

# C ORGÁNICO Y P-OLSEN EN TEPETATES CULTIVADOS DE MÉXICO

## ORGANIC C AND OLSEN-P IN CULTIVATED TEPETATES OF MÉXICO

Aurelio Báez-Pérez<sup>1</sup>, Jorge D. Etchevers-Barra<sup>1</sup>, Claudia Hidalgo-Moreno<sup>1</sup>, Christian Prat<sup>2</sup>,  
Víctor Ordaz-Chaparro<sup>1</sup> y Roberto Núñez-Escobar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Especialidad de Edafología. Instituto de Recursos Naturales. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México. (jetchev@colpos.mx). <sup>2</sup>IRD. BP 34093 Montpellier, Cedex 05. Francia (prat@salam.teledetection.fr)

### RESUMEN

Los tepetates son tobas volcánicas parcialmente alteradas y endurecidas por procesos geológicos o pedológicos, que se encuentran a diferentes profundidades en los suelos de piedemonte del Eje Neovolcánico de México, en áreas con alta densidad de población. Cuando el suelo que cubre los tepetates se erosiona, estas capas afloran a la superficie. Los tepetates pueden ser habilitados para la agricultura mediante roturación y prácticas agrícolas adecuadas, pero poseen una fertilidad muy baja. El objetivo del presente trabajo fue analizar la situación del C orgánico y P-Olsen, dos elementos claves para la fertilidad, en tepetates que tienen de 1 a 100 años de haber sido incorporados a la agricultura y sometidos a diferentes sistemas de manejo. Se entrevistó a los productores de comunidades aledañas a la cuenca del río Texcoco, México, y se seleccionaron 100 parcelas. Se colectaron muestras del sustrato (0 a 20 cm) y se analizaron para C orgánico y P-Olsen. La concentración de ambos aumentó a medida que se incrementó el tiempo de cultivo, pero ésta dependió del tipo de manejo. Los sistemas de manejo: (a) labranza cero, (b) con frecuente aportación de estiércol bovino, (c) con frecuente introducción de leguminosas en la rotación, y (d) sustrato de invernadero, presentaron las mayores concentraciones de estas fracciones (2 a 4% de C y 35 a más de 60 ppm de P-Olsen). Las tendencias se ajustaron a modelos logarítmicos o potenciales. Los bajos porcentajes de C de los tepetates recién incorporados a la agricultura (trazas) en relación con los máximos observados, los hace sustratos viables para capturar C atmosférico (2 a 4 Mg ha<sup>-1</sup>) con tecnologías y estrategias adecuadas para este propósito. El porcentaje de C orgánico fue mayor a medida que disminuyó el tamaño de partícula. La máxima acumulación de éste ocurrió en las partículas <0.25 mm y decreció de manera no lineal cuando el tamaño se incrementó.

**Palabras clave:** Captura de carbono, fósforo, suelos volcánicos endurecidos, tepetates.

### INTRODUCCIÓN

Los tepetates son capas de toba endurecidas, casi inertes, que afloran a la superficie después de que el suelo que las cubre se erosiona. Estas capas

Recibido: Enero, 2001. Aprobado: Agosto, 2002.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 36: 643-653. 2002.

### ABSTRACT

Tepetates are layered volcanic tuffs partially altered and hardened by geological and pedogenetic processes. These layers are found at different depths in the piedmont soils of the Central Volcanic Belt of México, close to densely populated areas. When the soil covering the tepetates is eroded, these layers are exposed to the surface. Tepetates can be reclaimed for agricultural use by mechanical breaking up of the hardened layer and appropriate agricultural practices, but the resulting bed is infertile. The objective of this study was to analyze organic C and Olsen-P, two key elements of fertility, in tepetates that were reclaimed for agriculture 1 to 100 years ago and subjected to different management systems. Farmers from the communities surrounding the River Texcoco (México) watershed were interviewed, and 100 plots were selected. Samples of the substrate (0 to 20 cm) were collected and analyzed for organic C and Olsen-P. The concentration of both elements increased as time under cultivation increased, but this depended on the type of management. The management systems that had the highest concentrations of these fractions (2 to 4% C and 35 to over 60 ppm Olsen-P) were (a) conservation tillage (b) frequent additions of cattle manure, (c) frequent cultivation of legumes, and (d) greenhouse substrate. Trends were adjusted to logarithmic or power models. The low percentages of C of the tepetates recently incorporated into agriculture, compared with the oldest tepetate, make them substrates that are viable for the capture of atmospheric C (2 to 4 Mg ha<sup>-1</sup>) under technology and strategies appropriate for this purpose. The percentage of organic C was inversely proportional to particle size. The maximum accumulation was found in particles <0.25 mm and decreased non-linearly as particle sized increased.

**Key words:** Carbon sequestration, phosphorus hardened volcanic soils, tepetates.

### INTRODUCTION

Tepetates are hardened layers of almost inert tuffs, that surface after the soil covering them has been eroded. These layers can be habilitated for agricultural and forest production by breaking them up manually or mechanically, but it is necessary to increase its natural infertility, especially in terms of the

pueden habilitarse mediante roturación manual o mecánica, e incorporarse a la producción agrícola y forestal, pero es preciso aumentar su baja fertilidad natural, en particular, la concentración de materia orgánica y la de N y P disponibles (Cajuste y Cruz, 1987; Etchevers *et al.*, 1992). Los tepetates de interés para este trabajo se localizan entre 1800 y 2900 m de altitud en los piedemontes del Eje Neovolcánico de México y cubren cerca de 37 000 km<sup>2</sup> (Peña y Zebrowski, 1992); la mayoría en las cercanías de zonas densamente pobladas de los Estados de México, Puebla y Tlaxcala, donde existe una gran presión por tierras de labor. Por ello, numerosas comunidades marginadas, que practican agricultura de subsistencia, han roturado los tepetates para incorporarlos a la agricultura. La investigación realizada en México acerca de estos materiales, ha puesto más énfasis en aspectos geológicos, pedológicos y de rehabilitación de las propiedades físicas, que en el mejoramiento de su fertilidad (Zebrowski *et al.*, 1997). El sustrato resultante de la roturación, como ya se indicó, tiene una baja fertilidad, pero los rendimientos de grano de cereales y leguminosas son cercanos a los que se obtienen en los suelos de la zona, aun desde los primeros años de cultivo, si se hace un manejo agronómico adecuado (Báez *et al.*, 1997). Contrario a lo que podría esperarse, la concentración de C orgánico, N y P en estos tepetates rehabilitados es baja, aún después de varias décadas (Etchevers *et al.*, 1997). Se suponía que la adición de fertilizantes orgánicos e inorgánicos debería haber producido un aumento de estos elementos al incrementarse el tiempo de uso.

La posibilidad de que al incorporar los tepetates a la producción agrícola y forestal se generen condiciones para secuestrar C atmosférico, requiere entender mejor los mecanismos y la potencialidad para tal efecto, ya que el costo de su habilitación para uso en agricultura es alto. Además, es necesario disponer de alternativas tecnológicas que aseguren el aumento de la concentración de este elemento en el suelo, lo cual se supone relacionado con el sistema de producción y el manejo. El objetivo de este estudio fue investigar el comportamiento del C orgánico y P-Olsen en tepetates recuperados sometidos a diversos manejos agrícolas, tiempo de cultivo y manejo de los residuos orgánicos; así como la variación en ambos en el tiempo. Los resultados de este estudio servirán para proponer prácticas agrícolas que ayuden a incrementar la fertilidad y sustentabilidad de estos sustratos y a evaluar su potencialidad para la captura de carbono.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio se localiza en la cuenca del Valle de México, en la parte media de la ladera noroccidental de la Sierra Nevada, Estado de México, entre los 98° 45' y 98° 50' O y 19° 27' y 19° 32' N, en la parte central del Eje Volcánico Transversal. La altitud de la zona es de

concentración de available N and P (Cajuste and Cruz, 1987; Etchevers *et al.*, 1992). The tepetates of interest for this study are located between 1800 and 2900 m above sea level in the piedmonts of the Central Volcanic Belt of México. They cover nearly 37 000 km<sup>2</sup> (Peña & Zebrowski, 1992), and most are near to the densely populated zones of the states of México, Puebla, and Tlaxcala, where there is severe pressure over arable land. For this reason, numerous poor communities that practice subsistence farming have broken up the tepetates for agricultural use. Research done in México on these materials has placed more emphasis on geological and pedological aspects and on the rehabilitation of their physical properties than on increasing fertility (Zebrowski *et al.*, 1997). The substrate that results from breaking up the tepetate is, as was pointed out, infertile, but the yields in cereals and legumes are close to those obtained on other soils of the zone, even in the first years of cultivation, if there is appropriate agronomic management (Báez *et al.*, 1997). Contrary to what might be expected, the concentration of organic C, N, and P in these rehabilitated tepetates is low, even after several decades (Etchevers *et al.*, 1997). It was supposed that the addition of organic and inorganic fertilizers must have produced an increase in these elements as the time of use lengthened.

The possibility of incorporating tepetates into agriculture and forestry to produce conditions for sequestering atmospheric C requires a better understanding of the mechanisms and potential for such an effect, since the cost of habilitation for agricultural use is high. Also, it is necessary to make technological alternatives available to assure an increase in the concentration of this element in the soil. It is assumed that this is related to the production system and its management. The objective of this study was to observe the behavior and variation of organic C and Olsen-P in tepetates that were recovered and subjected to diverse agricultural and residue management systems over different periods of time. The results of this study will be useful to propose agricultural practices that help to increase the fertility and sustainability of these substrates and to evaluate their potential for carbon capture.

## MATERIALS AND METHODS

The study location is in the Valley of México watershed, in the middle part of the northwestern slope of the Sierra Nevada mountains of the state of México, between 98° 45' and 98° 50' W, and 19° 27' and 19° 32' N in the central part of the Central Volcanic Belt. The altitude of the zone is 2300 to 2900 m. The climate of the piedmonts and the sierra changes with the altitude. For example, the higher the altitude, the lower the temperature and the greater the precipitation. At an altitude of 2200 to 2800 m, there is a progressive transition in the moisture regime, from ustic to udic, with precipitation 600 to 900

2300 hasta 2900 m. El clima de los piedemontes y de la sierra cambia según la altitud. Por ejemplo, conforme aumenta la altitud, la temperatura disminuye y la precipitación se incrementa. A una altitud de 2200 a 2800 m hay una transición progresiva de un régimen de humedad ústico a údico, con precipitación de 600 a 900 mm por año. Existe una época de sequía bien definida de noviembre a abril, y las lluvias se distribuyen irregularmente entre mayo y octubre. Este tipo de clima contribuyó a la formación de los tepetates (Quantin *et al.*, 1993). Durante la época lluviosa precipita entre 85 y 90% de la lluvia total anual, pero algunos años sólo se tiene 70%. En agosto las precipitaciones representan una cuarta parte de la lluvia total anual y es el mes más lluvioso del año.

Para realizar este estudio fue necesario construir una base de datos confiable, que permitiera identificar la ubicación de los sitios cultivados, el tiempo transcurrido desde su habilitación, el tipo de cultivos, el manejo de los residuos y las características generales de los sitios. Con este fin, se hicieron recorridos y entrevistas en comunidades en las cercanías de Texcoco, Estado de México, y se obtuvo información satisfactoria de 100 parcelas de tepetate, las cuales mostraban un amplio intervalo de variación de las variables mencionadas. Los sistemas de manejo empleados por los productores se agruparon en nueve clases (Cuadro 1).

Con el propósito de medir la concentración de C orgánico y P-Olsen en esos tepetates, se obtuvo una muestra compuesta (0 a 20 cm, 22 submuestras por muestra) en cada sitio. Las muestras se secaron, molieron y tamizaron (2 mm), antes de analizarse para C orgánico y P-Olsen. La medición de C se hizo con un analizador automático de C total (Shimadzu, TOC-5050) mediante un proceso de combustión seca a 900 °C durante 3 a 4 min.

La determinación C se hizo en una submuestra de la que se extrajeron manualmente las raíces antes de remolerse hasta pasar por malla 100. En otra muestra del mismo material, se midió el C inorgánico en

mm per year. There is a well-defined dry season from November to April, and rainfall is distributed unevenly between May and October. This type of climate contributed to the formation of tepetates (Quantin *et al.*, 1993). During the rainy season, 85 to 90% of the total yearly precipitation falls, but in some years it may amount to only 70%. August, the wettest month of the year, accounts for a fourth of the total annual precipitation.

To conduct this study, it was necessary to construct a reliable data base that would allow permit the location of cultivated sites, time under cultivation from habilitation, type of crop, management of residues, and general characteristics of the sites. To this end, field observations and interviews were conducted in the areas around Texcoco, State of México. Satisfactory information was obtained on 100 plots of tepetate, which varied widely in terms of these variables. The management systems used by the farmers were grouped in nine classes (Table 1).

With the purpose of measuring the concentration of organic C and Olsen-P in the tepetates, a compound sample (0 to 20 cm, 22 subsamples per sample) was taken at each site. The samples were dried, ground, and screened (2 mm) before analysis. C was measured with an automatic analyzer of total C (Shimadzu, TOC-5050) using a dry combustion process at 900 °C during 3 to 4 min.

C was determined in a subsample from which the roots were extracted manually before they were ground enough to pass through a 100 screen. In another sample of the same material, inorganic C was measured in the same automatic analyzer. Extractable P was determined by the procedure proposed by Olsen (Olsen-P) (Olsen & Dean, 1965).

Concentrations of organic C and Olsen-P found in tepetate samples grouped by agronomic management were compared. For the analysis of data, a completely randomized design was used with different numbers of replications.

Classes I, III, V, and VI, for which more information was available, were studied for changes in the concentration of organic C and Olsen-P

**Cuadro 1. Clases de sistemas de manejo en las que se agruparon las parcelas experimentales.**  
**Table 1. Classes of management systems used in the experimental plots.**

Clase	Parcelas de tepetate	Descripción
I	Recién roturadas	Roturadas con maquinaria pesada. Se tomaron muestras antes que se cultivaran por primera vez
II	Erosión fuerte	Deterioradas, sin obras de conservación de suelo y con evidente presencia de canalillos y cárcavas.
III	Monocultivo	Únicamente se han cultivado con maíz ( <i>Zea mays</i> L.), trigo ( <i>Triticum vulgare</i> L.) o cebada ( <i>Hordeum vulgare</i> L.), y se retiran los rastrojos.
IV	Leguminosas o poco estiércol	Se han cultivado gramíneas y leguminosas en asociación o en rotación. Ocasionalmente se agregó estiércol bovino. También se ha cultivado maíz ( <i>Zea mays</i> L.) y gramíneas en monocultivos, pero con adición intermitente de abonos orgánicos. Se retiran los rastrojos.
V	Labranza cero	Parcelas cultivadas con agapando ( <i>Agapanthus africanus</i> Hoffmans), nopal ( <i>Opuntia</i> spp.) y maguey ( <i>Agave</i> spp.). Nunca se ha removido el suelo.
VI	Leguminosas y mucho estiércol	Se han cultivado gramíneas y leguminosas en asociación o rotación. Frecuentemente se agregó estiércol bovino. Se retiran los rastrojos.
VII	Invernadero	Parcelas tratadas como cama invernadero, donde se cultivan plantas de ornato, se incorporan abonos orgánicos y se utiliza el riego.
VIII	Labranza cero, estiércol y riego	Parcelas cultivadas con agapando ( <i>Agapanthus africanus</i> Hoffmans), ciruelo ( <i>Prunus do mestica</i> L.), peral ( <i>Pyrus communis</i> L.) y plantas medicinales. Ocasionalmente, se agrega estiércol bovino y se utiliza riego.
IX	Invernadero con manejo intensivo	Igual que la Clase VII, pero además se incorporó madera podrida molida al suelo como abono orgánico. Su uso fue más intensivo.

el mismo analizador indicado anteriormente. El P extraíble del suelo se determinó por el procedimiento propuesto por Olsen (P-Olsen) (Olsen y Dean, 1965).

Se comparó la concentración de C orgánico y P-Olsen de los tepetates muestreados agrupados por manejo agronómico. Para el análisis de los datos, se utilizó un diseño completamente al azar con distinto número de repeticiones.

En las Clases I, III, V y VI, con mayor información disponible, se estudió el cambio de la concentración de C orgánico y P-Olsen producido por el tiempo transcurrido desde que el tepetate se incorporó a la agricultura (1 a aproximadamente 100 años).

La tasa de C orgánico acumulado promedio se midió en parcelas experimentales de tepetate sometidas a distintas condiciones de manejo agrícola: monocultivo más roturación a 45 cm (T1) y asociación gramínea leguminosa más incorporación de estiércol bovino seco (43 Mg ha<sup>-1</sup>) (T2), por 4 años de cultivo. Los cultivos, fertilizantes y abonos empleados en estas parcelas se presentan en los Cuadros 2 y 3 (Prat y Báez, 1998).

Con el propósito de analizar el lugar en que se acumulaba el C orgánico en estos materiales cuando se sometieron a diferentes manejos, se hizo un fraccionamiento de partículas por tamaños, mediante tamizado en seco. Las fracciones separadas fueron: 50.3, 31.7, 22.2, 11.5, 6.35, 4.76, 3.36, 2.00 y 1.00, 0.46, 0.25, 0.10 y 0.05 mm.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las Figuras 1 y 2 se presentan las concentraciones de C orgánico y P-Olsen por clases de manejo agronómico.

which occurred from the time the tepetate was incorporated into agricultural use (1 to approximately 100 years).

The rate of average accumulated organic C was measured in experimental plots of tepetate subjected to different conditions of agricultural management: monocropping with plowing to 45 cm (T1) and association of gramineous and leguminous crops plus dry cattle manure (43 Mg ha<sup>-1</sup>) (T2), for four years. The crops and fertilizers used in these plots are presented in Tables 2 and 3 (Prat & Baez, 1998).

To determine where organic C accumulates in these materials when subjected to different management systems, particles were fractionated by dry screening. The fractions that were separated were 50.3, 31.7, 22.2, 11.5, 6.35, 4.76, 3.36, 2.00, 1.00, 0.46, 0.25, 0.10, 0.05 mm.

## RESULTS AND DISCUSSION

Figures 1 and 2 present the concentration of organic C and Olsen-P by classes of agronomical management.

The recently fractured tepetates and those that had undergone intense erosion (Class I and II) had only traces of C and Olsen-P. The continuous use over years of monocropped grains, especially maize (Class III), did not produce any important increase in the concentration of these elements in tepetates under cultivation. The removal of crop residues, the usual practice of peasants (who use it as forage), as well as the scarce yields of grain and thus of biomass and the nil incorporation of organic fertilizers, explain the low accumulation of C and Olsen-P in this class of agricultural management.

Cuadro 2. Cultivos y fertilizantes. Experimento en San Miguel Tlaixpan, Texcoco (Prat y Báez, 1998).

Table 2. Crops and fertilizers. Experiment in San Miguel Tlaixpan, Texcoco (Prat and Baez, 1998).

T <sup>†</sup>	1993		1994		1995		1996	
	Cultivos <sup>‡</sup>	N-P-E	Cultivos	N-P-E <sup>§</sup>	Cultivos	N-P-E	Cultivos	N-P-E
T1	C	80-60-00	M	70-60-00	M	70-60-00	C	100-80-00
T2	C+V	80-60-13	M+F+H	70-60-7	M+H	70-60-7	C+Me	100-80-16

<sup>†</sup> T = Tratamientos.

<sup>‡</sup> C = cebada, V = veza, M = maíz, F = frijol, H = haba, Me = *Medicago sativa*.

<sup>§</sup> N = sulfato de amonio (kg ha<sup>-1</sup>), P = superfosfato de calcio triple (kg ha<sup>-1</sup>), E = estiércol bovino seco (Mg ha<sup>-1</sup>).

Cuadro 3. Paja incorporada. Experimento en San Miguel Tlaixpan, Texcoco (Prat y Báez, 1998).

Table 3. Incorporated straw. Experiment in San Miguel Tlaixpan, Texcoco (Prat and Baez, 1998).

T <sup>†</sup>	1993		1994			1995		1996				Total
	Cebada	Veza	Maíz	Frijol	Haba	Maíz	Haba	Cebada	<i>Medicago sativa</i>	Maíz	Haba	
	Mg ha <sup>-1</sup>											
T1	3.5	¶	7.5	¶	¶	5.0	¶	1.3	¶	¶	¶	17.3
T2	2.8	0.5	1.2	0.1	1.2	2.7	1.2	3.6	0.1	¶	¶	13.4

<sup>†</sup> T = Tratamientos.

<sup>¶</sup> Los espacios en blanco indican que no se sembró.

Los tepetates recién roturados y los que habían experimentado una intensa erosión (Clase I y II), presentaron sólo trazas de C y P-Olsen. El uso continuo por años de gramíneas en monocultivo, en especial maíz (Clase III), no produjo un aumento importante en la concentración de estos elementos en los tepetates cultivados. El retiro de los rastrojos de los cultivos, que habitualmente realizan los campesinos (se utilizan como forraje), así como los escasos rendimientos de grano y, por ende, de biomasa y la casi nula incorporación de abonos orgánicos, explicarían la baja acumulación de C y P-Olsen en esta clase de manejo agrícola.

El uso de especies leguminosas en los sistemas de producción (Clase IV) y la incorporación de abonos orgánicos favorecieron la acumulación de C orgánico y P-Olsen en los tepetates, pero en cantidades inferiores a las que pudieran esperarse. En contraste, donde se practicó la labranza cero (Clase V), se acumuló aproximadamente el doble de C orgánico que en la Clase IV; sin embargo, la concentración de P-Olsen no experimentó cambio. Este comportamiento se atribuyó al tipo de labranza. Mientras que en la labranza tradicional (rastreo, barbecho, surcado y aporque) se favorece la oxidación de C y las pérdidas de éste en forma de  $\text{CO}_2$ , en la labranza cero la materia orgánica (MO) que se deja en la superficie del suelo reduce la evaporación, la temperatura y el intercambio de gases que interviene en la oxidación biológica de la materia orgánica (Reicosky y Lindstrom, 1993). La descomposición de los residuos orgánicos en la superficie del suelo es más lenta que cuando éstos se incorporan por la labranza, ya que se reduce el contacto con los microorganismos del suelo (Edwards *et al.*, 1992). Esto se evidenció al observar la cantidad de C en el sistema con leguminosas y mucho estiércol (Clase VI), donde la frecuencia de aplicación de MO fue mayor que en la Clase V. Sin embargo, ambas clases tuvieron un porcentaje de C semejante, aunque en la Clase V se incorporó menos MO, pero no se labró el suelo. En contraste, la concentración de P-Olsen en la Clase VI aumentó aproximadamente tres veces con respecto al de la Clase V, *i. e.*, el P-Olsen de los tepetates está estrechamente relacionado con la adición de abonos orgánicos (Figura 3).

Los tepetates que se emplean como sustratos de invernadero y que se riegan de manera continua (Clase VII), tuvieron una acumulación de C aproximadamente 15% mayor que las Clases V y VI. Fue evidente que las condiciones de temperatura y humedad en invernadero fueron más intensas que en los casos anteriores, lo cual favoreció la acumulación y el secuestro de carbono en el corto plazo.

La concentración de C orgánico y P-Olsen de los tepetates empleados como sustrato de invernadero, los cuales con frecuencia se riegan y se les incorporan abonos orgánicos y se someten a intenso laboreo (Clase IX),

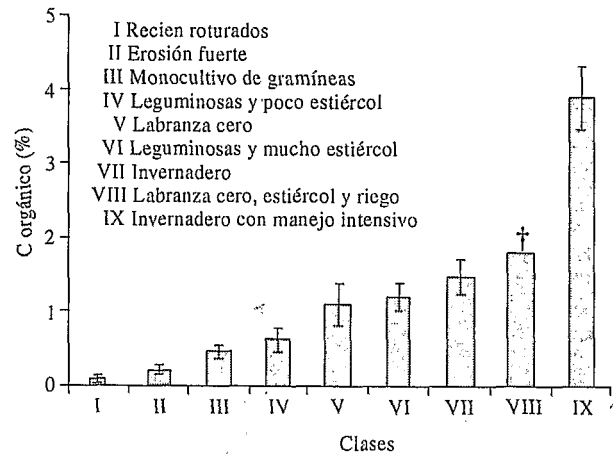


Figura 1. Contenido de carbono orgánico en tepetates cultivados, según el manejo agronómico (†: una observación).

Figure 1. Content of organic carbon in cultivated tepetates, by agronomic management (†: one observation).

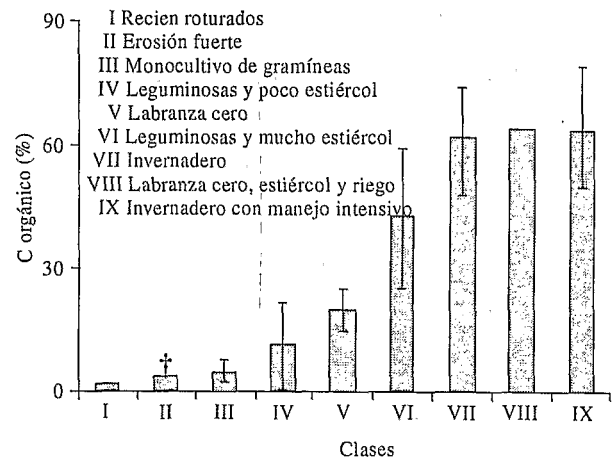


Figura 2. Contenido de P extractable Olsen en tepetates cultivados, según el manejo agronómico (†: una observación).

Figure 2. Content of extractable Olsen-P in cultivated tepetates, by agronomic management (†: one observation).

The use of leguminous species in the Class IV production systems and the incorporation of organic fertilizers favored the accumulation of organic C and Olsen-P in the tepetates, but in amounts lower than might be expected. In contrast, where conservation tillage (Class V) was practiced, the amount of organic C accumulated was about twice that accumulated in Class IV. However, there was no change in the concentration of Olsen-P.

This behavior is attributed to the type of tillage. While traditional tillage (harrowing, plowing, ditching, and cultivating) favors oxidation of C, which is lost in the form of  $\text{CO}_2$ , in conservation tillage the organic matter (OM) left on the soil surface reduces evaporation, temperature, and exchange of gases that intervene in the

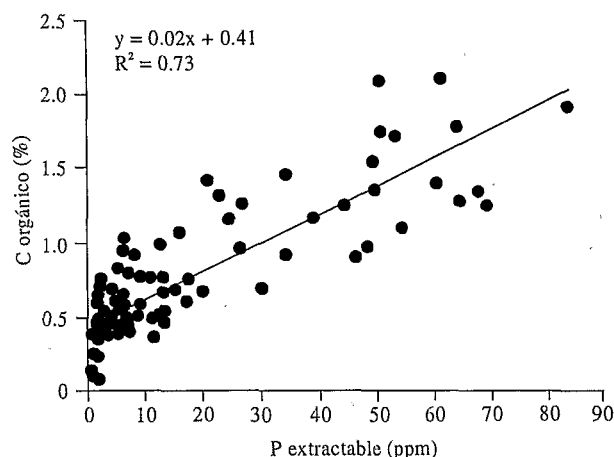


Figura 3. Relación entre contenido de C orgánico y P-Olsen, en tepetates cultivados.

Figure 3. Relationship between organic C and Olsen-P contents in cultivated tepetates.

se vio favorecida considerablemente. Una de las enmiendas orgánicas usadas para aportar C al suelo de esta clase, es la madera podrida de pino, la cual recibe un tratamiento especial de secado y molido antes de incorporarse.

Las concentraciones de C orgánico y P-Olsen estuvieron estrechamente relacionadas con las clases de manejo agronómico establecidas y tuvieron diferencias significativas.

La variación del porcentaje de C orgánico de los tepetates con el tiempo de cultivo, se analizó, en particular, en cuatro condiciones de manejo agronómico: monocultivo (Clase III), uso eventual de leguminosas (Clase IV) y tratamiento frecuente con estiércol (Clase VI) junto con labranza cero (Clase V). En todos los casos, la naturaleza de la variación en todos los casos mostró un comportamiento consistente, aunque las pendientes de las curvas fueron distintas (Figura 4).

Si bien no se contó con series completas de información que abarcaran hasta los 100 años de cultivo para los cuatro casos, las tendencias fueron claras e indicaron que el porcentaje de C orgánico aumentaba con el tiempo de cultivo.

El incremento del C orgánico fue más rápido durante los primeros 10 años de cultivo del tepetate, pero después de ese tiempo la tasa de acumulación decreció. Tal comportamiento de la acumulación puede ser explicado porque al inicio la roturación o fragmentación del lecho endurecido proporciona condiciones adecuadas para que las raíces penetren el sustrato más fácilmente, ya que se favorece la circulación de aire y agua, se incrementa la capacidad de almacenamiento de esta última y se genera un espacio poroso para la retención de la solución del suelo (Werner, 1992). Como consecuencia de la roturación, hubo un incremento significativo de la acumulación de MO, al aumentar la actividad biológica y desarrollarse

biological oxidation of OM (Reicosky & Lindstrom, 1993). Decomposition of organic residues on the soil surface is slower than under the soil, when they are incorporated by tillage, since contact with soil microorganisms is reduced (Edwards *et al.*, 1992). This was evident when a similar amount of C was observed in Class V and Class IV, in which leguminous crops and a great deal of manure were used, although the application of OM was more frequent in Class IV than in Class V, which was not tilled. In contrast, the concentration of Olsen-P in Class VI increased approximately three times more than in Class V, *i.e.*, the amount of Olsen-P of the tepetates is closely related to the addition of organic fertilizers (Figure 3).

The tepetates that were used as greenhouse substrates and irrigated continuously (Class VII) accumulated approximately 15% more than Classes V and VI. It was evident that the conditions of temperature and moisture in the greenhouse were more intense than in the other cases, favoring the accumulation and sequester of carbon in a short time.

The concentration of organic C and Olsen-P of the tepetates used as greenhouse substrate, which is frequently irrigated and mixed with organic fertilizers and subjected to intense cultivation (Class IX), was favored considerably. One of the organic amendments used to contribute C to the soil of the class is decomposed pine wood, which receives a special treatment of drying and grinding before being incorporated.

Concentrations of organic C and Olsen-P were closely related to the classes of the established agronomic management practices with significant differences among the classes.

The variation in the percentage of organic C in the tepetates over time under cultivation was analyzed, particularly under four conditions of agronomic management: monocropping (Class III), occasional use of legumes (Class IV), and frequent manuring (Class VI) together with conservation tillage (Class V). In all cases, the nature of the variation was consistent, although the slopes of the curves differed (Figure 4).

Even though complete series of information were unavailable for the four cases that were 100 years old, the trends were clear and indicated that the percentage of organic C increased as the time of cultivation lengthened.

The increase in organic C was faster during the first 10 years of cultivation, but after this time the rate of accumulation slowed. This behavior in accumulation can be explained by the fact that, initially, fragmentation of the hard bed provides conditions in which roots to penetrate easily into the substrate; circulation of air and water is facilitated, water storage capacity is increased, and pore space where the soil solution can be retained is created (Werner, 1992). As a consequence of

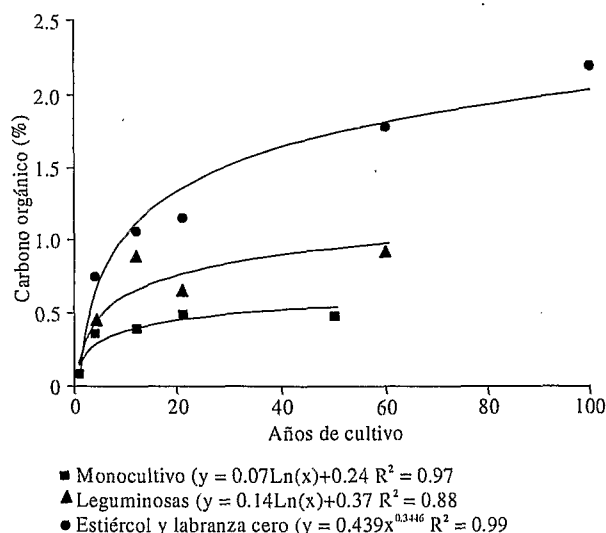


Figura 4. C orgánico a través del tiempo en tepetates cultivados en diferentes sistemas de cultivo.

Figure 4. Organic C over time in cultivated tepetates under different production systems.

rápido en el suelo flora, microflora y microfauna (Álvarez *et al.*, 2000). Como el sustrato recién roturado casi no contiene C orgánico, y lo acumula con los años de cultivo, tiene un alto potencial para la captura de éste. Con el transcurrir del tiempo, el rápido incremento de C orgánico ocurrido durante los primeros años de cultivo tendió a alcanzar un equilibrio natural. Esto es, la diferencia entre el C orgánico incorporado al suelo y el perdido como  $\text{CO}_2$  fue más estrecha; por lo que la acumulación se hizo más lenta. El aumento de la concentración de C orgánico en estos tepetates depende, definitivamente, de la frecuencia de la incorporación de biomasa. En el proceso de captura de C la cantidad de C orgánico adicionado debe ser mayor que las pérdidas de ese elemento por oxidación (Follett, 2001).

En el caso particular de los sistemas agrícolas con monocultivos de cereales (Clase III), el más común en la zona, se observó que el porcentaje de C orgánico en el suelo tendió a estabilizarse alrededor de 0.5%, después de la primera década. La tendencia de la curva hace pensar que será difícil con dicho manejo lograr incrementos substanciales, después de 50 años de cultivo, y es posible que de más de 100 años. Cuando se cultivan cereales en monocultivo no se incorpora casi nada de biomasa al suelo, lo que queda después de que los agricultores cortan y retiran los esquilmos agrícolas son las raíces y la parte inferior de los tallos. Pérez *et al.* (2000) concluyeron que el aporte nutrimental de estos residuos orgánicos a los tepetates es insuficiente para cubrir la demanda nutrimental de los cultivos. En tales circunstancias, es difícil obtener mayores incrementos de C orgánico en ese sistema agrícola.

fragmentation of the tepetates, there was a significant increment in the accumulation of OM as biological activity increased with the rapid growth of soil flora, microflora and microfauna (Álvarez *et al.*, 2000). Because newly fractured substrate has almost no organic C, but accumulates it over years of cultivation, it has potential for carbon sequestration. Over time, the rapid increase in organic C occurring in the first years of cultivation tended to reach a natural equilibrium. That is, the difference between the organic C incorporated into the soil and its loss as  $\text{CO}_2$  was smaller, and so accumulation slowed. The increase in the concentration of organic C in these tepetates definitely depends on the frequency with which biomass is incorporated. In the process of carbon sequestration, the quantity of added organic C must be greater than the loss of the element by oxidation (Follett, 2001).

In the particular case of agricultural systems with monocropped grains (Class III), the most common in the zone, it was observed that the percentage of organic C in the soil tended to become stable at about 0.5% after the first decade. The trend shown by the curve suggests that it would be difficult to achieve substantial increases with this system of management after 50 years, or even after 100 years. When grains are monocropped, almost no biomass is incorporated into the soil; what is left over after farmers cut and remove the stalks from the field are the roots and lower part of the stems. Pérez *et al.* (2000) concluded that the contribution of these organic residues to tepetates is not sufficient to satisfy the crops' demand of nutrients. Under these circumstances, it is difficult to obtain larger increases of organic C with this agricultural system.

In the agricultural system in which legumes are planted frequently, it was observed that the percentage of organic C increased over time more than in monocropping. It is worth noting that accumulation of organic C was more than double that in monocropping when the curve begins to stabilize. The frequent use of legumes assures the incorporation of more biomass into the soil because almost all of the leaves have fallen off by the time the plants reach senescence and the farmers of the region remove the stems after harvest; about half of the plant biomass (residues plus roots) is incorporated into the soil. In addition, in the roots of leguminous plants biological activity favors nitrogen fixation and production of a larger quantity of radical exudates that favorably modify the medium (Puget & Drinkwater, 2001). Carbon capture is facilitated by both; however, the amount of organic C would decrease if the system is not maintained with the frequent use of legumes and the incorporation of organic matter (Follett, 2001; Lal *et al.*, 1999).

The behavior of the agricultural system in which manure and residues are incorporated was similar to that of conservation tillage. The average increase in organic

En el sistema agrícola con uso frecuente de leguminosas se observó que el porcentaje de C orgánico al aumentar el tiempo de cultivo era mayor que en el monocultivo. Cabe destacar que la acumulación de C orgánico fue más del doble que en el caso del monocultivo, cuando comienza a estabilizarse la curva. El uso frecuente de leguminosas asegura una mayor incorporación de biomasa en el suelo, debido a que en esas plantas hay abscisión de casi la totalidad de las hojas al llegar a la senectud y, a pesar de que por lo general los agricultores de la región retiran los tallos después de la cosecha, aproximadamente la mitad de la biomasa de la planta (residuos más raíces) se incorpora al suelo. Por otra parte, en las raíces de las leguminosas hay actividad biológica que favorece la fijación biológica de nitrógeno y la producción de mayor cantidad de exudados radicales que modifican de manera favorable el medio (Puget y Drinkwater, 2001). En ambos casos se favorece la captura de C; sin embargo, el nivel de acumulación de C orgánico disminuiría si no se mantiene el sistema agrícola con uso frecuente de leguminosas e incorporación de materia orgánica (Follett, 2001; Lal *et al.*, 1999).

En el sistema agrícola con incorporación de estiércoles y residuos se observó un comportamiento similar al observado con la labranza cero. El incremento de C orgánico promedio, con respecto a los sistemas agrícolas donde hubo un uso frecuente de leguminosas en los primeros 40 años, fue de más de 50%. La incorporación continua de estiércoles, pajas y otras fuentes de abonos orgánicos, favorece el incremento significativo del C en el suelo y mantiene la productividad agrícola (Chander *et al.*, 1999). Sin embargo, si se considera que la acumulación de C orgánico después de más de 100 años de cultivo con labranza tradicional en un tepetate cultivado, es sólo 2% en promedio, es posible concluir que dicho porcentaje es relativamente bajo; en particular, si se toma en cuenta que después de la primera década de cultivo había un poco más de 1% de C. Es decir, debieron transcurrir cerca de 90 años para que se lograra incrementar 1% más el C orgánico del suelo. Esto se explica por la constante transformación del C orgánico del suelo en CO<sub>2</sub>, que no llega a estabilizarse o formar asociaciones permanentes con componentes inorgánicos del suelo. Al respecto, Martin y Haider (1986) y Jenkinson (1971) demostraron que 60 a 70% del C adicionado al suelo se transforma en CO<sub>2</sub>, 5 a 10% pasa a formar parte de las fracciones más recalcitrantes y el resto constituye humus de nueva formación. Las sustancias más recalcitrantes, como las ligninas, melaninas y ácidos húmicos, permanecen más tiempo en el suelo. Estos autores también mencionaron que dichos resultados son más o menos los mismos para climas tropicales y templados o invernaderos. La acumulación de C en el suelo no sólo depende de la adición de materia orgánica al suelo sino de su permanencia.

C, compared with the agricultural systems in which legumes were planted frequently during the first 40 years, was above 50%. The continuous incorporation of manure, straw and other sources of organic matter favors a significant increase in soil carbon and maintains agricultural productivity (Chander *et al.*, 1999). However, the accumulation of organic C after more than 100 years under traditional tillage of cultivated tepetates is only 2% on average. This is low, particularly if it is taken into account that after the first decade of cultivation, C was a little more than 1%. That is, it took 90 years to accumulate another 1% of organic C in the soil. This is explained by the constant transformation of organic C in the soil into CO<sub>2</sub>, which does not stabilize or form permanent associations with inorganic components of the soil. In this respect, Martin and Haider (1986) and Jenkinson (1971) demonstrated that 60 to 70% of the C added to the soil is transformed into CO<sub>2</sub>, 5 to 10% form part of the most recalcitrant fractions, and the rest constitute newly formed humus. The most recalcitrant substances, such as lignin, melanin, and humic acid remain in the soil for a longer time. These authors also mentioned that their results are approximately the same for tropical and temperate climates or for greenhouses. The accumulation of C in the soil does not depend only on the addition of organic matter to the soil, but also on its remaining there.

In experimental plots T1 and T2, the lower concentration of organic C was recorded in maize monocropping (T1), in which more than 17 Mg ha<sup>-1</sup> of agricultural residues were incorporated during the first four years of cultivation, while the highest concentration was found in plots that received 13 Mg ha<sup>-1</sup> of residues and more than 40 Mg ha<sup>-1</sup> of dry cattle manure (T2) for four years. In these treatments, the average yearly rate of accumulation of organic C was 0.1 to 0.2%. Average bulk density of the cultivated tepetates has been estimated at 1.1 g cm<sup>-3</sup> (Rugama, 1997)<sup>3</sup>, from which it can be estimated that 2.2 Mg ha<sup>-1</sup> to 4.8 Mg ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> of organic C has accumulated. If the low content of C in tepetates during the first few years of cultivation is compared with the C content under certain conditions of agricultural management, such as those explained above, it is evident that these materials are large potential storehouses of carbon. The highest rate of accumulation occurred during the first few years of cultivation; after 10 years, the rate of accumulation slows. There was one case of the 100 sites selected in which the percentage of organic C reached 4% C (Class IX after 20 years), meaning that in this tepetate there was more than 88 Mg ha<sup>-1</sup> of sequestered organic C. This result gives an idea of the potential that these materials have of storing C.

The relationship between organic C and mean particle diameter is shown in Figure 5. The differences between the percentage of organic C in recently fractured tepetates



En las parcelas experimentales T1 y T2 la menor concentración de C orgánico se registró en el monocultivo de maíz (T1), donde se incorporaron más de 17 Mg ha<sup>-1</sup> de esquilmos agrícolas durante los primeros cuatro años de cultivo. Mientras que la mayor concentración se tuvo donde se incorporaron 13 Mg ha<sup>-1</sup> de esquilmos agrícolas y más de 40 Mg ha<sup>-1</sup> de estiércol seco de vaca (T2), a lo largo de los cuatro años de cultivo. En estos tratamientos, la tasa de acumulación promedio de C orgánico por año fue 0.1 a 0.2% C. La densidad aparente promedio de los tepetates cultivados se ha estimado en 1.1 g cm<sup>-3</sup> (Rugama, 1997)<sup>3</sup>, por lo que se puede estimar que se acumularon de 2.2 Mg ha<sup>-1</sup> a 4.8 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de C orgánico. Si se compara el bajo contenido de C que tienen los tepetates durante los primeros años de cultivo, con aquél que se puede acumular bajo ciertas condiciones de manejo agrícola, como los explicados anteriormente, se pone de manifiesto que estos materiales son grandes almacenes potenciales de carbono. La mayor tasa de acumulación ocurrió durante los primeros años de cultivo, después de 10 años la tasa de acumulación se hace más lenta. Hubo un caso, dentro de los 100 sitios seleccionados, donde el porcentaje de C orgánico alcanzó más de 4% de C (Clase IX, después de 20 años), lo cual significa que en ese tepetate había más de 88 Mg ha<sup>-1</sup> de C orgánico secuestrado. Este resultado da una idea del potencial de almacenamiento de C que tienen estos materiales.

Las relaciones entre C orgánico y diámetro medio de partícula se muestran en la Figura 5. Son evidentes las diferencias entre el porcentaje de C orgánico del tepetate recién roturado (menor nivel) y aquél empleado como sustrato de invernadero, el cual tuvo la concentración más alta de carbono. Todos los demás sistemas de cultivo se encuentran entre este intervalo.

Destaca, independientemente de la cantidad de C encontrada en cada sistema de cultivo, que la distribución del C orgánico por tamaño de partícula mostró un patrón de comportamiento definido. El porcentaje de C fue mayor a medida que el tamaño de partícula se hizo menor. Los coeficientes de ajuste de los modelos empleados fueron relativamente altos en todos los casos. Las diferencias en concentración de C fueron menores entre las partículas más grandes (>10 mm), pero a medida que disminuyó el tamaño de éstas (<10 mm) las diferencias se hicieron mayores. El aumento de la concentración de C fue más notorio en las partículas con diámetros inferiores a 3 o 4 mm y la máxima acumulación ocurrió en las partículas menores que 0.25 mm. Esta forma de acumulación de C por tamaño de partícula, dio como resultado en la mayoría de los casos que las tendencias se ajustaran a modelos estadísticos logarítmicos, potenciales y exponenciales negativos.

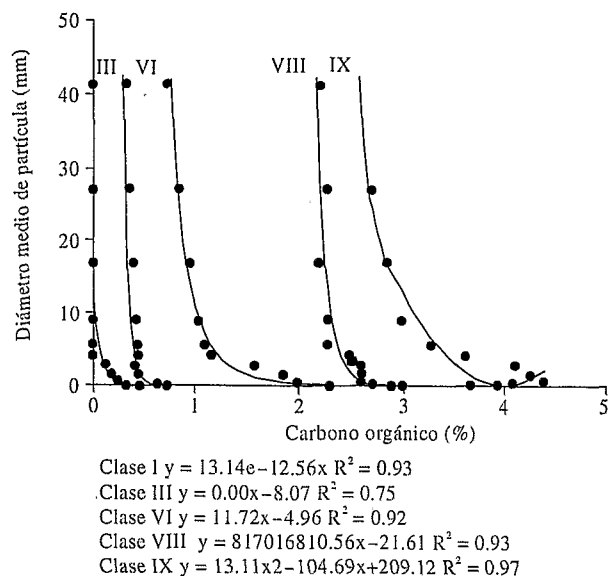


Figura 5. Carbono orgánico por tamaño de partícula en distintos sistemas agrícolas.

Figure 5. Organic carbon by particle size in different agricultural systems.

(lower level) and that found in greenhouse substrate, which had the highest concentration of carbon, are evident. The concentrations found in all of the other of the cultivation systems are within this range.

It is important to note that, regardless of the amount of C found in each system of cultivation, the distribution of organic C by particle size revealed a definite pattern of behavior. The larger the percentage of C, the smaller the particle size. The adjustment coefficients of the models used were relatively high in all of the cases. The differences in the concentration of C were smaller among the larger particles (>10 mm), but the smaller the particles (<10 mm), the larger the differences. The increase in the concentration of C was more notable in particles with diameters under 3 or 4 mm, and the highest accumulation occurred in particles smaller than 0.25 mm. This form of accumulation of C by particle size, in most of the cases, resulted in trends that adjusted to logarithmic, power, and negative exponent models.

Although there was an interaction between particle size and quantity of organic C, it was necessary to analyze each cultivation system in particular to visualize the interactions clearly. It is evident that agronomic management had a differential impact in each cropping system (Curtin *et al.*, 1998; Grant *et al.*, 2001; Lal *et al.*, 1999).

Variation in Olsen-P was also consistent over time in three conditions of agronomic management:

<sup>3</sup> Rugama U., J. A. Evolución estructural del tepetate t3, producto de la roturación y manejo agrícola. Tesis de Maestría del Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México, México. pp: 61-62.

Existió una interacción entre el tamaño de partícula medio y la cantidad de C orgánico, sin embargo, fue necesario analizar de forma particular cada sistema de cultivo, para ver claramente las interacciones. Es evidente que el manejo agronómico tuvo un impacto diferencial en cada sistema de cultivo (Curtin *et al.*, 1998; Grant *et al.*, 2001; Lal *et al.*, 1999).

La variación del P-Olsen con el tiempo de cultivo, en tres condiciones de manejo agronómico: [monocultivo (Clase III), uso eventual de leguminosas en la rotación (Clase IV) y tratamiento frecuente con estiércol (Clase VI)], fue consistente (Figura 6).

Los tepetates recién roturados, antes de cultivarse, tuvieron en promedio 2 ppm de P-Olsen, lo cual se considera una concentración muy baja. Con monocultivo de cereales, la situación del P-Olsen no cambió casi nada con respecto al caso anterior. La tendencia de acumulación hace pensar que con este manejo difícilmente podría acumularse mucho más P-Olsen entre 10 y 50 años de cultivo. En contraste, con uso frecuente de leguminosas en la rotación, la concentración de P-Olsen fue casi el doble que la del monocultivo con cereales. Los sistemas agrícolas con incorporación frecuente de estiércol mostraron una mayor concentración de P-Olsen en el suelo que los sistemas anteriormente analizados. Durante la primera década de cultivo hubo un rápido incremento de esta fracción, que alcanzó hasta 45 ppm, pero la curva tendió a estabilizarse después de alcanzar ese valor. Sólo existe un punto de referencia después de 20 años de cultivo, sin embargo, se tuvo información suficiente en todos los sistemas agrícolas hasta los 20 años de cultivo, que le da solidez al análisis.

### CONCLUSIONES

La concentración de C orgánico y P-Olsen en los tepetates cultivados se relaciona con las clases de manejo agrícola establecidas. El grado de acumulación de estos elementos en el suelo, dependió del manejo agronómico y tiempo de cultivo. Los tepetates constituyen un sustrato con gran potencial para capturar y secuestrar C orgánico. La tasa de acumulación de éste, durante los primeros cuatro años de cultivo, fue de 2.2 a 4.4 Mg ha<sup>-1</sup> por año según el manejo agronómico, y muestra una potencialidad de más de 88 Mg ha<sup>-1</sup>, según el máximo porcentaje de C medido en estos tepetates. El porcentaje de C orgánico en los tepetates se asoció mayormente con las partículas <10 mm y, en especial, con aquéllas <0.25 mm.

### AGRADECIMIENTOS

Al IRD (ex ORSTOM), por el financiamiento otorgado para iniciar esta investigación. A INSTRUCT, por el financiamiento otorgado para la realización de la base de datos de esta investigación. A los

[monocultivo (Clase III), occasional use of legumes in crop rotation (Class IV), and frequent treatment with manure (Class VI)] (Figure 6).

Before cultivation, recently fractured tepetates had an average of 2 ppm of Olsen-P, which is considered to be a very low concentration. With grain monocropping, the concentration of Olsen-P had almost no change at all. The trend of accumulation suggests that with this type of management it would be difficult to accumulate more Olsen-P between 10 and 50 years of cultivation. In contrast, with the frequent use of legumes in rotation, the concentration of Olsen-P was almost double that found in grain monocropping. The agricultural systems in which manure is frequently incorporated had a higher concentration of Olsen-P in the soil than the systems analyzed above. During the first decade of cropping, there was a rapid increase of this fraction, reaching up to 45 ppm, but the curve tended to stabilize after reaching this value. Only one point of reference exists after 20 years of cultivation; however, enough information was obtained from all of the agricultural systems up to 20 years to make the analysis sound.

### CONCLUSIONS

The concentration of organic C and Olsen-P in cultivated tepetates is related to the classes of agricultural management established. The degree of accumulation of these elements in the soil depended on agronomic management and time under cultivation. Tepetates constitute a substrate with great potential for the capture and sequester of organic C. The rate of accumulation of

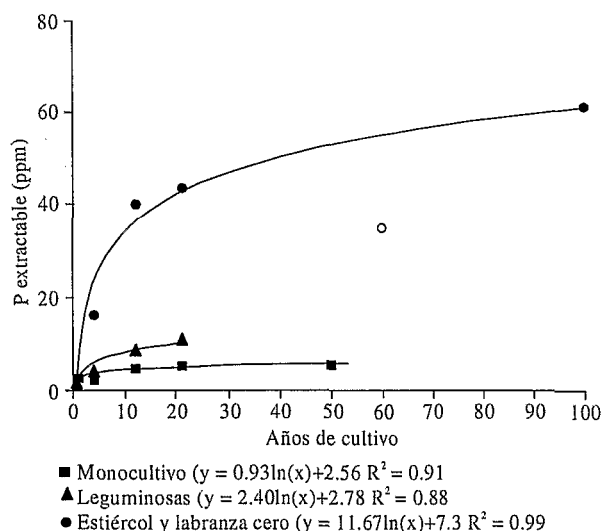


Figura 6. Acumulación de fósforo a través del tiempo en tepetates cultivados en diferentes sistemas de cultivo.

Figure 6. Accumulation of phosphorus over time in cultivated tepetates under different agricultural systems.

agricultores de las comunidades de San Miguel Tlaxpan, Tequexquináhuac, San Pablo Ixayoc, San Dieguito, Nativitas, Santa Catarina del Monte, Santa María Tecuanulco, Tepetlaoxtoc y Santo Tomás Apipilhuasco, quienes proporcionaron información valiosa para esta investigación.

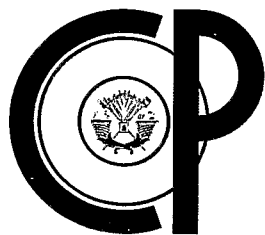
### LITERATURA CITADA

- Álvarez D., J., R. Ferrera C. y J. D. Etchevers B. 2000. Actividad microbiana en tepetates con incorporación de residuos orgánicos. *Agrociencia* 34: 523-532.
- Báez, A., E. Ascencio Z., C. Prat y A. Márquez, 1997. Análisis del comportamiento de cultivos en tepetate t3 incorporado a la agricultura de temporal, Texcoco, México. *In: Tercer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. Zebrowski, C., Quantin, P. y Trujillo, G. (eds.). ORSTOM, Quito, Ecuador. pp: 296-310.
- Cajuste, L. y J. Cruz D. 1987. Presencia de materiales amorfos en algunos tepetates de la zona de influencia de Chapingo. *In: Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*. Ruiz F., F. (ed.). Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Estado de México. pp: 69-67.
- Chander, K., K. Kapoor, S. Singh, and S. Goyal. 1999. Impact of soil management practices on soil microbial biomass and microbial activities. *In: Management of Tropical Agroecosystems and the Beneficial Soil Biota*. Vikram, R. M (ed.). Science Publishers, Enfield, New Hampshire. pp. 115-131
- Curtin, D., F. Selles, H. Wang, and C. Biederbeck. 1998. Carbon dioxide emissions and transformation of soil carbon and nitrogen during wheat straw decomposition. *Soil Sci. Soc. of America J.* 62:1035-1041.
- Edwards, J. H., C. W. Wood, D. L. Thurlow and M. E., Ruf, 1992. Tillage and crop rotation effects on fertility status of a Hapludult soil. *Soil Sci. Soc. of America J.* 56:1577-1582.
- Etchevers B., J. D., R. M. López, C. Zebrowski y D. Peña. 1992. Características químicas de tepetates de referencia de los estados de México y Tlaxcala. *México. Terra* 10 (Número especial): 171-177.
- Etchevers B., J. D., M. A. Pérez y H. Navarro G. 1997. Dinámica de la materia orgánica y N en tepetates habilitados para la producción agrícola. *In: Tercer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. Zebrowski, C., Quantin, P y Trujillo, G. (ed.). ORSTOM. Quito, Ecuador. pp: 213-224.
- Follett, R. F. 2001. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soil. *Soil and Tillage Research* 61:77-92.
- Grant, R., G. Juma N., A. Robertson J., C. Izaurrealde, R. and C. McGill, W. 2001. Long-term changes in soil carbon under different fertilizer, manure, and rotation: testing the mathematical model *ecosys* with data from the Breaton plots. *Soil Sci. Soc. of America J.* 65:205-214.
- Jenkinson, D. S. 1971. Studies on decomposition of 14 C labeled organic matter in soil. *Science* 111:64-70.
- this element during the first four years of cultivation was 2.2 to 4.4 Mg ha<sup>-1</sup> per year, depending on agronomic management, and exhibits a potential for the capture of 88 Mg ha<sup>-1</sup>, according to the highest percentage of C measured in these tepetates. The percentage of organic C in the tepetates was associated mostly with particles <10 mm and, especially, with those <0.25 mm.

—End of the English version—



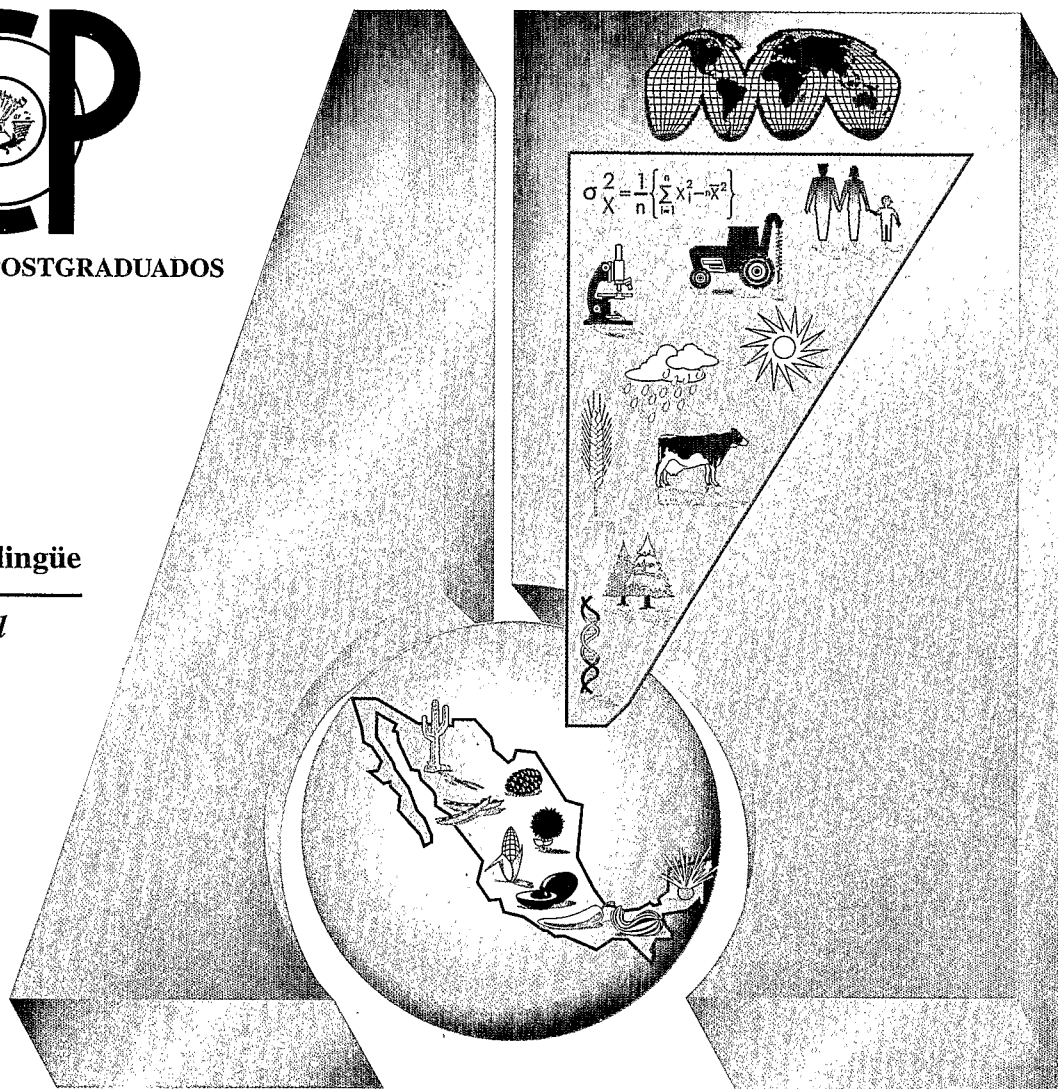
- Lal, R., D. Mokma and B. Lowery 1999. Relation between soil quality and erosion. *In: Soil Quality and Soil Erosion*. Lal, R. (ed.). CRC, Boca Raton, Florida. pp: 237-245.
- Martin, J. P. and K. Haider. 1986 Influence of mineral colloids on turnover rates of soil organic carbon. *In: Interactions of Soil Minerals with Natural Organics and Microbes*. Huang, P. M. (ed.). Soil Science Society of America. Special publication 17. Madison, Wisconsin. pp: 283-303.
- Olsen, S. R., and L. A. Dean. 1965. Phosphorus. *In: Methods of Soil Analysis. Part 2. American Society of Agronomy*. Black, C. A. (ed.). Madison, Wisconsin. pp: 1035-1049.
- Peña, D. y C. Zebrowski, 1992. Estudio de los suelos volcánicos endurecidos de las cuencas de México y Tlaxcala. Informe de Mapa Morfopedológico de la Vertiente Occidental de la Sierra Nevada. Commission des Communautés Européennes (ed.). Montecillo, México: pp: 1-16.
- Pérez O., A., J. Etchevers., H. Navarro y R. Núñez. 2000. Aporte de los residuos del cultivo anterior al reservorio de nitrógeno en los tepetates. *Agrociencia* 34:115-125.
- Prat, C. y A. Báez. 1998. Comment créer un sol à partir d'un tuf volcanique induré (*tepetate*) au Mexique. *Transactions* 16 World Congress of Soil Science. Montpellier, Francia. (CD-ROM, no. 2547, Symposium 38).
- Puget, P. and E. Drinkwater L. 2001. Short-term dynamics of root- and shoot-derived carbon from a leguminous green manure. *Soil Sci. Soc. of America J.* 65:771-779.
- Quantin, P., A. Arias, J. Etchevers, R. Ferrera, K. Olechko, H. Navarro, G. Werner y C. Zebrowski, 1993. Tepetates de México: caracterización y habilitación para la agricultura. *Terra* 11 (Número especial): 1-25.
- Reicosky, D. and M. Lindstrom. 1993. Effect of fall tillage on short term carbon dioxide flux from soil. *Agronomy J.* 85:1237-1243.
- Werner, G. 1992. Suelos volcánicos endurecidos (tepetates) en el estado de Tlaxcala: Distribución, rehabilitación, manejo y conservación. *Terra* 10 (Número especial): 318-331.
- Zebrowski, C., P. Quantin y G. Trujillo. (ed.). 1997. *Suelos Volcánicos Endurecidos*. ORSTOM, Quito, Ecuador. 510 p.



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**Totalmente bilingüe**

*Fully bilingual*



# Agrociencia

**C ORGÁNICO Y P-OLSEN EN TEPETATES CULTIVADOS DE MÉXICO**

**ORGANIC C AND OLSEN-P IN CULTIVATED TEPETATES OF MÉXICO**

Aurelio Báez-Pérez<sup>1</sup>, Jorge D. Etchevers-Barra<sup>1</sup>, Claudia Hidalgo-Moreno<sup>1</sup>, Christian Prat<sup>2</sup>,  
V́ctor Ordaz-Chaparro<sup>1</sup> y Roberto Núñez-Escobar<sup>1</sup>

**MÉXICO**