

## Efecto de las prácticas de agricultura de conservación en algunas propiedades químicas de los Vertisoles\*

### Effect of conservation agriculture practices on some chemical properties of Vertisols

Aurelio Báez Pérez<sup>1§</sup>, Agustín Limón Ortega<sup>2</sup>, Lucila González Molina<sup>2</sup>, César Eduardo Ramírez Barrientos<sup>3</sup> y Angélica Bautista-Cruz<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Campo Experimental Bajío-INIFAP. Carretera Celaya-San Miguel de Allende, km 6.5. Celaya, Guanajuato, México. CP. 38110. <sup>2</sup>Campo Experimental Valle de México-INIFAP. Carretera los Reyes-Textcoco, km 13.5. Coatlinchan, Texcoco, Estado de México. CP. 56250. <sup>3</sup>Instituto Tecnológico del Valle de Morelia. Carretera Morelia-Salamanca, km 6.5. Morelia, Michoacán. CP. 58100. <sup>4</sup>Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR-Oaxaca. Hornos 1003, Xoxocotlan, Oaxaca, México. CP. 71230. <sup>§</sup>Autor para correspondencia: baez.aurelio@inifap.gob.mx.

#### Resumen

El Bajío es una importante zona agrícola de México y entre sus suelos, los Vérticos tienen mayor potencial para la agricultura, pero el deterioro físico-químico ocasionado por las prácticas de agricultura intensiva ha repercutido en su fertilidad y la rentabilidad para la producción de granos. Las prácticas de agricultura de conservación (PAC) son una opción viable para revertir esta problemática. El objetivo de este estudio fue evaluar el pH, materia orgánica (MOS), tasa de acumulación de carbono orgánico (COS) y P-extratable Olsen en cinco Vertisoles: cuatro de Michoacán y uno de Guanajuato, con cuatro a ocho ciclos de cultivo continuos con PAC. Se evaluaron cinco prácticas agronómicas: (1) rotación gramínea-gramínea, todos los residuos de cosecha y uso de aguas negras; (2) rotación gramínea-leguminosas-gramínea, todos los residuos de cosecha y uso de aguas negras; (3) igual que 2, pero con agua de presa; (4) rotación gramínea-gramínea, 30% de residuos de cosecha y uso de agua de presa; y (5) rotación gramínea-gramínea, todos los residuos de cosecha y uso de agua de pozo. El pH fue alcalino antes de la implementación de las PAC, y disminuyó a ligeramente alcalino en función del tiempo de

#### Abstract

El Bajío is an important agricultural area of México and among its soils, the Vérticos have greater potential for agriculture, but the physical-chemical deterioration caused by intensive farming practices has had an impact on its fertility and profitability for grains production. Conservation agriculture practices (CAPs) are a viable option to reverse this problem. The objective of this paper was to evaluate pH, organic matter (MOS), organic carbon accumulation rate (COS), and P-extractable Olsen in five Vertisols: four from Michoacán and one from Guanajuato, with four to eight cycles of continuous cultivation with CAP. Five agronomic practices were evaluated: (1) grass-grass rotation, all crop residues and sewage use; (2) rotating grass-legume-grass, all crop residues and sewage use; (3) same as 2, but with dam water; (4) grass-grass rotation, 30% crop residues and use of dam water; and (5) grass-grass rotation, all crop residues and well water use. The pH was alkaline before the CAP implementation, and decreased to slightly alkaline as a function of the culture time, mainly in the stratum of 0-5 cm. The MOS increased between 1.5 and 2%, after eight continuous CAP cycles. The COS accumulation rate varied

\* Recibido: enero de 2017  
Aceptado: marzo de 2017

cultivo, principalmente en el estrato de 0-5 cm. La MOS aumentó entre 1.5 y 2%, después de ocho ciclos continuos con PAC. La tasa de acumulación de COS varió entre 1.5 y 7 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. La acumulación de P-Olsen mostró una baja correlación respecto al contenido de MOS ( $r= 0.44$ ). La mayor concentración de P-Olsen se encontró en el estrato de 0-5 cm (hasta 47 ppm). Las PAC mejoraron las características químicas de los Vertisoles evaluados en este estudio.

**Palabras clave:** agricultura de conservación, carbono orgánico del suelo.

## Introducción

La fertilidad del suelo y la acumulación de reservas orgánicas están determinadas por la interacción compleja de factores climáticos, edáficos, biológicos y de manejo agronómico (Lal, 2004). El suelo es un cuerpo natural con una amplia heterogeneidad vertical, lateral y a través del tiempo (Post *et al.*, 2001), por lo que hay dificultades para delimitar sus estándares de calidad; su estudio requiere evaluar variables que permitan medir su estatus y evolución. El contenido de C orgánico en el suelo (COS) es un indicador de calidad e influye en las propiedades físicas, químicas y biológicas. Este parámetro es factible de monitorear en los ecosistemas terrestres para evaluar su condición y definir su potencial productivo en una escala de tiempo determinada (Karlen *et al.*, 1997; Bautista-Cruz, 2004).

En los suelos agrícolas del Bajío las continuas prácticas de labranza (barbecho, rastreo y surcado) implica una constante remoción del suelo y una alteración de sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Ongley, 1997), aunado al retiro o quema de los esquilmos agrícolas y la falta de incorporación de abonos orgánicos, han ocasionado un severo deterioro de la fertilidad de los suelos (Grageda-Cabrera *et al.*, 2004). Como consecuencia a lo anterior, los agricultores emplean dosis excesivas de fertilizantes químicos para tratar de aumentar la producción agrícola, lo que impacta directamente en los costos de producción y la contaminación ambiental.

Los Vertisoles constituyen 8.6% del total de los suelos en México (Cruz *et al.*, 2007) y en el Bajío abarcan aproximadamente 500 000 hectáreas, con un potencial alto para la producción de granos y hortalizas cuando hay disponibilidad de agua para riego (Grageda, 1999); sin embargo, la agricultura intensiva y las inadecuadas prácticas

between 1.5 and 7 t ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>. The accumulation of P-Olsen showed a low correlation with the MOS content ( $r= 0.44$ ). The highest concentration of P-Olsen was found in the 0-5 cm stratum (up to 47 ppm). CAPs improved the chemical characteristics of the Vertisols evaluated in this study.

**Keywords:** conservation agriculture, soil organic carbon.

## Introduction

Soil fertility and accumulation of organic reserves are determined by the complex interaction of climatic, edaphic, biological and agronomic factors (Lal, 2004). The soil is a natural body with a wide vertical heterogeneity, lateral and over time (Post *et al.*, 2001), so there are difficulties to delimit its quality standards; its study requires evaluating variables that allow to measure their status and evolution. The C organic content in the soil (COS) is an indicator of quality and influences the physical, chemical and biological properties. This parameter is feasible to monitor on soil ecosystems in order to assess their condition and define its productive potential on a given time scale (Karlen *et al.*, 1997; Bautista-Cruz, 2004).

In the Bajío agricultural soils, the continuous tillage practices (fallow, crawl and furrow) implies a constant removal of the soil and an alteration of its physical, chemical and biological properties (Ongley, 1997), together with the removal or burning of crop waste and the lack of incorporation of organic fertilizers, have caused a severe deterioration of soil fertility (Grageda-Cabrera *et al.*, 2004). As a consequence, farmers use excessive doses of chemical fertilizers to try to increase agricultural production, which has a direct impact on production costs and environmental pollution.

Vertisols constitute 8.6% of the total soils in México (Cruz *et al.*, 2007) and in the Bajío they cover approximately 500 000 hectares, with a high potential for grains and vegetables production when there is water available for irrigation (Grageda, 1999); however, intensive agriculture and inadequate agricultural practices have led to a severe soils deterioration, impacting on ecology and profitability for agricultural production. Conservation agriculture practices (CAPs) are based on minimal soil removal, continuous addition of crop residues on its surface, and crop diversification, which is a viable option to reverse the above-mentioned problem. This favors in the medium term

agrícolas han ocasionado un severo deteriorado de los suelos, lo que impacta en la ecología y en la rentabilidad para la producción agrícola. Las prácticas de agricultura de conservación (PAC) se fundamentada en la mínima remoción del suelo, la continua adición de los residuos de cosecha en su superficie y la diversificación de cultivos, lo cual constituye una opción viable para revertir la problemática antes mencionada. Lo anterior favorece a mediano plazo la acumulación de COS y la actividad biológica, lo que incide directamente en la calidad del suelo (Gregorich y Carter, 1997). El objetivo del presente trabajo fue evaluar la evolución de las propiedades químicas en Vertisoles del Bajío sometidos a varios ciclos continuos con PAC y estudiar la tendencia de acumulación de las reservas orgánicas.

## Materiales y métodos

### Sitios de estudio

El estudio se realizó en la Cuenca de Cuitzeo, ubicada entre los 19° 59' y 19° 30' latitud norte y 101° 00' y 101° 30' longitud oeste. Tiene una superficie aproximada de 1 050 km<sup>2</sup>, y ocupa un área importante del Distrito de Riego Morelia-Queréndaro (Figura 1). La altitud es superior a 2 000 msnm. En este sitio se evaluaron cuatro Vertisoles. Otro suelo se evaluó en el INIFAP, Campo Experimental Bajío en Celaya, Guanajuato, ubicado a los 20° 3' latitud norte y 100° 0' longitud oeste, a una altitud de 1 754 m. El clima (García, 1984) es BS<sub>1</sub>hw(w)(e)g con temperatura media anual de 20.6 °C y precipitación media anual de 597 mm.

### Los suelos

La clasificación textural de los suelos, excepto uno, correspondió a arcillosa (Cuadro 1), que es propia de los Vertisoles (Cuadro 2). Estos suelos se caracterizaron por ser oscuros y profundos (>1 m) y poseer arcillas expansibles del tipo esmécticas (USDA, 1999).

### Manejo agronómico

Los suelos se cultivaron durante cuatro a ocho ciclos de cultivo continuos (dos a cuatro años) con prácticas de agricultura de conservación (PAC) con la adición de 30 a 100% de los residuos de cosecha en la superficie del suelo. El historial agronómico se presenta en el Cuadro 2. En el valle Morelia-Queréndaro los agricultores regularmente siembran,

the accumulation of COS and biological activity, which directly affects soil quality (Gregorich and Carter, 1997). The aim of this paper was to evaluate the evolution of chemical properties in Bajío's Vertisols subjected to several continuous cycles with CAP and to study the tendency of organic reserves accumulation.

## Materials and methods

### Study sites

The study was conducted in the Cuitzeo Basin, located between 19° 59' and 19° 30' north latitude and 101° 00' and 101° 30' west longitude. It has an approximate area of 1 050 km<sup>2</sup>, and occupies an important area of the Morelia-Queréndaro Irrigation District (Figure 1). The altitude is over 2 000 meters above sea level. Four Vertisols were evaluated in this site. Another soil was evaluated at INIFAP, Bajío Experimental Field in Celaya, Guanajuato, located at 20° 3' north latitude and 100° 0' west longitude, at an altitude of 1 754 m. The climate (García, 1984) is BS<sub>1</sub>hw(w)(e)g with an average annual temperature of 20.6 °C and annual rainfall of 597 mm.

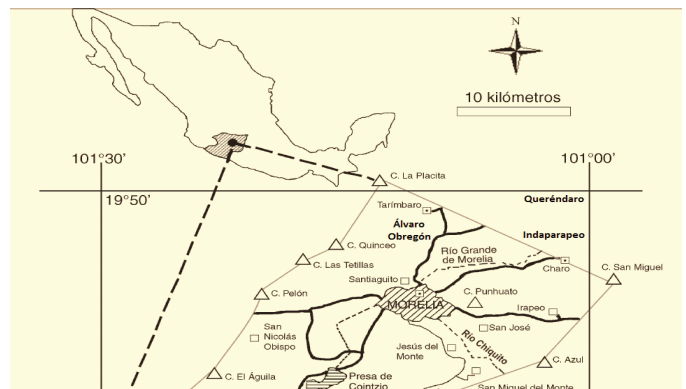


Figura 1. Ubicación del área de estudio. Valle Morelia-Queréndaro, Michoacán.

Figure 1. Location of the study area. Morelia-Queréndaro Valley, Michoacán.

### The soils

The textural classification of soils, except one, corresponded to clayey (Table 1), which is characteristic of Vertisols (Table 2). These soils were characterized by being dark and deep (>1 m) and possess expandable clays of smectic type (USDA, 1999).

durante otoño-invierno, trigo en camas de 1.6 m de ancho, entre las cuales remarcan el surco para facilitar la conducción del agua de riego; y en primavera-verano siembran maíz, a doble hilera, sobre las mismas camas. Al final de cada ciclo de cultivo, después de cosechar el grano, los residuos de cosecha se trituran y esparcen en forma de mantillo lo más homogéneamente posible sobre la superficie del suelo.

Los suelos localizados en Indaparapeo y Álvaro Obregón, son regados continuamente con aguas negras provenientes de la ciudad de Morelia, mientras que los suelos de Queréndaro se riegan con agua de la presa. En todos los suelos se adicionó el total de los residuos de cosecha en la superficie, excepto en el suelo denominado Queréndaro II, donde aproximadamente tres cuartas partes se empaquetan para su venta. La cantidad de residuos de cosecha que se adicionaron en este suelo, después de cada ciclo de cultivo, fue variable (Cuadro 2).

En el Campo Experimental Bajío el trigo se siembra en otoño-invierno sobre surcos de 0.76 cm de ancho, a doble hilera, mientras que el maíz se siembra en primavera-verano en los mismos surcos en hilera simple. Se utilizó agua de pozo para la irrigación y se dejaron todos los residuos de cosecha en la superficie del suelo en forma de mantillo.

### Muestreo y procesamiento de las muestras de suelo

En cada suelo evaluado se efectuaron cuatro muestreos, desde que se implementaron las prácticas de agricultura de conservación (PAC). En el valle Morelia-Queréndaro éstos se efectuaron a 0, 960, 1 200 y 1 440 días de la implementación de las PAC; y en el Campo Experimental Bajío a los 0, 180, 360 y 540 días. Las muestras estuvieron constituidas por 22 sub muestras cada una, y fueron recolectadas al azar dentro de cada parcela. Se utilizó una barrena de acero inoxidable y se consideraron tres profundidades: 0-5, 5-15 y 15-30 cm. Las muestras fueron secadas a la sombra y a temperatura ambiente, molidas con un mazo de madera, se tamizaron en malla de 2 mm de diámetro y fueron perfectamente homogeneizadas. Para la determinación analítica de la materia orgánica (MOS) se preparó una sub-muestra de 100 g y se molió y tamizó en malla número 30.

La determinación se hizo mediante el método de Walkley y Black, descrito por Jackson (1976). Para la determinación analítica del C total se utilizó una sub muestras de suelo 10 g, la cual se molió y tamizó en malla número 100. El C total se midió mediante un determinador automático de carbono marca Shimadzu, modelo TOC-5050<sup>a</sup>.

### Cuadro 1. Clasificación textural de los suelos evaluados bajo LC.

Table 1. Textural classification of soils evaluated under LC.

Localidad	Textura (%)			Clasificación textural
	Arena	Limo	Arcilla	
Indaparapeo, Michoacán	26	22	52	Arcillosa
Álvaro Obregón, Michoacán	24	26	50	Arcillosa
Queréndaro I, Michoacán	20	30	50	Arcillosa
Queréndaro II, Michoacán	40	26	34	Franco-Arcillosa
Celaya, Guanajuato	16	20	64	Arcillosa

### Agronomic management

Soils were cultivated for four to eight continuous cropping cycles (two to four years) with conservation agriculture practices (CAP) adding 30 to 100% of crop residues on the soil surface. The agronomic history is presented in Table 2. In the Morelia-Queréndaro valley, farmers regularly plant wheat in beds of 1.6 m wide during autumn-winter seasons, re-marking the furrow to facilitate the water irrigation; and in spring-summer they plant maize in a double row, on the same beds. At the end of each crop cycle, after harvesting the grains, the crop residues are crushed and then spread in a mulch-like form as homogeneously as possible on the soil surface.

The soils located in Indaparapeo and Álvaro Obregón, Michoacán, are continuously irrigated with sewage from Morelia city, while the soils of Queréndaro are irrigated with water from the dam. In all soils, the total amount of crop residues on the soil surface was added, except in the soil called Queréndaro II, where approximately three quarters are packed for sale. The amount of crop residues that were added in this soil, after each crop cycle, was variable (Table 2).

In the Experimental Field Bajío wheat is sown in autumn-winter on grooves of 0.76 cm wide, in double row, while maize is sown in spring-summer in the same grooves in single row. Well water was used for irrigation and all crop residues were left on the soil surface in a mulch-like form.

**Cuadro 2. Manejo agronómico bajo labranza de conservación en cuatro localidades del Valle Queréndaro-Morelia y Campo Experimental Bajío.****Table 2. Agronomic management under conservation tillage in four localities of the Queréndaro-Morelia Valley and Bajío Experimental Field.**

Localidad y sistema de cultivo	Ciclo	Cultivo	Residuos (t ha <sup>-1</sup> )
Indaparapeo, Michoacán Rota-ción gramínea-gramínea con 100% de residuos de cosecha y uso de aguas negras	P-V 2008	Maíz	10.2
	O-I 2008-2009	Descanso	0
	P-V 2009	Sorgo	9.78
	O-I 2009-2010	Cártamo	5.64
	P-V 2010	Maíz	10.17
	O-I 2010-2011	Trigo	9.85
	P-V 2011	Descanso	0
Álvaro Obregón, Michoacán Rotación gramínea-leguminosas-gramínea con 100% de residuos de cosecha y uso de aguas negras	O-I 2011-2012	Trigo	9.9
	P-V 2008	Maíz	10.85
	O-I 2008-2009	Frijol	0.8
	P-V 2009	Maíz	10.21
	O-I 2009-2010	Garbanzo	0.64
	P-V 2010	Maíz	9.41
	O-I 2010-2011	Haba	2
Queréndaro I, Michoacán Rota-ción gramínea-leguminosas-gramínea con 100% de residuos de cosecha y uso de aguas de presa	P-V 2011	Maíz	10.89
	O-I 2011-2012	Trigo	9.94
	P-V 2007	Maíz	2.88
	O-I 2007-2008	Trigo	2.45
	P-V 2008	Maíz	2.59
	O-I 2008-2009	Trigo	3.28
	P-V 2009	Maíz	2.91
Queréndaro II, Michoacán Rota-ción gramínea-gramínea con 30% de residuos de cosecha y uso de aguas de presa	O-I 2009-2010	Trigo	2.45
	P-V 2010	Maíz	2.42
	O-I 2010-2011	Trigo	3.28
	P-V 2011	Maíz	3.02
	O-I 2011-2012	Trigo	3.08
	P-V 2008	Maíz	8.28
	O-I 2008-2009	Trigo	10.93
Celaya, Guanajuato Rotación gramínea-gramínea con 100% de residuos de cosecha y uso de aguas de pozo.	P-V 2009	Maíz	9.01
	O-I 2009-2010	Trigo	10.44
	P-V 2010	Maíz	8.03
	O-I 2010-2011	Trigo	10.21
	P-V 2011	Maíz	10.1
	O-I 2011-2012	Trigo	10.13
	P-V 2010	Maíz	15
O-I 2010-2011	Trigo	10	
P-V 2011	Maíz	12	
O-I 2011-2012	Trigo	9.5	

O-I= otoño-invierno; P-V= primavera-verano.



En este equipo se midió el C inorgánico. El COS se calculó restando el C inorgánico al C total. El pH del suelo se midió en agua relación 1:2. El P-extractable se avaluó mediante el método de Olsen, descrito por Jackson (1976). Los resultados se relacionaron con el tiempo de cultivo, para evaluar el comportamiento y tendencia de acumulación de las reservas orgánicas por efecto de las prácticas de agricultura de conservación.

## Resultados y discusión

El pH en los Vertisoles evaluados fue de alcalino a fuertemente alcalino antes de la implementación de las prácticas de agricultura de conservación (PAC) (Figura 2). El pH disminuyó en función del tiempo de cultivo, hasta cerca de una unidad en el estrato de 0-5 cm de profundidad. En los estratos de 5-15 y 15-30 cm la disminución del pH fue más tenue. En el primer estrato del suelo la actividad biológica fue más intensa, por estar en contacto directo con la capa orgánica de los residuos de cosecha. Según Galeana-Cruz *et al.* (1998) la adición de materia orgánica (MOS) en la superficie del suelo, como parte de las PAC, es el componente con mayor influencia en el abatimiento del pH. La mineralización de la MOS implica necesariamente una actividad más intensa de los microorganismos del suelo, y durante el proceso de humificación se producen ácidos orgánicos que reaccionan con la fracción mineral del suelo.

La problemática de la degradación química de los suelos en el Bajío es ocasionada, en parte, por la acumulación de sales provenientes del uso excesivo de fertilizantes químicos y de las aguas de riego con altas concentraciones de sodio. Castellanos *et al.* (2000) mencionaron que el contenido de sodio en los suelos de Guanajuato ha aumentado en los últimos años, por el alto contenido de carbonatos de sodio que contienen las aguas de riego. Las aguas negras que se utilizan en Michoacán es probable que contengan aún mayores niveles de sodio. Por tanto, la adición e incorporación continua de MOS es una alternativa viable para reducir la alcalinidad en suelos.

### Materia orgánica

La acumulación de MOS en los Vertisoles, después de cuatro a ocho ciclos de cultivo continuos con la adición de los residuos de cosecha en la superficie del suelo y la mínima remoción del mismo, fue significativa ( $p \leq 0.05$ ).

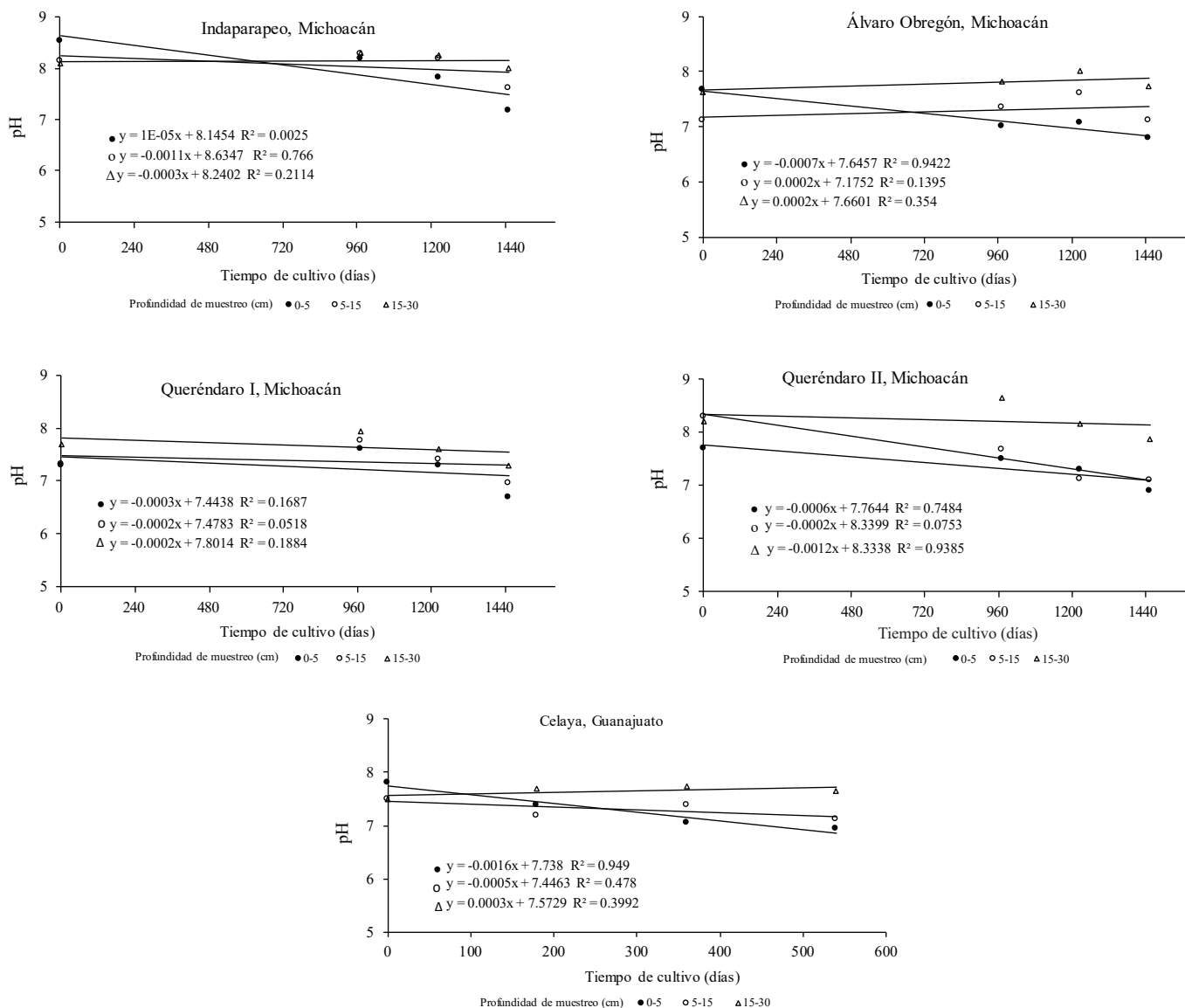
## Sampling and processing of soil samples

Four samples were taken in each soil evaluated, since the conservation agriculture practices (CAP) were implemented. In the Morelia-Queréndaro valley these were carried out at 0, 960, 1 200 and 1 440 days of the implementation of PACs; and in the Bajío Experimental Field at 0, 180, 360 and 540 days. The samples consisted of 22 sub samples each, and were collected randomly within each plot. A stainless steel bit was used and three depths were considered: 0-5, 5-15 and 15-30 cm. Samples then were dried in the shade and at room temperature, milled with a wooden mallet, sieved in a 2 mm diameter mesh and perfectly homogenized. For the analytical determination of the organic matter (MOS) a sub-sample of 100 g was prepared, ground and sieved in a number 30 mesh.

The determination was made by the Walkley and Black method, described by Jackson (1976). For the analytical determination of C total, a sub-soil sample of 10 g was used, which was ground and sieved in a number 100 mesh. The C total was measured by a Shimadzu automatic carbon determinator, model TOC-5050<sup>a</sup>. It was used to measured inorganic C. The COS was calculated by subtracting the inorganic C to the total C. The pH of the soil was measured in wáter at 1:2 ratio. The P-extractable was evaluated by the Olsen method, described by Jackson (1976). Results were related to cultivation time, in order to evaluate the behavior and accumulation tendency of organic reserves by the effect of conservation agriculture practices.

## Results and discussion

The pH in the evaluated Vertisols was from alkaline to strongly alkaline prior to the implementation of conservation agriculture (CAP) practices (Figure 2). The pH decreased as a function of the culture time, to about one unit in the 0-5 cm depth stratum. In the strata of 5-15 and 15-30 cm the pH decrease was more tenuous. In the first soil stratum the biological activity was more intense, due to the direct contact with the organic layer of the crop residues. According to Galeana-Cruz *et al.* (1998), the addition of organic matter (MOS) to the soil surface, as part of the CAP, is the component with the greatest influence on pH depletion. The mineralization of MOS necessarily implies a more intense activity of soil microorganisms, and during the humification process organic acids are produced that react with the mineral fraction of the soil.



**Figura 2. Evolución del pH en cinco Vertisoles sometidos a prácticas de agricultura de conservación.**  
**Figure 2. Evolution of pH in five Vertisols submitted to conservation agriculture practices.**

El incremento fue lineal en función del tiempo de cultivo y de la cantidad esquilmos agrícolas. Sin embargo, cuando los productores rompen el sistema de labranza de conservación por la necesidad de nivelar su terreno de cultivo, las reservas de MOS desciende drásticamente en un sólo ciclo de cultivo. Este fue el caso del suelo Queréndaro II donde el agricultor, después de cuatro ciclos continuos con las PAC, efectuó todas las prácticas de labranza para nivelar su parcela. Se observó que después de dos años con las PAC la MOS aumentó hasta cerca de 5% en el estrato

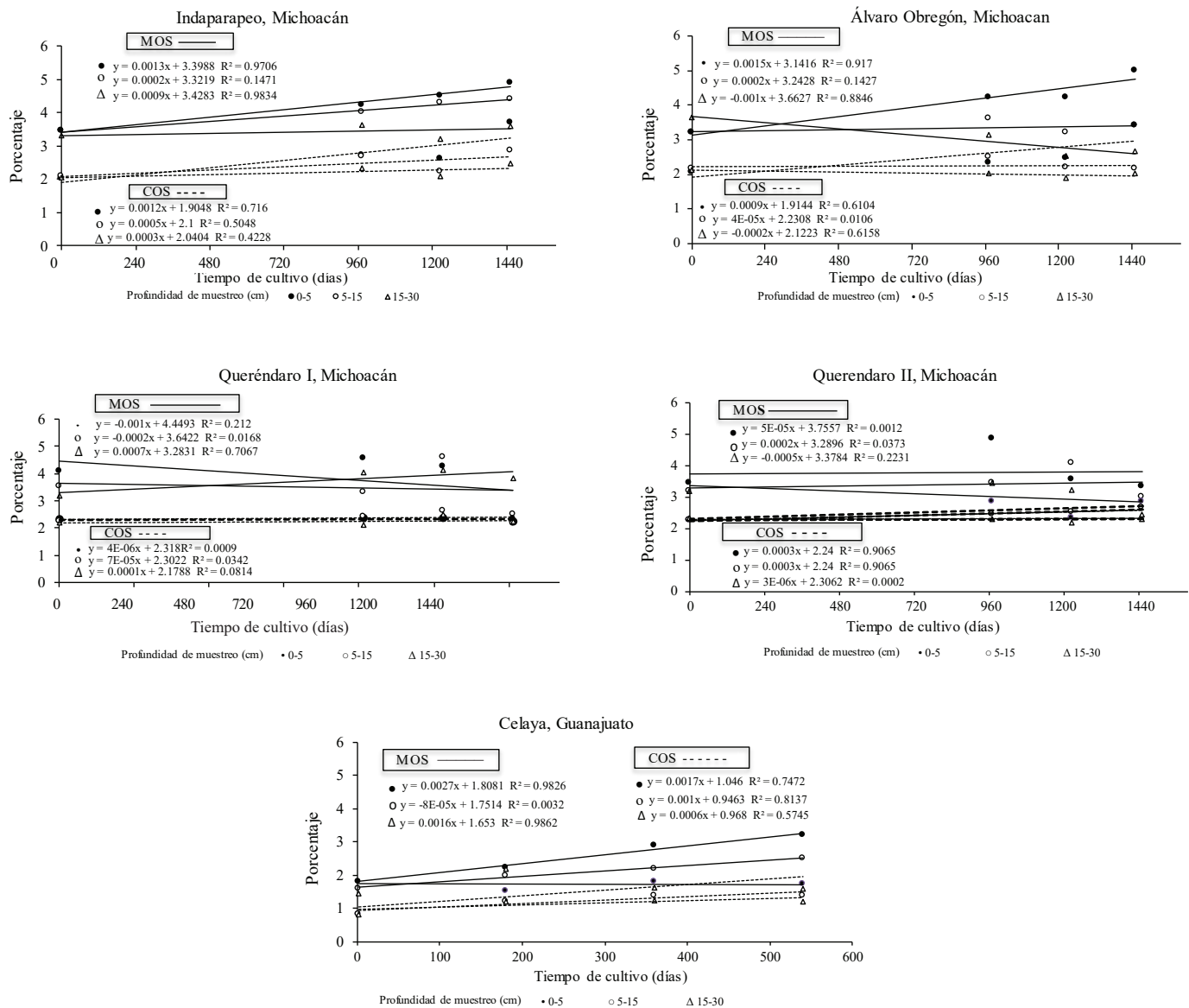
The problem of chemical degradation of soils in the Bajío is caused in part by the accumulation of salts from the excessive use of chemical fertilizers and irrigation water with high concentrations of sodium. Castellanos *et al.* (2000) mentioned that sodium content in Guanajuato soils has increased in recent years due to the high content of sodium carbonates contained in irrigation waters. The sewage used in Michoacán is likely to contain even higher levels of sodium. Therefore, the addition and continuous incorporation of MOS is a viable alternative to reduce alkalinity in soils.

de 0-5 cm de profundidad, pero al romper con el sistema de cultivo la MOS disminuyó drásticamente hasta poco más de 3% (Figura 3).

En este suelo se adicionó durante 4 ciclos de cultivo continuos, alrededor de 38 t ha<sup>-1</sup>. Los residuos de cosecha existentes en la superficie del suelo hasta ese momento se incorporaron al suelo con el barbecho, posteriormente se reanudó con las PAC; sin embargo, debido a la alteración del suelo la tasa de acumulación de la MOS fue alterada y disminuyó.

### Organic material

The accumulation of MOS in Vertisols, after four to eight cycles of continuous cultivation with the addition of crop residues on the soil surface and its minimal removal, was significant ( $p \leq 0.05$ ). The increase was linear according to the cultivation time and the amount of agricultural wastes. However, when producers break the conservation tillage system due to the need to level their cropland, MOS reserves falls drastically in a single crop cycle.



**Figura 3. Evolución en la acumulación de MOS y COS en cinco Vertisoles sometidos a labranza de conservación en el Bajío.**  
**Figure 3. Evolution in the accumulation of MOS and COS in five Vertisols submitted to conservation tillage in the Bajío.**



La incorporación de residuos de cosecha en el suelo mediante el barbecho implica voltear la capa arable y exponer en la superficie el estrato inferior, que tiene menor contenido de MOS respecto al estrato superior. Este último al quedar enterrado y en contacto directo con los microorganismos del suelo, aumenta la tasa de mineralización de la MOS y las reservas orgánicas disminuyen. La pulverización de los agregados del suelo por rastro, nivelación y surcado, favorecen la oxidación del COS (Elliot, 1986; Oades, 1988).

En suelos regados con aguas negras, en Álvaro Obregón e Indaparapeo, después de ocho ciclos de cultivo con las PAC, la MOS aumentó alrededor de 2%, en el estrato 0-5 cm de profundidad, respecto al contenido de MOS antes de implementar las PAC (Figura 2). Este nivel de acumulación alto se explica por un ingreso continuo de residuos orgánicos con el agua de riego. Para lograr este aumento de MOS, después de casi cuatro años de cultivo, ingresaron al suelo alrededor de 50 t ha<sup>-1</sup> de residuos de cosecha. En la profundidad de 5-15 cm la acumulación de la MOS fue 0.5% menor, respecto a la profundidad anterior.

En el estrato de 15-30 cm la acumulación de MOS no mostró cambio con respecto a la cantidad materia orgánica encontrada antes de iniciar con las PAC. Fue evidente que la acumulación de MOS fue menor a medida que aumentó la profundidad, porque el contacto con los residuos de cosecha con los estratos más profundos es más distante. Para que ocurra un aumento de MOS a mayor profundidad se requiere mayor tiempo de cultivo, para que los procesos propios de lixiviación, intemperización, mineralización y humificación, entre otros, incidan en los horizontes más profundos.

En el suelo Queréndaro I el porcentaje de MOS aumentó ligeramente en los primeros 5 cm de profundidad, respecto al contenido que tenía antes de implementar las PAC. En este suelo se incorporaron alrededor de 30% de los residuos de cosecha después de cada ciclo de cultivo, que equivalió a aproximadamente 28 t ha<sup>-1</sup> (Cuadro 2). Lo anterior, se explica porque la velocidad de mineralización de la MOS es ligeramente menor que la tasa de acumulación. Es decir, se requiere un mayor ingreso de residuos de cosecha para aumentar significativamente el contenido MOS en este suelo (Reycosky *et al.*, 1995).

This was the case of the Queréndaro II soil where the farmer, after four continuous cycles of CAPs, performed all the tillage practices to level his plot. It was observed that after two years with CAPs the MOS increased up to 5% in the 0-5 cm depth stratum, but when the culture system was broken the MOS decreased drastically to a little more than 3% (Figure 3).

In this soil, about 38 t ha<sup>-1</sup> were added to the surface for 4 continuous crop cycles. The harvest residues in the soil surface until that moment were incorporated to the soil with the fallow, later it was resumed with the CAP; however, due to soil disturbance the MOS accumulation rate was altered and decreased.

Incorporation of crop residues into the soil by fallowing involves flipping the arable layer and exposing the lower layer to the surface, which has a lower MOS content than the upper layer. The latter being buried and in direct contact with soil microorganisms, increases the rate of mineralization of the MOS and the organic reserves decrease. The spraying of soil aggregates by the work of tracking, leveling and furrowing also favors the oxidation of COS (Elliot, 1986; Oades, 1988).

In the soils irrigated with sewage, in Álvaro Obregón and Indaparapeo, after eight cycles of cultivation with CAPs, MOS increased by about 2%, in the stratum 0-5 cm deep, with respect to the content of MOS before implementing The CAPs (Figure 2). This level of high accumulation is explained by a continuous intake of organic waste with the irrigation water. To achieve this increase in MOS, after nearly four years of cultivation, about 50 t ha<sup>-1</sup> of crop residues were introduced into the soil. At the depth of 5-15 cm the MOS accumulation was 0.5% smaller, compared to the previous depth.

In the stratum of 15-30 cm the MOS accumulation did not show changes with respect to the amount of organic matter found before starting with the CAP. It was evident that the accumulation of MOS was lower as the depth increased, because the contact with the crop residues with the deeper strata is more distant. In order for a substantial increase of MOS at a greater depth to occur, longer cultivation time is required for the leaching, intemperisation, mineralization and humification processes, among others, to affect the deeper horizons.

En el suelo evaluado en Celaya, con sólo cuatro ciclos de cultivo con las PAC, hubo una tendencia en la acumulación de la MOS aproximadamente lineal, alcanzando un contenido mayor de 3%; es decir, 1.2% más con respecto al año cero. Para la profundidad de 5-15 cm este aumento fue 0.7%. Se estimó que la cantidad de residuos de cosecha que se adicionaron al suelo fue de cerca de 46 t ha<sup>-1</sup> (Cuadro 2). En el estrato de 15-30 cm de profundidad el contenido de MOS no aumentó (Figura 3).

### Carbono orgánico

La evolución en la acumulación de reservas de COS en los Vertisoles evaluados presentó un aumento significativo, especialmente en el estrato de 0-5 cm de profundidad, para los suelos de Indaparapeo, Álvaro Obregón y Celaya. Este aumento varió de 0.5 a 2%, lo cual dependió del tiempo de cultivo con las PAC y la cantidad de residuos de cosecha adicionados al suelo (Figura 3). El comportamiento en la dinámica de acumulación del COS fue similar a lo expuesto para MOS, lo cual se explica por la estrecha relación ( $R^2 < 0.7$ ) entre ambos parámetros. La MOS del suelo contiene 58% de C (Jackson, 1976) y su velocidad de mineralización depende de la cantidad de lignina, grado de desmenuzamiento, distribución en el suelo, manejo agronómico y de las condiciones edafoclimáticas (Curtin *et al.*, 2000).

En el segundo estrato, de 5 a 15 cm de profundidad, la acumulación del COS fue más discreta y en algunos casos no fue evidente, mientras que en la profundidad de 15-30 cm en la mayoría de los casos no fue evidente. Esto se debe a que no hay un contacto directo con los residuos de cosecha, como se ha explicado anteriormente.

La tasa de acumulación de COS en el Vertisol de Indaparapeo, Michoacán, fue la más alta de los suelos que se evaluaron en el valle Morelia-Queréndaro. Ingresó en promedio 7 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en los primeros 30 cm de profundidad (Figura 4), Mientras los Vertisoles de Álvaro Obregón y Queréndaro II se acumularon 1.5 y 2.5 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de este elemento, respectivamente. Pero en el suelo de Queréndaro I prácticamente no hubo acumulación de carbono al adicionar sólo 30% de los residuos de cosecha. En el suelo de Celaya, donde se acumularon mayores cantidades de esquilmos agrícolas, la tasa de acumulación de COS fue la más alta, con 9.3 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.

La acumulación de COS en el suelo ocurre cuando los ingresos (residuos orgánicos) son mayores que las pérdidas (erosión, mineralización, lixiviación) (Lal, 2004).

In the Queréndaro I soil the percentage of MOS slightly increased in the first 5 cm of depth, in relation to the content it had before implementing the PACs. In this soil about 30% of the crop residues were incorporated after each crop cycle, which was equivalent to approximately 28 t ha<sup>-1</sup> (Table 2). This can be explained because the mineralization rate of the MOS is slightly lower than the accumulation rate. In other words, a higher input of crop residues is required to significantly increase the MOS content in this soil (Reycosky *et al.*, 1995).

In the soil evaluated in Celaya, with only four cycles of cultivation with PACs, there was an approximately linear trend in the MOS accumulation, reaching a content greater than 3%; i.e. 1.2% more than year zero. For the depth of 5-15 cm this increase was 0.7%. It was estimated that the amount of crop residues added to the soil was about 46 t ha<sup>-1</sup> (Table 2). In the stratum 15-30 cm deep the MOS content did not increase (Figure 3).

### Organic carbon

The evolution in the accumulation of COS reserves in the evaluated Vertisols showed a significant increase, especially in the 0-5 cm depth stratum, for the soils of Indaparapeo, Álvaro Obregón and Celaya. This increase varied from 0.5 to 2%, which depended on the cultivation time with the PAC and the amount of crop residues added to the soil (Figure 3). The behavior in the accumulation dynamics of the COS was similar to that reported for MOS, which is explained by the close relation ( $R^2 < 0.7$ ) between both parameters. Soil MOS contains 58% of C (Jackson, 1976) and its rate of mineralization depends on the amount of lignin, comminution degree, soil distribution, agronomic and edaphoclimatic conditions (Curtin *et al.*, 2000).

In the second stratum, 5 to 15 cm deep, the COS accumulation was more discrete and in some cases was not even evident, whereas in the depth of 15-30 cm in most cases, it was not evident. This is because there is no direct contact with the crop residues, as explained above.

The COS accumulation rate in the Vertisol of Indaparapeo, Michoacán, was the highest of the soils that were evaluated in the valley Morelia-Queréndaro. It entered on average 7 t ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> in the first 30 cm of depth (Figure 4). Meanwhile, in the Vertisols of Álvaro Obregón and Queréndaro II, 1.5 and 2.5 t ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> of this element were accumulated, respectively. But on the Queréndaro I soil there was practically no carbon

Báez-Pérez *et al.* (2009) concluyeron que la tasa de emisión de CO<sub>2</sub> (TEC) del suelo está en función de la humedad retenida y del contenido de COS. Por ello, los suelos sometidos a labranza de conservación tienen mayor contenido de MOS que es potencialmente mineralizable, comparados con los suelos donde se practica labranza tradicional. Lo anterior implica una mayor emisión de CO<sub>2</sub> a medida que aumenta el contenido de MOS, como ha sido reportado en otro estudio en estos mismos suelos Vertisoles (Báez-Pérez *et al.*, 2011).

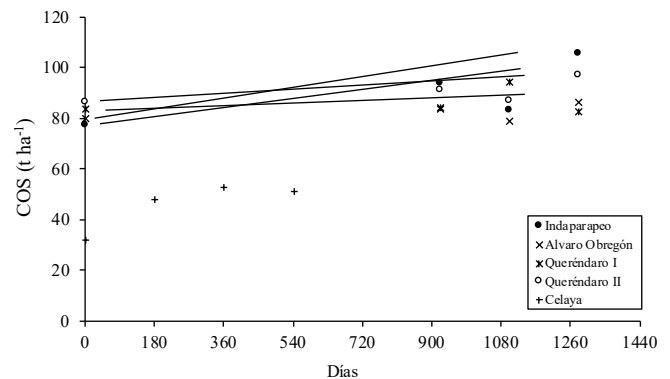
En los sistemas con labranza tradicional, en los suelos Vertisoles del valle Morelia-Queréndaro, la cantidad de residuos de cosecha incorporada al suelo varía de 1 a 2 t ha<sup>-1</sup>, y su humedad volumétrica en los primeros 30 cm de profundidad durante primavera-verano puede variar desde 12% en época seca, hasta 42% en época húmeda, con una emisión de CO<sub>2</sub> de 0.2 a 1.2 g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, respectivamente. En los sistemas con PAC la humedad volumétrica fluctúa de 20% a 52% y las emisiones de CO<sub>2</sub>, en el mismo sentido, de 0.4 a 2.6 g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Lo anterior evidencia, que aun cuando existe un ingreso constante de MOS en los sistemas de cultivo con PAC, la TEC también es mayor, por lo cual la acumulación de COS también puede ser limitada. Lograr que la tasa de acumulación de COS sea mayor que la tasa de pérdida del mismo requiere estrategias adicionales además de la incorporación de residuos orgánicos. El empleo de cultivos de amplia cobertura vegetal y la rotación de cultivos podrían constituir alternativas adicionales para disminuir las pérdidas de COS por efecto de la mineralización y erosión.

### Fosforo extractable

El contenido de P-extractable (P) en los suelos evaluados mostró una baja correlación respecto al contenido de MOS del suelo (R<sup>2</sup>= 0.2). El aporte continuo de los residuos de cosecha en la superficie del suelo necesariamente contribuye con reservas importantes de P; sin embargo, la constante aplicación de fertilizantes fosfatados, que los agricultores aplican ciclo con ciclo a los cultivos, ha proporcionado un amplio reservorio disponible de este elemento en el corto plazo para satisfacer el requerimiento de los cultivos de cereales.

No se observó ninguna tendencia en la acumulación de este elemento que se relacione con el tiempo de cultivo por efecto las PAC. Debido a que el P es un elemento con poca movilidad en el suelo y que las formas asimilables por las

acumulación por añadir sólo 30% de los residuos de cultivo. En el suelo de Celaya, donde hubo una acumulación de mayores cantidades de residuos agrícolas, la tasa de acumulación de COS fue la más alta, con 9.3 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.



**Figura 4. Tasa de acumulación de COS en cinco Vertisoles sometidos a labranza de conservación en el Bajío.**  
**Figure 4. COS accumulation rate in five Vertisols submitted to conservation tillage in the Bajío.**

The accumulation of COS in the soil occurs when the income (organic waste) is greater than the losses (erosion, mineralization, leaching) (Lal, 2004). Báez-Pérez *et al.* (2009) concluded that the CO<sub>2</sub> emission rate (TEC) of the soil is a function of the retained moisture and the COS content. Therefore, soils subject to conservation tillage have a higher content of MOS that is potentially mineralizable, compared to soils where traditional tillage is practiced. This implies a higher CO<sub>2</sub> emission as the MOS content increases, as has been reported in another study in these same Vertisols soils (Báez-Pérez *et al.*, 2011).

In traditional tillage systems, in the Vertisols soils of Morelia-Queréndaro Valley, the amount of crop residues incorporated in the soil varies from 1 to 2 t ha<sup>-1</sup> and its volumetric moisture in the first 30 cm of depth during spring-summer can vary from 12% in dry season, to 42% in wet season, with a CO<sub>2</sub> emission of 0.2 to 1.2 g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, respectively. In CAP systems the volumetric humidity fluctuates from 20% to 52% and CO<sub>2</sub> emissions, in the same regard, from 0.4 to 2.6 g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. The above shows that even when there is a constant income of MOS in the culture systems with CAP, the TEC is also larger, so the accumulation of COS can also be limited. In order to achieve a COS accumulation rate greater than the COS loss, additional strategies are required in addition to the incorporation of organic waste. The use of crops with wide

plantas ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y  $\text{HPO}_4^{2-}$ ) son estables en un medio con pH ligeramente ácido (Castellanos, 2000), se podría inferir que hay una alta disponibilidad de este elemento en el suelo. Sin embargo, los valores de pH alcalino que presentan la mayoría de los suelos en esta evaluación podría influir en la solubilidad de este elemento, y por tanto en la disponibilidad para la nutrición de las plantas.

La mayor concentración de P-extractable en los Vertisoles evaluados se encontró en el estrato de 0-5 cm de profundidad, con excepción del suelo de Indaparapeo (Cuadro 3), donde los estratos de 5-15 y 15-30 cm de profundidad fueron más ricos en este elemento, 42 y 65 ppm, respectivamente, lo cual es extremadamente alto.

vegetation coverage and crop rotation could be additional alternatives to reduce COS losses due to mineralization and erosion.

### Extractable phosphorus

The P-extractable content (P) in the evaluated soils showed a low correlation with the soil MOS content ( $R^2= 0.2$ ). The continued contribution of crop residues to the soil surface necessarily contributes to significant reserves of P; however, the constant application of phosphate fertilizers, which farmers apply cycle by cycle to crops, has provided a large reservoir of this element available in the short term to meet the requirement of cereal crops.

**Cuadro 3. Cantidad de P-extractable Olsen (ppm) en los suelos evaluados del Bajío.**

**Table 3. Amount of P-extractable Olsen (ppm) in the evaluated soils of the Bajío.**

Localidad	Tiempo de cultivo (días)	Profundidad (cm)			P-extractable total ( $\text{kg ha}^{-1}$ )
		0-5	5-15	15-30	
Indaparapeo Michoacán	0	43	65	53	580
	730	43	65	53	580
	920	43	60	57	576
	1 090	41	65	53	572
Álvaro Obregón Michoacán	0	47	23	20	324
	730	47	26	20	335
	920	47	26	20	335
	1 090	41	28	29	353
Queréndaro I Michoacán	0	21	33	15	248
	730	21	33	15	248
	920	21	33	15	248
	1 090	37	19	23	284
Queréndaro II Michoacán	0	26	27	17	252
	730	26	27	17	252
	920	26	27	17	252
	1 090	32	14	10	202
Celaya Guanajuato	0	23	23	23	248
	180	14	16	17	169
	360	23	15	13	184
	540	24	15	18	205

Lo anterior se explica por el uso continuo de aguas negras provenientes de la ciudad de Morelia, con fines de riego, como se explicó anteriormente. La concentración de P-extractable en los suelos de Michoacán puede clasificarse de alta a muy alta, lo cual sugiere que no sería necesario

No trend was observed in the accumulation of this element that was related to the culture time by effect of the CAP. Because P is an element with low soil mobility and the forms assimilable by plants ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y  $\text{HPO}_4^{2-}$ ) are stable in a medium with slightly acidic pH (Castellanos, 2000),

aplicar fertilizantes fosfatados en varios ciclos de cultivo. Según Castellanos (2000), el requerimiento de P-extractable para un potencial de rendimiento en maíz de  $10 \text{ t ha}^{-1}$  para la región Bajío es de 90 a  $100 \text{ kg ha}^{-1}$ .

La reserva disponible de este elemento en los suelos de Michoacán se estimó que fue de 169 a  $680 \text{ kg ha}^{-1}$ , lo cual puede satisfacer las necesidades nutrimentales de dos a seis ciclos consecutivos de gramíneas (Cuadro 3). Lo anterior puede constituir un ahorro importante en el costo del fertilizante químico. Sin embargo, el pH alcalino que presenta en algunos suelos podría influir en esta disponibilidad.

El suelo de Celaya, Guanajuato, con sólo dos años con las PAC, presentó los valores de P-extractable más bajos, de 17 a 26 ppm, respecto a los demás suelos; sin embargo, su contenido se clasifica de medio a moderadamente alto. Las reservas de P-extractable en este suelo se estimaron en más de  $200 \text{ kg ha}^{-1}$ .

## Conclusiones

Las prácticas de agricultura de conservación en los suelos evaluados aumentaron en las reservas orgánicas y disminuyeron el pH, mayormente en el estrato de 0-5 cm de profundidad, lo cual contribuyó con el mejoramiento de la fertilidad. Hubo un aumento significativo en la acumulación de materia orgánica y carbono orgánico, principalmente en el estrato de 0-5 cm de profundidad, 1 a 2% y 0.5 a 1.5% respectivamente. A medida que aumentó la profundidad de suelo la acumulación de MOS disminuyó. El contenido de P-extractable en los suelos fue alto para los tres estratos, entre 20 y 47 ppm; sin embargo, no se relacionó con el contenido de MOS. La continua aplicación de este elemento por medio de fertilizantes químicos ha proporcionado un reservorio importante en el suelo.

## Agradecimientos

A la COFUPRO Unidad Operativa Michoacán, por el financiamiento otorgado para la realización de esta investigación.

it could be inferred that there is a high availability of this element in the ground. However, the values of alkaline pH that present the majority of the soils in this evaluation could influence the solubility of this element, and therefore the availability for the plants nutrition.

The highest concentration of P-extractable in the evaluated Vertisols was found in the 0-5 cm depth stratum, with the exception of the Indaparapeo soil (Table 3), where strata of 5-15 and 15-30 cm depth were more rich in this element, 42 and 65 ppm, respectively, which is extremely high.

This is explained by the continuous use of sewage from Morelia city, for irrigation purposes, as explained above. The concentration of P-extractable in the soils of Michoacán can be classified from high to very high, suggesting that it would not be necessary to apply phosphate fertilizers in several crop cycles. According to Castellanos (2000), the requirement of P-extractable for a yield potential in  $10 \text{ t ha}^{-1}$  maize for the Bajío region is 90 to  $100 \text{ kg ha}^{-1}$ .

The available reserve of this element in the soils of Michoacán was estimated to be 169 to  $680 \text{ kg ha}^{-1}$ , which can satisfy the nutritional needs of two to six consecutive cycles of grasses (Table 3). This can constitute a significant saving in the cost of chemical fertilizer. However, the alkaline pH present in some soils could influence its availability.

The soil of Celaya, Guanajuato, with only two years with CAP, showed the lowest P-extractable values, from 17 to 26 ppm, with respect to the other soils; however, its content is classified as medium to moderately high. The reserves of P-extractable in this soil were estimated at more than  $200 \text{ kg ha}^{-1}$ .

## Conclusions

The conservation agriculture practices in the evaluated soils increased the organic reserves and decreased the pH, mainly in the stratum of 0-5 cm of depth, which contributed to the fertility improvement. There was a significant increase in the accumulation of organic matter and organic carbon, mainly in the stratum 0-5 cm deep, 1 to 2% and 0.5 to 1.5% respectively. As soil depth increased, MOS accumulation decreased. The P-extractable content in soils was high for



## Literatura citada

- Báez, P. A.; Etchevers, J. D.; Haulon, M.; Werner, G.; Flores, G. e Hidalgo, C. 2009. Pérdida de carbono por erosión hídrica y emisiones de CO<sub>2</sub> en tepetates habilitados para la agricultura. *In*: Gallardo, J. F.; Campo, J. and Conti, M. E. (Eds). Emisiones de gases con efecto invernadero en ecosistemas iberoamericanos. Salamanca, España. 25-48 pp.
- Báez, P. A.; Huerta, M. E.; Velázquez, G. J. y Bautista, C. M. A. 2011. Acumulación y flujo de carbono en Vertisoles cultivados en labranza de conservación. *In*: estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México. Paz, F. y Cuevas R. M. (Eds.). Síntesis a 2011 del programa mexicano del carbono. Instituto Nacional de Ecología. México. D. F. 204-2011 pp.
- Bautista, C. A.; Etchevers, B. J. D.; del Castillo, R. F. y Gutiérrez, C. C. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*. 13:90-97.
- Castellanos, J. Z. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. INTAGRI. Segunda edición. Celaya, Guanajuato. 187 p.
- Castellanos, J. Z.; Hurtado, G. B.; Villalobos, R. S.; Badillo, T. V.; Vargas, T. P. y Enríquez, R. S. A. 2000. La calidad de agua subterránea para Guanajuato. Reporte técnico del proyecto 47/99 de la Fundación Produce Guanajuato A.C. Celaya, Guanajuato. 6 p.
- Curtin, D.; Wang, H.; Selles, F. B.; McConkey, G. and Campbell, C. A. 2000. Tillage effects on carbon in continuous wheat and fallow - weat rotations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:2080-2086.
- Elliot, E. T. 1986. Aggregates structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50:627-633.
- Galeana, C. M.; Trinidad, S. A.; García, C. N. E. y Flores, R. D. 1998. Labranza de conservación y fertilización en el rendimiento de maíz y su efecto en el suelo. *Terra Latinoam.* 17:325-335.
- Grageda-Cabrera, O. A. 1999. La fertilización nitrogenada en el Bajío guanajuatense como fuente potencial de contaminantes ambientales. Tesis de doctorado en Biotecnología y Bioenergía. CINVESTAV-IPN. México, D. F. 145 p.
- Grageda, C. O. A.; Medina, C. T.; Aguilar, A. J. L.; Hernández, M. M.; Solís, M. E.; Aguado, S. G. A. y Peña, C. J. J. 2004. Pérdidas de nitrógeno por emisión de N<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O en diferentes sistemas de manejo y con tres fuentes nitrogenadas. *Agrociencia*. 38:625-633.
- all three strata, between 20 and 47 ppm; however, it was not related to MOS content. The continuous application of this element by means of chemical fertilizers has provided an important reservoir in the soil.

*End of the English version*



- García, E. 1984. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen. Universidad Nacional Autónoma de México. México, 16-21 pp.
- Gregorich, E. G. and Carter, M. R. 1997. Soil quality for crop production and ecosystem health. *Develop. Soil Sci.* 25:125-165.
- INEGI. 2007. Conjunto de datos vectorial edafológico, escala 1: 250 000 Serie II (continuo nacional). México.
- Jackson, M. L. 1976. Análisis químico de suelos. 3<sup>ra</sup> edición. Traducción al español por Martínez, J. B. Omega. Barcelona, España. 282-283 pp.
- Karlen, D. L.; Mausbach, M. J.; Doran, J. W.; Cline, R. G.; Harris, R. F. and Schuman, G. E. 1997. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:4-10.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*. 304:1624-1627.
- Oades, J. M. 1988. The retention of organic matter in soils. *Biogeochemistry*. 5:35-70.
- Ongley, E. D. 1997. Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. Estudio de la FAO riego y drenaje núm. 55. 115 pp.
- Post, W. M.; Izaurralde, R. C.; Mann, L. K. and Bliss, N. 2001. Monitoring and verifying of changes of organic carbon in soil. *Climatic change*. 51:73-99.
- Reicosky, D. C.; Kemper, W. D.; Langdele, G. W.; Douglas Jr, C. L. and Rasmussen, P. E. 2000. Soil organic matter changes resulting from tillage and biomass production. *J. soil and water conservation*. 50:253-261.
- USDA (United States Department of Agriculture). 1999. Soil taxonomy: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Second edition. 783-784 pp.