de respiración que prevalecieron tanto en el período seco como de lluvias en el presente trabajo, pues a medida que hay una mayor cantidad de sustrato orgánico disponible de ser transformado por la microbiota del suelo, más amplio será el rango de humedad del suelo en el cual ocurra la respiración (Moyano *et al.*, 2013).

Niveles de flujo de C-CO₂ de acuerdo al sistema de manejo de las tierras

Los sistemas de manejo que mostraron los valores más altos de respiración fueron el bosque secundario y los dos tratamientos de *Opuntia*. Estos tres sistemas son los que mantienen un sistema de raíces vivo a lo largo de todo el año el cual es un componente de la respiración del suelo (Trumbore, 2006).

La presencia permanente de raíces activas y de las comunidades microbianas asociadas a ellas en el caso de los dos sistemas de *Opuntia*, puede explicar las diferencias de respiración respecto a los dos tratamientos de maíz y el suelo en descanso. Se sabe que las plantas perennes son sistemas que aseguran el mantenimiento de altos niveles de C_{org} debido a la reincorporación continua de raíces viejas al pool activo del C en el suelo y a la ausencia de disturbio físico (Poustian *et al.*, 2000; Poustian *et al.*, 1990).

Las plantas perennes mantienen normalmente raíces vivas a profundidades mayores respecto a los cultivos anuales de tal forma que la respiración autotrófica se puede mantener a lo largo del año (Davidson *et al.*, 1998).

Respecto a resultados de variabilidad en las tasas de respiración, Campos (2014) encontró una mayor variabilidad en los campos de maíz a una altitud de 2500 m en la región de Cofre de Perote (México) respecto a las tasas de suelos bajo bosque de coníferas. De igual modo, a una altitud menor (1650 m) el autor reportó menores variaciones en las tasas de respiración para campos con rotación de papa-maíz, comparado con el bosque tropical de nubes (Campos, 2014). Los resultados del presente trabajo son coincidentes

con los reportados por Campos (2014) en cuanto a los patrones de variabilidad de campos cultivados comparados con suelo de ecosistemas naturales. Relativo a los niveles de respiración los resultados no son comparables en tanto que se utilizaron dos formas de medición de C-CO₂ diferentes.

Iqbal *et al* (2008) reportaron en condiciones subtropicales de China que suelos bajo especies frutícolas perennes presentaron tasas de respiración ligeramente superiores a los suelos bajo bosques maderables.

En un estudio realizado en una región árida de China (Río Sangong), Lai *et al.* (2012) compararon las tasas de respiración y otras variables del suelo de un sistema de producción de trigo bajo irrigación, respecto a las tasas de vegetación natural que no recibió irrigación. Las tasas fueron de 1 a 4 veces mayores en el sistema irrigado y fertilizado, sin que se haya observado un incremento en la acumulación de C_{org} en el suelo salino-alcálico bajo estudio.

Los datos de C_{org} de la Cuadro 3 indican que las parcelas bajo bosque y los dos tratamientos de *Opuntia* tienen un contenido más elevado de C_{org} respecto a las parcelas con uso continuo de maíz y bajos aportes de fertilizantes de tipo industrial u orgánico.

Además de presentar valores más altos de respiración, los sistemas perennes (*Opuntia* y bosque) mostraron un patrón de valores con mayor estabilidad a lo largo del año, comparado con los sistemas bajo suelo roturado (Maíz). En términos de captura de carbono los sistemas perennes son más eficientes respecto a los campos de monocultivo en los cuales en los meses sin plantas ocurre una respiración del suelo sin que exista acumulación de materia seca en la parte aérea y en las raíces lo cual puede tendencialmente conducir a niveles de C_{org} bajos (Janzen, 2006). Uno de los propósitos de introducir especies perennes en el sistema de milpa tradicional del Centro de México es contribuir a la captura de carbono (Etchevers *et al*, 2009).

Fuentes *et al.* (2012) reportaron valores más altos de respiración del suelo sembrado con maíz respecto a los valores del presente trabajo, pero en este caso se tuvo un nivel más alto de intensificación en cuanto a densidad de plantas y fertilización nitrogenada: 200 kg ha⁻¹, contra 100 kg en los sistemas de baja intensidad como el del presente estudio. Está demostrado que entre mayor sea la intensificación productiva del cultivo mayor será la biomasa de raíces que se incorpora como materia orgánica

susceptible de ser descompuesta por la microbiota del suelo (Johnston *et al*, 2009; Janzen, 2006) y mayor será la respiración del suelo.

Dado que la producción de maíz en el Centro de México es dependiente de la aleatoriedad de las lluvias, las alternativas que mejoren la retención de humedad en el suelo mediante curvas de nivel, terrazas con especies perennes y la asociación con especies leguminosas como se hace en el sistema de milpa. Se ha demostrado que la simultaneidad de sistemas de raíces con diferente arquitectura, como es el caso de la asociación de maíz (exploración superficial de agua por sus raíces), frijol (exploración vertical) y calabaza (exploración dependiente de la disponibilidad de P), aporta beneficios en términos de incrementos de la biomasa de raíces, cuyos beneficios se reflejan en el rendimiento económico, la biomasa incorporada el suelo y la captura de C (Zhang *et.al*, 2014). La intensificación productiva adaptada a las condiciones ambientales de cada sitio puede asegurar el mantenimiento de los niveles de C orgánico en el suelo (Janzen, 2006; Poustian *et al.*, 2000).

Los resultados del presente trabajo al ser colocados en el contexto de políticas para gestionar regiones que están sometidas a fuertes presiones de asentamientos humanos y conversión de zonas de bosque a parcelas agrícolas, como es el caso de la zona bajo estudio, se desprenden las siguientes recomendaciones: (1) el mantenimiento de las zonas de bosque es crucial para la conservación de la biodiversidad de especies vegetales y microorganismos del suelo, así como la alimentación de mantos acuíferos, reducción de corrientes de agua erosiva y aumento constante en el suministro de C en el suelo; (2) los sistemas de maíz en monocultivo pueden ser mejorados a través de la asociación con leguminosas y mediante prácticas que reduzcan o eliminen la labranza profunda (Roger-Estrade *et al.*, 2010); (3) los sistemas que alternan cultivos básicos como maíz y leguminosas con árboles frutales, hortalizas perennes como *Opuntia*, especies vegetales que tradicionalmente han servido en terrazas de conservación del suelo en México y en otros países (*Agave*), además de representar ingresos complementarios a los pequeños agricultores, contribuyen con la conservación de los microorganismos del suelo y con la captura de carbono. Los incrementos de Corg en el Suelo de Conservación se deben a la conservación de los diferentes bosques citados antes, por lo que los sistemas mejorados de maíz y otras especies anuales con prácticas novedosas como las terrazas con especies

perennes es una medida concreta para mejorar el balance del C en el Valle de México y su sistema montañoso del sur de la megalópolis.

Conclusiones

Los valores promedio de emisiones de CO₂ para los seis manejos de tierras bajo estudio mostraron diferencias significativas, dentro de un rango que varió entre 170 y 240 g C-CO₂ m⁻² h⁻¹. El bosque secundario de *Quercus* y *Pinus* mostró los valores más altos, cercanos a los reportados para *Opuntia*, especie perenne cuyo manejo no implica alteraciones físicas en la rizosfera ni tampoco aplicaciones de fertilizantes minerales. El rasgo de mayor importancia de los datos aquí reportados es que el sistema bosque y *Opuntia* (especies perennes) presentaron un patrón de mayor estabilidad de las emisiones de C-CO₂ a lo largo del año así como la inexistencia de picos de respiración, mientras que los dos tratamientos de maíz bajo labranza mostraron la mayor variabilidad de respiración a lo largo del año, con picos entre 600 y 1200 g C-CO₂ m⁻² h⁻¹.

Referencias

- Ahedo R. 2000.** Estimación de biomasa radical y almacenes de carbono en los Tuxtlas Veracruz, México: los cambios con el uso del suelo. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias. UNAM. México, D.F. En Proceso.
- Alvear, M, Reyes, F., Morales, A., Arriagada, C, Reyes, M. 2007.** Actividad biológica y agregados estables al agua en dos tipos de formaciones vegetales de un bosque templado del Centro-Sur de Chile con perturbación antrópica. *Ecología Austral*. 17: 113- 122.
- Bremer, E.,Janzen, H.H.,McKenzie,R.H. 2002.** Short-term impact of fallow frequency and perennial grass on soil organic carbon in a Brown Chernozem in southern Alberta. *Can. J. Soil Sci.* 82, 481–488.
- Campos, A. 2014.** Trends in soil respiration on the eastern slope of the Cofre de Perote Volcano (Mexico): Environmental contributions. *Catena* 114: 59–66.

- Carbone, M. S., Still, C. J., Ambrose, A. R., Dawson, T. E., Williams, A. P., Boot, C. M., Schaeffer, S. M., and Schimel, J. P. 2011.** Seasonal and episodic moisture controls on plant and microbial contributions to soil respiration, *Oecologia*, 167, 265–78, doi:10.1007/s00442-011-1975-3.
- Centro Geo-PAOT. 2010.** Modelo de análisis tendencial sobre la pérdida de cubierta forestal en el Suelo de Conservación del Distrito Federal. Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del D.F. México.
- Christopher, S.F. y Lal, R. 2007.** Nitrogen management affects carbon sequestration in North American cropland soils. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 26,45-64.
- Comisión Nacional del Agua. 2015.** Climate data for Santa Ana Tlacotenco (Milpa Alta)Station.http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=179:distrito-federal&catid=:normales-por-estacion
- Davidson E.A., Belk E., Boone R.D. 1998.** Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Glob Change Biol* 4: 217–227.
- Davidson G.R. 1995.** The stable isotopic composition and measurement of carbon in soil CO₂. *Geochim. Cosmochim. Acta* 59,2485-2489.
- Davidson, E. A., and I. A. Janssens. 2006.** Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* 440:165-173.
- Denman, K.L., Brasseur, G., Chidthaisong, A., Ciais, P., Cox, P.M., Dickinson, R.E., Hauglustaine, D., Heinze, C., Holland, E., Jacob, D., Lohmann, U., Ramachandran, S., da Silva Dias, P.L., Wofsy, S.C. and Zhang, X. 2007:** Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Estrade, J., Anger, C., Bertrand, M., Richard, G. 2010.** Tillage and soil ecology: Partners for sustainable agriculture. *Soil and Tillage Research* 111, 33-40.
- Estudios técnicos 2010.** Evaluación de la vulnerabilidad ambiental que presenta el suelo de conservación por la pérdida de servicios ecosistémicos a consecuencia del cambio de uso de suelo. México. PAOT. Obtenido de http://centro.paot.org.mx/documentos/paot/estudios/EsPA_07_10_vulnerabilidad_en_SC.pdf
- Etchevers, J.D., Prat, C., Balbontin, C., Bravo, M., Martínez, M. 2009.** Influence of land use on carbon sequestration and erosion in Mexico: A Review. In: *Sustainable Agriculture*. Lichtfouse, E. et al. (eds.). Springer Netherlands.
- FAO. 2013.** En *Directrices sobre el cambio climático para los gestores forestales*. (págs. 1-109). Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FAO. 2015.** Los Suelos Ayudan a Combatir y Adaptarse al cambio climático. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Fuentes J. H Bown, D Gatica y J. Pérez 2010.** Short-term effects of litter extraction on soil respiration, soil temperature and soil water content in a Sclerophyll forest of Central Chile. World Congress of Soil Science, Brisbane, Australia.
- Fuentes-Ponce, M., Hidalgo, C., Etchevers, B. J. Govaerts, B., De León-González, F., Armando Guerrero, A., Luc Dendooven, L. 2012.** Conservation agriculture, increased organic carbon in the top-soil macro-aggregates and reduced soil CO₂ emissions. *Plant and Soil* 355: 183-197.
- Galford, G.L., Melillo J.M., Kicklighter, D.W., Cronin, T.W., Cerri, C.E.P., John F. Mustard, J.F., Cerri, C.C. 2010.** Greenhouse gas emissions from alternative futures of deforestation and agricultural management in the southern Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107 (46): 19649–19654.

- Giardina C.P. and Ryan M.G. 2000.** Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature. *Nature* 404: 858–861.
- Hughes, R.F., J.B. Kauffman y V.J. Jaramillo.1999.** Biomass, carbon, and nutrient dynamics of secondary forest in a humid tropical región of Mexico. *Ecology* 80(60):1892-1907.
- Hughes, R.F., J.B. Kauffman y V.J. Jaramillo. 2000.** Ecosystem-scale impacts of deforestation and land use in a humid tropical región of México. *Ecological Applications* 10:515-527.
- INEGI, 2015** Conjunto Nacional de Datos Vectorial Edafológico, geológico, climático, hidrológico, uso de suelo, Escala 1: 250,000 Serie II, elaborado en el periodo 2002 a 2007 por el INEGI
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2007.** Intergovernmental Panel on Climate Change WGI, Fourth Assessment Report, Climate Change. The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. IPCC Secretariat, c/o WMO, 7bis, Avenue de la Paix, C.P.N. 2300, 1211 Geneva 2, Switzerland, Available from: <http://www.ipcc.ch/SPMfeb07.pdf>.
- Iqbal, J., Hu Ronggui, H., Lijun, D., Lan, L., Shan, L. Tao, C., Leilei, R. 2008.** Differences in soil CO₂ flux between different land use types in mid-subtropical China. *Soil Biology and Biochemistry* 40 (9): 2324–2333.
- Janzen HH. 2006.** The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it *Soil Biology y Biochemistry*.38:419–424.
- Janzen, H.H. 2006.** The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it?. *Soil Biology and Biochemistry* 38: 419–424.
- Jassal, R. S., Black, T. A., Cai, T. B., Morgenstern, K., Li, Z. and co-authors. 2007.** Components of ecosystem respiration and an estimate of net primary productivity of an intermediate-aged Douglas-fir stand. *Agric. Forest Meteor.* 144, 4457
- Jobbagy, E.G., and R.B. Jackson. 2000.** The vertical distribution of organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecol. Appl.* 10: 423–436.

- Johnston, A.E., Poulton, P.R., Coleman, K. 2009.** Soil organic matter: its importance in sustainable agriculture and carbon dioxide fluxes. *Advances in Agronomy*, 101, 1–57.
- Jong M. S., Reynolds R. J. B., Richterova K., Lucie Musilova L., Staicu L. C., Chocholata I., et al. 2015.** Selenium hyperaccumulators harbor a diverse endophytic bacterial community characterized by high selenium resistance and plant growth promoting properties. *Front. Plant Sci.* 6:113. 10.3389/fpls.2015.00113 [PMC free article] [PubMed] [Cross Ref]
- Kane, E. S., D. W. Valentine, E. A. G. Schuur, and K. Dutta 2005.** Soil carbon stabilization along climate and stand productivity gradients in black spruce forests of interior Alaska, *Can. J. For. Res.*, 35, 2118 – 2129.
- Kleber, M., Sollins, P., Sutton, R. 2007.** A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces. *Biogeochemistry* (2007) 85: 9–24.
- Lai, L., Zhao, X., Jiang, L., Wang, Y., Luo, L., Zheng, Y., Xi Chen, X., Rimmington, G.M. 2012.** Soil respiration in different agricultural and natural ecosystems in an arid region. *PLoS One* 7(10): e48011.
- LAL, R., 1997.** Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂ - enrichment. *Soil Till. Res.* 43, 81-107.
- LAL, R., Eckert, D. J., Fausey, N. R., Edwards, W. M., 1990.** Conservation tillage in sustainable agriculture. In: C. A. Edwards, R. Lai, P. Madden, R. H. Miller and G. House, *Sustainable Agriculture Systems*. Soil and Water Conservation Society, Iowa, USA, pp. 203-225.
- Li Y, Xu M, Zou XM, Zhang YQ. 2005.** Comparing soil organic carbon dynamics in plantation and secondary forest in wet tropics in Puerto Rico. *Global Change Biol* 11:239-248.
- Masera, O. 1996.** Desforestación y degradación forestal en México. Documento de trabajo 19. Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada, A.C. Pátzcuaro Michoacán, México. 50 p.

- Moore, T. R., and R. Knowles. 1989.** The influence of water table levels on methane and carbon dioxide emissions from peatland soils. *Canadian Journal of Soil Science* 69:33-38.
- Moyano FE, Manzoni S, Chenu C. 2013.** Responses of soil heterotrophic respiration to moisture availability: an exploration of processes and models. *Soil Biol Biochem* 59:72–85.
- Moyano FE, Vasilyeva N, Bouckaert L. 2012.** The moisture response of soil heterotrophic respiration: interaction with soil properties. *Biogeosciences*. 9:1173–1182.
- Ordóñez, A. 1998.** Estimación de la captura de carbono en un estudio de caso para bosque templado: San Juan Nuevo, Michoacán. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias. UNAM. México D.F.
- Ordóñez, A. 1999.** Estimación de la captura de carbono en un estudio de caso. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAP. México D.F.
- Paustian, K., Andrén, O., Janzen H., Lal R., Smith P., Tian G., Tiessen H., van Noordwijk, M., Woomeer, P. 1997.** Agricultural soil as a C sink to offset CO₂ emissions. *Soil Use Manage.* 13: 230–244.
- Poustian, K, J. Six, E.T. Elliott, H.W. Hunt. 2000.** Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry* 48: 147–163.
- Rodríguez y Blanco, 2006.** “Caracterización de unidades biofísicas a partir de indicadores ambientales en Milpa Alta, Centro de México”, *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 60, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 46-61.
- Schlesinger, W.H. 1995.** Soil respiration and changes in soil carbon stocks, in G.M. Woodwell and G.M. Mackenzie, eds., *Biotic Feedbacks in the Global Climatic System: Will the Warming Feed the Warming?* Oxford University Press, New York, pp. 159-168.

- Schlesinger, W.H. and J. Andrews 2000.** Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochem.* 48(1):7-20.
- Schmidt, M. W. I., Torn, M. S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I. A., Kleber, M., Kogel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D. A. C., Nannipieri, P., Rasse, D. P., Weiner, S., and Trumbore, S. E. 2011.** Persistence of soil organic matter as an ecosystem property, *Nature*, 478, 49–56, doi:10.1038/Nature10386.
- Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal 2007.** Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio de la Zona Metropolitana del Valle de México. México, D.F.
- Stockmann, U., Adams, M.A., Crawford, J.W., Field, D.J., Henakaarchchi, N., Jenkins, M., Minasny, B., McBratney, A.B., de Remy de Courcelles, V., Singh, K., Wheeler, I., Abbott, L., Angers, D.A., Baldock, J., Bird, M., Brooke, P.C., Chenu, C., Jastrow, J.D., Lal, R., Lehmann, J., O'Donnell, A.G., Parton, W.J., Whitehead, D., Zimmerman, M. 2013.** The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 164: 80– 99
- Thornley J.H.M., Cannell M.G.R. 2001.** Soil carbon storage response to temperature: a hypothesis. *Ann Bot* 87: 591–598.
- Trumbore, S. 2006.** Carbon respired by terrestrial ecosystems – recent progress and challenges. *Glob Change Biol* 12: 141–153.
- Veenendaal EM, Kolle O, Lloyd J. 2004.** Seasonal variation in energy fluxes and carbon dioxide exchange for a broad-leaved semi-arid savanna (Mopane woodland) in Southern Africa. *Glob Chang Biol* 10:318–328.
- Vela G. 2009.** Vulnerabilidad del suelo de conservación del Distrito Federal ante el cambio climático y posibles medidas de adaptación. UAM Xochimilco, IG de la UNAM, IC y DF.
- Vela, G., López, J., y Rodríguez, M. 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, 77,18–30. Obtenido de http://www.igeograf.unam.mx/web/sigg/docs/pdfs/publicaciones/inves_geo/boletines/77/bltn77_art_b.pdf

von Lützw, M., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B., Flessa, H. 2006. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions — a review. *Eur. J. Soil Sci.* 57, 426–445. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x>

Wang J.K., Wang T.Y., Zhang, X.D., Guan, L.Z., Wang, Q. B., Hu, H.X. and Zhao, Y.C. 2002. Effects of cultivation duration on the changes of the black soil fertility qualities (in Chinese). *Journal of Shengyang Agricultural University* 33(1), 43-47

Zhang, C., Postma, J.A., York, L.M., Lynch, J.P. 2014. Root foraging elicits niche complementarity-dependent yield advantage in the ancient ‘three sisters’ (maize/bean/squash) polyculture. *Annals of Botany* 114: 1719–1733.

CAPITULO 2

DINÁMICA DEL CARBONO Y ACTIVIDADES ENZIMÁTICAS EN BOSQUE, MAÍZ Y NOPAL EN EL SUELO DE CONSERVACIÓN DEL DISTRITO FEDERAL

Resumen

El cambio de uso del suelo reduce las reservas naturales de materia orgánica (MO) y cambia su dinámica. En este estudio se evaluaron los efectos de diferentes usos del Suelo de Conservación del Distrito Federal (México) [nopal con abundante y escaso aporte de MO (Nacol, Nsacol); maíz con abundante y escaso aporte de MO (Masoc, Mmono), suelo con bosque de pino-encino (SB) y suelo en descanso (SD)] sobre el contenido de C orgánico total (COT), dinámica del C y propiedades biológicas. En cada sistema se colectaron cinco muestras individuales de suelo rizosférico a 15 cm de profundidad. El C lábil (CL) y el C recalcitrante (CR) se cuantificaron mediante hidrólisis ácida. El COT se cuantificó mediante el método de oxidación húmeda de Walkley y Black. La actividad de carboximetilcelulasa y de celobiohidrolasa se determinó cuantificando los azúcares reductores liberados de la carboximetilcelulosa y del avicel, respectivamente. La actividad de β -glucosidasa se determinó por el método de Tabatabai (1982) y la actividad de arilesterasa por el método de Zornoza *et al.* (2009). En comparación con el SB, el M_{mono} redujo el contenido de COT en 68% y en 12% el CR. El M_{asoc} incrementó en 48% el CL. La actividad de carboximetilcelulasa y celobiohidrolasa no cambió en los sistemas estudiados. La actividad de β -glucosidasa fue más alta en Nacol y en SD, mientras que la actividad de arilesterasa fue mayor en Nacol. El cambio de uso de suelo de forestal a agrícola redujo el contenido de COT, especialmente la fracción CR.

Palabras clave: *β -glucosidasa, carbono orgánico total, C recalcitrante, suelo agrícola, suelo forestal.*

Introducción

El cambio en el uso del suelo reduce las reservas naturales de materia orgánica (MO) (Netto *et al.*, 2007) y, en consecuencia, cambia su dinámica (Bona *et al.*, 2008). Además del efecto perjudicial sobre la calidad del suelo, la continua pérdida de MO es de gran preocupación debido a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) (Lal, 2004).

La MO es la fuente primaria y un reservorio temporal de elementos nutritivos para las plantas. La textura del suelo, la labranza, la humedad, y la temperatura son factores que influyen en la dinámica, composición y acumulación de la MO en el suelo (Guimarães *et al.*, 2014). Diferentes fracciones de la MO responden de diversa manera a las prácticas de manejo debido a su composición y asociación con la matriz mineral, lo cual determina su accesibilidad a los organismos descomponedores y su estabilidad en el ambiente edáfico (Gregorich *et al.*, 2006).

Las sustancias húmicas son el principal constituyente de la materia orgánica, que junto con los polisacáridos y la biomasa microbiana, tienen un efecto positivo sobre la formación y estabilidad de agregados del suelo y la retención de nutrientes. La estabilización de C en el suelo consiste en la protección de una fracción de la MO a ser mineralizada; y es el efecto integrado de diferentes factores como el carácter recalcitrante de los compuestos orgánicos, la interacción entre la fracción orgánica y mineral del suelo (mecanismos de agregación, formación de complejos órgano-metálicos) y, la inaccesibilidad espacial de la MO al alcance de los microorganismos y de las enzimas (Lützow *et al.*, 2006).

La fracción lábil es fácilmente degradable, su cantidad y el grado en el cual se encuentra protegida determinan su degradabilidad (Wendling *et al.*, 2010). La fracción más estable y recalcitrante contiene más material degradado y procesado y se asocia con la fracción mineral para formar complejos órgano-minerales (Wiesenberg *et al.*, 2010). La fracción estable es el principal reservorio de C y contiene poco C mineralizable (Jagadamma y Lal, 2010). Los cambios en las fracciones de la MO como una función del cambio de uso del suelo se han empleado para evaluar los cambios en la dinámica de la MO (Galdos *et al.*, 2009).

La respiración heterotrófica involucra la actividad de los microorganismos durante la mineralización de la MO vía enzimática. La respuesta efectiva a dichos cambios edáficos se ha estudiado mediante las actividades enzimáticas del suelo, que son indicadores sensibles y tempranos de cambios producidos por el manejo en la calidad edáfica (Masciandaro y Ceccanti, 1999; Pascual *et al.*, 2000; Nannipieri *et al.*, 2003) y la respuesta de este recurso a distintas prácticas de manejo, así como la manera en que las enzimas se relacionan con la mineralización de nutrientes tales como N, P y C (Trasar-Cepeda *et al.*, 2008). Entre otras propiedades cabe destacar el C de la biomasa microbiana [BM], N mineralizable y la respiración del suelo (Caravaca *et al.*, 2002; Nannipieri *et al.*, 2003).

La celulosa es una de las moléculas poliméricas recalcitrantes más abundantes en la biosfera (Pérez *et al.*, 2002; Martínez *et al.*, 2005). Está formada por moléculas de glucosa unidas por enlaces β -1,4 y es el constituyente principal de la pared celular de las plantas (Coughlan, 1988; Idetzky *et al.*, 1995). La celulosa es degradada por una serie de microorganismos mediante la acción de varias enzimas que forman un complejo denominado “celulosoma”(constituido por tres tipos de enzimas (1) endocelulasas (endoglucanasa o 1,4-b-D-glucan 4-glucanohidrolasa; E.C. 3.2.1.4), (2) exocelulasas (celulosa 1,4-b-D-celobiosidasa o 1,4-b-D-glucan celobiohidrolasa; E.C. 3.2.1.91) y (3) β -D-glucosidasas (β -D-glucosido glucohidrolasa; E.C.3.2.1.21. (Baker *et al.*, 1995; Nidetzky *et al.*, 1995).

La hidrólisis completa de la celulosa transcurre en tres etapas. La etapa inicial es la transformación de la celulosa insoluble (cristalina) en celulosa soluble (amorfa), la segunda etapa es la transformación de celulosa soluble en oligosacáridos y celobiosa; y finalmente se da la transformación de la celobiosa en glucosa (García *et al.*, 2003).

La información referente a la emisión de CO₂ del suelo y su relación con el carbono de la biomasa microbiana (CBM) y la actividad de enzimas involucradas en el proceso de mineralización de la MO, tales como CMCasa, exo- β -1,4-glucanasa (celobiohidrolasa, CLHasa), β -glucosidasa (celobiasa, CEasa) y arilesterasa (AREasa) es escasa en la zona del Suelo de Conservación del Distrito Federal, México. El CBM es el componente activo de la MO y su estudio proporciona una mejor comprensión del reciclaje del C y N edáficos. La CMCasa se utiliza como un índice de la actividad microbiana en la descomposición de

la celulosa (Sinsabaugh *et al.*, 1991) Ishizuka *et al.* (2006) reportaron una correlación positiva entre la actividad de la endo- β -1,4-glucanasa (carboximetilcelulasa, CMCasa) y la tasa de emisión de CO₂ en suelos forestales. La celobiohidrolasa actúa cortando la celobiosa del extremo no reductor de la cadena y en algunas ocasiones liberan pequeñas cantidades de glucosa (Hernández-Santoyo *et al.*, 1999). La CEasa hidroliza los enlaces β -D-glucopiranosidos de las grandes cadenas de carbohidratos, proporcionando estructuras carbónicas esenciales y energía para el crecimiento de los organismos heterótrofos del suelo (Pascual *et al.*, 2000). La AREasa cataliza la hidrólisis de ésteres fenólicos tales como fenil acetato a un fenol y un acetato (Zornoza *et al.*, 2009).

En los ecosistemas terrestres el clima, la temperatura y la humedad edáfica, el tipo de vegetación, la cubierta vegetal y el uso o manejo del suelo son factores que influyen en el flujo de CO₂, haciéndolo variable aun en cortos periodos (Davidson *et al.*, 1995; Li *et al.*, 2005). Además de las características del suelo influye, particularmente, la cantidad de residuos orgánicos que actúan como substrato susceptible de ser mineralizado (Stevenson y Cole, 1999).

El Suelo de Conservación del Distrito Federal es una zona que aporta diversos servicios ambientales; en ella prevalecen usos de tipo agrícola, forestal y silvo-pastoril. La medición del impacto de dichos sistemas en materia de ciclo del carbono, emisiones de gases de efecto invernadero y actividades biológicas es necesaria en la perspectiva de diseño de sistemas compatibles con mitigación y adaptación al cambio climático. En este estudio se evaluaron los efectos de diferentes usos del Suelo de Conservación del Distrito Federal [nopal con abundante y escaso aporte de MO (Nacol, Nsacol); maíz con abundante y escaso aporte de MO (Masoc, Mmono), suelo con bosque de pino-encino (SB) y suelo en periodo de descanso (SD)] sobre el contenido de C orgánico total (COT), dinámica del C, propiedades biológicas, físicas y químicas del suelo.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El área de estudio y los sistemas evaluados se han descrito previamente en el Capítulo 1.

Muestreo y análisis de suelo

El muestreo de suelos inició en septiembre de 2013, las muestras se colectaron en seis parcelas de 0.4 ha previamente delimitadas. En cada parcela se colectaron cinco muestras de suelo rizosférico cada dos meses durante un año, a una profundidad de 20 cm. Las muestras se homogeneizaron y se tamizaron a través de una malla de 2 mm, una parte se secó al aire durante 72 h para llevar a cabo los análisis físicos y químicos. Para el análisis de las propiedades biológicas el resto de la muestra se mantuvo a 4°C. Para la determinación de la densidad aparente se colectaron 3 muestras de suelo inalterado por parcela.

Las variables físicas que se analizaron fueron humedad, densidad aparente, textura, estabilidad de agregados en húmedo y fraccionamiento del suelo en tamaño de partícula. La humedad del suelo se determinó por el método AS-05 establecido por la NOM-021-RECNAT-2000, que consiste en la medición gravimétrica de una muestra, antes y después del secado. La densidad aparente se determinó por el método del cilindro (Blake y Hartge, 1986), mediante la medición gravimétrica a través de un cilindro con volumen conocido. La textura del suelo se determinó por el método de Bouyoucos (NOM-021-RECNAT-2000), que consiste en la dispersión de partículas minerales y determinadas por densidad a diferentes tiempos, la estabilidad de agregados (DMP) en húmedo por el método de Le Bissonnais (1996), mediante el sometimiento del suelo en tres posibles condiciones hídricas y presiones y el fraccionamiento del suelo propuestos por US EPA (2005), que consiste en tamizar el suelo y realizar la separación del tamaño de partículas, utilizando 6 tamices con los siguientes diámetros de <75, 115, 250, 420, 850, >850 μm , que corresponden respectivamente a F6, F5, F4, F3, F2 y F1 respectivamente (Ajmone-Marsan *et al.*, 2008).

Las variables químicas analizadas incluyeron pH, contenido de carbono orgánico total (COT), carbono lábil, carbono recalcitrante y COT asociado a cada una de las fracciones obtenidas mediante el fraccionamiento del suelo en tamaño de partícula. El pH del suelo se determinó por medio del método AS-02 de la NOM-021-RECNAT-2000, que consiste en una relación suelo: agua (1:2). El contenido de COT en el suelo se cuantificó mediante el método de oxidación húmeda de Walkley y Black (1934), basado en la oxidación del carbono mediante $K_2Cr_2O_7$, en medio ácido. El carbono lábil (CL) y recalcitrante (CR) mediante hidrólisis ácida se determinó por el método establecido por Rovira y Vallejo (2007) y Walkley y Black (1934), que consiste en someter la muestra a hidrólisis y posteriormente a oxidación ácida mediante K_2SO_4 . El carbono y fraccionamiento del suelo en tamaño de partícula se determinó por el método propuesto por US EPA (2005) y Walkley y Black (1934), que consiste en la separación de los diferentes tamaños de partícula, posteriormente se determinó por medio de la oxidación del carbono mediante $K_2Cr_2O_7$, en medio ácido.

Las variables biológicas analizadas comprenden la actividad de algunas enzimas que participan en la mineralización de la MO como la actividad de la carboximetilcelulasa «CMCasa», celobiohidrolasa «CLHasa», la β -glucosidasa «CEasa» arilesterasa «AREasa» y carbono de la biomasa microbiana «CBM». La actividad de la CMCasa se determinó cuantificando los azúcares reductores liberados de la carboximetilcelulosa a 50° durante 24h. Los azúcares liberados se extrajeron por filtración y se cuantificaron por el método de Somogyi-Nelson (1944). La actividad CLHasa se determinó por el método establecido por Somogyi-Nelson (1944) basado en la determinación del avicel liberado después de la incubación a 50° durante 48 horas. La actividad CEasa (EC 3.2.1.21) se determinó por el método propuesto por Tabatabai (1982) basado en la determinación del p-nitrofenol liberado después de la incubación del suelo con p-nitrofenil- β -D-glucopiranosido a 37 °C durante 1h. La actividad de la AREasa (EC 3.1.1.2) se cuantificó por el método propuesto por Zornoza *et al.* (2009) que se basa en la determinación del p-nitrofenol liberado después de la incubación del suelo con p-nitrofenil acetato a 37 °C durante 1 h. Durante los análisis de suelo, 10% de las muestras se duplicaron al azar para controlar la calidad del análisis.

Análisis estadístico

Se calculó la media y el error estándar de las propiedades del suelo en cada uno de los sitios de estudio. Los datos se sometieron a un análisis de varianza para analizar el efecto de los siguientes factores: sitio y tiempo de muestreo. Los datos fueron estandarizados ($X = 0$ y $\sigma = 1$) antes del análisis. El valor medio de cada variable en los sitios de estudio y tiempo de muestreo se comparó con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Para examinar la asociación entre las propiedades del suelo se empleó un análisis de correlación de Pearson. En todos los análisis estadísticos se utilizó el paquete estadístico JMP versión 7.0 para Windows 7.

Resultados y Discusión

Propiedades físicas, químicas y biológicas y su variación respecto al uso del suelo y al tiempo de muestreo

Las propiedades edáficas que cambiaron significativamente en cada uno de los diferentes usos del suelo fueron F1, F2, F3, F4, F6, DMP de agregados hidroestables, densidad aparente, porcentaje de arena, limo, arcilla, pH, contenido de COT, CBM, carbono recalcitrante, carbono lábil, COT asociado a cada uno de los 6 tamaños de partícula del suelo, CEasa y Areasa. La F5, la actividad de CMCasa y de CLHasa no cambiaron significativamente entre diferentes usos del suelo. Las únicas propiedades del suelo que cambiaron significativamente con el tiempo de muestreo fueron la F3 y la F6 (Cuadro 5).

La densidad aparente del suelo varió de 0.82 a 1.19 g cm⁻³, el valor más alto se encontró en los cultivos de Masoc y Mmono y el menor valor en el SB (Cuadro 6).

La partícula dominante en el suelo de los 6 tratamientos fue la arena y fluctuó entre 58.04 y 80.04%. La proporción más alta de arena se registró en los cultivos de Nacol y Nsacol, mientras que la proporción más baja se encontró en el SB (Cuadro 6).

Cuadro 5. Niveles de probabilidad de los efectos del uso del suelo y tiempo de muestreo sobre algunas propiedades físicas, químicas y biológicas en Suelos de Conservación del

Distrito Federal determinados mediante un análisis de varianza. NS, efecto no significativo ($p>0.05$).

Variable	Sitio	Tiempo de muestreo
pH	<0.0001	0.8331 ^{NS}
Carbono orgánico total (COT)	<0.0001	0.6550 ^{NS}
Carboximetilcelulasa	0.4679 ^{NS}	0.4770 ^{NS}
Celobiohidrolasa	0.9724 ^{NS}	0.8288 ^{NS}
Carbono de la biomasa microbiana	0.0190	0.9769 ^{NS}
Carbono recalcitrante	0.0055	0.1750 ^{NS}
Carbono lábil	0.0511	0.7889 ^{NS}
β -glucosidasa	<0.0001	0.8136 ^{NS}
Ariesterasa	0.0006	0.4571 ^{NS}
F1 <2.0-0.85mm>	0.0001	0.3593 ^{NS}
F2 <0.85-0.425 mm>	0.0385	0.0685 ^{NS}
F3 <0.425-0.250 mm>	0.0193	0.0164
F4 <0.250-0.115 mm>	<0.0001	0.5943 ^{NS}
F5 <0.115-0.075 mm>	0.7383 ^{NS}	0.2753 ^{NS}
F6 <0.075	0.0028	0.0161
COT en F1	<0.0001	0.9096 ^{NS}
COT en F2	<0.0001	0.9383 ^{NS}
COT en F3	<0.0001	0.8648 ^{NS}
COT en F4	<0.0001	0.6865 ^{NS}
COT en F5	<0.0001	0.8555 ^{NS}
COT en F6	<0.0001	0.8561 ^{NS}
Agregados hidroestables	0.0014	0.2587 ^{NS}
Arena	<0.0001	0.9949 ^{NS}
Arcilla	0.0008	0.8563 ^{NS}
Limo	<0.0001	0.9941 ^{NS}
Densidad aparente	<0.0001	0.9037 ^{NS}

La partícula que se encontró en más baja proporción fue la arcilla y varió entre 4.70 y 11.10%. La proporción más alta de arcilla se detectó en el SD y en el SB en tanto que el Nsacol tuvo la proporción más baja (Cuadro 6). Todos los suelos presentaron una clase textural franco arenosa. El DMP de agregados hidroestables del suelo varió de 1.26 a 1.83 mm y fue mayor en el SB. Con base en los intervalos de DMP a partir de los cuáles se establecen clases de estabilidad y se predice el riesgo de encostrado y erosión propuestos por Le Bissonais (1996), la clase de estabilidad en los suelos de la zona de

Cuadro 6. Valor medio (\pm error estándar y significancia) de las propiedades físicas en los diferentes usos del suelo en el Suelo de Conservación del Distrito Federal.

	Masoc	Mmono	Nacol	Nsacol	SB	SD
Profundidad	20 cm	20 cm	20 cm	20 cm	20 cm	20 cm
Dap	1.1998 \pm 0.00 (A)	1.19786 \pm 0.01(A)	0.94687 \pm 0.03©	1.06116 \pm 0.01(B)	0.82981 \pm 0.02(D)	1.05696 \pm 0.02(B)
DMP	1.276 \pm 0.09 (B)	1.26417 \pm 0.05(B)	1.616 \pm 0.06(AB)	1.44817 \pm 0.07(B)	1.83833 \pm 0.12(A)	1.48367 \pm 0.07(AB)
Limo	22.46 \pm 0.8 (B)	18.46 \pm 1.35(BC)	13.26 \pm 1.32(D)	15.66 \pm 1.26(CD)	31.26 \pm 0.74(A)	19.26 \pm 0.74(BC)
Arcilla	8.3 \pm 1.26(AB)	6.7 \pm 1.16(AB)	6.7 \pm 1.16(AB)	4.7 \pm 0.4(B)	10.7 \pm 0.74(A)	11.1 \pm 1.01(A)
Arena	69.24 \pm 0.8©	74.84 \pm 0.48(B)	80.04 \pm 0.63(A)	79.64 \pm 1.16(A)	58.04 \pm 0.63(D)	69.64 \pm 0.74©
Textura	Franco Arenoso	Areno Francoso	Areno Francoso	Areno Francoso	Franco	Franco Arenoso
Humedad	22.99 \pm 3.39 (A)	23.89 \pm 2.84(A)	39.69 \pm 3.24(A)	25.64 \pm 3.71(A)	34.66 \pm 5.17(A)	29.56 \pm 28.43(A)
F1	5.1008 \pm 0.56©	5.3527 \pm 2.57©	15.678 \pm 0.42(A)	9.65 \pm 0.98(ABC)	12.57 \pm 1.82(AB)	9.22 \pm 1.36(BC)
F2	12.516 \pm 1.42(AB)	9.7545 \pm 1.33(B)	15.429 \pm 1.43(A)	11.02 \pm 0.32(AB)	11.2063 \pm 1.21(AB)	11.6228 \pm 0.89(AB)
F3	22.507 \pm 3.05(A)	18.8855 \pm 1.78(AB)	16.01 \pm 1.56(AB)	16.01 \pm 1.32(AB)	11.5238 \pm 1.71(B)	14.6413 \pm 2.57(AB)
F4	21.477 \pm 0.52(A)	23.320 \pm 1.84(A)	14.98 \pm 0.64(BC)	18.80 \pm 1.82(AB)	12.59 \pm 1.72©	14.419 \pm 1.10(BC)
F5	22.395 \pm 1.66(A)	24.0257 \pm 1.8(A)	22.236 \pm 1.76(A)	25.653 \pm 1.02(A)	23.709 \pm 2.63(A)	22.496 \pm 1.41(A)
F6	15.408 \pm 2.12(B)	17.685 \pm 2.56 (AB)	14.785 \pm 1.23(B)	17.93 \pm 2.53(AB)	27.561 \pm 3.97(A)	26.806 \pm 2.56(A)

Letras diferentes en las columnas indican el efecto de sitio con base en la prueba de Tukey a una probabilidad de 0.05.

Dap= Densidad Aparente, DMP= Diámetro Medio Ponderado, F1= >850 μ m, F2=850 μ m, F3= 420 μ m, F4= 250 μ m, F5= 115 μ m, F6= <75 μ m.

estudio se clasifica como estable con un riesgo ocasional de encostrado y un riesgo limitado de escorrentía y erosión difusa (Cuadro 6).

La F1 fluctuó entre 5.10 y 15.67%, la F2 varió entre 9.75 y 15.42%. Ambas fracciones fueron más altas en el Nacol (Cuadro 6). La F3 varió entre 11.52 y 22.50% y fue mayor en M_{asoc}. La F4 osciló entre 12.59 y 23.32% y se encontró en mayor proporción en el M_{mono}. La F5 varió entre 22.23 y 25.65% y no cambió significativamente entre los diferentes usos del suelo. La F6 fluctuó entre 14.78 y 27.56% y fue más alta en el SB. Se encontró una asociación positiva altamente significativa entre el contenido de MO y la F1 ($r = 0.60, p < 0.0001$) y entre la MO y la F3 ($r = 0.498, p \leq 0.002$), lo cual sugiere que la abundante incorporación de MO en los suelos de N_{acol} y M_{asoc} favoreció la formación de agregados de mayor tamaño.

El valor de pH osciló entre 5.53 y 6.90 y fue menor en el SB, mientras que los valores más altos de pH se registraron en el SD y en el cultivo de N_{sacol}. De acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 el valor de pH en los suelos de los sitios de estudio varió de moderadamente ácido a neutro (Cuadro 6).

El COT ocupa un lugar importante en el ciclo de nutrientes, consecuentemente, la cantidad y tipo de COT refleja y controla el desarrollo del suelo y por lo tanto, la productividad del ecosistema (Van Cleve y Powers, 1995). En los sitios de estudio el contenido de COT varió de 20.45 a 63.83 g kg⁻¹ y fue mayor en el SB (Figura 8).

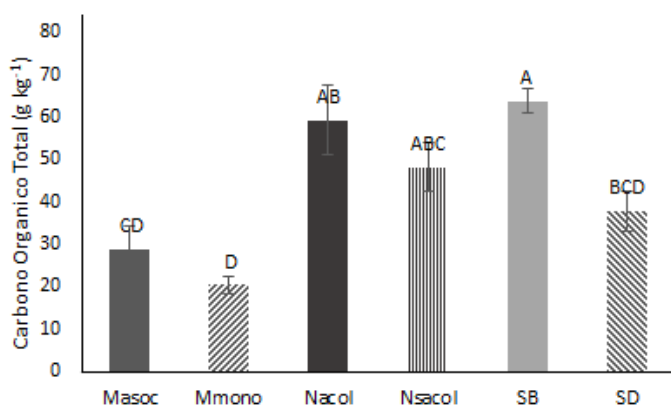


Figura 8. Contenido de carbono orgánico total (COT) en diferentes usos del suelo en la zona de Conservación del Distrito Federal. Letras diferentes en las columnas indican el efecto del uso del suelo con base en la prueba de Tukey a una probabilidad de 0.05.

En comparación con el SB, el Mmono redujo el contenido de COT en 68% y en 12% el CR (Figura 9). Esta disminución en el contenido de COT en el cultivo de Mmono probablemente esté relacionada con la escasa incorporación de MO y a la perturbación del suelo debido a las prácticas de labranza (Guimarães *et al.*, 2014). Por otro lado, se encontró que en Masoc el CL incrementó en 48%, posiblemente como resultado de la descomposición rápida de las raíces finas de la leguminosa, cuya relación de C:N es más baja (18) respecto a las raíces de maíz (48) (De León, *et al.*, 2006), así como a la adición de una gran cantidad de MO en este sitio. De acuerdo con Wu *et al.* (2005) la adición de fertilizantes y enmiendas orgánicas incrementa el COT asociado a diferentes tamaños de partícula.

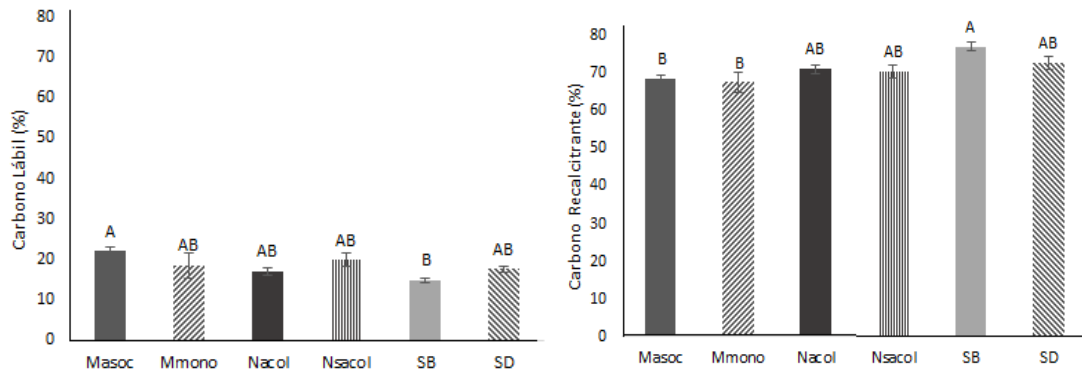


Figura 9. Contenido de carbono lábil y recalcitrante en diferentes usos del suelo en la zona de Conservación del Distrito Federal. Letras diferentes en las columnas indican el efecto de sitio con base en la prueba de Tukey a una probabilidad de 0.05.

Los factores que contribuyeron a explicar el alto nivel de COT en el SB (Figura 8) comprenden la elevada incorporación de residuos orgánicos y el bajo grado de perturbación del suelo.

Además del clima y la textura del suelo, el secuestro de C es afectado por la fertilización nitrogenada así como por el tiempo de permanencia de los residuos sobre la superficie del suelo.

El COT asociado a las seis fracciones analizadas cambió significativamente entre los sitios de estudio (Figura 10). El COT asociado a la F1 varió de 2.20 a 7.84%. En todos los casos el COT asociado a cada una de las fracciones analizadas fue mayor en el SB,

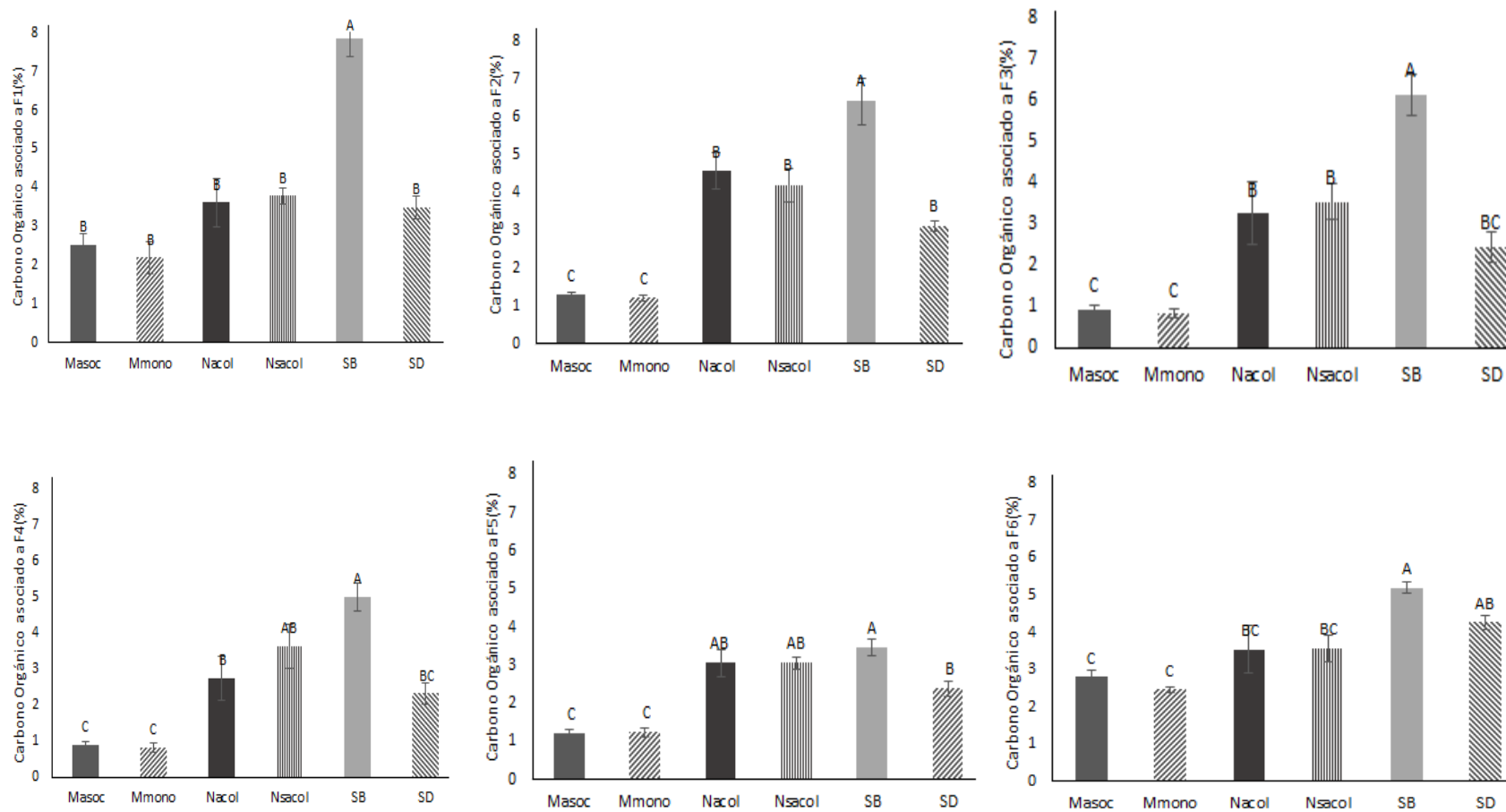


Figura 10. Contenido de carbono asociado las fracciones físicas en diferentes usos del suelo en la zona de Conservación del Distrito Federal. Letras diferentes en las columnas indican el efecto de sitio con base en la prueba de Tukey a una probabilidad de 0.05.

probablemente debido al elevado contenido de COT en este suelo, de hecho el COT se correlacionó positivamente con cada una de las fracciones ($r = 0.74$, $p < 0.0001$).

La MO estabiliza los agregados mediante dos mecanismos diferentes (1) incrementa la cohesión inter-partículas dentro de los agregados disminuyendo de esta manera su rompimiento y (2) incrementa su hidrofobicidad disminuyendo su rompimiento (Eynard *et al.*, 2006; Le Bissonnais, 1996). La formación de micro-agregados (Gale *et al.*, 2000; Six *et al.*, 1998) y micro-agregados dentro de los macro-agregados (Denef *et al.* 2001; Six *et al.*, 2000) puede desempeñar una función muy importante en el almacenamiento y estabilización del C a largo plazo. La formación de micro-agregados ocurre en etapas avanzadas de la descomposición del C orgánico, de modo que la MO en los micro-agregados es más estable o recalcitrante en comparación con el C presente en otros agregados, favoreciendo la estabilidad y la retención de C (Six *et al.*, 2004). Además, el C orgánico está físicamente protegido en los micro-agregados dentro de los macro-agregados (Denef *et al.* 2004). Stewart *et al.* (2008) expresaron que la capacidad de un suelo para secuestrar C está determinada principalmente por la protección del C en los agregados. El almacenamiento de C de un suelo puede cambiar como resultado de las prácticas de manejo (Govaerts *et al.*, 2009).

La actividad de CMCasa fluctuó de 0.130 a 0.844 μg de glucosa g^{-1} suelo 24 h^{-1} (Figura 11). La actividad de CLHasa varió de 0.013 a 0.021 μg de glucosa g^{-1} suelo 48 h^{-1} (Figura 12). La actividad de ambas enzimas no cambió significativamente en los suelos estudiados, no obstante, la actividad más alta de CMCasa se registró en el suelo de Nsacol.

Los valores de la actividad de CMCasa encontrados en este estudio están por debajo de los reportados por Cenciani *et al.* (2011) de 25.5 y 151.6 μg de glucosa g^{-1} suelo 24 h^{-1} en cultivos de maíz a los que se adicionó estiércol, desechos de lombriz y lodos de aguas residuales. Bini *et al.* (2013) encontraron valores de 190 μg de glucosa g^{-1} suelo 24 h^{-1} en bosques nativos, mientras que Harum *et al.* (2014) detectaron valores de 264 μg de glucosa g^{-1} suelo 24 h^{-1} en bosques secundarios.

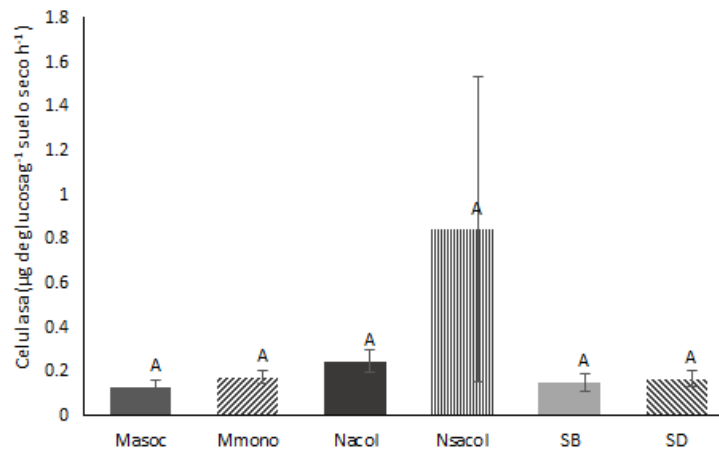


Figura 11. Actividad de carboximetilcelulasa (*endo-β-glucanasa*) en diferentes usos del suelo en la zona de Conservación del Distrito Federal. Letras diferentes en las columnas

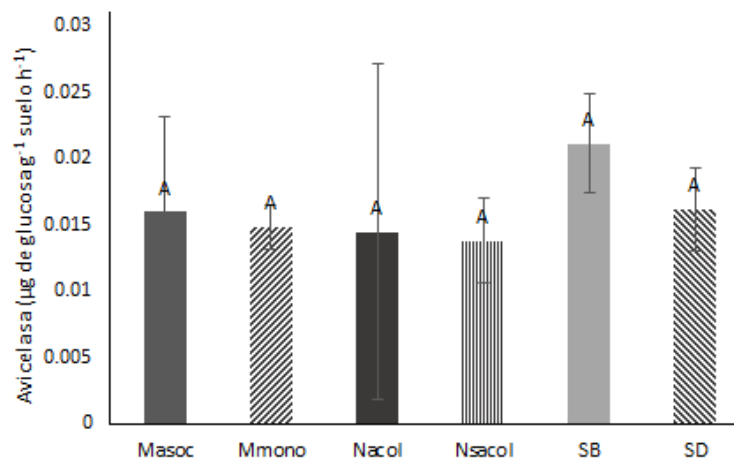


Figura 12. Actividad de celobiohidrolasa (*β-1,4-exoglucanasa*) en diferentes usos del suelo en la zona de Conservación del Distrito Federal. Letras diferentes en las columnas indican el efecto de sitio con base en la prueba de Tukey a una probabilidad de 0.05

El proceso de degradación de la celulosa en el suelo, en general, es un proceso lento que depende de variables ambientales como la temperatura, la humedad, el pH, la concentración de sustratos y el tipo de hojarasca. Las enzimas CMCase y CLCase no mostraron diferencias entre los sitios, sin mostrar una sensibilidad a los cambios de vegetación, lo que se puede deber a que la tasa de degradación de compuestos celulósicos provenientes del material orgánico es similar (Lillo *et al.*, 2011).

La actividad de CEasa osciló entre 0.527 y 1.53 $\mu\text{moles de p-nitrofenol g}^{-1}$ suelo h^{-1} y fue significativamente más alta en el N_{acol} y en el SD (Figura 13). La CEasa cataliza la hidrólisis de largas cadenas de carbohidratos de β -D-glucósidos para formar β -D-glucosa, de esta manera participa en la etapa final de la descomposición de la celulosa y hemicelulosa (Moreno-Cornejo *et al.*, 2013). El incremento en la actividad de esta enzima en el N_{acol} sugiere que la gran cantidad de MO adicionada en estos suelos incluye carbohidratos en su composición. Moreno-Cornejo *et al.* (2013) encontraron valores de 0.52 $\mu\text{moles de p-nitrofenol g}^{-1}$ suelo h^{-1} en suelos cultivados con brócoli a los que se le adicionó residuos frescos de pimienta, estos valores son similares a los reportados en este estudio. No obstante, Henríquez *et al.* (2014) reportaron valores más altos de 39.9 a 208.1 $\mu\text{moles de p-nitrofenol g}^{-1}$ suelo h^{-1} en suelos agrícolas.

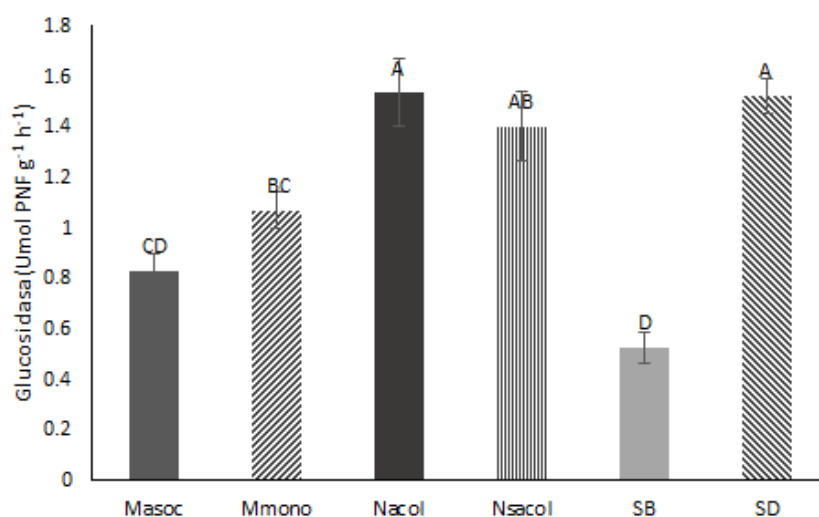


Figura 13. Actividad de β -glucosidasa en diferentes usos del suelo en la zona de Conservación del Distrito Federal. Letras diferentes en las columnas indican el efecto de sitio con base en la prueba de Tukey a una probabilidad de 0.05

La arilesterasa cataliza la hidrólisis de ésteres fenólicos (Zornoza *et al.*, 2009), la actividad de esta enzima fluctuó entre 153.85 y 275.12 $\mu\text{moles de p-nitrofenol g}^{-1}$ suelo h^{-1} y fue mayor en N_{acol} (Figura 14). Estos valores fueron más altos que los encontrados por Moreno-Cornejo *et al.* (2013) de 21.91 y 28.38 $\mu\text{moles de p-nitrofenol g}^{-1}$ suelo h^{-1} en suelos cultivados con brócoli a los que se le adicionó residuos frescos de pimienta.

El incremento en la actividad de esta enzima en el suelo de N_{acol} probablemente sea debido a una mayor disponibilidad de esteres alquílicos y arílicos en estos suelos (p.e., metoxi fenil acetato, metil acetato, etil acetato) (Mancuso *et al.*, 2015). La actividad de arilesterasa en el suelo se ve más afectada por la MO que por cualquier otra propiedad química o microbiológica (Zornoza *et al.*, 2009; Renella *et al.*, 2011).

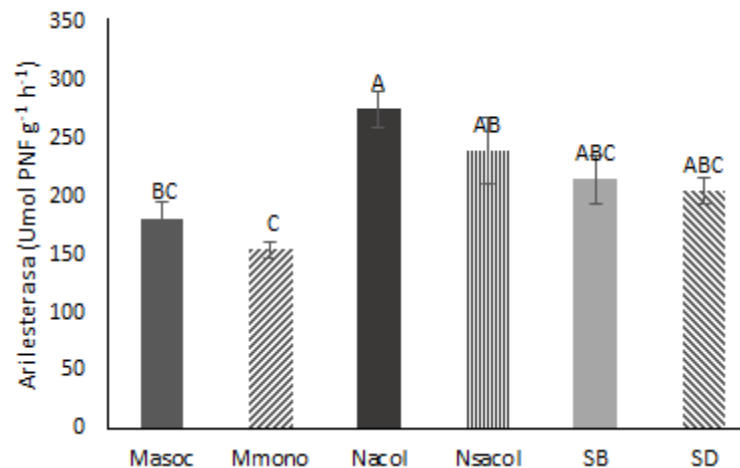


Figura 14. Actividad de arilesterasa en diferentes usos del suelo en la zona de Conservación del Distrito Federal. Letras diferentes en las columnas indican el efecto de sitio con base en la prueba de Tukey a una probabilidad de 0.05

El CBM varió de 380.76 a 875.89 mg kg⁻¹ y cambió significativamente entre los sitios de estudio. El mayor contenido de CBM se registró en el N_{sacol} y el menor valor en el SB (Figura 15).

Relación entre la tasa de emisión de CO₂ del suelo y las variables edáficas analizadas

La actividad de CMCasa se correlacionó positivamente con la tasa de emisión de CO₂ ($r = 0.952$, $p \leq 0.003$). El resto de las variables analizadas no se correlacionaron con la tasa de emisión de CO₂. Ishizuka *et al.* (2006) también reportaron una correlación positiva entre la actividad de CMCasa y la emisión de CO₂.

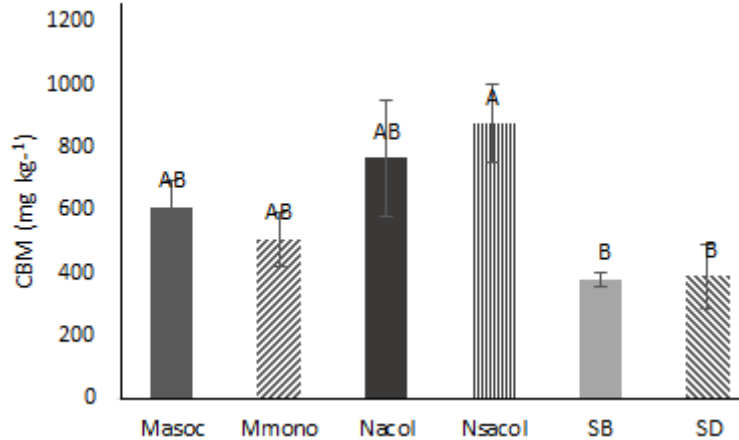


Figura 15. Carbono de la biomasa microbiana (CBM) en diferentes usos del suelo en la zona de Conservación del Distrito Federal. Letras diferentes en las columnas indican el efecto de sitio con base en la prueba de Tukey a una probabilidad de 0.05.

El calentamiento global está incrementando la temperatura del suelo, lo cual promoverá la emisión de CO₂ al acelerar la descomposición de la MO y de la hojarasca del suelo. Por ello, es importante identificar el sustrato que se correlaciona directamente con la emisión potencial de CO₂, debido a que la abundancia del sustrato ayudará a predecir en qué magnitud el calentamiento global incrementará la emisión de CO₂ y por cuánto tiempo continuará (Ishizuka *et al.*, 2006), en los suelos de Conservación del Distrito Federal todo parece indicar que este sustrato posiblemente sea la celulosa.

Conclusiones

(1) Los suelos de la zona de estudio presentaron un alto contenido de arena, pero un bajo contenido de arcilla y se clasificaron como franco-arenosos. (2) la clase de estabilidad de los suelos corresponde a estable con un riesgo ocasional de encostrado y un riesgo limitado de escorrentía y erosión difusa. (3) el valor de pH en los suelos varió de moderadamente ácido a neutro. (4) en comparación con el suelo forestal, el suelo de maíz en monocultivo redujo el contenido de carbono orgánico total en 68% y en 12% el carbono recalcitrante. El suelo de maíz en asociación con leguminosas incrementó en 48% el carbono lábil. (5) la actividad de carboximetilcelulasa y celobiohidrolasa no cambió en

los sistemas estudiados. (6) la actividad de β -glucosidasa fue más alta en el suelo de *Opuntia* sp. con acolchado y en el suelo en descanso, mientras que la actividad de arilesterasa fue mayor en el suelo de nopal con acolchado. (7) el cambio de uso de suelo de forestal a agrícola redujo el contenido de carbono orgánico total, especialmente el carbono recalcitrante. (8) la actividad de CMCasa se correlacionó positivamente con la tasa de emisión de CO₂, lo que sugiere que la celulosa es el sustrato que se correlaciona directamente con la emisión potencial de CO₂.

Referencias

- Ajmone-Marsan F., Biasioli M., Kralj T., Gracman H., Davidson C.M., Hursthouse A.S., Madrid L., Rodrigues S. 2008.** Metals in particle-size fractions of the soils of five European cities. *Environmental Pollution* 152, 73-81.
- Bini, D.; Santos, C.A.; Bouillet, J.P.; Goncalves, J.L.M. ; Cardoso, E.J.B.N. 2013.** Eucaliptus granlis and Acacia mangium in monoculture and intercropped plantations: Evolution of soil and litter microbial and chemical attributes during early stages of plant development. *Applied Soil Ecology*. Amsterdam, v.63, p. 57-66.
- Bona, F.D., Bayer, C., Diekow, J., Bergamaschi, H. 2008.** Soil quality assessed by carbon management index in a subtropical Acrisol subjected to tillage and irrigation. *Australian Journal of Soil Research* 46: 469-475.
- Caravaca, F, G. Masciandaro, and B. Ceccanti. 2002.** Land use in relation to soil chemical and biochemical properties in a semiarid Mediterranean environment. *Soil Till. Res.* 68:23–30.
- Cenciani K., Freitas S. S., Critter S. A. M., Airoidi C. 2011** Enzymatic activity measured by microcalorimetry in soil amended with organic residues. *R Bras Ci Solo* 35:1167- 1175.
- Coughlan, M. P. and Ljungdahl, L. G. 1988.** Comparative biochemistry of fungal and bacterial cellulolytic enzymes system. In: *Biochemistry and genetics of*

cellulose degradation. FEMS symposium n. °43. Eds. J. P. Aubert, P. Beguin y J. Millet. Academic Press. London.

Davidson, G.R. 1995. The stable isotopic composition and measurement of carbón in soil CO₂, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59(12),2485-2489.

De León-González, F. et al. 2006. “Root-soil adhesion as affected by crop species in a volcanic sandy soil of Mexico”, en *Soil Till. Res.* 90:77-83.

Galdos, M.V., Cerri, C.C., Cerri, C.E.P. 2009. Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. *Geoderma* 153: 347-352.

García, C., Gil, F., Hernandez, T. y C. Trasar. 2003. Técnicas de análisis de parámetros bioquímicos en suelos. Ediciones Mundi Prensa, España. 373p.

Gregorich, E.G., Beare, M.H., Mckim, U.F., Skjemstad, J.O. 2006. Chemical and biological characteristics of physically uncomplexed organic matter. *Soil Science Society of America Journal* 7: 975-985.

Guimarães, D.V., Gonzaga, M.I.S., Melo-Neto, J.O. 2014. Management of soil organic matter and carbon storage in tropical fruit crops. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 18: 301-306.

Hernández-Santoyo, A., García-Hernández, E., Rodríguez-Romero, H. 1999. Celulosomas: sistemas multienzimáticos. *Rev. Soc. Quim. Mex.* 43(3-4):137-142.

Jagadamma, S., Lal, R. 2010. Distribution of organic carbon in physical fractions of soils as affected by agricultural management. *Biology Fertility of Soils* 46: 543-554.

Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123: 1-22.

Li, Y.T., Y.N. Zhang, W.D. Yan y D.L. Tian. 2005. The effect of different types of soil on the growth and fruiting of Penggan. *Journal of Central South Forestry University* 25: 48-51.

Lonergan, G. y Baker, W.L. 1995. Comparative study of substrates of fungal laccase. *Lett. Appl. Microbiol.* 21: 31-33.

- Martínez, A. T., Speranza, M., Ruiz-Dueñas, F. J., Ferreira, P., Camarero, S., Guillén, F., Martínez, M. J., Gutiérrez, A. y del Río, J. C. 2005.** Biodegradation of lignocellulosics: microbial, chemical, and enzymatic aspects of the fungal attack of lignin. *Int Microbiol.* 8, 195-204.
- Masciandaro, G.; Ceccanti, B. 1999.** Assessing soil quality in different agro-ecosystems through biochemical and chemicostructural properties of humic substances. *Soil and Tillage Research*, v.51, p.129-137.
- Nannipieri, P., J. Ascher, M. Cecherini, T. Landi, G. Pietramellaa and G. Resella. 2003.** Microbial diversity and soil functions. *European Journal of Soil Science* 54 (4): 54: 655-670.
- Nelson, N. 1944.** A photometric adaptation of the Somogyi method for determination of glucose. *Journal of Biology y Chemistry* 153, 375-380.
- Netto, A.O.A., Gomes, C.C.S., Lins, C.C.V., Barros, A.C., Campeche, L.F.S.M., Blanco, F.F. 2007.** Características químicas e salino-sodicidade dos solos do Perímetro irrigado Califórnia, SE. Brasil. *Ciência Rural* 37: 1640-1645.
- Nidetzky, B., Steiner, W. and Claeysens, M. 1995.** Synergistic interaction of cellulases from *Trichoderma reesei* during cellulose degradation. *American Chemical Society (ACS), Washington*, 90-112 pp.
- NOM-021-RECNAT-2000,** Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.
- Pascual, J. A., C. García, T. Hernández, J. L. Moreno, and M. Ros. 2000.** Soil microbial activity as a biomarker of degradation and remediation processes. *Soil Biol. Biochem.* 32: 1877–1883.
- Pérez J, Muñoz-Dorado A, De la Rubia T y Martínez, E. 2002.** Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview. *Int. Microbiol.* 5: 53–63.
- Renella, G., Landi, L., Garcia Mina, J.M., Giagnoni, L., Nannipieri, P. 2011.** Microbial and hydrolase activity after release of indoleacetic acid and

ethylene–polyamine precursors by a model root surface. *Appl. Soil Ecol.* 47, 106–110.

Rovira, P., Vallejo, V.R. 2007. Labile, recalcitrant, and inert organic matter in Mediterranean forest soils. *Soil Biology y Biochemistry* 39, 202-215.

Sinsabaugh RL, Antibus RK y Linkins AE. 1991. An enzymic approach to the analysis of microbial activity during plant litter decomposition. *Agriculture, Ecosystems y Environment* 34: 43-54.

Stevenson, F.J., and M.A. Cole. 1999. Cycles of soil. 427 p. 2nd ed.. John Wiley y Sons, New York, USA.

Tabatabai, M. A. 1982. Soil Eenzymes. In *Methods of Analysis*, part 2, 2nd Ed. A. L. Page et al. (eds.). *Agronomy* 9:903-947.

Tabatabai, M.A. 1982. Soil Enzymes. En: Page, A.L., Millar, E.M., Keeney, D.R. (Eds.). *Methods of Soil Analices. Part 2. Chemcial and Microbiological Properties.* Soil Science Society of America , Inc, Madison, pp. 903-947.

Trasar-Cepeda C, M Leirós, F Gil-Sotres. 2000. Biochemical properties of acid soils under climax vegetation (Atlantic oakwood) in an area of the European temperate-humid zone (Galicia, NW Spain): specific parameters. *Soil Biology and Biochemistry* 32(6): 747-755.

US EPA. 2005. Compilation of air pollutant emission factors, 5th Edition. Stationary Point and Area Sources, AP-42, vol. 1. Available on the internet at <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42>.

v.Lutzow, M., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B., and Flessa H. 2006. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review, *Eur. J. Soil Sci.*, 57, 426–445.

Van Cleve, K., and R. F. Powers. 1995. Soil carbon, soil formation and ecosystem development. In : Mc Free, W. W., and J. M. Kelly (eds). *Carbon forms and functions in forest soils.* Soil Sci. Soc. Am. USA. pp: 155-199.

- Walkley, A., Black, I.A. 1934.** An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37, 29-38.
- Wendling, B., I. Jucksch, E.S. Mendonça and R.C. Alvarenga. 2010.** Organic-matter pools of soil under pines and annual cultures. *Commun. Soil Sci. Plan.* 41: 1707-1722.
- Wiesenberg, G.L.B., Dorodnikov, M., Kuzyakov, Y. 2010.** Source determination of lipids in bulk soil and soil density fractions after four years of wheat cropping. *Geoderma* 156: 267-277.
- Zornoza, R., Landi, L., Nannipieri, P., Renella, G. 2009.** A protocol for the assay of arylesterase activity in soil. *Soil Biology and Biochemistry* 41: 659-662.
- Zornoza, R., Landi, L., Nannipieri, P., Renella, G. 2009.** A protocol for the assay of arylestease activity in soil. *Soil Biology y Biochemistry* 41, 659-662.