



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN
EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**INSTITUTO DE RECURSOS NATURALES
ESPECIALIDAD DE EDAFOLOGIA**

**DINÁMICA DEL CARBONO ORGÁNICO EN TEPETATES
CULTIVADOS**

AURELIO BÁEZ PÉREZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MEXICO

2001

CONTENIDO

RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISION DE LITERATURA.....	4
2.1. Los tepetates.....	4
2.1.1. Origen y clasificación.....	5
2.1.2. Características físicas y químicas.....	9
2.1.3. Incorporación de los tepetates a la agricultura.....	10
2.1.4. Fertilidad de los tepetates.....	11
2.1.5. El carbono orgánico en los tepetates.....	12
2.2. El capital orgánico del suelo.....	13
2.3. Ciclo global del carbono.....	14
2.3.1. El carbono orgánico del suelo.....	16
2.3.2. Dinámica del carbono en el suelo.....	17
2.3.3. Factores que incrementan el carbono orgánico del suelo.....	19
2.3.3.1. Residuos orgánicos.....	19
2.3.3.2. Secuestro de carbono.....	20
2.3.3.3. Agregación de las partículas del suelo.....	21
2.3.3.4. Biomasa microbiana.....	23
2.3.4. Factores que disminuyen el carbono orgánico del suelo.....	24
2.3.4.1. Erosión.....	24
2.3.4.2. Oxidación del carbono orgánico del suelo.....	25

2.3.4.3. Retiro de rastrojos y sistemas de cultivo.....	26
2.3.4.4. Labranza.....	27
2.3.5. Carbono orgánico y las arcillas del suelo.....	28
3. OBJETIVOS E HIPOTESIS.....	29
3.1. Objetivos.....	29
3.2. Hipótesis.....	29
4. MATERIALES Y METODOS.....	30
4.1. Carbono orgánico del suelo, sistemas de cultivo y manejo de residuos.....	34
4.1.1. Base de datos.....	35
4.1.1.1. Recorridos y entrevistas.....	35
4.1.1.2. Muestreo.....	38
4.1.1.3. Procesamiento de las muestras.....	39
4.1.1.4. pH y conductividad eléctrica.....	39
4.1.1.5. Carbono orgánico.....	40
4.1.1.6. Carbono inorgánico.....	41
4.1.2. Carbono orgánico y contenido de raíces pequeñas en el suelo.....	41
4.1.3. Carbono orgánico y los sistemas de cultivo.....	42
4.1.4. Carbono orgánico y tiempo de cultivo del tepetate.....	45
4.1.5. Carbono orgánico y tiempo de cultivo en cuatro sistemas de cultivo a través del tiempo.....	45
4.1.6. Carbono orgánico y fósforo extractable del suelo.....	46
4.1.6.1. Fósforo extractable del suelo y sistemas de cultivo.....	47
4.1.6.2. Fósforo extractable del suelo en cuatro sistemas de cultivo a través del tiempo.....	47

4.1.7. Carbono orgánico en seis parcelas experimentales.....	48
4.2. Carbono orgánico y algunas mediciones físicas del tepetate.....	51
4.2.1 Carbono orgánico y estabilidad de agregados en húmedo.....	52
4.2.2. Carbono orgánico y estabilidad de agregados en seco.....	54
4.2.3. Carbono orgánico y estado estructural del suelo.....	54
4.2.4 Carbono orgánico y coeficiente de estructuración del suelo.....	55
4.2.5. Carbono orgánico en macropartículas y micropartículas.....	56
4.2.6. Carbono orgánico en distintos tamaños de partícula.....	56
4.2.6.1. Carbono orgánico en fragmentos y agregados.....	56
4.2.6.2. Fragmentos y agregados a través del tiempo de cultivo....	58
4.2.6.3. Carbono orgánico y dureza de agregados y fragmentos....	58
4.3. Minerales arcillosos y carbono orgánico.....	58
4.3.1. Carbono orgánico y contenido de arcilla.....	63
4.4. Diseño experimental.....	64
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	65
5.1. Carbono orgánico del suelo, sistemas de cultivo y manejo de residuos.....	66
5.1.1. Base de datos.....	66
5.1.2. Carbono orgánico y contenido de raíces pequeñas en el suelo.....	70
5.1.3. Carbono orgánico y los sistemas de cultivo.....	72
5.1.4. Carbono orgánico y tiempo de cultivo del tepetate.....	75
5.1.5. Carbono orgánico y tiempo de cultivo en cuatro sistemas de cultivo a través del tiempo.....	76
5.1.6 Carbono orgánico y fósforo extractable en los tepetates.....	81
5.1.6.1. Fósforo extractable y sistemas de cultivo.....	82

5.1.6.2. Fósforo extractable en cuatro sistemas de cultivo a través del tiempo.....	84
5.1.7. Carbono orgánico en seis parcelas experimentales de tepetate.....	86
5.2. Carbono orgánico y algunas características físicas del tepetate.....	89
5.2.1. Carbono orgánico y estabilidad de agregados en húmedo.....	89
5.2.2. Carbono orgánico y estado estructural del suelo.....	91
5.2.3. Carbono orgánico y coeficiente de estructuración.....	96
5.2.4. Carbono orgánico en macropartículas y micropartículas.....	98
5.2.5. Carbono orgánico en distintos tamaños de partículas.....	100
5.2.5.1. Carbono orgánico en fragmentos y agregados.....	104
5.2.5.2. Dinámica de fragmentos y agregados..... y tiempo de cultivo	107
5.2.5.3. Carbono orgánico y dureza en agregados y fragmentos..	109
5.3. Minerales de arcilla.....	116
5.3.1. Carbono orgánico y contenido de arcilla.....	120
6. CONCLUSIONES.....	122
7. BIBLIOGRAFÍA.....	124
8. APÉNDICE.....	136

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Algunas características físicas de los tepetates.....	9
Cuadro 2. Características químicas los tepetates.....	10
Cuadro 3. Cuestionario elaborado para las entrevistas a productores.....	37
Cuadro 4. Variables de estudio.....	46
Cuadro 5. Labores agrícolas realizadas en los ciclos de cultivo. Experimento en San Miguel Tlaixpan, Texcoco.....	49
Cuadro 6. Cultivos y fertilizantes. Experimento en San Miguel Tlaixpan, Texcoco.....	50
Cuadro 7. Paja incorporada. Experimento en San Miguel Tlaixpan, Texcoco.....	50
Cuadro 8. Rendimiento de grano. Experimento en San Miguel Tlaixpan, Texcoco.....	51
Cuadro 9. Apreciación del estado estructural del suelo.....	55
Cuadro 10. Algunas características químicas de los suelos de las parcelas incluidas en este estudio.	67
Cuadro 11. ANOVA para la variable carbono orgánico.....	74
Cuadro 12. ANOVA para la variable fósforo extractable.....	83
Cuadro 13. Resultados de parcelas de tepetate experimentales en San Miguel Tlaixpan, Texcoco.	87
Cuadro 14. Arcillas presentes en los tepetates incluidos en este estudio.....	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Procesos edafológicos del carbono orgánico en el suelo.....	17
Figura 2. Las reservas orgánicas del suelo.....	18
Figura 3. Localización del área de estudio.....	31
Figura 4. Ubicación de los tepetates.....	33
Figura 5. Comunidades de la Cuenca del Río Texcoco.....	36
Figura 6. Carbono orgánico en muestras de suelos donde se lavaron residuos vegetales y no lavados, con 0 a 12% de C.	70
Figura 7. Carbono orgánico en muestras de suelos donde se lavaron residuos vegetales y no lavados, con 0 a 6% de C.....	71
Figura 8. Contenido de carbono orgánico en tepetates cultivados según el manejo agronómico.....	72
Figura 9. Relación general entre carbono orgánico y tiempo de cultivo en tepetates habilitados para la agricultura sin discriminar por sistema de cultivo.....	75
Figura 10. Carbono orgánico a través del tiempo en tepetates cultivados en diferentes sistemas de cultivo.....	76
Figura 11. Acumulación de carbono orgánico en tepetates sometidos a diferentes sistemas de cultivos sin labranza después de 20 años.....	81
Figura 12. Relación entre contenido de carbono orgánico y fósforo extractable Olsen en tepetates cultivados.....	82
Figura 13. Contenido de fósforo extractable Olsen en tepetates cultivados según el manejo agronómico.....	83
Figura 14. Acumulación de fósforo a través del tiempo en tepetates cultivados en diferentes sistemas de cultivo.....	84
Figura 15. Carbono orgánico (a) y fósforo extractable (b) en las parcelas de tepetate experimentales.....	87
Figura 16. Estabilidad de agregados en húmedo en tepetates.....	89

Figura 17. Estado estructural del suelo en tres sistemas agrícolas en tepetates cultivados.....	92
Figura 18. Relación entre carbono orgánico y estabilidad de agregados en tepetates en sistemas agrícolas con labranza convencional en tepetates.....	93
Figura 19. Rompimiento de agregados y deterioro de la estructura del suelo.....	94
Figura 20. Coeficiente de estructuración en tres sistemas agrícolas en tepetates cultivados.....	96
Figura 21. Carbono orgánico y coeficiente de estructuración en tepetates.....	97
Figura 22. Micropartículas y macropartículas en tres sistemas de cultivo en tepetates cultivados.....	98
Figura 23. Microagregados, macroagregados y carbono orgánico en sistemas agrícolas con labranza convencional en tepetates cultivados.....	99
Figura 24. Tiempo de permanencia de la materia orgánica del suelo en macroagregados y microagregados.....	100
Figura 25. Carbono orgánico y diámetro medio de partículas en distintos sistemas agrícolas en tepetates cultivados.....	101
Figura 26. Carbono orgánico en agregados (a) y fragmentos (b) en tepetates cultivados.....	105
Figura 27. Carbono orgánico contenido en agregados y fragmentos en diferentes condiciones de manejo agrícola.....	106
Figura 28. Evolución de agregados (a) y fragmentos (b) mayores de 3.36 mm a través del tiempo en tepetates cultivados.....	108
Figura 29. Dureza y tamaño de partícula de fragmentos y agregados en tepetates cultivados.....	110
Figura 30. Dureza de fragmentos y agregados de nueve sistemas de cultivo en tepetates cultivados.....	111
Figura 31. Dureza de fragmentos y agregados y contenido de carbono orgánico en nueve sistemas de cultivo en tepetates cultivados.....	114
Figura 32. Difractograma de la fracción fina (< 2 μm) de un tepetate blanco de Nativitas (t1) después de 10 lavados con NaOH 0.5 N.....	116

Figura 33. Difractograma de la fracción fina ($< 2 \mu\text{m}$) de un tepetate blanco de Nativitas (t1) después de 20 lavados con NaOH 0.5 N.....	117
Figura 34. Difractograma de la fracción fina ($< 2 \mu\text{m}$) de un tepetate amarillo (t3) de San Miguel Tlaixpan después de 10 lavados con NaOH 0.5 N.....	117
Figura 35. Difractograma de la fracción fina ($< 2 \mu\text{m}$) de un tepetate amarillo (t3) de San Miguel Tlaixpan después de 20 lavados con NaOH 0.5 N.....	117
Figura 36. Difractograma de la fracción fina ($< 2 \mu\text{m}$) de un tepetate blanco (t3) después de 20 lavados con NaOH 0.5 N.....	118
Figura 37. Relación entre carbono orgánico y cantidad de arcilla en los tepetates cultivados.....	121

INDICE DE APÉNDICES

Apéndice 1. Posición geográfica de las parcelas de tepetate.....	136
Apéndice 2. Cultivos y abonos orgánicos utilizados en las parcelas de tepetate.....	139
Apéndice 3. Carbono orgánico y fósforo extractable en las clases designadas.....	143
Apéndice 4. Comparación de medias para las clases establecidas según Tukey (< 0.05).....	145
Apéndice 5. Carbono orgánico por diámetro de partícula, fragmentos, agregados y dureza.....	147

RESUMEN

Los tepetates son tobas volcánicas parcialmente alteradas y endurecidas por procesos geológicos o pedogenéticos, que se encuentran a diferentes profundidades en los suelos de piedemonte del Eje Neovolcánico de México. Cuando el suelo que cubre a estas capas endurecidas se erosiona, los tepetates quedan expuestos a la superficie. Los tepetates pueden ser incorporados a la agricultura mediante la roturación, aradura, rastreo y prácticas agrícolas adecuadas. Sin embargo, el sustrato resultante tiene una fertilidad química, física y biológica muy pobre, lo cual limita el rendimiento de los cultivos. Ya que el C orgánico del suelo ha sido considerado como un buen indicador de la calidad agrícola, puesto que mejora las propiedades químicas, físicas, biológicas y la disponibilidad nutrimental para las plantas, se le ha dado especial atención. Antes de ser habilitados, el C orgánico de los tepetates solamente se encuentra en trazas, lo cual limita su incorporación de estos materiales a la agricultura. El objetivo de la presente investigación fue estudiar los cambios de concentración de C y P a medida que incrementan los años de cultivo de los tepetates. Se consideraron diferentes sistemas de cultivo, manejo agronómico y manejo de residuos orgánicos. Se hicieron recorridos y entrevistas en comunidades de la Cuenca del Río Texcoco y zonas aledañas en el municipio del mismo nombre. Se seleccionaron 100 parcelas de tepetate cultivadas y se tomaron muestras de suelo en todas éstas (0 a 20 cm de profundidad). Las parcelas con tepetate se clasificaron en función de los siguientes sistemas agrícolas y la cantidad de C y P extractable: recién roturadas, mal laboreadas o abandonadas, con monocultivo de gramíneas, ocasionalmente cultivadas con leguminosas en rotación o asociación con cereales y/o tratadas con algo de estiércol, con labranza cero, cultivadas con leguminosas y frecuentemente abonadas con estiércol, sustrato de invernadero, con labranza cero y con riego, y sustrato de invernadero con uso intensivo. El estudio de la variación del C y P-Olsen con el tiempo de cultivo sólo se hizo en los sistemas agrícolas donde hubo suficiente información: monocultivo de gramíneas, cereales ocasionalmente asociados con leguminosas, cultivadas con leguminosas y frecuentemente abonadas con estiércol y labranza cero. También se estudió la distribución de C en distintos tamaños de partículas y/o fragmentos separados por la prueba de estabilidad de agregados en seco (>50.8, 31.7-22.2, 22.2-11.5, 11.5-6.35, 6.35-4.76, 4.76-3.36, 3.36-2.0, 2.0-1.0, 1.0-

0.46, 0.46-0.25, 0.25-0.10, 0.10-0.05 y <0.05 mm). Por último se determinó la cantidad y tipo de arcilla y ambos se relacionaron con el C.

El C y el P se acumularon mayormente en los sistemas agrícolas con labranza cero, con frecuente incorporación de estiércoles, con uso frecuente de leguminosas, así como, en los tepetates empleados como sustrato en invernaderos. La cantidad de C se relacionó positivamente con la estabilidad estructural del suelo y se acumuló más en las partículas menores a 0.25 mm. En los tepetates cultivados se distinguieron dos tipos de partículas: fragmentos y agregados, los cuales se diferenciaron por su dureza, forma de los bordes y apariencia. Los fragmentos fueron más duros, tuvieron bordes más angulosos y tuvieron una apariencia más compacta que los agregados; sin embargo, los fragmentos <4.76 mm solamente pudieron ser diferenciados de los agregados por su dureza. Ésta se relacionó negativamente con el C. La acumulación de C en los tepetates con respecto al tiempo de cultivo mostró una tendencia en la que el aumento de éste fue relativamente mayor durante los primeros 10 años. En general, la concentración del C aumentó (logarítmica o potencialmente) a medida que el tamaño de las partículas se hacía más pequeño. El aumento de la concentración fue mínimo en las partículas mayores a 10 mm.. La cantidad de C también fue inversamente proporcional a la cantidad de fragmentos. La cantidad de arcilla no se relacionó claramente con el contenido de C de los tepetates. Los minerales de la arcilla encontrados en los tepetates fueron del tipo amorfo combinados con una pequeña porción de arcillas del tipo 1:1. Estos no influyeron en la agregación y la acumulación de C orgánico.

Los tepetates expuestos de la Cuenca del Río Texcoco, improductivos, pueden ser útiles para la producción agrícola y forestal, si se les proporciona un manejo agronómico conducente a la acumulación de C (secuestro), proceso también deseable desde el punto de vista ambiental.. La pobreza en el contenido de C de los tepetates sin roturar y de muchos otros roturados, pero con mal manejo agronómico, los hace sustratos potencialmente viables para almacenar el exceso de C atmosférico; sin embargo, es preciso diseñar tecnologías y estrategias adecuadas para este propósito.

ABSTRACT

The tepetates are volcanic tuff partially altered and hardened by geological and pedogenetical processes. These materials are found at different depths in the soils of piedemont in the Neovolcanic Axis of Mexico. When the soil overlaying these hardened layers is eroded, the tepetates are exposed to the surface. The tepetates can be rehabilitated for agricultural use by mechanically breaking off the hardened layer, plowing, grading and applying appropriate agricultural practices. However, the resulting soil bed has a poor biological, physical, and chemical fertility, which limits the performance of the crops. Since soil organic C has been considered as a good indicator of the soil quality, because it improves the biological, physical, chemical properties and the availability of plant nutrients, particular consideration has been given to its status. Soil organic C is found in the recently rehabilitated tepetates in traces, which restricts its use for agricultural purposes. The objective of this study was to study the changes in the C and P concentration as the cropping time of the tepetate increases. The study considered different systems of cultivation, crop management and management of the crop residues. The experimental area (Basin of the River Texcoco and surroundings) was visited and farmers were interviewed. One hundred plots of rehabilitated tepetates were selected and soil samples (0 to 20 cm) were collected in each one of them. The tepetate fields were classified as a function of the management system and of the C and Olsen-P contents. The classes were the following: recently ripped tepetates, abandoned or not well managed tepetates, tepetates with monoculture of cereals, with cereals and occasionally associated with legumes and/or treated with small amounts of farmyard manure, tepetates with zero tillage, tepetates sown with cereals and frequently associated with legumes and treated with farmyard manure, tepetate used as greenhouse bed, tepetates with zero tillage and irrigation, and tepetates used as greenhouse bed with intensive use. The changes in C and Olsen-P concentration due to years of cropping was only studied in those systems where enough information was available: monoculture of cereals, cereals occasionally associated with legumes and/or treated with small amounts of farmyard manure, tepetates sown with cereals and frequently associated with legumes and treated with farmyard manure plus zero tillage. The distribution of C in the clay fraction and in aggregates or fragments of different size (>50.8,

31.7-22.2, 22.2-11.5, 11.5-6.35, 6.35-4.76, 4.76-3.36, 3.36-2.0, 2.0-1.0, 1.0-0.46, 0.46-0.25, 0.25-0.10, 0.10-0.05 and <0.05 mm) was also studied. C and Olsen-P were higher in the zero tillage, in those treatments with frequent addition of farmyard manure, frequent use of legumes, and in the tepetates used as greenhouse bed. The C percentage was positively correlated to the soil structural stability. Higher C concentration was found in soil particles < 0.25 mm. Two types of particles were distinguished in the tepetates: fragments and aggregates. These types of particles differed in hardness, shape of the borders and aspect. Fragments were harder, with angled borders, and more compact than aggregates. Fragments <4.76 mm were classified based only on hardness. Hardness was negatively related to C concentration. The C percentage increased with the number of years under cultivation, the increase being higher during the first 10 years. In general, the C concentration increased (logarithmically or as power function of e) as the particle size decreased. C concentration increments were small in soil particles larger than 10 mm. The C concentration varied inversely to the quantity of fragments. Clay content was not clearly related to the C content of tepetates. The clay minerals found in the tepetates were a combination of amorphous type with a small portion of the type 1:1. The clay type was not related with the aggregation or the C concentration. The tepetates exposed to the surface in the Basin of the Texcoco River are infertile, however, they can be brought into agricultural and forestry production if they are provided with appropriate management, particularly one favoring the accumulation of soil carbon (sequestration). C sequestration is a much more desirable process from an environmental point of view. The surface exposed tepetates as well as the rehabilitated tepetates low in C content are substrata with high potential for sequestration atmospheric carbon, however, it is necessary to design appropriate strategies and technologies for this purpose.

1. INTRODUCCION

Los tepetates son tobas volcánicas parcialmente alteradas y endurecidas por procesos geológicos o pedogenéticos, que se encuentran a diferentes profundidades en los suelos de piedemonte en las cordilleras volcánicas de México. Cuando éstos son erosionados, los tepetates quedan expuestos a la superficie. Pueden ser incorporados a la agricultura mediante la roturación, construcción de terrazas (si existen pendientes fuertes) y prácticas agrícolas adecuadas. Sin embargo, el substrato resultante tiene una fertilidad química, física y biológica muy pobre, lo cual limita el rendimiento de los cultivos.

La investigación de los tepetates en México que se hizo en el pasado, puso menor énfasis en el mejoramiento de su fertilidad que en su origen, génesis, localización, clasificación, características físicas y químicas, erosionabilidad, producción agrícola e impacto social. La mayoría de los estudios referentes a estos materiales fueron realizados por el Proyecto Puebla–Tlaxcala de la Fundación Alemana para el Desarrollo de la Ciencia (Miehlich, 1992) y por los proyectos del programa de investigación UE-ORSTOM-CP-UAT-UG¹ de 1988 a 1996 (Quantin, *et al.*, 1993; Zebrowski *et al.*, 1992; Zebrowski *et al.*, 1997).

Pese a los esfuerzos hechos por agricultores e investigadores por habilitar agrícolamente los tepetates, el aumento en la fertilidad de estos materiales ha sido escaso, debido principalmente a la baja tasa de acumulación de C, N y P, aún después de varias décadas de cultivo (Etchevers y Brito, 1997; Pérez *et al.*, 2000). Aunque se ha demostrado que es posible obtener buenos rendimientos agrícolas de algunos cereales y leguminosas el primer año de cultivo y en los años subsecuentes, mediante rotación de cultivos, asociaciones de cultivos adecuadas, incorporación de estiércoles, etc. (Báez *et al.*, 1997; Prat y Báez, 1998),

¹ UE: Unión Europea; ORSTOM: Instituto de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación (Francia); CP: Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas de Montecillo (México); UAT: Universidad Autónoma de Tlaxcala (México); UG: Universidad de Giessen (Alemania).

la fertilidad de los tepetates sigue siendo baja. Etchevers *et al.* (1997) evaluaron la mineralización de residuos vegetales de maíz y frijol en parcelas de tepetates que habían sido recién roturados (1 año) y otras que habían sido incorporadas a la producción desde hace varias décadas (hasta 60 años) y concluyeron que la cantidad de C orgánico en todos los tepetates era baja. Estos investigadores confirmaron las observaciones previas realizadas por Etchevers *et al.* (1992c) y Etchevers y Brito (1997). Los antecedentes indicados en la literatura hacen suponer que el manejo agronómico y la naturaleza misma del material influyen determinadamente en la acumulación de C, N, P y otros nutrimentos (Navarro, 1992; Navarro y Flores, 1997; Prat y Báez, 1998). La baja acumulación de C orgánico se atribuye a la casi nula incorporación de residuos orgánicos al suelo. Esta práctica agrícola no se lleva a cabo regularmente en la zona de estudio porque no siempre se cuenta con disponibilidad de estiércol, porque los esquilmos agrícolas son utilizados por los agricultores para la alimentación del ganado y por tradición, ya que los agricultores acostumbran limpiar sus parcelas, aún con fuego, para facilitar las labores de labranza. Ocasionalmente algunos productores regresan al campo parte del estiércol generado. Otra causa de la baja concentración de C en el suelo es los escasos rastrojos son retirados del campo (Pérez *et al.*, 2000). El problema se ve agravado por factores climáticos, como irregularidad de los ciclos térmicos y escasez y mala distribución de las lluvias, poco propicios para la producción de biomasa.

En décadas anteriores hubo programas de roturación de tepetates en los estados de México y Tlaxcala destinados a incorporarlos como tierras de labor agrícola. La roturación de estos materiales no implica el mejoramiento de la fertilidad asociada a la fase orgánica de los suelos. La roturación del tepetate es un proceso caro, y si no se contemplan paralelamente a

ésta la solución de problemas que limitan su fertilidad, pueden pasar décadas y el substrato continuar con una baja fertilidad, casi igual a la que tenía antes de ser roturado.

El problema de la baja fertilidad de los tepetates debe ser atacado a partir de la comprensión del concepto de agrosistema y de la manera cómo éste funciona. El entendimiento de cómo interacciona el cultivo con los diversos factores edáficos, climáticos, agronómicos y socio-económicos, contribuiría a planear estrategias que ayuden a resolver el problema.

En el Eje Volcánico Transversal o Eje Neovolcánico de México, donde hay aproximadamente 30,700 km² de tepetates (Peña y Zebrowski, 1993), están asentadas más de la mitad de la población de la República Mexicana. Muchas de estas poblaciones rurales han modificado el medio ambiente que las rodea, principalmente por la deforestación y, en general, por el cambio de uso de suelo, que va desembocando en un mal manejo de dicho recurso. El aumento de población y la disminución de tierras de cultivo, ponen de manifiesto la necesidad de realizar un aprovechamiento racional de los recursos que son susceptibles de ser renovados. La zona en cuestión posee una de las densidades de población más altas del país, fenómeno que aunado a la falta de tierra de labor, genera problemas sociales, como abandono de parcelas, pobreza, presión sobre los entornos urbanos y degradación del medio.

El propósito de este estudio es investigar el comportamiento del carbono orgánico bajo diversos manejos agrícolas, tiempo de cultivo y manejo de residuos orgánicos para proponer prácticas agrícolas que ayuden a incrementar la fertilidad y sustentabilidad de estos sustratos.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Los tepetates

La palabra "tepetate" proviene del vocablo que se deriva de la lengua Náhuatl: *tepetlatl*, cuyas raíces "*tetl*"=piedra" y "*petlatl*"=petate o lecho, significan: lecho de piedra (Simeon 1885) y alude a horizontes endurecidos que han sido expuestos a la superficie por la erosión.

Los tepetates son horizontes cementados originados de materiales volcánicos, con textura que va desde arcillosa hasta arenosa, y en color desde blanco hasta rojizo. Es común observar en la parte superior de los tepetates un paleosuelo. El afloramiento de estos materiales ocurre después de que la capa de suelo es removida por procesos erosivos (Dubroeuq, 1992; Miehlich, 1992; Quantin 1992; Zebrowski, 1992). Los tepetates son improductivos desde el punto de vista agrícola, sin embargo, pueden ser cultivados después de un proceso de habilitación que incluye la roturación para mejorar sus propiedades físicas y fertilización orgánica e inorgánica para superar deficiencias nutrimentales. En los estados de México y Tlaxcala los tepetates se encuentran situados en tres tipos de geformas que son accidentadas: piedemonte, glacis y sobre materiales geológicos de tipo piroclásticos con endurecimiento de origen volcánico. Estos se ubican a una altitud comprendida entre 2,250 y 2,800 m, sin embargo, es posible encontrarlos desde 1,800 hasta 3,400 msnm (Peña y Zebrowski, 1993). Debido a la altitud, las condiciones de clima en donde se encuentran los tepetates, varían desde templado seco hasta templado sub-húmedo. La época de lluvias es aproximadamente de 6 meses, desde mayo hasta octubre, y la época de sequía es también aproximadamente de 6 meses. En la temporada seca, uno o dos meses son sub-húmedos, abril y noviembre, y de 4 a 5 meses son sub-áridos, desde diciembre hasta marzo.

La temperatura media anual varía de 11 a 15 °C, la variación diurna es mayor de 10 °C con heladas nocturnas muy frecuentes durante la época invernal. La precipitación media anual varía de 420 mm a de 750 mm (Quantin *et al.*, 1993; Prat, 1997).

2.1.1. Origen y clasificación

Para Miehlich (1992), los tepetates de la parte central de México se originaron por depósitos de ceniza volcánica que fueron proyectadas por antiguas explosiones piroclásticas ocurridas desde hace 20,000 hasta 40,000 años. Este autor denomina a los tepetates como tobas volcánicas. También para Bertaux y Quantin (1994) los tepetates son tobas volcánicas, pero parcialmente alteradas. Dubroeuq *et al.* (1989) coincidieron con estos autores en cuanto a que los tepetates provienen en su mayoría de productos volcánicos piroclásticos en forma de flujos piroclásticos de tipo “nubes ardientes”, hidromagmáticas y coladas de barro (lahares). Estas cenizas han sido alteradas al momento de su deposición, y luego a través del tiempo. El endurecimiento ocurrió principalmente al momento de la deposición de estos flujos piroclásticos, después hubo procesos pedológicos tales como el aporte de carbonato de calcio, caliza, arcillas, sílice y sesquióxidos; que condujeron al relleno de la porosidad del material y al refuerzo de su endurecimiento (Dubroeuq, 1992). Existe una amplia gama en cuanto a la abundancia de estos elementos en los tepetates de las regiones estudiadas. Flach *et al.* (1969), citado por Nimlos (1987) y Castorena (1988), concluyeron que la dureza de los tepetates del Valle de México y Tlaxcala se debía a la presencia de carbonatos de calcio y sílice. Los carbonatos son dominantes en las capas cercanas a la superficie, mientras que la cementación por sílice es más común en las capas más profundas. Estos resultados coinciden con los de Alfaro *et al.*

(1992), sin embargo, estos autores indicaron que el carbonato de calcio como cementante solamente puede encontrarse en la capa más superficial del tepetate. Aunque a lo largo del perfil del tepetate puede haber altas concentraciones de carbonatos de calcio, aún en forma de relleno en las grietas, éste no es el cementante principal de las capas endurecidas (Hidalgo, 1995). Los mismos autores mencionaron que aunque no estaba claro, las arcillas podrían jugar un papel importante en la cementación, situación que fue comprobada por Olechko *et al.* (1992). Durante el intemperismo muchos de los excedentes de sílice se concentran formando ópalo-A orgánico e inorgánico y una menor parte se incorpora a los minerales de la arcilla (Miehlich, 1992). Estos son más abundantes en los horizontes inferiores que en los superficiales. Después de un proceso de erosión, los tepetates quedan expuestos a variaciones por humedecimiento y secado, lo cual ocasiona una fuerte compactación y endurecimiento de las arcillas ricas en ópalo-A, las que forman el tepetate. Hidalgo *et al.* (1992) encontraron una mayor abundancia de sílice en las capas de tepetate más profundas, sin embargo, concluyeron que ésta no era la única causa del endurecimiento de estos materiales. La silificación en el plasma matricial es difusa y discreta, pero en condiciones climáticas secas, no existe sílice en cantidades suficientes como para servir de cementante. En climas más húmedos, ésta si puede actuar como cementante. Los tepetates pueden ser clasificados en dos grupos, según su dureza: fragipanes y duripanes (Peña *et al.*, 1992). Según Hidalgo *et al.* (1992) el endurecimiento en los tepetates del tipo fragipán no es causado por un cementante estable como en los tepetates de tipo duripán y horizontes petrocálcicos. El tepetate tipo fragipán se caracteriza por una matriz consolidada y su estado duro corresponde en realidad a un estado intermedio en la alteración de una toba. La estructura compacta de la matriz del tepetate tipo fragipán es atribuida a una serie de

procesos de alteración de los minerales arcillosos, los óxidos e hidróxidos de Fe y Al y los geles de sílice.

Aeppli y Schönhals (1975) identificaron y describieron hasta cuatro series de materiales en los piedemontes occidentales de la Sierra Nevada. Miehlich (1992) confirmó la cementación de algunos de estos materiales y los denominó fajas. Al efectuar el levantamiento de los suelos del oriente del Valle de México, Peña y Zebrowski (1993) retomaron la información de este autor, con el fin de identificar mejor los tepetates. Con base en ella, estos autores definieron las siguientes series de materiales:

(a). Capa Holocena (H): Es un horizonte superficial que cubre la totalidad de los suelos, excepto a los andosoles y los suelos aluviales del estado de Tlaxcala. Generalmente tiene un espesor de 20 a 30 cm, pero en ocasiones puede llegar hasta 80 cm. Son de textura arenosa y franca, y se caracterizan por presentar numerosos artefactos humanos tales como fragmentos de cerámica y obsidiana labrada, por lo que se denominó capa Holocena. El origen de esta capa es eólico-coluvial y su fuente de origen fue el volcán Popocatepetl (Quantin, 1992).

(b). Serie T1: Son depósitos amarillos, muy friables presentes en la vertiente oriental de la Sierra Nevada a una altitud de más de 2,500 m. Su edad varía desde 12,000 hasta 20,000 años (Miehlich, 1992). En las zonas más secas, la parte inferior de estos depósitos presenta un nivel ligeramente endurecido llamado tepetate incipiente.

(c). Serie T2: Tiene de 1 a 2 m de espesor. La superficie la conforma un paleosuelo arcilloso vértico, de color gris oscuro denominado cambisol vértico. Por debajo de éste se encuentra un horizonte blanquecino, masivo y duro con edades que fluctúan desde 12,600 hasta 13,000 años.

(d). Serie T3: Corresponde a un conjunto de varios metros de espesor con un color ligeramente rojizo o pardo, que permite distinguirlos fácilmente de la serie T2. Su edad varía de 20,000 a 40,000 años. La serie T3 está presente en la vertiente occidental de la Sierra Nevada, habiéndose fechado una capa más reciente en 25,000 años. Esta se encuentra ubicada a lo largo de la autopista México-Puebla. La serie T3 también existe en la vertiente occidental.

En el pasado los tepetates fueron clasificados por su color (Valdés, 1970 y Pacheco, 1987), pero Quantin *et al.* (1993) argumentaron que los tepetates no deben ser clasificados según este criterio o por su dureza aparente, ya que éstas son características imprecisas. Los autores propusieron tres criterios de clasificación con bases científicas más sólidas:

(a). Estratigráfico. Por su relación con las series estratigráficas de depósitos T1, T2 y T3 y designando a los horizontes endurecidos como t2a, t2b, t3, etc., o ti si es que era indeterminado.

(b). De consistencia. Ya sea de fragipán (friable en estado húmedo), o duro permanentemente (duripán).

(c). Acumulación calcárea. Presencia de horizontes petrocálcicos en forma de encostramiento laminar.

Con base en lo anterior propuso una clasificación de cinco tipos distintivos de tepetate en México llamados: *t3* con y sin CaCO_3 , *t2* con y sin CaCO_3 , y *ti* con CaCO_3 , que fue la empleada por Peña y Zebrowki (1992) para el levantamiento morfopedológico de estos materiales en la parte noroccidental de la Sierra Nevada. Sin embargo, esta clasificación está sujeta a crítica porque los tepetates clasificados como sin CaCO_3 , si lo contienen, pero en bajas cantidades. (Etchevers *et al.*, 1992a).

Es importante señalar que los tepetates, siendo materiales volcánicos, nunca fueron suelos y por eso no tienen C y N, elementos originados por la vida. Por otra parte, el endurecimiento de éstos no se debe a que se encuentren “unidos” por elementos como arcillas, carbonatos, materia orgánica; sino que tienen una estructura solidificada (“soldada”), con una parte de su porosidad que está rellena con éstos materiales. El hecho de que la estructura del tepetate no sea estrictamente cementada, implica que al desestructurarse por efecto de la erosión hídrica o roturación mecánica, los tepetates no pueden volver a unirse, aunque si pueden compactarse por efecto de las labores agrícolas.

2.1.2. Características físicas y químicas

En el Cuadro 1 se presentan resultados de un estudio de caracterización física y mineralógica de tepetates de las cuencas de México y Tlaxcala, hecho por Peña y Zebrowski (1992).

Cuadro 1. Algunas características físicas de los tepetates. (Peña y Zebrowski 1992).

Tipo de tepetate	Da g/cm ³	Dr g/cm ³	pF 2.5(t)	pF 2.5(b)	pF 4.2(t)	pF 4.2(b)	CC (a)	PMP (b)	Pt %	Pb %	Pm %	$\frac{Pm}{Pb}$ %	HBS %
t3 sin CaCO ₃	1.32	2.44	38.8	36.2	29.2	33.7	10.3	2.5	50	54.0	48.4	0.89	41.0
t3 con CaCO ₃	1.47	2.34	24.6	22.3	17.2	20.5	7.3	3.8	44	38.1	32.8	86.3	26.0
t2 sin CaCO ₃	1.44	2.38	30.1	27.7	18.9	25.0	11.2	4.1	46	50.6	39.9	79	35.1
t2 con CaCO ₃	1.45	2.27	32.2	†	23.6	20.2	8.6	†	45	32.0	†	†	21.8
ti	1.43	2.27	24.7	25.8	18.8	20.4	5.9	5.4	46	38.6	36.9	0.96	27.0

- a: Capacidad de campo. b: Humedad determinada sobre bloques cúbicos de tepetate.
t: Humedad determinada sobre suelo tamizado. Da: Densidad aparente. Dr: Densidad real.
pF: Retención de humedad. PMP: Punto de marchitez permanente
Pt: Porosidad total calculada ($Pt=1-Da/Dr$, $Dr=2.65$) en muestras tamizadas.
Pb: Porosidad total media a partir de la Da y del contenido de agua en los bloques saturados.
Pm: Microporosidad ($Da \times CC$ de bloques cúbicos).
HBS: Humedad de bloques saturados. †: no registrado.

La densidad aparente (Da) presentó valores entre 1.16 y 1.55 g cm⁻¹ y la densidad real (Dr) se ubicó en el rango de 2.34 hasta 2.44 g cm⁻¹. Estos últimos valores fueron considerados por los autores como bajos. Los tepetates con carbonatos de calcio presentaron densidades

más altas, pero la porosidad total fue más elevada en los tepetates sin carbonatos de calcio y principalmente en los tepetates de la serie t3.

En el Cuadro 2 se presentan los resultados de la caracterización química de los tepetates cultivados realizada por Etchevers *et al.* (1992a). Se observó que estos tepetates, presentaban el carbonato de calcio distribuido uniformemente en la masa o en forma laminar, sin embargo, en los substratos consolidados que dieron origen a las capas que se cultivan, muestran el carbonato de calcio en diferentes formas (laminares o granulares). El porcentaje de éste varió de 1.4 a 14.2, dependiendo de la naturaleza del material parental y de las condiciones del clima en que evolucionaron. Estas diferencias explican parcialmente la dureza de estos materiales y las deficiencias de micronutrientes que a veces se observan en ellos (Castorena, 1988; Etchevers, 1992a). El pH de los tepetates se midió siempre en el rango alcalino y los porcentajes de C, N y P fueron extremadamente bajos.

Cuadro 2. Características químicas los tepetates. (Etchevers *et al.*, 1992a).

Toba	CaCO ₃ %	pH agua	pH KCl 1N	C %	N %	P Olsen ppm	Ca	Mg	K	Na	CIC	PSB
							meq/100g					%
t3 sin CaCO ₃	2.4	7.8	6.6	0.1	0.03	T	12.2	8.7	2.4	1.7	32.0	80
t3 con CaCO ₃	6.0	8.4	7.1	0.1	0.02	T	23.4	8.9	1.4	1.3	25.9	97
t2 sin CaCO ₃	1.6	7.5	6.3	0.2	0.04	T	7.7	6.2	1.2	0.9	19.6	79
ti	3.5	8.5	7.1	0.2	0.04	T	26.3	6.8	1.4	0.9	22.9	100

CIC: capacidad de intercambio catiónico.

PSB: porcentaje de saturación de bases, T: trazas.

2.1.3. Incorporación de los tepetates a la agricultura

Los tepetates en condiciones naturales debido a su dureza, prácticamente no permiten la penetración de las raíces de las plantas, y su capacidad de almacenamiento de agua es muy limitado (Arias, 1992; Báez, 1998; Werner, 1992). La incorporación agrícola de los

tepetates comienza con el acondicionamiento físico de este substrato endurecido mediante la roturación y la construcción de terrazas. Estas prácticas que se han venido realizando desde la época precolombina, tienen el propósito de favorecer la penetración de las raíces de las plantas en profundidad, aumentar la capacidad de almacenamiento de agua y aumentar la retención de humedad, para favorecer el establecimiento de cultivos (Hernández, 1987). La construcción de terrazas es una alternativa importante para el control de la erosión. Se realizan más o menos de forma horizontal siguiendo o no las curvas de nivel del terreno (Ruiz, 1979). Las terrazas se delimitan con bordes que pueden ser contruidos por montículos de tierra, muros de piedra, o bien por algunas especies vegetales como árboles, magueyes, nopales, etc.

La incorporación de abonos orgánicos como pajas y estiércoles es importante para el mejoramiento de la estructura del suelo y la acumulación de reservas orgánicas, pero los beneficios de estas prácticas agrícolas son a largo plazo. Sin embargo, en el caso de la incorporación de estiércoles de buena calidad (relación C/N 20:1) se han observado resultados favorables inmediatos en cuanto a aspectos nutrimentales (Alvarez *et al.*, 2000; Báez *et al.*, 1997; Ferrera *et al.*, 1997; Navarro y Flores 1997). El uso de fertilizantes químicos, la adecuada selección y rotación de cultivos, la asociación de gramíneas con leguminosas y las técnicas de captación de agua de lluvia, son indispensables para obtener buenos resultados en los primeros años de cultivo (Prat y Báez., 1998).

2.1.4. Fertilidad de los tepetates

Los principales problemas de nutrición a los que se enfrentan las plantas cuando se desarrollan sobre tepetates recién roturados, son la carencia de N y P, elementos asociados estrechamente a la mineralización de la materia orgánica, la cual es extremadamente baja.

Los niveles de carbono orgánico en tepetates sin roturar o recién roturados también son muy bajos, desde 0.1 hasta 0.2% (Etchevers *et al.*, 1992 b). El contenido de N y P son bajos en la mayoría de los tepetates de la Sierra Nevada (Etchevers y Brito, 1997). Su carencia se debe a que en los tepetates vírgenes, la actividad biológica es reducida.

Algunas deficiencias nutrimentales que presentan los tepetates pueden ser corregidas con adiciones de fertilizantes químicos y orgánicos. Sin embargo, son las limitantes físicas iniciales, las máximas restricciones para el rendimiento de las plantas en los tepetates. En el caso de los tepetates recuperados, un inadecuado manejo agronómico realizado durante el ciclo productivo también se confabula para obtener rendimientos bajos (Navarro, 1992). Un factor importante estrechamente relacionado con la deficiencia de nutrimentos, es la escasa presencia de microorganismos, los cuales se encuentran en poblaciones muy bajas. Alvarez (1992) encontró en tepetates vírgenes 2.3×10^4 bacterias, 11.8×10^3 actinomicetos y 6.57×10^1 hongos. Estas poblaciones son relativamente bajas, pero se ha observado que pueden aumentar después de la roturación y la adición de estiércoles. La importancia de los microorganismos radica en su actividad metabólica al fijar CO₂, en la transformación de la materia orgánica a humus y en algunos procesos de nitrificación (Alvarez, *et al.*, 2000; Ferrera, 1992).

2.1.5. El carbono orgánico en los tepetates

El contenido de carbono orgánico en los tepetates cultivados y no cultivados es bajo. Etchevers y Brito (1997) hicieron un levantamiento nutrimental de los tepetates no cultivados de México y Tlaxcala, y los resultados que presentaron demuestran que los niveles de nutrimentos como N y P disponibles en el suelo, son insuficientes para producir

cualquier tipo de cultivo. Parte importante de la situación anterior se deriva de la baja presencia de materia orgánica en los tepetates de estas zonas. Pérez *et al.* (2000) por su parte, evaluaron la mineralización de los pocos residuos vegetales de maíz y frijol, que dejan los productores en el terreno de cultivo después de las cosechas, en parcelas de tepetates que habían sido recién roturados (1 año) y otras que habían sido incorporadas a la producción hace aproximadamente 60 años. Estos investigadores determinaron que la cantidad de C orgánico en todos los tepetates era baja, independientemente de su historial de manejo agronómico. Esta situación requiere especial atención porque no es posible mejorar las condiciones físicas y químicas de los tepetates en orden a aumentar la producción agrícola, sin incrementar los porcentajes de materia orgánica. Ésta, además de proveer los nutrientes en déficit y otros nutrientes esenciales, se sabe contribuye significativamente a mejorar algunas propiedades físicas del suelo relacionadas con la productividad agrícola del mismo (Ortiz y Ortiz, 1990).

Los resultados anteriores ratifican la información generada por la observación de un número limitado de autores como Álvarez *et al.* (2000), Etchevers *et al.* (1992), Pérez *et al.* (2000) y los reportes publicados por Ruiz (1987), que proporcionan información valiosa para planear las prioridades de atención que requiere el estudio de los diferentes problemas nutrimentales.

2.2. El capital orgánico del suelo

El suelo constituye una parte importante del capital natural, por que en él se desarrollan las plantas que sostienen la mayor parte de la vida heterótrofa terrestre. Las reservas orgánicas e inorgánicas del suelo constituyen una parte fundamental de éste, y el mantenimiento de estas reservas constituye un factor importante para el desarrollo de la

agricultura sustentable. De León y Etchevers (1999) mencionaron tres puntos fundamentales en la restauración del capital natural del suelo: la revegetación natural o cultivada es la única manera de incrementar las reservas orgánicas del suelo, la producción sostenida de cultivos requiere de la aplicación de materiales orgánicos y fertilizantes, y realizar mayor investigación en la acumulación de reservas orgánicas del suelo enfocada a resolver problemas de este tipo.

2.3. Ciclo global del carbono

La atmósfera que rodea el globo terráqueo suministra el CO₂ a las plantas y el oxígeno a todos los organismos vivos. La atmósfera primitiva contenía grandes cantidades de CO₂, amonio, y metano, y era carente de O₂. Actualmente, los componentes principales de la troposfera son: 78% nitrógeno, 21 % oxígeno, 0.95 % gases raros y 0.035 % CO₂ (Lal, 1996). Las plantas acuáticas y terrestres convierten la energía del sol en energía química mediante la fotosíntesis, capturando de este modo el CO₂ de la atmósfera y fijándolo en compuestos orgánicos hidrocarbonados que forman parte de su estructura (celulosa, lignina, carbohidratos). Las plantas producen también CO₂ mediante la respiración, sin embargo, este C puede ser rápidamente usado en la fotosíntesis (Stevenson y Cole, 1999). Los animales también liberan CO₂ como producto final de la respiración, en la que se degradan carbohidratos sintetizados en la fotosíntesis.

En la naturaleza el balance entre el CO₂ fijado por las plantas y el CO₂ producto de la respiración, fenómenos oxidativos y catástrofes, es mantenido por la formación de carbonatos en los océanos y en los suelos. Sin embargo, desde mediados del siglo XVIII, el contenido del CO₂ atmosférico ha venido aumentando, primero lentamente, pero desde

mediados del siglo XX su incremento ha sido muy rápido, en promedio de $0.2 \text{ Pg C año}^{-1}$ o $1,3 \mu\text{L} \times \text{L}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Lal *et al.*, 1998). Durante ese lapso extensas regiones boscosas tanto en Norteamérica, como en las regiones tropicales de la tierra, han sido destruidas por el hombre dando paso a urbes y a terrenos agrícolas, incrementando la tasa histórica de emisiones de CO_2 . Paralelamente se han quemado cantidades apreciables de madera (carbón que es parte del ciclo natural de este elemento) y combustibles fósiles como el carbón y el petróleo (que son parte de los reservorios que no participan habitualmente en el ciclo). Este aporte externo en el ciclo del C, ha sido fundamentalmente el que ha incrementado las emisiones de CO_2 a la atmósfera. Actividades industriales, la calefacción y enfriamiento de las casas, el incremento del transporte automovilístico, así como las guerras destruyen enormes cantidades de materia orgánica que finalmente terminan en el reservorio atmosférico del mundo.

Todos esos acontecimientos han reducido las reservas de carbono en la biomasa y en el suelo; y han incorporado cantidades excesivas de CO_2 a la atmósfera. Éste, el vapor de agua, el metano, el ozono, el óxido de nitrógeno (N_2O) y otros gases como los fluorocarbonos ejercen una influencia negativa en el clima, produciendo un calentamiento global en la atmósfera terrestre, que se conoce como “efecto invernadero”. Así mismo, como resultado de la actividad humana, se han agregado a la atmósfera, hidrocarburos halogenados (cloro-fluoro-carbonos) y otros gases en pequeñas cantidades, que destruyen la capa de ozono, que protege a los seres vivos de los efectos dañinos de la radiación ultravioleta (Lal, 1996, Lal *et al.*, 1998).

El problema del calentamiento global de la atmósfera puede ocasionar que se derrita parte de las zonas polares del planeta, elevando el nivel del mar. Los cambios en la temperatura

y el nivel de los mares, podrían afectar el clima, alterando la producción de cultivos alimenticios, así como los regímenes de lluvias, ocasionando inundaciones, pérdida de vidas humanas, de cultivos agrícolas y dejando grandes masas de población desamparadas y sin hogares. Es necesario reducir las emisiones del CO₂ a la atmósfera producido por la actividad humana y buscar soluciones que permitan capturar el exceso de éste y almacenarlo. El suelo podría ser una alternativa viable y se sabe que el C orgánico mejora la fertilidad física, química y biológica de los suelos, que son deseables para el cultivo de las plantas (Lal *et al.*, 1999)

2.3.1. El carbono orgánico del suelo

El contenido total de materia orgánica (MO) edáfica se utiliza como un indicador de la calidad del suelo. Mide la capacidad que tiene un suelo para sostener una determinada productividad y el potencial que éste tiene para aportar nutrimentos disponibles para los cultivos, principalmente nitrógeno y fósforo (Lal, 1999). Sin embargo, dicha disponibilidad nutrimental depende del tipo de residuos orgánicos, la calidad de éstos y su grado de descomposición. A los distintos componentes de la MO se les denomina reservas orgánicas del suelo (COS) y su permanencia en el suelo puede mantener un nivel adecuado de aporte nutrimental para la producción de los cultivos (Zilbilske, 1994). La COS se dividen a su vez en COS activas y pasivas (Figura 1).

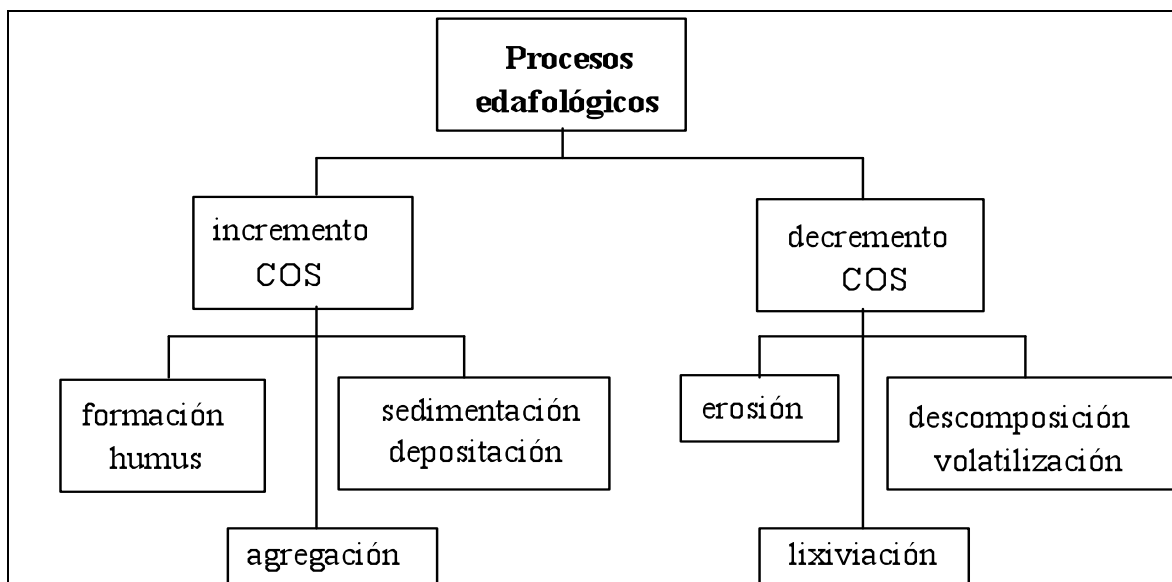


Figura 1. Procesos edafológicos del carbono orgánico en el suelo. COS: Carbono orgánico del suelo (Lal *et al.*, 1998).

La COS activas se subdividen a su vez en reservas lábiles y estabilizadas; las primeras están constituidas principalmente por aminoácidos, ácidos simples, proteínas, celulosas y hemicelulosas, las cuales son de rápida descomposición (1 a 5 años), su proporción en relación con el total es de aproximadamente 5%. Las segundas están constituidas principalmente por ligninas y pectinas, y su descomposición no es tan rápida (5 a 50 años), su proporción respecto al total varía desde 5 hasta 30%. Las COS pasivas están constituidas principalmente por ceras, quitinas y sustancias húmicas, las cuales son muy resistentes a la descomposición (cientos a miles de años) (Galvis, 1998).

2.3.2. Dinámica del carbono en el suelo

El almacenaje de los productos resultantes de la descomposición de plantas y animales en el suelo, es básico para los procesos biológicos que ocurren en éste, y forman parte esencial del ciclo del carbono (Figura 2).

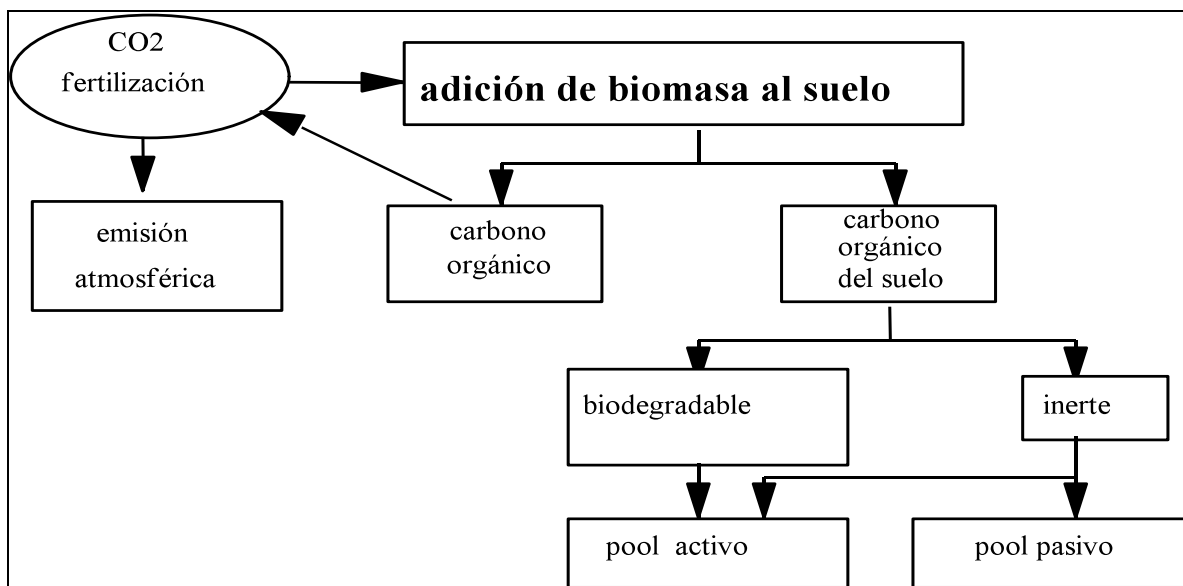


Figura 2. Las reservas orgánicas del suelo (Lal *et al.*, 1998).

Durante la degradación de la MO ocurren procesos de transformación en donde una parte del C es reciclado a la atmósfera como CO_2 y otra parte queda en el suelo en forma de sustancias húmicas. El N es transformado a amonios y nitratos, que son formas más disponible para las plantas, y otros macroelementos como el P y el S son liberados y quedan disponibles para la nutrición de plantas. La formación de ácidos húmicos, fúlvicos y huminas intervienen en la producción de coloides orgánicos del suelo, en la capacidad amortiguadora del éste y en la producción de agregados que mejoran sustancialmente las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos (Chenu *et al.*, 2000; Lal *et al.*, 1999; Six *et al.*, 2000; Stott. *et al.*, 1999) Los compuestos húmicos también son importantes en la vinculación de iones metálicos, ya que incrementan la disponibilidad de algunos nutrimentos y reducen el efecto tóxico de otros (Fisher, 1995).

El mejoramiento en la agregación y estructura por los complejos organo-minerales es un importante mecanismo en la secuestación de carbono en el suelo y el ciclo del carbono. La unión mineral-materia orgánica es una síntesis vital para la continuidad de la vida. Los productos microbianos sirven como cementantes del complejo organo-mineral; fortalecen y

estabilizan los agregados. La estabilidad de agregados proviene de la protección física del carbono orgánico del suelo señalado, un posible camino en la secuestación de carbono en el suelo. La adición regular de cantidades sustanciales de biomasa al suelo tiene la ventaja de mejorar la cantidad y calidad de humus y la formación de complejos organo-minerales que son estabilizados por productos derivados de microbios (Lal *et al.*, 1998).

2.3.3. Factores que incrementan el carbono orgánico en el suelo

2.3.3.1. Residuos orgánicos

La MO de los suelos está compuesta por una mezcla: de residuos de plantas y animales en diferentes estados de descomposición; de sustancias sintetizadas química y biológicamente a partir del rompimiento de las estructuras carbonadas; y de microorganismos (Schnitzer, 1982). Los principales componentes de la MO son polisacáridos, proteínas, carbohidratos, péptidos, aminoácidos, grasas, ceras y ácidos orgánicos de bajo peso molecular. El máximo grado de descomposición de la MO da como resultado los materiales húmicos: ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y huminas. Los materiales húmicos son los principales componentes de la materia orgánica del suelo. Estas sustancias son amorfas, de color oscuro, hidrofílicas y en parte aromáticas (Schnitzer, 1982). Otra característica importante es que las sustancias húmicas son capaces de formar complejos solubles e insolubles en agua y pueden interaccionar con las partículas minerales del suelo. La MO es la principal fuente de carbono orgánico (CO) en el suelo. Se estima que la MO contiene 58% de C (Jackson, 1976). Al ser mineralizada proporciona nutrimentos disponibles para las plantas y el mejoramiento de algunas características físicas de los suelos, como la estructura, la porosidad, la permeabilidad y la aireación. Sin embargo, su permanencia en el suelo

depende del grado de resistencia a la degradación. Buyanovsky *et al.* (1994), mencionaron que el tiempo de residencia de del carbono en los compuestos de la MO varía desde unos minutos hasta cientos de años. James y Konrad (1989) y Jenkinson (1971) mencionaron que más del 70% del CO que es adicionado al suelo como MO es oxidado y perdido como CO₂ en la atmósfera cada año. Estos autores validaron sus resultados tanto en zonas templadas como en zonas tropicales.

2.3.3.2. Secuestro de carbono

Secuestro de carbono es un término ampliamente usado en la actualidad para indicar la cantidad de CO₂ que puede ser capturado de la atmósfera por las plantas y permanecer como C orgánico después de la biodegradación de la MO (Angers y Chenu, 1998). Es importante diferenciar los términos captura de carbono y secuestro de carbono. El primero se refiere al carbono que es capturado por organismos autótrofos y utilizado en su metabolismo para la construcción de esqueletos hidrocarbonados. El secuestro se interpreta de dos maneras. En el caso de la MO que regresa al suelo después de su muerte, una parte del carbono que fue capturado es rápidamente degradado y convertido nuevamente en CO₂ por la respiración microbiana, y otra parte, el que es más recalcitrante, puede permanecer en el suelo con una tasa de degradación muy baja y ser transformado por los microorganismos del suelo en sustancias húmicas estables. El secuestro de carbono se refiere en este caso a esta parte de la MO que es muy resistente a biodegradación o que está protegida y puede permanecer por largo tiempo en el suelo. Esta última está asociada con la fracción mineral del suelo y forma complejos organo-minerales. Oades (1988) menciona que la transformación química del carbono en el suelo y su asociación con la fracción mineral proporcionan protección física, y ha sido propuesto como un mecanismo que

explica la secuestro de carbono en el suelo. La segunda acepción de carbono secuestrado es aquella parte de este carbono que queda temporalmente fuera del ciclo, en productos maderables.

2.3.3.3. Agregación de las partículas del suelo

El término agregación se refiere a la unión de partículas primarias del suelo por la intervención de agentes cementantes orgánicos (polímeros orgánicos, bacterias, hongos, etc.) e inorgánicos (arcillas, carbonatos, sílice) (Tisdall y Oades, 1982). Las partículas del suelo también pueden unirse a la materia orgánica, raíces finas y hongos. En otro tipo de uniones entre partículas del suelo, intervienen fuerzas electrostáticas entre las cargas del borde positivo sobre un dominio de arcilla y la fase cargada negativamente del otro (Six *et al.*, 2000; Chenu *et al.*, 2000). Los agregados que se forman cuando las partículas primarias se agrupan en unidades separables más grandes, determinan el tamaño y distribución de poros en el suelo y, en general, la estructura del suelo (Stott. *et al.*, 1999). La estructura del suelo está definida como el tamaño y arreglo de partículas y poros del suelo (Soil Survey Staff, 1975).

Los productos de la descomposición de la MO en el suelo y sus cambios químicos se asocian estrechamente con las partículas minerales de éste. La MO tiende a estabilizarse químicamente y físicamente, es decir, que se hace más resistente a la biodegradación (Denis y Claire, 1998). De este modo la asociación organo-mineral provoca la aglutinación de las partículas primarias del suelo formando microagregados (< 0.25 mm) que a la vez se aglutinan y forman los macroagregados (> 0.25 mm) (Kaúrichev,1984). La MO atrapada dentro de los macroagregados queda protegida al acceso de microorganismos y contribuye a la producción de agregados estables que prolonga su permanencia en el suelo. Los

agregados del suelo son formados por procesos químicos, físicos y biológicos, pero su estabilidad depende del COS. Éste fue dividido por Tisdall y Oades (1982) en tres componentes principales según su capacidad para estabilizar agregados: (1) sustancias húmicas que están asociadas con cationes metal polivalentes que son los agentes estabilizantes más persistentes y están asociados con los microagregados, (2) las raíces e hifas de hongos son agentes estabilizantes temporales y están asociados con los macroagregados; y los polisacáridos y microorganismos son agentes estabilizantes transitorios y contribuyen tanto a la micro como macroagregación. Mann (1986) mencionó que la cantidad y estabilidad de agregados está en función del clima, tipo de suelo, contenido de C y cantidad de raíces finas.

Se ha observado que cuando los agregados del suelo son rotos, la mineralización del C se incrementa (Elliot, 1986). Por lo tanto se concluye que la fracción mineral provee de protección física a la MO; sin embargo, el nivel de protección varía con el manejo agrícola del suelo. Beare *et al.* (1994) mostraron que el nivel de protección física de la MO era mayor en suelos no labrados y menor en suelos labrados. La cantidad de MO localizada y protegida en los agregados del suelo, depende de la resistencia a la degradación de ésta y de la resistencia de los agregados a algunas presiones naturales como humedecimiento y secado, y otras presiones artificiales como la labranza.

La capacidad de protección de los agregados por lo tanto, puede ser relacionada con técnicas de estabilidad de agregados en agua y otras pruebas de presión de agregados (Denis y Claire, 1998). La estabilidad de agregados de los suelos es de suma importancia para medir su calidad agrícola porque la agregación repercute directamente en las propiedades físicas y químicas del suelo, determina la porosidad y la infiltración de agua,

mantiene o incrementa el secuestro de C, que influye en la retención y disponibilidad de nutrimentos esenciales para las plantas (Lal *et al.*, 1999).

2.3.3.4. Biomasa microbiana

El suelo es un cuerpo natural en donde habitan una gran cantidad de microorganismos y pequeños animales que están estrechamente asociados con la materia orgánica, la cual representa una fuente de carbono, energía y nutrientes para los microorganismos del suelo. La biomasa microbiana juega un papel importante en las propiedades químicas y físicas de los suelos. Está constituida principalmente por bacterias, actinomicetos, hongos, algas y protozoarios, los que participan activamente en la biodegradación de la materia orgánica que se incorpora al suelo (Buckman y Brady, 1991; Haider y Azad, 1991). Los beneficios y actividades de estos organismos están influenciados por el tipo y cantidad de residuos orgánicos disponibles (Stott *et al.*, 1999). El mismo autor menciona que algunas características de los suelos como textura, pH, aireación, concentración de sales y disponibilidad de nutrientes podrían tener un impacto sobre la actividad biológica de la biomasa microbiana. A través de la descomposición de residuos orgánicos y del humus del suelo la biomasa microbiana libera C, N, P y S, quedando disponibles para nuevas generaciones de microorganismos y para las mismas plantas terrestres (Buchanan y King, 1992). La biomasa microbiana en el suelo también es considerada como un índice que mide la calidad agrícola de éstos, porque los microorganismos intervienen directamente en el ciclo de los nutrimentos de las plantas (Rice *et al.*, 1986). Otra parte del material orgánico es sintetizada por los organismos del suelo y es transformada en humus (Voroney *et al.*, 1989). En los suelos agrícolas se ha estimado que la biomasa microbiana comprende de 0.5 a 4% (en promedio 2.1%) del COS (Chander *et al.*, 1999). La biomasa microbiana participa

activamente en el enlace de partículas del suelo dentro de los agregados, incrementando de esta manera la resistencia a la erosión y la protección de la materia orgánica del suelo (Stott *et al.*, 1999). Los microorganismos producen polisacáridos que ayudan a cohesionar las partículas del suelo y a resistir la erosión (Lee y Foster, 1991).

2.3.4. Factores que disminuyen el carbono orgánico del suelo

2.3.4.1. Erosión

La erosión es uno de los factores principales que ocasionan la degradación de los suelos, porque ocasiona la pérdida gradual de la capa cultivable, la pérdida de la MO, la pérdida de los minerales que contienen nutrimentos esenciales de las plantas, reduce el rendimiento de los cultivos y expone el subsuelo que tiene baja fertilidad; lo que trae como consecuencia pobreza y desnutrición (Lal, 1999). La erosión ocasiona cambios en las propiedades físicas (estructura, textura, infiltración) y químicas (propiedades mineralógicas) de los suelos por la disminución de la capa arable que afectan el rendimiento de los cultivos (Olson *et al.*, 1999).

Los tepetates aparecen en la superficie por la erosión del suelo, tienen un alto potencial de escurrimiento superficial y muy bajas tasas de infiltración, que los hace muy susceptibles a la erosión hídrica (Prat *et al.*, 1997; Oropeza *et al.*, 1997). La alta erosionabilidad de estos materiales se debe precisamente a la falta de estructura del tepetate. Los estudios sobre la erosión en México se han realizado generalmente en parcelas de tipo Wischmeier. Estas parcelas son sólo de referencia, cuyo tamaño de 22 x 2 m, son utilizadas para establecer los diferentes coeficientes que se requieren en la ecuación “universal” de pérdida de suelo, y de esta manera tener un marco de comparación con resultados obtenidos en otros lugares del

planeta con esta metodología. Arias *et al.* (1992) y Oropeza *et al.* (1997) calcularon la pérdida de suelo anual en tepetates no roturados y tepetates roturados de la Cuenca del Río Texcoco, y reportaron que para el primero la pérdida de suelo podía ser de más de 16 t ha⁻¹ año⁻¹, y desde 6 hasta 13.8 t ha⁻¹ año⁻¹ para tepetates cultivados. En contraste Prat *et al.* (1997) evaluaron directamente la erosión del tepetate en terrazas de 500 a 1800 m². En tepetate sin roturar estos autores obtuvieron valores de erosión de más 32 t ha⁻¹ año⁻¹, y en tepetates cultivados de 1 a 20 t ha⁻¹ año⁻¹. Las precipitaciones variaron de 420 a 800 mm por año. Sin embargo, unas cuantas lluvias (muy intensas) son las que ocasionaron la mayor parte de la erosión (Prat, 1997). Estos resultados fueron confirmados en experimentos similares realizados en la parte occidental del estado de Tlaxcala por Baumann y Werner (1997) y Fechter *et al.* (1997). Estos resultados de erosión se obtuvieron en parcelas que tenían obras de conservación de suelos, es decir, que estaban perfectamente delimitadas por bordes y niveladas con pendientes del 2 al 6%. Lo anterior significa que en parcelas de tepetate mal construidas, con pendientes fuertes y sin obras de conservación de suelos, la erosión podría ser mucho mayor.

La erosión medida a partir de las parcelas Wischmeier, al parecer, tiende a subestimar la erosión hídrica en los tepetates, sin embargo, en ambos casos es evidente la erosionabilidad de los tepetates es elevada. Por lo tanto es necesario tomar medidas para controlar la erosión después de habilitar los tepetates para el uso agrícola.

2.3.4.2. Oxidación del carbono orgánico del suelo

La oxidación es la pérdida de electrones que ocurren en un sistema y que forman parte de los diversos ciclos biogénicos que ocurren en la naturaleza (Sparks, 1988). La vida en el planeta depende del equilibrio de estos sistemas, en donde intervienen de manera activa los

animales, las plantas, el suelo, los mares, la atmósfera, etc. El intercambio de C entre el suelo y la atmósfera ocupa una posición importante dentro del ciclo global del C. La transformación del C en el suelo ocurre por la mineralización de la MO, la descomposición de los residuos de cultivo, la respiración de las raíces de las plantas y la respiración de la biomasa microbiana que convierten el C de forma orgánica a forma inorgánica por un proceso de oxidación, generando CO₂ (Curtin *et al.*, 1998). La oxidación del C del suelo también ha sido definida por Zibilske (1994) como la respiración del suelo, y es el resultado de la suma de todas las actividades metabólicas de diversos organismos como animales, plantas y microorganismos que producen CO₂ como resultado de la absorción de oxígeno. El grado de oxidación de la MO en los suelos agrícolas depende en gran medida del manejo agrícola. Al reducir la labranza, incluir leguminosas, rotar cultivos, fertilizar apropiadamente y reforestar tierras marginales ocurre una reducción en el flujo de CO₂ en el suelo (Campbell *et al.*, 1995). El secuestro de C en los suelos se da cuando la incorporación de residuos orgánicos es mayor que las pérdidas de C por emisión de CO₂ resultado de la oxidación biológica de la MO, descomposición de residuos de cultivo y respiración de las raíces (Curtin *et al.*, 1998).

2.3.4.3. Retiro de rastrojos y sistemas de cultivo

La incorporación de los residuos del cultivo al suelo es una práctica agronómica que contribuye a mantener o incrementar el C del suelo (Lal *et al.*, 1999.), sin embargo, en algunos lugares, estas prácticas son inusuales ya que muchas veces los esquilmos agrícolas son utilizados en la alimentación del ganado. Al retirar los rastrojos se ocasiona un desequilibrio en el suelo porque disminuyen las fuentes de incorporación de C y éste tiende a disminuir. Los sistemas de cultivo pueden aumentar o disminuir el contenido de C en el

suelo dependiendo del manejo agronómico (Robinson *et al.*, 1996). Fertilizaciones inadecuadas y monocultivos ocasionan un detrimento drástico en el contenido de C del suelo, mientras que las rotaciones de cultivo que incluyen leguminosas o cultivos con amplia cobertura vegetal pueden incrementar el contenido de C (Grant *et al.*, 2001), sin embargo, al cultivar el suelo de manera consecutiva durante 20 años, aún utilizando la rotación de cultivos, se provoca un decremento del C en el suelo (Bremer *et al.*, 1995). Esto se debe a que durante la preparación de la tierra (labranza) se incrementa la descomposición de la MO, se ocasiona pérdida de nutrimentos de las plantas y se reduce la cantidad de biomasa microbiana, aunado al retiro de rastrojos, se ocasiona un detrimento del C del suelo (Lal *et al.*, 1999).

2.3.4.4. Labranza

El término labranza se refiere a cualquier manipulación mecánica del suelo que altere la estructura o resistencia del mismo, con el objetivo de proporcionar y mantener en el suelo las condiciones óptimas para la germinación y desarrollo de las plantas (Figuroa, 1982). El propósito principal de la labranza es mullir el suelo para acondicionarlo a la germinación de las semillas, reducir la compactación, incorporar fertilizantes químicos y orgánicos y controlar las malas hierbas (Braunack y Dexter, 1989).

La vegetación permanente, por lo general favorece la estructura del suelo, la cantidad de raíces finas y la acumulación de C en el suelo, mientras que la labranza intensiva puede causar cambios adversos en las propiedades físicas de los suelos y reducir su calidad (Mann, 1986). Con la remoción mecánica del suelo se produce un declive en la cantidad de MO debido a cambios en la temperatura de la superficie del suelo, mayor aireación, exposición de nueva superficie del suelo a través de la ruptura de los agregados y

predisposición del suelo a la erosión (Dormar, 1983). La descomposición de residuos orgánicos es más lenta en la superficie del suelo que cuando éstos son incorporados al suelo mediante la labranza, porque se reduce el contacto con los microorganismos (Edwards *et al.*, 1992). Por otra parte la presencia de residuos orgánicos en la superficie del suelo reduce la evaporación, la temperatura y el intercambio de gases que interviene en la oxidación biológica de la MO (Reicosky y Lindstrom, 1993).

2.3.5. Carbono orgánico y las arcillas del suelo.

Los minerales de arcilla intervienen de manera importante en la formación y estabilidad de agregados del suelo. En varios estudios se ha mencionado que existe una fuerte correlación entre el contenido de C en el suelo y el contenido de arcillas, principalmente en suelos forestales (Nichols, 1984; Spain, 1990). Monreal y Kodama (1997) y Monreal *et al.* (1997) han mencionado que existe una fuerte asociación entre el C de los agregados del suelo y las arcillas del tipo expandibles (2:1). Sin embargo, otros estudios han demostrado que en muchas ocasiones el contenido de arcilla no se relaciona con el contenido de C del suelo, debido a que los minerales y tipo de arcillas influyen en la acumulación del C (Percival *et al.*, 1999). Sollins *et al.* (1996) y Torn *et al.* (1997) mencionaron que el C del suelo podría asociarse más con óxidos de Fe y Al. Así mismo Homann *et al.* (1997) y Burke, *et al.* (1989) han sugerido que el clima es el que controla la acumulación de C del suelo, especialmente en condiciones de alta humedad. Por otra parte las prácticas de labranza en el suelo ocasionan la dispersión de las arcillas y por lo tanto la inestabilidad de los agregados, lo que conlleva a la pérdida de C en el suelo y a una mayor predisposición de éste a la erosión hídrica (Fuller *et al.*, 1995).

3. OBJETIVOS E HIPOTESIS

3.1. Objetivos:

El presente estudio tiene los siguientes objetivos:

1. Evaluar el impacto de los diferentes sistemas de cultivo y manejo de residuos orgánicos en la acumulación de carbono orgánico y fósforo extractable en tepetates cultivados.
2. Evaluar el porcentaje de carbono orgánico asociado a los diferentes tamaños de agregados y su relación con la acumulación de carbono orgánico en tepetates cultivados.
3. Evaluar la influencia de la cantidad y tipo de arcillas con la acumulación de carbono orgánico en tepetates cultivados.

3.2. Hipótesis

1. La acumulación de carbono orgánico y fósforo extractable en tepetates es función del tiempo de cultivo, tipo de cultivo y manejo de residuos orgánicos.
2. El contenido de carbono orgánico y fósforo extractable se asocia mayormente a los agregados menores a 0.25 mm, que a otros tamaños mayores de agregados
3. La estabilidad de agregados está determinada en mayor grado por la cantidad de arcilla y tipo de arcilla, que por el contenido de materia orgánica.

4. MATERIALES Y METODOS

La zona de estudio se ubica en la Cuenca de México, en la parte media de la ladera noroccidental de la Sierra Nevada en el Estado de México, entre los $98^{\circ} 45'$ y $98^{\circ} 50'$ de longitud oeste, y $19^{\circ} 27'$ y $19^{\circ} 32'$ de latitud norte, dentro del Eje Volcánico Transversal. La altitud varía desde 2,300 hasta 2,900 m (Figura 3). Los procesos volcánicos del pasado y del presente hacen que la cuenca se caracterice por la presencia de una serie de volcanes, todavía activos, que han formado una serie de depósitos sucesivos y mezclados de tobas, brechas, andesitas, riolitas, ceniza volcánica y depósitos clásticos que pudieron ser afectados por glaciares hace unas decenas de miles de años. El relieve existente en la zona es en general accidentado, se caracteriza por una gran variedad de geformas con montañas aisladas bajas, cuevas con cañadas, con mesetas, laderas, montañas aisladas y lomeríos. En las partes más altas (altitud superior a los 2900 m) se encuentran las máximas pendientes, las cuales son superiores a 30 %, y en la parte baja (altitud inferior a 2400 m) las pendientes son más suaves. En los piedemonte a una altitud entre 2250 y 2900 m se encuentran situados los tepetates sobre pendientes que van de 11- 30 % (Zebrowski, 1992).

El clima en las vertientes de piedemonte y de la sierra, donde se encuentran los tepetates, varía según la altitud. La temperatura disminuye con ésta y la precipitación aumenta. De 2200 a 2800 msnm, hay una transición progresiva del régimen de humedad de ústico a údico, y de 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 aproximadamente de mayo a octubre. Durante la época lluviosa caen generalmente entre el 85 y 90% de la lluvia total anual, aunque hay años durante las cuales solamente caen 70% de las lluvias durante esta temporada. El mes de agosto, cuyas precipitaciones representan una cuarta parte de la lluvia total anual, constituye el mes más lluvioso del año.

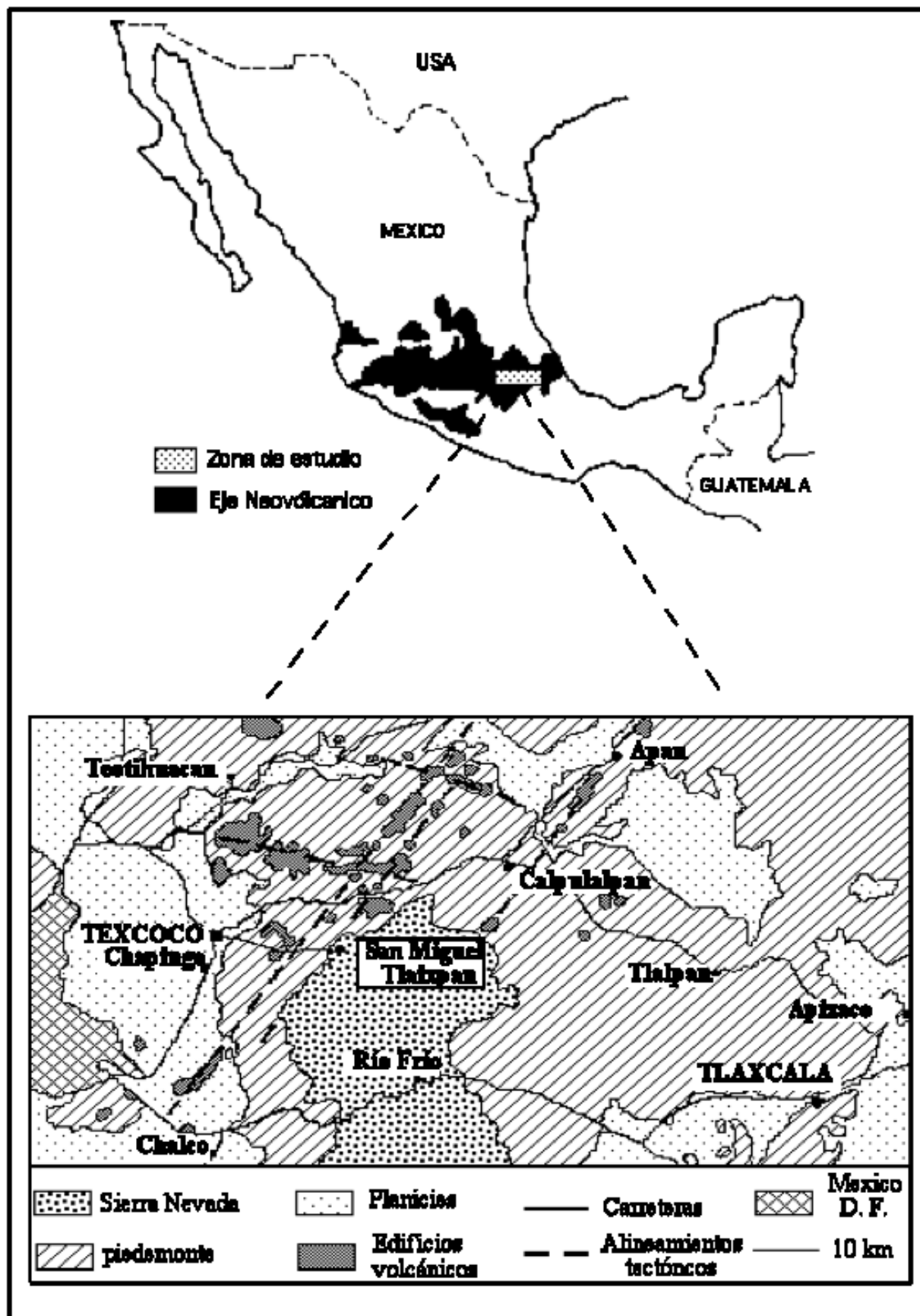


Figura 3. Localización del área de estudio.

(Peña y Zebrowski, 1993).

El clima determinado por Quantin *et al.* (1993) según la altitud es el siguiente: a 2200 m, es templado-cálido subárido; a 2600 m, es templado con un gradiente de aridez hacia subárido a mitad del piedemonte; a 2800 m, es subhúmedo y templado de transición; a 3400 m es húmedo y templado frío; a más de 3400 m, es perhúmedo y frío.

En la parte media de la toposecuencia, a 2550 m de altitud, fue donde se llevó a cabo el seguimiento agronómico de las parcelas experimentales de tepetate presentadas en este estudio. De acuerdo a la clasificación de Köppen modificado por García (1981), le corresponde un clima C(Wo)(w)b(i') templado sub-húmedo. La temperatura media anual es 14.7 °C y fluctúa entre 12 °C de diciembre a febrero y 18 °C durante junio a agosto. La precipitación está distribuida desde mayo hasta octubre y es, en promedio, de 620 mm por año; desde 1992 hasta 1995 se registraron precipitaciones anuales de lluvia desde 420 mm hasta 794 mm (Prat, 1997). El porcentaje de lluvias invernales es inferior que 5% del total anual. Su régimen de temperatura, es isotérmico (Peña y Zebrowski, 1992).

Los tipos de suelos que existen en el área de estudio varían según la altitud. Entre 2200 y 2300 m, que corresponde a un plano lacustre con pendientes menores a 2%, los suelos son fluvisoles y los tepetates se encuentran aproximadamente a 3 m por debajo de estos suelos. Entre 2300 y 2800 m en el piedemonte se encuentran suelos cambisoles, phaeozems y vertisoles; en general, los suelos en estos intervalos son de mediana a poca profundidad; y los tepetates se encuentran de 0.5 a 2 m por debajo de estos suelos. También existen afloramientos de roca andesítica o brecha sedimentada. Por arriba de los 2800 msnm con pendientes de 20 a 60% se encuentran andosoles, debajo de los cuales los tepetates están cubierto por suelos muy profundos (varios metros). El clima perhúmedo de esta parte de la toposecuencia, dificulta la identificación y ubicación de los tepetates (Figura 4).

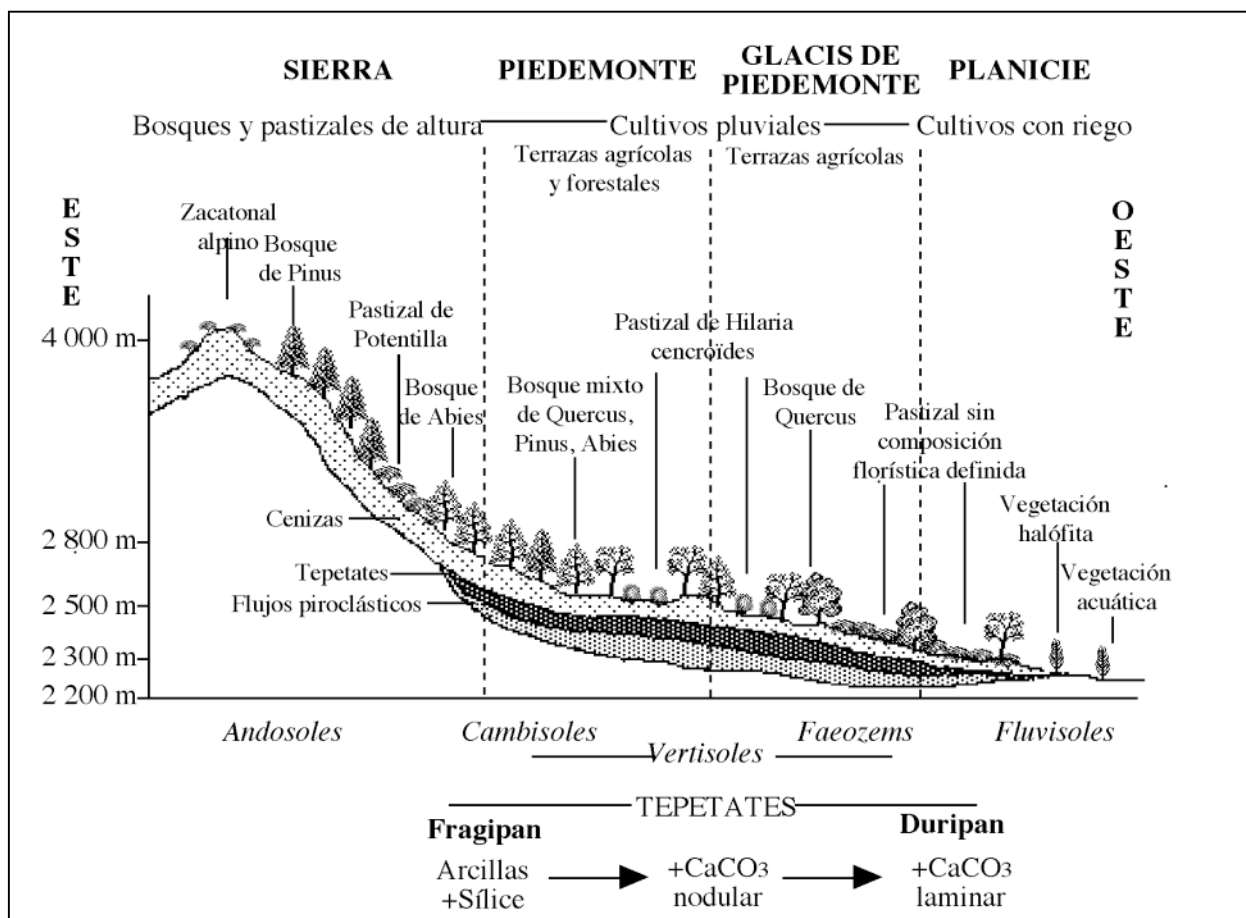


Figura 4. Ubicación de los tepetates. (Quantín *et al.*, 1993).

Los asentamientos humanos del pasado y del presente en el área de estudio, han modificado notablemente el paisaje de la zona de estudio. La vegetación original era bosques de pino y encino. Actualmente es posible identificar aún reducidas áreas forestales, agostaderos, terrenos de cultivo y muchas áreas degradadas donde aflora el tepetate. De estas últimas, pequeñas áreas han sido roturadas y reforestadas con eucaliptos y acacias, y otras han sido incorporadas a la agricultura, pero la mayor parte del tepetate no se ha roturado y los suelos continúan erosionándose. Los principales cultivos que siembran los campesinos en estos tepetates roturados son: maíz (*Zea mays* L.), fríjol (*Phaseolus vulgaris* L.), trigo (*Triticum vulgare* L.), cebada (*Hodeum vulgare* L.), haba (*Vicia faba* L.) y algunas especies ornamentales como agapando (*Agapanthus africanus* Hoffmans), crisantemo

(*Chrysanthemum frutescens* L.), dalia (*Dalia pinata* Cav.), zempoalxuchitl (*Tarjetas erecta* L.) y flor de nube (*Gypsophila paniculata* L.); en menor escala también algunos frutales como ciruelo (*Prunus domestica* L.), durazno (*Prunus persica* L.), chabacano (*Prunus americana* L.), tejocote (*Crataegus pubescens* HBK Steud.), manzano (*Pyrus malus* L.) y peral (*Pyrus communis* L.). Otro tipo de uso que ha venido disminuyendo notablemente en los últimos años, es como material de construcción en casas, mientras que se ha incrementado su uso en carreteras, caminos y relleno en áreas habitacionales. Ocasionalmente se han roturado tepetates y construido invernaderos en esos lugares.

Las parcelas incluidas en el presente estudio correspondieron a horizontes de tepetate duros que afloraron a la superficie, después de que el suelo original se perdió por erosión. Éstos fueron roturados mecánicamente y cultivados. Se utilizó la propuesta de clasificación de tepetates hecha por Quantin *et al.* (1993): t1, t2 y t3 con y sin carbonatos. La mayoría de las parcelas de tepetate incluidas en este estudio corresponde con lo que denominó tepetate T3 sin carbonatos. Tal denominación deriva de su asociación de los criterios estratigráficos de tobas T1, T2 y T3 propuesto por Miehlich (1992).

4.1. Carbono orgánico del suelo, sistemas de cultivo y manejo de residuos

Para la realización de este estudio fue necesario primero construir una base de datos confiable, que permitiera identificar sitios cultivados, tiempo transcurrido desde su habilitación, tipo de cultivos, manejo de los residuos y características generales de los sitios. Para la construcción de la base se realizaron recorridos, entrevistas, muestreos y análisis para la caracterización química.

4.1.1. Base de datos

Los sitios de tepetate rehabilitados que se incluyen en este estudio, provienen de cuatro comunidades de la Cuenca del río Texcoco: San Pablo Ixayoc, Nativitas, Tequexquinahuac y San Dieguito Xochimanca; y cinco comunidades aledañas a la Cuenca: San Miguel Tlaixpan, Santa Catarina del Monte, Santa María Tecuanulco, Tepetlaoxtoc y Apipilhualco; las cuales se encuentran en las cercanías de Texcoco, Estado de México (Figura 5).

4.1.1.1. Recorridos y entrevistas

Se hicieron recorridos de reconocimiento en las comunidades mencionadas, para ubicar y hacer una selección de parcelas de tepetate cultivado con una serie de características que permitieran construir una base de datos, donde se pudieran agrupar distintas condiciones de manejo agrícola. Se entrevistó a los dueños de las parcelas y se obtuvo información sobre el tiempo transcurrido desde la roturación, especies de plantas comúnmente cultivadas, rotación de cultivos, manejo de residuos orgánicos, tipo de labraza y tipo de fertilizantes empleados. El cuestionario utilizado se muestra en el Cuadro (3)

La información proporcionada por los productores se verificó mediante una inspección ocular en las parcelas. Por ejemplo, si el agricultor mencionaba que incorporaron regularmente estiércol a su parcela, se buscó la evidencia en el campo de tal afirmación, para construir un historial agronómico confiable de cada parcela seleccionada, desde el momento que fueron roturadas hasta la actualidad. Por razones fáciles de comprender, la información de las parcelas con mayor tiempo desde su roturación, no es de igual calidad que las de aquellas roturadas en tiempos más recientes.

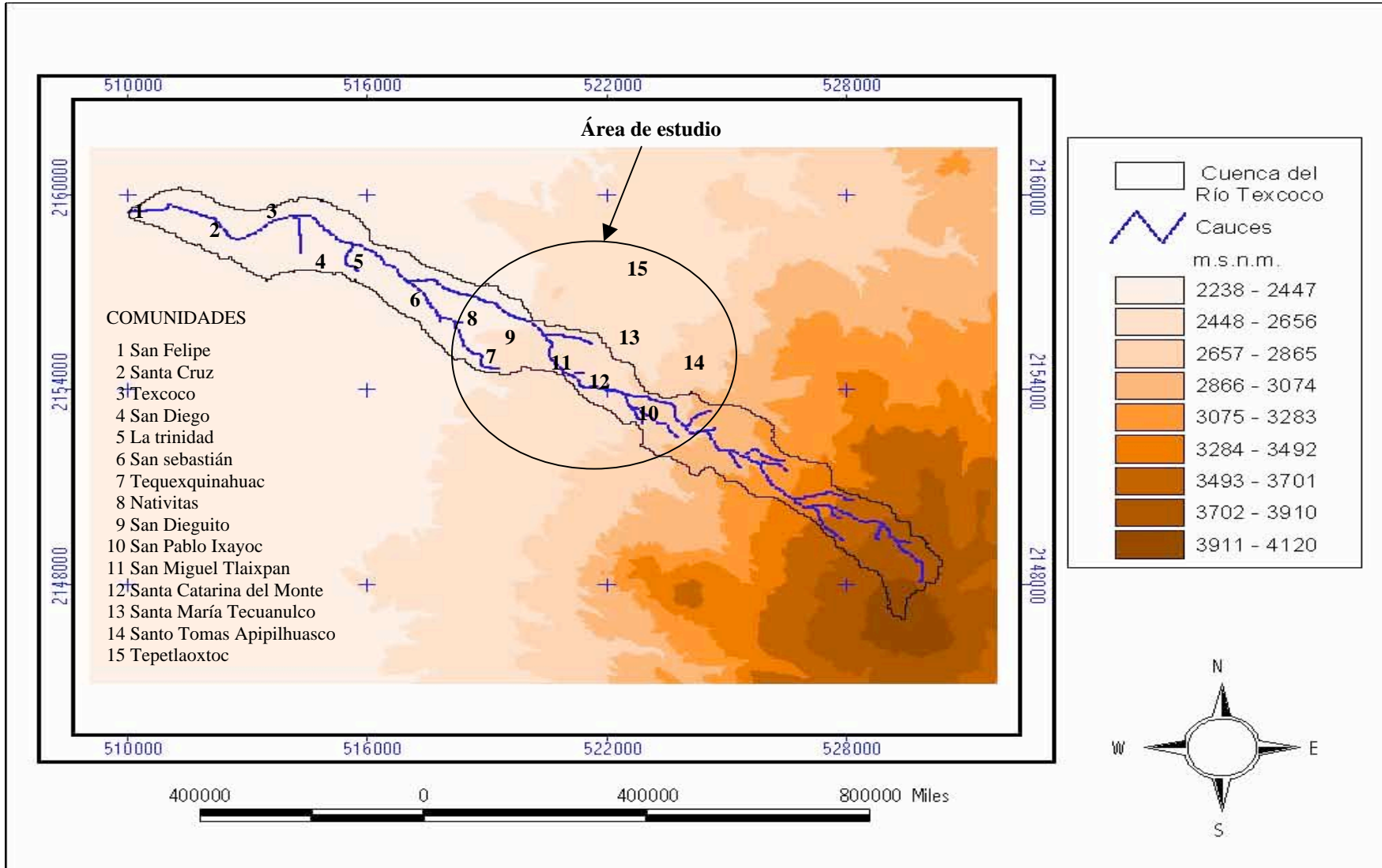


Figura 5. Comunidades de la Cuenca del Río Texcoco

Cuadro 3. Cuestionario elaborado para las entrevistas a productores.

Ubicación de la parcela: Comunidad _____	Coordenadas geográficas _____
Nombre del productor: _____	
Roturación hecha con: Buldózer _____	Pico y pala _____ Otro _____
Tiempo de cultivo: Año de roturación _____	Primer año de cultivo _____
Cultivos: _____	
Sistema de cultivo: Monocultivo _____	Asociación _____ Rotación de cultivos _____
Incorporación de esquilmos agrícolas: Mucho _____	Poco _____ Nada _____
Incorporación de estiércoles: Mucho _____	Poco _____ Nada _____
Tipo de estiércol: _____	
Fertilizantes químicos: Siempre _____	Ocasionalmente _____ Nunca _____
Tipo de fertilizantes: _____	
Tipo de labranza: _____	
Riego: Siempre _____	Ocasionalmente _____
Temporal: _____	

En esta etapa fue importante considerar la edad del productor así como su personalidad, ya que comúnmente, los agricultores de mayor edad eran los que conocían el historial completo de las parcelas de tepetate cultivado. En muchos casos se encontraron parcelas con rasgos interesantes para ser incluidas en el estudio, pero que habían sido heredadas a los hijos al fallecer los dueños, y la gente que quedó a cargo de éstas no sabía el historial de la parcela; es más, en algunas ocasiones ni siquiera sabían que se trataba de una parcela de tepetate. Otra manera de verificar la información fue tomar en cuenta como referencia algunas fechas importantes, por ejemplo, si el dato de año de roturación de las parcelas de

tepetate más frecuente coincidía con los programas de roturación y reforestación que se hicieron en la región en inicio de los años setenta, lo cual sirvió como referencia para ajustar algunas fallas de memoria. También se identificó el tipo de tepetate a partir del cual fueron hechas las terrazas, y si se contaba con obras de conservación de suelo o no. De esta manera se obtuvo información de 106 parcelas de tepetate que mostraron variadas condiciones de los parámetros antes mencionados. Seis de estas parcelas (San Miguel Tlaixpan) eran experimentales y se cuenta con información cuantitativa muy precisa. El autor de esta tesis, trabajó durante 4 años continuos en dichas parcelas.

4.1.1.2. Muestreo

De las 106 parcelas incluidas en el registro original se seleccionaron 100 (de tepetate cultivado), en su mayoría del tipo t3, sin carbonato de calcio. El criterio de selección comprendió tres variables independientes: tiempo de roturación, tipo de cultivos y manejo de residuos orgánicos. Las parcelas seleccionadas reunieron características específicas de homogeneidad en cuanto al manejo agrícola (tipo de cultivo, la adición de fertilizantes químicos y orgánicos, el tipo de labranza, etc.) y tipo tepetate.

Se hicieron dos muestreos de suelo: uno para determinaciones químicas y otro para determinaciones físicas. Para el primero se utilizó una barrena de acero inoxidable y se tomaron 22 sub-muestras de suelo por parcela, obteniendo una muestra compuesta de aproximadamente 2 kg de tierra. El muestreo se hizo en forma de zigzag, de 0 a 20 cm de profundidad, que es la capa arable en donde se encuentra la mayor cantidad de raíces, aproximadamente 95% de los residuos orgánicos y la mayor actividad de microorganismos (Etchevers, 1995). Para definir las condiciones más homogéneas posibles de cada parcela se utilizó el criterio del investigador, tomando en cuenta que la heterogeneidad que existe en

una parcela de cualquier tamaño, es aproximadamente la misma que existe en 1 m², siempre y cuando la unidad de producción presente condiciones homogéneas en cuanto al tipo de suelo y manejo agronómico. El número de sub-muestras recomendadas para hacer trabajos de correlación y calibración es de 40, mientras que para diagnóstico puede ser de 15 a 25 (Etchevers, 1985).

Para el segundo muestreo se utilizó una pala recta y se hicieron cinco pozos por parcela en forma de cubo cada uno, de 20 cm por lado, obteniendo una muestra compuesta de aproximadamente 5 o 6 kg. La localización de los pozos se hizo en zig zag.

4.1.1.3. Procesamiento de las muestras

Las muestras para análisis físicos y químicos fueron extendidas en charolas de aluminio en un cuarto acondicionado para la desecación a la sombra y a temperatura ambiente. En el caso de las muestras para análisis químico, éstas fueron molidas con un martillo de madera, pasadas por un tamiz de acero inoxidable de 2 mm, homogeneizadas y almacenadas en frascos de plástico.

4.1.1.4. pH y conductividad eléctrica

La medición de pH se hizo en agua (relación 2:1) con un potenciómetro Conductronic pH 20. Se pesaron 10 g de suelo tamizado en malla de 2 mm en vasos de precipitado de plástico de 50 ml, se agregaron 20 ml de agua destilada y se agitó de forma manual por 1 minuto con una varilla de vidrio. La suspensión se dejó reposar por 15 minutos y se repitió la agitación. La lectura se tomó a los 30 minutos de la primera agitación, después de volver a suspender el suelo. Para la conductividad eléctrica se usaron las mismas muestras donde se midió el pH. Se agregaron 30 ml de agua destilada y se agitaron por un minuto

nuevamente. Se dejaron reposar por 16 horas y se midió la conductividad eléctrica en un conductimetro YSI modelo 31.

4.1.1.5. Carbono orgánico

El carbono del suelo está constituido por carbono orgánico (C) y carbono inorgánico (CI), que juntos constituyen el carbono total del suelo (CT). El C proviene de residuos de vegetales, animales y de toda la actividad biológica, mientras que el CI proviene de algunas reacciones químicas que se dan de manera espontánea en la naturaleza y que según las condiciones medio ambientales puede favorecer la acumulación de carbonatos y bicarbonatos (Jackson, 1976).

Se hizo la medición de carbono del suelo mediante un determinador automático de carbono marca Shimadzu, modelo TOC-5050A, el cual cuenta con un software que permite obtener de manera directa los resultados de carbono total CT a partir de una curva de calibración hecha con sacarosa. También se puede medir el CI a partir de una curva de calibración hecha con carbonato de sodio.

Para determinar el C fue preciso medir primero el CT y restarle el CI. Las muestras utilizadas para la prueba de CT fueron secadas al aire y a la sombra, se les extrajo manualmente las raíces y piedrecillas grandes observables a simple vista y luego fueron molidas en un mortero de porcelana y tamizadas en malla 100. Se pesaron aproximadamente 0.8 g de muestra, perfectamente homogenizada, en unos crisoles especiales de porcelana. Las muestras se colocaron en el horno del módulo de sólidos, del determinador automático de carbono (TOC-5050A), donde fueron sometidas a un proceso de combustión seca a temperatura de 900 °C durante 3 a 4 minutos. El módulo del aparato

TOC-5050A mide la cantidad de CO₂ desprendido de la muestra mediante un censor infrarrojo.

4.1.1.6. Carbono inorgánico

El CI en las muestras fue medido en el mismo modulo de sólidos del TOC-5050A, en una unidad alterna al CT que se puede trabajar por separado. El procedimiento fue básicamente el mismo que en la determinación de CT, sólo que en este caso se adicionaron 3 ml de ácido fosfórico sobre los crisoles conteniendo las muestras, previo a la combustión que fue a 200 °C. La determinación de CI se hizo en todas aquellas muestras donde el pH fue superior a 7.8. Las muestras con pH alcalino o ligeramente alcalino indican la posible presencia de carbonatos.

4.1.2. Carbono orgánico y contenido de raíces pequeñas en el suelo

Antes de efectuar los análisis definitivos de CT, se hicieron algunas pruebas para determinar si al incluirse las raíces pequeñas se subestiman significativamente el contenido de carbono orgánico que está incorporado en el suelo. Esta prueba fue necesaria para tomar la decisión de eliminar o no las raíces pequeñas y otros residuos vegetales que son difíciles de extraer de forma manual en las muestras donde se medirá carbono. El proceso fue un poco laborioso, pero si al final dichos residuos vegetales no afectan significativamente los resultados, es posible soslayar este paso.

Se seleccionó una serie de muestras que contenían un amplio intervalo de variación en el contenido de carbono orgánico, desde casi nada (muestras de tepetate) hasta más de 12% (muestras de bosques tropicales). Las muestras fueron secadas al aire a temperatura ambiente y tamizadas en malla de 2 mm perfectamente homogeneizadas, y extendidas

sobre un papel para dividir las en cuatro partes iguales. Las dos partes opuestas se juntaron y se obtuvieron finalmente dos sub-muestras muy homogéneas. Una de éstas fue molida directamente con todo y raíces finas en un mortero de porcelana y tamizada en malla 100. La otra sub-muestra le fueron extraídas raíces y hojarasca muy fina. El método consistió en tamizar primero la sub-muestra en malla de 0.05 mm, para separar de este modo la fracción del suelo más fina, la otra parte fue vaciada en un recipiente de vidrio de aproximadamente 150 mm lleno de agua. Las partículas más pesadas, que correspondieron al suelo, quedaron en el fondo del frasco y las partículas más finas junto con raíces y hojarasca quedaron flotando en el agua. El sobrenadante se pasó por un tamiz de malla 100 y casi todo el material vegetal quedó atrapado en el tamiz. Otra parte quedó pegada en las paredes del frasco y se limpió con una tela de nylon. Cuando se observó que algunas partículas de vegetales continuaban flotando el agua se regresó al primer frasco y se repitió la operación. Se procuró que toda el agua quedara en un sólo frasco. Una vez que se eliminaron las raíces se agregaron unas gotas de alumbre ($K_2SO_4 \cdot Al_2(SO_4)_3 \cdot 24H_2O$) al frasco para precipitar rápidamente las partículas más finas, ya que de otro modo al someterse al secado, todas éstas quedarían pegadas a las paredes del envase. Las sub-muestras fueron secadas en una estufa por 24 horas a 100 °C y después molidas en un mortero de porcelana y tamizadas en un tamiz de malla 100. Finalmente se efectuaron las determinaciones de CT como se describió en el punto anterior.

4.1.3. Carbono orgánico y los sistemas de cultivo

Se hizo una agrupación discreta de las parcelas en función del manejo agronómico y grado de erosión. Se establecieron en nueve categorías o clases diferentes. Los resultados de C de

estas clases se promediaron y ordenaron crecientemente para observar la tendencia de la acumulación de C por sistema de cultivo. Las clases de manejo se describen a continuación:

- I- **Tepetate recién roturado:** Corresponde a aquellas parcelas que fueron roturadas recientemente y se tomaron muestras antes de que fueran cultivadas por primera vez. Se sabe que la actividad biológica de los tepetates antes de su roturación es muy baja, por lo que se espera que esta clase se ubique en el nivel más bajo en cuanto a su contenido de carbono orgánico.

- II- **Parcelas mal laboreadas o abandonadas:** Corresponde a aquellas parcelas en donde había evidencias de erosión fuerte, terrazas sin bordos con presencia de canalillos o cárcavas y por lo regular muy descuidadas.

- III- **Parcelas con monocultivo de gramíneas:** Corresponde a aquellas parcelas que todo el tiempo fueron cultivadas con maíz, cebada o trigo, y nunca fueron fertilizadas con abonos orgánicos de ninguna clase. Regularmente en estas parcelas los esquilmos agrícolas fueron retirados. Sin embargo, ocasionalmente fueron fertilizadas con un poco (de 50 a 100 kg ha⁻¹) de fertilizante químico, que en más de 90 % corresponde solamente a nitrógeno.

- IV- **Parcelas con leguminosas o estiércol:** Corresponde a aquellas parcelas que fueron cultivadas frecuentemente con leguminosas y se les incorporó ocasionalmente un poco de estiércoles o esquilmos agrícolas. También se

incluyeron en esta clase monocultivos de maíz, pero con incorporación ocasional de abonos orgánicos.

- V- **Labranza cero:** Correspondió a aquellas parcelas sembradas con algunas especies perennes ornamentales como agapando, nopal y maguey. y por lo tanto no se labro el suelo.

- VI- **Parcelas con leguminosas y mucho estiércol:** Es en igual condición que en la clase IV, pero la incorporación de estiércol es mucho más frecuente e intensiva.

- VII- **Parcelas en invernadero con riego:** Correspondió a aquellas parcelas que fueron tratadas como cama de invernadero. Se incorporaron regularmente abonos orgánicos y químicos, se sembraron flores de ornato y se uso el riego.

- VIII- **Parcelas con labranza cero y riego:** Correspondió a una parcela donde se cultivaron agapandos, plantas medicinales y frutales, con incorporación frecuente de abonos orgánicos y uso del riego.

- IX- **Parcelas en invernadero con manejo muy intensivo y riego:** Correspondió a aquellas parcelas que fueron tratadas como cama de invernadero, se incorporaron abonos orgánicos en mayor cantidad y de varios tipos (vacuno, porcino, madera podrida molida y pajas), se usan abonos químicos y cultivaron flores de ornato. Los residuos orgánicos fueron molidos antes de ser incorporados, se utilizó constantemente el riego y su uso fue muy intensivo.

Los resultados de este ejercicio se graficaron empleando como variable dependiente el C medido como se indicó más arriba, y como variable independiente las clases de manejo.

4.1.4. Carbono orgánico y tiempo de cultivo del tepetate

Para inferir si el contenido de C de las parcelas de tepetate cultivado estaba relacionado con el tiempo de cultivo, se correlacionó este parámetro y el tiempo de cultivo que varió de 0 a 100 años.

4.1.5. Carbono orgánico y tiempo de cultivo en cuatro sistemas de cultivo a través del tiempo

La información se agrupó por sistema de cultivo y se establecieron cuatro clases, que fueron las que contaron con información suficiente (años de cultivo) para observar la acumulación del C a través del tiempo. Siempre se partió de cero años de cultivo (tepetates recién roturados) para observar el comportamiento de C desde que éste se comenzó a acumular, hasta el mayor tiempo transcurrido desde que fueron roturados por primera vez. Se utilizó el valor promedio de C obtenido por cada clase para compararlo con el tiempo de cultivo. Las clases que se designaron fueron las siguientes:

Monocultivo: Correspondió a parcelas que durante todo el tiempo fueron cultivadas con cereales, principalmente maíz, cebada, trigo y ocasionalmente alguna leguminosa, y que se agregó muy poco o nada de abonos orgánicos.

Leguminosas: Correspondió a parcelas que durante el tiempo que han sido cultivadas, se han usado frecuentemente las leguminosas, ya sea que hayan sido cultivadas en asociación o en rotación de cultivos, y donde se han agregado muy poco o nada de abonos orgánicos.

Estiércol: Corresponde a parcelas que durante el tiempo que han sido cultivadas, se les incorporaron frecuentemente abonos orgánicos y pueden haber sido cultivadas con algunas leguminosas.

Labranza cero: Corresponde a parcelas que durante el tiempo que han sido cultivadas, el suelo no ha sido removido. Estas parcelas generalmente se siembran plantas ornamentales como el agapando combinado con algunos frutales como el peral, principalmente. Así será considerado para este manuscrito.

Con tales agrupaciones se pretende estudiar la acumulación de C y P según el manejo agronómico, y predicción de la acumulación de éstos a través del tiempo. En el Cuadro 4 se presentan las variables de estudio.

Cuadro 4. Variables de estudio.

Condiciones estudiadas		Variable de respuesta
Años de cultivo	0, 1, 2, 3... más de 100 años	C, P
Sistema de cultivo	monocultivo, asociado, rotación	"
Tipo de cultivo	leguminosas, gramíneas, ornamental	"
Manejo de residuos orgánicos	incorporación, sin incorporar	"

Para obtener toda esta información se previó desde que se hicieron los recorridos de campo y las entrevistas, incluir parcelas de tepetate con las condiciones más diversas en cuanto manejo agrícola y tiempo de cultivo, sin embargo, no fue posible contar con la información completa que indicase el comportamiento de C en todos los sistemas de cultivo propuestos en el punto 4.1.3.

4.1.6 Carbono orgánico y fósforo extractable del suelo

El C del suelo se correlacionó con el contenido de P extractable del suelo. El P extractable del suelo se midió por el método propuesto por Olsen (Olsen y Dean, 1965) que es propio

para suelos básicos o ligeramente básicos. Todo el material utilizado para esta determinación fue lavado en ácido y enjuagado con agua desionizada. Para la preparación de los reactivos también se utilizó agua desionizada. El procedimiento de medición consistió en pesar 2.5 g de suelo y colocarlos en tubos de polipropileno de 100 ml, a los que se le agregó 50 ml de solución extractora de bicarbonato de sodio 0.5 M, ajustado a pH de 8.5. Los tubos se taparon y se colocaron de forma horizontal en un agitador mecánico de vaivén, y se agitaron por 30 minutos a razón de 180 opm. La suspensión se filtró inmediatamente a través de papel Ahlstrom no. 6100-1250. Se tomó una alícuota de 10 ml del filtrado y se colocó en un matraz Erlenmeyer de 50 ml, se adicionó un poco de agua desionizada, 5 ml de la mezcla del molibdato de amonio con el reductor (ácido ascórbico) y se aforó con agua desionizada. Para la valoración de la absorbancia del complejo coloreado reducido, se utilizó un equipo Spectronic 20D regulado a 882 nm. La lectura se hizo entre 30 minutos y una hora después de adicionado el reductor.

4.1.6.1. Fósforo extractable del suelo y sistemas de cultivo

Para conocer cómo se relacionaba el fósforo extractable del suelo con el tiempo transcurrido desde la roturación del tepetate para un grupo seleccionado de manejos agronómicos, se siguió el mismo procedimiento usado en el punto 4.1.3.

4.1.6.2. Fósforo extractable del suelo en cuatro sistemas de cultivo a través del tiempo

Para inferir el comportamiento del C a través del tiempo se hicieron dos tipos de correlaciones: primero, se compararon de manera general todos los datos, empleando como variable independiente el tiempo y como variable dependiente el contenido de P extractable

Olsen. La segunda correlación se obtuvo a partir de la media, obtenida después de agrupar los datos de igual manera que en el punto 4.1.5.

4.1.7. Carbono orgánico en seis parcelas experimentales

El C y fósforo extractable Olsen se analizaron en detalle en seis parcelas experimentales de tepetate cultivadas en San Miguel Tlaixpan, Texcoco. Estas parcelas fueron sometidas a rehabilitación y a la producción agrícola por 4 años continuos bajo diferentes condiciones de manejo agrícola y estricto control de plagas, enfermedades, hierbas y erosión.

Los tratamientos estudiados fueron los siguientes:

T1: Asociación + Profundidad de roturación (60 cm)

T2: Monocultivo + roturación a 45 cm

T3: Asociación + Incorporación de estiércol (43 t ha^{-1} de estiércol seco de bovino)

T4: Asociación + Terreno más mullido

T5: Asociación + roturación a 45 cm

T6: Suelo phaeozem (testigo)

La roturación del tepetate se hizo con un Caterpillar D7. Después de haber limpiado y delimitado el área de las terrazas, se roturó en forma lineal, a 15 cm de separación entre líneas. Después se hizo otro paso de roturación de igual manera que el anterior, pero de forma perpendicular a las líneas anteriores, de tal modo que se roturó en forma de cuadrícula. Los bordes de las terrazas se fueron conformando durante la roturación y al final de la labor, se complementaron. Las terrazas fueron niveladas y al final se obtuvo una pendiente de 2 a 5%. La profundidad de roturación en esas parcelas fue de 45 cm para todos

los casos, a excepción de T1, que fue de 60 cm. En T4 se hizo cada labor dos veces para mullir más el terreno. El tipo de labranza utilizado fue convencional, es decir, se hicieron labores de nivelación, rastreo, barbecho y/o surcado en cada ciclo de cultivo. En el Cuadro 5 se presentan las modalidades e implementos agrícolas utilizados.

Cuadro 5. Labores agrícolas realizadas en los ciclos de cultivo. Experimento en San Miguel Tlaixpan, Texcoco.

Labor agrícola	Implemento agrícola	Tracción
Chaponeo	Chaponeadora	Tractor
Nivelación	Niveladora de “cuchilla”	Tractor
Barbecho	Arado de discos	Tractor
Rastra	Arado de discos	Tractor
Surcado	Arado de vertederas	Tractor
Siembra	-	Manual
Fertilización	-	Manual
Aporcado	Arado de doble vertedera	Animal
Deshierbe	Arado de doble vertedera	Animal y manual
Cosecha	-	Manual

En 1993 se sembraron 105 kg ha⁻¹ de cebada y 21 kg ha⁻¹ de veza en la asociación cebada/veza. En el monocultivo de cebada se sembraron 150 kg ha⁻¹ de semilla. En 1994 se sembró la asociación maíz + frijol + haba; la distancia entre matas fue 33 cm y el ancho de los surcos 85 cm. Se sembraron 3 semillas de haba, 4 de maíz y 4 de frijol por mata, pero después de la emergencia se aclaró y se dejaron 2 plantas de haba, 3 de maíz y 3 de frijol, por mata. La población fue de 25 000, 37 000 y 37 000 plantas ha⁻¹, respectivamente. En el monocultivo de maíz la distancia entre matas fue de 40 cm y se aclaró a tres plantas por mata después de la emergencia, la población fue de 60 000 plantas ha⁻¹. En 1995 se sembró la asociación maíz + haba, la distancia entre matas fue de 40 cm, sembraron 3 semillas de haba y 4 de maíz por mata, se aclaró después de la emergencia a 3 plantas de maíz y 2 de haba por mata y la población fue de 46 900 y 31 250 plantas ha⁻¹, respectivamente. En

1996 se sembraron 105 kg ha⁻¹ de cebada y 21 kg ha⁻¹ de medicago en la asociación cebada/medicago.

En el Cuadro 6 se presentan las rotaciones de cultivo utilizadas, fertilizantes empleados y otras condiciones de manejo agrícola. En el Cuadro 7 se presenta la cantidad de esquilmos agrícolas incorporados por año de cultivo y en el Cuadro 8 los rendimientos de grano.

Cuadro 6. Cultivos y fertilizantes. Experimento en San Miguel Tlaixpan, Texcoco. (Prat y Báez, 1998).

T ¹	1993		1994		1995		1996	
	Cultivos ²	N-P-E	Cultivos	N-P-E ³	Cultivos	N-P-E	Cultivos	N-P-E
T1	C+V	80-60-00	M+F+H	70-60-00	M+H	70-60-00	C+Me	100-80-00
T2	C	80-60-00	M	70-60-00	M	70-60-00	C	100-80-00
T3	C+V	80-60-13	M+F+H	70-60-7	M+H	70-60-7	C+Me	100-80-16
T4	C+V	80-60-00	M+F+H	70-60-00	M+H	70-60-00	M+H	100-80-00
T5	C+V	80-60-00	M+F+H	70-60-00	M+H	70-60-00	M+H	100-80-00
T6	C+V	80-60-00	M+F+H	70-60-00	M+H	70-60-00	M+H	100-80-00

1: Tratamientos; **2:** cebada, V: veza, M: maíz, F: fríjol, H: haba, Me: medicago; **3:** N: sulfato de amonio en kg ha⁻¹, P: superfosfato de calcio triple en kg ha⁻¹, E: estiércol de bovino seco en t ha⁻¹.

Cuadro 7. Paja incorporada. Experimento en San Miguel Tlaixpan, Texcoco. (Prat y Báez, 1998).

ref.	1993		1994			1995		1996			total	
	Cebada	veza	maíz	fríjol	haba	maíz	haba	cebada	medicago	maíz		haba
	-----Mg ha ⁻¹ -----											
T1	2.1	0.2	3.1	0.1	1.9	3.1	1.1	1.3	0.1			13.0
T2	3.5	-	7.5	-	-	5.0	-	1.3	-			17.3
T3	2.8	0.5	1.2	0.1	1.2	2.7	1.2	3.6	0.1			13.4
T4	2.9	0.8	3.3	0.2	1.8	3.4	1.3			2.5	1.0	15.2
T5	3.7	1.1	3.6	0.1	2.0	2.7	1.2			2.7	0.5	17.6
T6	2.3	0.3	2.4	0.1	1.0	3.1	0.5	2.3	0.0			10.2

Cuadro 8 Rendimiento de grano. Experimento en San Miguel Tlaixpan, Texcoco. (Prat y Báez, 1998).

ref.	1993		1994			1995		1996				total
	Cebada	veza	maíz	fríjol	haba	maíz	haba	cebada	medicago	maíz	haba	
	-----Mg ha ⁻¹ -----											
T1	1.6	0.2	0.9	0.1	1.2	1.1	0.6	1.4	0.1			7.2
T2	2.0	-	1.9	-	-	1.3	-	1.6	-			6.8
T3	2.6	0.4	0.5	0.1	1.0	0.6	0.4	1.9	0.1			7.6
T4	2.2	0.7	0.8	0.2	1.2	1.1	0.5			2.5	0.8	10.0
T5	3.1	0.9	0.9	0.1	1.1	1.1	0.6			2.4	0.5	10.7
T6	2.5	0.2	0.9	0.1	1.0	2.6	0.3	1.2	0.1			8.9

4.2. Carbono orgánico y algunas mediciones físicas del tepetate

En esta sección se hizo una selección previa de las muestras más representativas. Para las pruebas de estabilidad de agregados se trabajó con poco más de un tercio de lo utilizado en la sección anterior. Para las mediciones de C por tamaño de partícula en agregados y fragmentos se utilizaron 10 casos particulares que fueron representativos de la condición que presentaron. Antes de describir los métodos es importante mencionar algunos aspectos físicos sobre el sustrato resultante después de roturar el tepetate, que es el objeto de observación en este estudio. Al roturar horizontes endurecidos (tepetates) se generó una gran cantidad de fragmentos de consistencia friable y de gran diversidad de tamaños, desde polvo hasta bloques de gran diámetro, y por supuesto que en este momento no había agregados. De este modo es posible que al emplear los métodos de estabilidad de agregados en estos tepetates, lo que realmente se estaba midiendo es la estabilidad de los fragmentos. Para determinar si el grado de desintegración de los fragmentos estaba relacionado con la formación de agregados del suelo, y ésta a su vez con la captura de carbono, se llevaron a cabo los siguientes experimentos:

4.2.1 Carbono orgánico y estabilidad de agregados en húmedo

La evaluación de la estabilidad de agregados se realizó para obtener información sobre su distribución, cantidad y estabilidad. Se relacionó el C con la estabilidad de agregados medida en húmedo por el método propuesto por Kemper y Rosenau (1986), que consiste en usar un equipo Yoder integrado por un juego de tamices de 4.76, 3.36, 2.00, 1.00, 0.50 y 0.25 mm. El recipiente del equipo Yoder se llenó con agua hasta un nivel en el que el tamiz de mayor diámetro colocado en la parte superior de la columna de tamices sobrepasara 4 o 5 cm el nivel del agua en su posición superior de oscilación. De esta forma la columna de tamices queda totalmente cubierta de agua en la posición inferior de oscilación del equipo Yoder. Se pesaron muestras de 100 g de suelo secado al aire sin tamizar, ésta se colocó sobre el tamiz superior de 4.76 mm y se tamizó durante 10 minutos a razón de 30 oscilaciones por minuto. Transcurrido el tiempo se elevó el contenedor de tamices fuera del agua y se dejó drenar por unos minutos. Las muestras se llevaron a recipientes de vidrio de 100 ml aproximadamente y se colocaron a secar en una estufa a 105 °C durante 24 horas. Cada una de las fracciones secas se pesaron y éstas correspondieron a la agregación total (agregados más arena). Cada fracción de agregación total se colocó en frascos de vidrio de 150 ml y se agregó 100 ml de agua destilada y 10 ml de dispersante (hexametáfosfato de sodio más carbonato de sodio), se agitaron manualmente con una varilla de vidrio durante 1 minuto, se dejaron reposar 15 minutos y finalmente se volvieron a agitar 1 minuto. El contenido de cada frasco fue vertido en el tamiz donde fue colocado inicialmente durante la inmersión en el equipo Yoder para eliminar las partículas que estaban adheridas a las arenas. La muestra retenida en el tamiz se colocó en un recipiente de vidrio y se llevó a secar a la estufa a 105 °C por 24 horas, para determinar así el peso de las arenas. Después se restó al peso total de los agregados más la arena al peso de éstas últimas, obteniéndose el

peso neto de los agregados del suelo y se determinó el porcentaje de agregados que le correspondían a cada fracción.

Los cálculos de la estabilidad de agregados en húmedo se hicieron mediante la siguiente fórmula:

$$EA= Pa/(Pim - Ps)$$

donde:

EA: Estabilidad de agregados (%)

Pa: Peso de agregados (g)

Pim: Peso inicial de la muestra (g)

Ps: Peso de las arenas (g)

La sumatoria del porcentaje de agregados estables retenidos desde el tamiz de 0.25 mm y mayores, proporcionaron el porcentaje total de la estabilidad de agregados del suelo. Para expresar la distribución de tamaño de agregados se utilizó el diámetro medio (DM), que se calculó con la siguiente fórmula:

$$DM= (LS+LI)/2$$

donde:

DM: Diámetro medio

LS: Limite superior (mm)

LI: Limite inferior (mm)

4.2.2. Carbono orgánico y estabilidad de agregados en seco

Se relacionó el C con la estabilidad de agregados en seco. La estabilidad de agregados en seco se evaluó por el método propuesto por Kemper y Rosenau (1986) ligeramente modificado. La modificación consistió en pasar toda la muestra, que pesaba de 5 a 6 kg de suelo seco al aire a través de una serie de tamices de malla 50.8, 31.7, 22.2, 11.5, 6.35, 4.76, 3.36, 2.00, 1.00, 0.46, 0.25, 0.10 y 0.05 mm y menores de 0.05 mm. Los tamices fueron ordenados en forma descendente, quedando el tamiz más grande en la parte superior donde fue colocada la muestra. La agitación de los tamices se hizo de forma manual para evitar que los agregados que se forman en los tepetates, que son muy frágiles, se desintegraran.

4.2.3. Carbono orgánico y estado estructural del suelo

Se relacionó el C con el estado estructural del suelo (EES). Este último se evaluó desde un punto de vista agronómico. El EES es igual al peso de los agregados de tamaño óptimo (0.25 a 4.75 mm) entre el peso de la muestra (Kaúrivhev, 1984). Esta determinación se hizo para suelo en condición seca y húmeda. El EES conceptualmente es la relación que hay entre las fracciones mecánicas dotadas de capacidad cementadora y las fracciones mecánicas que participan como material pasivo en la formación de la estructura. Finalmente el EES es un índice que sirve para evaluar la estructura del suelo con base en la granulometría de las partículas obtenidas por los métodos de tamizado en seco y húmedo, e indica la cantidad de agregados de cierto tamaño que son favorables para el desarrollo de los cultivos. La estructura grumosa granular de los agregados entre 0.25 – 11.5 mm, que son los que se incluyen en el concepto de EES se considera, agronómicamente la más

valiosa. A mayor estado estructural corresponde mayor capacidad de estructuración (Cuadro 9).

Cuadro 9. Apreciación del estado estructural del suelo.

Estado estructural del suelo	Contenido de partículas de 0.25-10 mm (en % de la masa del suelo seca al aire)	
	Tamizado en seco (%)	Tamizado en húmedo (%)
Excelente	>80	>70
Buena	80-60	70-55
Satisfactoria	60-40	55-40
No satisfactoria	40-20	40-20
Malo	<20	<20

Fuete: Kaúrichev (1984)

4.2.4 Carbono orgánico y coeficiente de estructuración del suelo

Se relacionó el C con el coeficiente estructural del suelo (E). El E se determinó a partir de la estabilidad de agregados en seco y se definió como la relación entre porcentaje de agregados de 0.25 mm a 10 mm y la suma de los porcentajes de agregados >10 mm y <0.25mm. Cuanto mayor es el valor de E, mayor es la estructuración del suelo (Kaúrichev, 1984). Los cálculos se realizaron de la siguiente manera:

$E = A/B$, donde:

E: Coeficiente de estructura del suelo

A: Suma de agregados del tamaño desde 0.25 hasta 10 mm

B: Suma de los agregados <0.25 y mayores de 10 mm

4.2.5. Carbono orgánico en macropartículas y micropartículas

De la prueba de estabilidad de agregados en seco se calculó la cantidad de macropartículas (MA), considerando aquellas partículas >0.25 mm de diámetro y micropartículas (MI) aquellas con tamaño <0.25 mm de diámetro. Kaúrichev (1984) mencionó que comparando los resultados de MA y MI se puede establecer el grado de dispersión del suelo y la estabilidad de su estructura. La cantidad de MA y MI se relacionó con el contenido de C.

4.2.6. Carbono orgánico en distintos tamaños de partícula

El C se midió en las fracciones de distintos tamaños de partícula que se obtuvieron en la prueba de estabilidad de agregados en seco, que fue descrita en el punto 4.2.1. La serie de tamices 11.5, 6.35, 4.76, 3.36, 2.00 y 1.00 mm correspondió a lo que clásicamente se usa para la determinación de la estabilidad de agregados en seco, sin embargo, con el fin de explorar el contenido de carbono orgánico tanto en diámetro de partículas más grandes como más pequeñas, se usaron además otros tamaños de tamices (50.3, 31.7, 22.2, 0.46, 0.25, 0.10 y 0.05 mm). Finalmente se obtuvieron 14 tamaños de partículas diferentes. Se observó el tamaño de partícula donde se acumula la mayor cantidad de carbono orgánico.

4.2.6.1. Carbono orgánico en fragmentos y agregados

Se determinó el C en fragmentos y agregados. Las partículas con diámetro >50.3 mm, $<50.3-22.2>$ mm, $<22.2-11.3>$ mm, $<11.3-6.30>$ mm, $<6.30-4.25>$ mm, y $<4.25-3.36>$ mm que se obtuvieron en la prueba de estabilidad de agregados en seco, fueron separadas en fragmentos y agregados. La separación se hizo de manera visual, auxiliado por una espátula, una aguja de disección, una lupa, un microscopio estereoscópico y una lámpara de escritorio. La identificación de estos componentes fue muy evidente en algunos casos, pero

complicada en otros. Los criterios utilizados para diferenciar los agregados de los fragmentos fueron consistencia, dureza, color y forma; sin embargo, el mejor indicador para diferenciarlos fue la dureza. Ésta fue medida por medio de un penetrométero manual. El procedimiento consistió en observar cuidadosamente una porción homogénea de partículas seleccionadas. En el caso de las partículas más grandes (<50.3-22.2> mm, <22.2-11.3> mm, <11.3-6.30> mm) la separación se hizo en toda la muestra, pero para los diámetros más pequeños (<6.30-4.25> mm, y <4.25-3.36> mm) hubo de tomarse cinco sub-muestras por muestra de entre 5 y 10 g de suelo cada una, y utilizar la lupa y la lámpara con un foco de 100 watts de luz de día para efectuar dicha separación. Para el diámetro de partículas entre 4.25 y 3.36 mm la operación de separación fue más compleja y se debió utilizar un microscopio estereoscópico. Aún con este mayor aumento óptico la diferenciación entre agregados y fragmentos fue difícil, debido a que todas las partículas se veían iguales en forma y color; sin embargo, al romperlas con una aguja de disección se ponía de manifiesto su diferencia en dureza. En este tamaño de partículas, apenas se pudo obtener un valor de dureza con el penetrométero ($0.1-0.5 \text{ kg cm}^{-2}$), ya que eran muy frágiles.

Se hizo un intento por separar en agregados y fragmentos las partículas de 3.36 a 2.00 mm de diámetro, pero aún con el microscopio no fue posible, debido a que había una gran cantidad de fragmentos que eran frágiles y se confundían frecuentemente con los agregados; o bien, los agregados que eran demasiado frágiles, se desmoronaban fácilmente confundándose con el polvo. Éste podía provenir en mayor parte de los agregados, pero otra parte también provenía de los fragmentos.

Para las partículas <2.0 mm no fue posible hacer una separación de fragmentos y agregados por un método visual. Además de que la dureza en este diámetro de partículas solamente

podía ser medida de manera cualitativa, a través de la resistencia a la presión dada por una aguja de disección.

Los fragmentos y agregados obtenidos de cada fracción sometida a separación, fueron pesados en una balanza analítica y se calculó el porcentaje relativo de cada uno de ellos. Después se midió el C de cada fracción como se indicó en el punto 4.1.1.5. y se buscaron las relaciones numéricas entre la cantidad de agregados y el contenido de C.

4.2.6.2. Fragmentos y agregados a través del tiempo de cultivo

Se obtuvo un valor promedio de la cantidad de fragmentos y agregados de los diámetros mencionados y se relacionó con el tiempo de cultivo. El propósito fue inferir si la formación de agregados dependió del tiempo del cultivo.

4.2.6.3. Carbono orgánico y dureza en agregados y fragmentos

Para determinar la dureza de los agregados y fragmentos se tomaron al azar 10 agregados y 10 fragmentos por muestra y fueron presionados con el penetrómetro hasta romperse, sobre la superficie de un tamiz de acero inoxidable. Después los agregados y fragmentos y los demás tamaños de partículas fueron molidos en un mortero de porcelana, tamizados en malla 100 y se midió el CT como ya fue indicado anteriormente.

4.3. Minerales arcillosos y carbono orgánico

Para definir si las arcillas de los tepetates tenían alguna relación con la estabilidad de agregados, se determinó tipo y cantidad de éstos. El porcentaje de arcillas de los tepetates fue relacionado con el porcentaje de carbono. Para caracterizar las arcillas del suelo se usó la difracción de rayos X. Las muestras fueron sometidas a un proceso previo para eliminar

la materia orgánica, los carbonatos y los materiales amorfos. Los pretratamientos que se le dieron a las muestras de tepetate fueron los siguientes:

Carbonatos. Para definir cualitativamente la presencia de carbonatos en estos tepetates, se colocaron de 4 a 5 g de muestra sobre un vidrio de reloj y se adicionaron de 4 a 5 gotas de HCl al 5 %. En ninguno de los casos se notó efervescencia, por lo que se infirió que las muestras no presentaban carbonatos. Lo anterior se corroboró al determinar la cantidad de carbono inorgánico total en el analizador de carbono TOC-5050.

Eliminación de la materia orgánica. Se colocaron 50 g de suelo en vasos de precipitados de 600 ml y se agregaron 30 ml de H₂O₂ a 80 volúmenes, hasta cubrir perfectamente el suelo. Inmediatamente después con una piceta se adicionaron 40 ml de agua destilada procurando lavar bien las paredes de los vasos. En algunos casos la efervescencia fue muy violenta (presencia de burbujas muy grandes y persistentes que amenazaron con desparramarse del vaso) por lo que fue necesario agregar más agua, hasta que disminuyó la efervescencia. Se agitaron los vasos con movimientos rotatorios constantes para mezclar la suspensión y se dejó reposar la suspensión durante toda la noche. Posteriormente los vasos fueron colocados en una plancha de arena caliente, cuya temperatura se controló entre 60 y 80 °C, cuidando que no se elevara a más del nivel máximo señalado, para que no se evaporara el peróxido antes de que éste reaccionase con el suelo. Los vasos se agitaron algunas veces con movimientos rotatorios para favorecer la reacción del peróxido con el suelo. La adición de H₂O₂ y agua destilada con agitación intermitente se continuó hasta que no se observó efervescencia en frío después de nuevas adiciones de agua oxigenada. El proceso para eliminar completamente la MO tuvo un periodo de duración variable (de 1 a 5 días), según el contenido de MO en el suelo.

Después se eliminó el exceso de peróxido adicionando porciones de agua destilada de aproximadamente 50 ml. La suspensión bien homogeneizada se calentó hasta que ya no se observó efervescencia y el sobrenadante de la suspensión se tornó translúcido.

Separación de las fracción fina (< 2 μ m): Una vez que se eliminó la MO con peróxido, las muestras fueron trasvasadas a cilindros de vidrio, y se adicionó agua destilada hasta completar un volumen de un litro. Se agitó la suspensión con un agitador de aluminio por espacio de un minuto y se dejaron reposar los cilindros durante 16 horas. Después se sifoneó el volumen correspondiente a los 30 cm superiores de la columna. Este volumen se centrifugó a 3000 rpm durante 15 minutos. El sobrenadante se eliminó y las partículas se recolectaron en un vaso de precipitado de 100 ml. Los cilindros se aforaron y agitaron nuevamente, y se repitió la operación de sifoneo y centrifugación hasta colectar aproximadamente 2 gramos de arcilla. El sedimento fue secado lentamente en una plancha de arena a una temperatura variable de 60 a 80 °C . Después el sedimento seco fue molido físicamente con un mortero de ágata y almacenado en bolsitas de plástico.

Eliminación de materiales amorfos: Los amorfos presentes en el suelo son minerales de arcilla que se caracterizan por no presentar difracción a los rayos X. Esto se debe a que son materiales poco cristalinos y presentan un desorden en su estructura. Para eliminar los compuestos amorfos de sílice y aluminio se utilizó la técnica propuesta por Hashimoto y Jackson (1960) y modificada por Hidalgo (1991), en la que se emplea NaOH 0.5 N a una temperatura de 50 °C. Este reactivo permite eliminar el Al que pudiera estar formando complejos con la materia orgánica, los óxidos hidratados no cristalinos y cristalinos de aluminio, la sílice opalina, el aluminio y sílice del alófono y la imogolita. No

ataca a la sílice cristalina y al Al y Si de los aluminosilicatos cristalinos (arcillas) (Mizota y Van Reewijk, 1989).

Se pesaron muestras de 1 g de arcilla y se colocaron en tubos de polipropileno de 100 ml, posteriormente se adicionaron 60 ml de una solución de NaOH 0.5 N a 50 °C, calentada en baño maría. Los tubos con el suelo y la solución de NaOH se mantuvieron 5 minutos en el baño maría a 50 °C. Posteriormente se centrifugaron a 2500 rpm aproximadamente durante 5 minutos. El sobrenadante se desechó y se repitió la adición de NaOH, calentamiento y centrifugación las veces que fueron necesarias (20 veces).

Preparación de las muestras para la difracción de rayos X: Para la preparación de las muestras que se someterían a difracción de rayos X, se requirió de una suspensión bien dispersa de la fracción fina del suelo ($< 2 \mu\text{m}$). Para ello la fracción fina libre de MO y amorfos, se traspasó a vasos de polipropileno de 50 ml y se sonificó durante 1 minuto, para lo cual se utilizó un ultrasonido Fisher (modelo 300). Esto permitió dispersar y homogeneizar perfectamente las partículas. Posteriormente, con un gotero se tomaron alícuotas, que fueron distribuidas uniformemente sobre portaobjetos de vidrio, perfectamente limpios con alcohol y previamente marcados. La película de suspensión colocada sobre los portaobjetos se dejó secar al aire a temperatura ambiente. Una vez que se evaporó el agua (aproximadamente 8 horas) se obtuvo una capa delgada de arcilla en la superficie de los portaobjetos. En los casos en que la película de arcilla fue demasiado delgada (casi traslúcida) fue necesario depositar otra porción de suspensión para formar una nueva capa sobre la primera depositada. Una vez secos los portaobjetos con la arcilla depositada en su superficie, fueron colocados en un desecador para protegerlos de la contaminación y prevenir el humedecimiento de las películas de arcilla por el ambiente.

Cada muestra fue preparada por triplicado: una para condiciones normales, otra para saturarla con etilenglicol y la tercera se calentó a 490 °C en una mufla.

Saturación con etilenglicol. (EG): Los portaobjetos con la capa de arcilla se colocaron en un desecador con EG y se aplicó vacío. La arcilla estuvo en contacto con los vapores del EG durante 8 horas.

Calentamiento a 490 °C: Se colocaron los portaobjetos con las películas de arcilla en una mufla a 490 °C durante 2 horas. Una vez fría la mufla, los portaobjetos se sacaron y fueron colocados en un desecador hasta el momento de hacer la determinación en el aparato de rayos X.

Difracción de rayos X: Se utilizó un difractómetro de rayos X (modelo XD-3A) marca Shimadzu, cuya fuente de rayos X se obtiene a partir de un tubo con ánodo de cobre y radiación $K\alpha$. Los portaobjetos con la capa de arcilla fueron colocados en el goniómetro del aparato. Los difractogramas fueron graficados por el aparato y simultáneamente en una computadora, para lo cual se utilizó el software Sadw1p. Las especificaciones del aparato correspondientes al análisis de las muestras fueron las siguientes: Ángulo de inicio de la difracción 35 grados, velocidad del goniómetro 4 grados por segundo, velocidad de carta del graficador 10 mm/min, $Kv=30$, $CPS = 5K$, tiempo de $\sigma= 1$ y constante de tiempo = 1. Para identificar el tipo de arcilla se ubicaron las reflexiones en los difractogramas usando las tablas correspondientes, para convertir los ángulos 2θ a los valores “ d ” correspondientes a las distancias interlaminares de las láminas de arcilla expresadas en *nm*.

4.3.1. Carbono orgánico y contenido de arcilla

Con el propósito de definir la relación entre el C y la cantidad de arcilla, se correlacionaron estas dos variables. La cantidad de arcilla de los tepetates se determinó por el método de la pipeta (Hans, 1996; Tan, 1996; Van, 1999). También se cuantificó la cantidad de arenas y limos presentes en los tepetates. Las muestras que se sometieron a este método estuvieron libres de materia orgánica y carbonatos. La eliminación de estos compuestos se hizo de manera similar a como se indicó en el punto anterior.

Método de la pipeta. Se pesaron 10 g de suelo seco al aire, tamizado en malla de 2 mm, libres de carbonatos y materia orgánica. Se colocaron en envases de acero inoxidable, se agregó agua destilada hasta la mitad del recipiente y se adicionaron 10 ml de hexametáfosfato de sodio. Se agitaron por espacio de 15 minutos en unas batidoras automáticas (Oster). Posteriormente la suspensión se pasó a través de un tamiz de malla de 0.05 mm y 8 cm de diámetro. Éste fue colocado sobre un embudo que conducía a una probeta de vidrio 1 litro. Las partículas atrapadas en el tamiz fueron perfectamente lavadas, transferidas a frascos de vidrio de 200 ml, secadas en una estufa a 105 °C por 24 horas y pesadas, obteniéndose de este modo la fracción arenosa del suelo. Las probetas con las partículas inferiores a 0.05 mm fueron aforadas con agua a 1 litro y agitadas manualmente con un agitador de aluminio por espacio de un minuto. A los 4 minutos exactamente de la agitación, se sumergió en el interior de las probetas a 10 cm de profundidad, una pipeta especial con cuatro orificios en la punta. Se tomó una alícuota de 20 ml y se transfirió a un vaso de precipitado de 40 ml, se midió la temperatura de la suspensión que se encontraba en las probetas. La muestra fue secada en una estufa a 105 °C por 24 horas e inmediatamente después se pesó en una balanza analítica, de este modo se obtuvo la

fracción limosa del suelo. A las ocho horas exactamente de la agitación, se repitió la operación y se obtuvo la fracción arcillosa del suelo. Para el cálculo de las arcillas y los limos se restó el peso de una muestra en blanco (sólo con hexametáfosfato de sodio), que se hizo paralelamente a las determinaciones de limos y arcillas. Se calcularon las proporciones correspondientes de arenas, limos y arcillas.

4.4. Diseño experimental

Se hizo un análisis de varianza con diferente número de repeticiones para obtener respuesta estadística de las clases designadas según el manejo agronómico, específicamente en los puntos 4.1.3. y 4.1.6.1. Se debe tomar en cuenta que este experimento no encaja a la perfección en el esquema de aleatorización prescrito por el diseño completamente al azar. La razón es que no se tiene la libertad de asignar unidades experimentales a las clases, ya que existen independientemente de la acción del investigador. No obstante basta que las muestras aleatorias sean independientes para que el análisis bajo el modelo que se propone, sea válido. Esto se debe a que se cuenta con un diseño de muestreo en vez de un diseño experimental, sin embargo, el análisis de varianza es aplicable (Infante y Zárate, 1998). El modelo utilizado fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad i = 1, \dots, ni, \quad j = 1, \dots, t.$$

Los términos en la ecuación representan:

Y_{ij} : respuesta de la j -ésima unidad experimental con el tratamiento i -ésimo.

μ : media general, común a todas las unidades antes de aplicar los tratamientos.

τ_i : efecto del i -ésimo tratamiento.

ε_{ij} : error experimental de la j -ésima repetición del i -ésimo tratamiento.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Antes de iniciar la presentación de los resultados y su discusión, es importante alertar al lector de las complicaciones implícitas en el análisis de esta información, pues no se trata de un experimento formal y la información de las entrevistas es básicamente cualitativa. Por ejemplo, se tiene información de parcelas donde se incorporó con frecuencia estiércol, pero no se sabe cuánto, sin embargo, el hecho de aplicar periódicamente cierta cantidad de estiércol indica que debería haber acumulación de C al transcurrir el tiempo. En consecuencia se esperaba *a priori* una alta variación en los resultados de las variables de respuesta, por lo que los valores promedios de C de las clases en que fueron agrupadas las parcelas, intentaron buscar las tendencias del comportamiento del C a través del tiempo. El inconveniente que se encontró durante el análisis de estos resultados fue que unos cuantos datos, que correspondían a la minoría de la población (puntos de influencia), no se ajustaban a las tendencias que mostraban la mayor parte de la población de datos. Estos desajustes ocurren porque en ocasiones intervienen una combinación de factores que influyen determinantemente en el contenido de C de algún caso en particular. Por ejemplo, supongamos que en una parcela de tepetate siempre se incorporaron estiércoles, pero nunca se controló la erosión, o que en otra parcela durante 20 años se sembró maíz, pero seis veces en asociación con leguminosas y cosas por el estilo. Esto trae como consecuencia que la variación en el manejo agrícola dentro de una misma clase (establecida arbitrariamente) influya en el contenido de C, dando como resultado varias excepciones. Por lo tanto, para el análisis de esta información fue necesario aplicar un análisis discriminatorio en los datos, lo cual permitió seleccionar aquellos que presentaban las condiciones más homogéneas posibles por cada clase, es decir, se eliminaron algunos puntos de influencia para ajustar en cierta medida las tendencias de las curvas obtenidas. Se usó la prueba estadística común

llamada *Outliers*, que sirve para eliminar puntos de influencia y ajustar las rectas en las regresiones. Se basa en el principio de ajustar un modelo estadístico para la mayor parte de la población de datos, excluyendo aquellos que causan un desajuste. Para el caso de este estudio se utilizó, además, el criterio del investigador, quien contaba con datos provenientes de parcelas donde se tiene plena seguridad de la veracidad de la información, así como otras parcelas donde ya se habían realizado estudios anteriormente (Báez *et al.*, 1997; Etchevers y Brito, 1997; Navarro y Flores 1997; Pérez *et al.*, 2000). Con este tipo de análisis se espera obtener información de carácter general sobre el comportamiento de C en los tepetates a corto plazo, substituyendo tiempo por espacio de exploración. Sería muy costoso y de muy largo plazo realizar un experimento formal con diversos manejos agronómicos para obtener resultados del comportamiento del C a través del tiempo (más de 100 años) en un tipo de sustrato del que se conoce poco. Los resultados de este estudio pueden dar una idea sobre: ¿Cuál es la tendencia de la tasa acumulación de C a través del tiempo bajo diferentes condiciones de manejo agrícola? ¿Por qué es baja la acumulación de C en los tepetates?, ¿De qué depende la acumulación del C en estos sustratos?.

5.1. Carbono orgánico del suelo, sistemas de cultivo y manejo de residuos

5.1.1. Base de datos

Los resultados de la base de datos construida *ex – profeso* para este estudio se muestran en el Cuadro 10. El pH de los tepetates varía de ligeramente básico a básico (pH 7.1 a 8.0) en la mayoría de los casos; sin embargo, en unos cuantos casos son ligeramente ácidos (pH<7.0) y tres con algo de acidez (pH <6.0). La conductividad eléctrica (CE) mostró valores bajos en sales, aún en las muestras donde el pH fue más alto. Todos los resultados

de CE correspondieron a la clasificación de no salinos, según la escala de salinidad propuesta por Jackson (1976).

Cuadro 10 Algunas características químicas de los suelos de las parcelas incluidas en este estudio.

Comunidad	Años cultivo	pH	C. E. mmhos cm ⁻¹	C %	M.O. %	P ppm	Arena Limo Arcilla -----%-----		
Apipilhuasco	0	8.2	0.11	0.00	0.00	6	54	34	12
Apipilhuasco	0	7.7	0.14	0.08	0.13	2	33	46	20
Apipilhuasco	4	7.8	0.14	0.53	0.92	3	39	53	8
Apipilhuasco	4	7.8	0.12	0.54	0.94	3	39	53	8
Apipilhuasco	4	7.8	0.12	0.38	0.66	4	23	40	36
Apipilhuasco	10	8.0	0.18	0.45	0.77	7	35	50	15
Apipilhuasco	19	7.0	0.18	1.16	2.00	25	33	38	29
Apipilhuasco	19	7.5	0.31	1.43	2.46	122	33	38	29
Apipilhuasco	100	7.7	0.21	1.72	2.96	53	43	38	19
Apipilhuasco	100	7.7	0.23	2.10	3.63	61	42	31	26
Apipilhuasco	100	7.6	0.16	1.46	2.51	34	42	31	26
Apipilhuasco	100	7.8	0.17	1.26	2.17	27	43	33	24
Apipilhuasco	100	7.7	0.14	1.43	2.46	21	44	34	22
Apipilhuasco	100	7.6	0.24	2.08	3.58	50	44	34	22
Nativitas	9	8.1	0.11	0.40	0.69	6	28	54	18
Nativitas	13	7.9	0.24	1.39	2.40	60	56	31	13
Nativitas	13	7.7	0.04	1.54	2.66	49	56	31	13
Nativitas	13	7.9	0.25	1.91	3.28	83	56	31	13
Nativitas	13	7.6	0.05	1.25	2.16	69	56	31	13
Nativitas	13	7.4	0.18	1.27	2.19	65	56	31	13
Nativitas	13	7.9	0.24	1.36	2.34	50	56	31	13
Nativitas	13	7.6	0.18	1.34	2.31	68	56	31	13
Nativitas	22	7.5	0.12	0.50	0.86	5	58	34	8
Nativitas	22	7.2	0.12	0.48	0.82	12	36	31	33
Nativitas	22	7.6	0.08	0.42	0.72	8	29	42	29
San Dieguito	4	6.7	0.14	0.50	0.87	9	33	34	33
San Dieguito	9	8.0	0.10	0.12	0.21	1	43	36	22
San Dieguito	23	7.0	0.09	0.77	1.33	9	28	38	34
San Dieguito	23	8.0	0.14	0.24	0.41	2	34	50	16
San Dieguito	23	7.9	0.18	0.49	0.84	5	32	45	23
San Dieguito	23	8.0	0.02	0.36	0.62	2	36	43	21
San Dieguito	23	6.9	0.11	0.61	1.05	2	33	34	33
San Dieguito	suelo	5.9	0.09	0.77	1.33	3	45	29	26

Cuadro 10. (continuación).

Comunidad	Años cultivo	pH	C. E. mmhos cm ⁻¹	C %	M.O. %	P ppm	Arena Limo Arcilla -----%-----		
San Miguel Tlaixpan	3	7.5	0.12	0.51	0.88	12	29	44	26
San Miguel Tlaixpan	3	7.3	0.15	0.49	0.84	7	29	44	26
San Miguel Tlaixpan	4	7.2	0.13	0.39	0.67	2	26	39	36
San Miguel Tlaixpan	4	7.0	0.11	0.41	0.71	3	26	39	36
San Miguel Tlaixpan	4	7.1	0.13	0.40	0.69	2	23	40	37
San Miguel Tlaixpan	4	7.4	0.20	0.76	1.31	18	23	41	36
San Miguel Tlaixpan	4	7.0	0.10	0.46	0.80	2	27	41	32
San Miguel Tlaixpan	4	7.0	0.09	0.47	0.81	4	28	45	27
San Miguel Tlaixpan	suelo	6.3	0.07	0.83	1.43	1	33	26	41
San Pablo Ixayoc	10	6.1	0.07	0.43	0.74	4	36	36	28
San Pablo Ixayoc	18	6.2	0.10	0.54	0.93	13	50	40	11
San Pablo Ixayoc	19	7.4	0.41	0.92	1.59	8	48	40	12
San Pablo Ixayoc	20	5.6	0.07	0.52	0.90	4	52	30	18
San Pablo Ixayoc	22	6.5	0.29	0.69	1.19	30	19	49	32
San Pablo Ixayoc	22	7.1	0.17	0.25	0.43	1	19	49	32
San Pablo Ixayoc	22	8.0	0.16	0.38	0.66	2	33	46	21
San Pablo Ixayoc	22	8.0	0.14	0.47	0.82	2	28	48	24
San Pablo Ixayoc	23	6.6	0.14	3.59	6.19	68	35	39	26
San Pablo Ixayoc	23	6.4	0.18	1.74	2.99	51	46	36	18
San Pablo Ixayoc	23	6.7	0.17	4.18	7.21	47	46	36	18
San Pablo Ixayoc	23	5.9	0.12	0.49	0.84	39	52	39	9
San Pablo Ixayoc	23	6.3	0.11	0.47	0.80	14	52	39	9
San Pablo Ixayoc	23	7.6	0.12	0.67	1.15	20	57	32	11
San Pablo Ixayoc	23	7.7	0.13	0.61	1.05	17	52	33	14
San Pablo Ixayoc	23	7.6	0.36	0.99	1.71	13	52	33	14
San Pablo Ixayoc	23	8.2	0.14	0.38	0.66	2	52	33	14
San Pablo Ixayoc	23	6.0	0.09	0.66	1.14	13	34	51	15
San Pablo Ixayoc	25	6.6	0.07	0.83	1.42	6	78	14	8
San Pablo Ixayoc	33	5.8	0.04	0.35	0.60	12	63	26	10
San Pablo Ixayoc	38	4.8	0.22	0.92	1.58	34	61	26	13
San Pablo Ixayoc	38	8.0	0.13	0.23	0.40	2	33	54	13
San Pablo Ixayoc	38	7.5	0.13	0.39	0.67	1	33	54	13
San Pablo Ixayoc	38	5.8	0.06	0.46	0.78	3	63	26	10
San Pablo Ixayoc	49	6.2	0.16	0.48	0.83	4	48	35	17
San Pablo Ixayoc	60	7.1	0.14	1.78	3.06	64	44	31	25
Santa Catarina	18	7.1	0.07	0.96	1.65	6	33	29	39
Santa Catarina	18	7.1	0.11	0.58	1.01	9	27	43	31
Santa Catarina	18	7.1	0.18	1.02	1.76	7	35	31	34

Cuadro 10. (continuación).

Comunidad	Años	pH	C. E.	C	M.O.	P	Arena	Limo	Arcilla
	cultivo		mmhos cm ⁻¹	%	%	ppm	-----%-----		
Santa Catarina	18	6.6	0.11	0.69	1.19	5	50	28	22
Santa Catarina	18	6.8	0.18	0.68	1.17	15	50	28	22
Santa Catarina	20	6.3	0.17	0.55	0.95	6	50	28	22
Santa Catarina	24	7.3	0.11	0.65	1.12	7	33	36	31
Santa Catarina	24	7.3	0.10	0.45	0.78	5	36	43	21
Santa Catarina	25	8.1	0.17	0.59	1.02	5	56	36	8
Santa Catarina	28	6.8	0.06	0.45	0.77	2	31	30	40
Santa María Tecuanulco	50	7.7	0.09	0.58	1.00	7	23	36	41
Santa María Tecuanulco	suelo	6.9	0.05	1.03	1.77	8	23	44	33
Tepetlaustoc	4	8.2	0.13	0.48	0.82	2	59	32	9
Tepetlaustoc	4	8.0	0.16	0.35	0.60	2	22	57	21
Tepetlaustoc	13	7.7	0.21	0.96	1.66	26	26	49	26
Tepetlaustoc	19	6.9	0.10	0.50	0.86	7	28	38	34
Tepetlaustoc	19	7.9	0.12	1.50	2.58	6	48	35	17
Tepetlaustoc	19	7.8	0.15	0.75	1.29	3	56	34	10
Tepetlaustoc	25	8.3	0.10	0.61	1.05	2	57	33	11
Tepetlaustoc	25	8.1	0.16	0.67	1.16	2	57	33	11
Tequexquihuac	0	8.0	0.12	0.09	0.16	2	43	40	17
Tequexquihuac	0	8.1	0.13	0.12	0.21	2	34	51	15
Tequexquihuac	5	8.0	0.49	1.17	2.02	39	36	57	7
Tequexquihuac	8	7.8	0.09	0.15	0.25	1	29	42	30
Tequexquihuac	11	8.1	0.04	0.91	1.57	46	60	32	8
Tequexquihuac	13	7.9	0.13	0.77	1.33	11	33	48	19
Tequexquihuac	13	7.7	0.18	1.25	2.15	44	35	49	16
Tequexquihuac	13	7.8	0.16	0.97	1.68	48	35	51	14
Tequexquihuac	13	8.0	0.12	0.37	0.63	2	23	55	23
Tequexquihuac	22	8.0	0.26	1.10	1.90	54	42	43	14
Tequexquihuac	22	7.8	0.19	1.07	1.84	16	42	43	14
Tequexquihuac	25	7.7	0.16	0.77	1.32	13	36	48	17

Los resultados mostraron que ninguna de las muestras incluidas en este estudio contenía carbono inorgánico (CI), por lo tanto se infirió que la cantidad de carbono total (CT) detectado por el análisis, correspondió a la cantidad de carbono orgánico (C). Se esperaba que las muestras con pH más altos tuvieran algo de CI (carbonatos y bicarbonatos), sin

embargo, su alcalinidad puede deberse a la presencia de otro tipo de sales básicas de calcio, sodio, potasio o magnesio. Los resultados de C, P y composición mecánica se analizarán con mayor detalle en los siguientes puntos.

5.1.2. Carbono orgánico y contenido de raíces pequeñas en el suelo

En las Figuras 6 y 7 se muestran las regresiones obtenidas entre suelos donde se efectuaron lavados para eliminar raíces finas y otros residuos vegetales, y suelos no lavados. Los primeros correspondieron a muestras que contenían desde trazas hasta más de 12 % de C (pendiente=0.89) y los otros a muestras con menos de 6% de carbono (pendiente=0.96). Algunos de estos suelos fueron tomados de otro estudio con el propósito de tener un amplio rango de exploración.

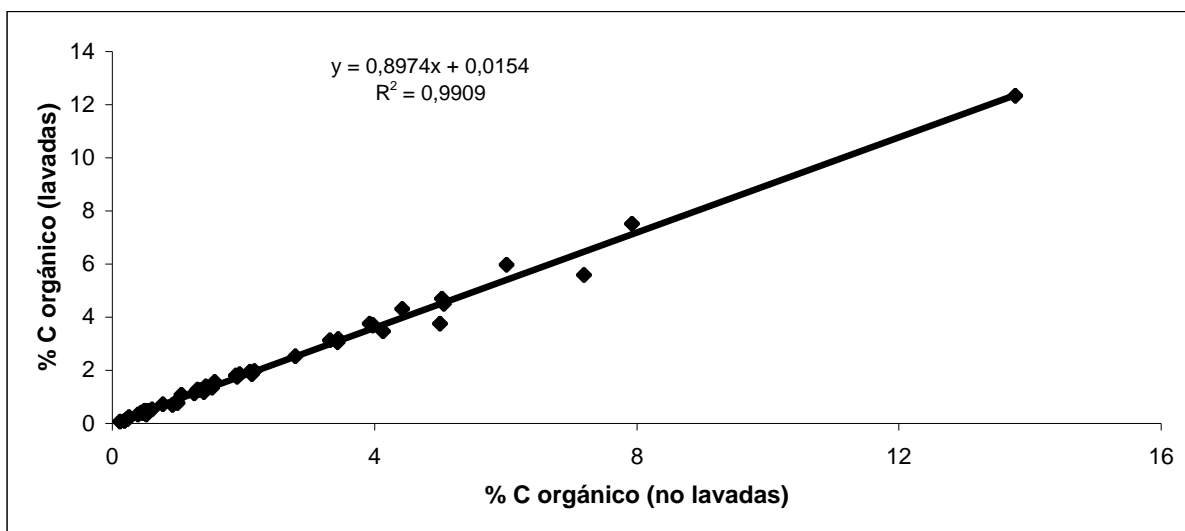


Figura 6. Carbono orgánico en muestras de suelos donde se lavaron residuos vegetales y no lavados, con 0 a 12% de C.

La división de la población, empleando como límite arbitrario 6% de C, se hizo porque se observó cierta tendencia del coeficiente de regresión a alejarse de 1.0 a medida que la concentración de C en el suelo era mayor. El contenido de C de las muestras lavadas y sin lavar fue muy similar en ambos casos cuando el C fue menor a 6%, pero cuando fue mayor

de 6%, las diferencias se hicieron más evidentes y aumentaron proporcionalmente a medida que el contenido de este elemento era más alto en las muestras donde no se eliminaron los residuos vegetales.

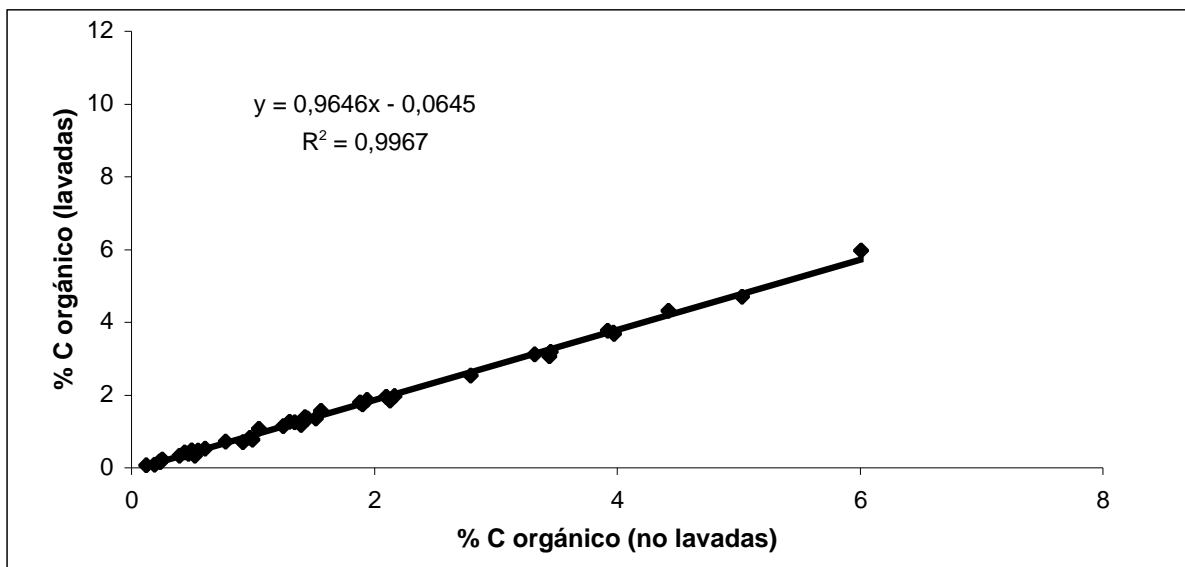


Figura 7. Carbono orgánico en muestras de suelos donde se lavaron residuos vegetales y no lavados, con 0 a 6% de C.

En la regresión donde se incluyeron las muestras que tenían más de 12% de C, la diferencia entre muestras lavadas y sin lavar fue muy alta (más de 10%). Cabe señalar que la abundancia de residuos vegetales en la muestra con 12% de C era tal que al efectuar los lavados se percibió que la mitad de la muestra correspondía a aquéllos. Al considerar estas muestras en la correlación es notable que la pendiente comienza a alejarse considerablemente de 1.0. Sin embargo, al no incluir los puntos más altos se observó que las diferencias de las muestras que contienen menos de 6 % de C son casi imperceptibles. La pendiente se acerca a 1.0 y el error es mínimo (3.5%). Se concluyó que cuando se trabaja con muestras de suelo cuya concentración de C es inferior al 6% no sería necesario eliminar previamente los pocos residuos vegetales que contienen. Para el caso de este estudio el contenido de C de las muestras fue, en general, muy bajo, frecuentemente entre

trazas y 2%, y excepcionalmente de 4%, por lo tanto no se hicieron lavados a las muestras incluidas en este estudio.

5.1.3. Carbono orgánico y los sistemas de cultivo

En la Figura 8 se presentan las clases (sistemas agrícolas) que se distinguieron según el manejo agronómico que se llevó a cabo en las parcelas de tepetate cultivado incluidas en este estudio (tipos de cultivos empleados, manejo de residuos orgánicos, tipo de labranza y uso de invernaderos). Éstas fueron agrupadas en orden ascendente para resaltar en que clases hubo una mayor cantidad de C.

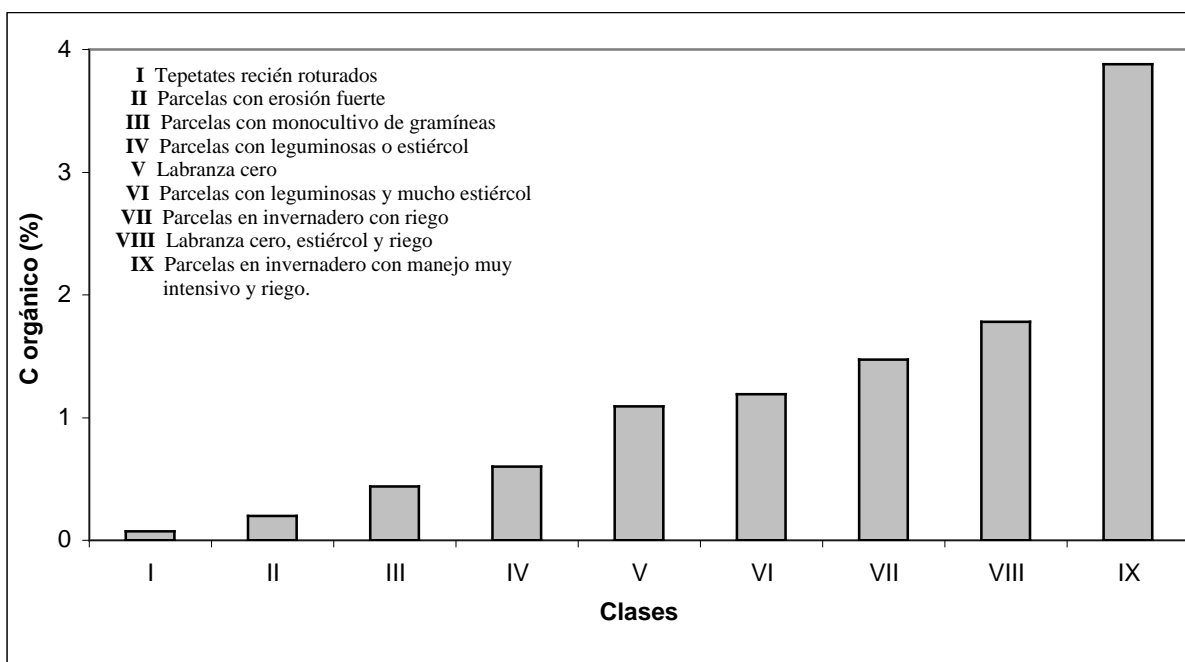


Figura 8. Contenido de carbono orgánico en tepetates cultivados según el manejo agronómico.

El uso constante de gramíneas en monocultivo, aunado al retiro de los esquilmos agrícolas, no resultó en un aumento importante del contenido de C en el tepetate. Las concentraciones de C con este manejo se mantienen en un nivel promedio inferior a 0.5%. Robinson *et al.*

(1996) demostraron que los sistemas agrícolas con monocultivo ocasionan un detrimento en el contenido de C, mientras que con el uso de rotaciones de cultivo de amplia cobertura vegetal o leguminosas, se conserva y aumenta el contenido de C en el suelo. La incorporación de leguminosas en el sistema de producción aunado a la incorporación de abonos orgánicos, favoreció la acumulación de C, pero no hace que éste se incremente como podría esperarse.

Una mayor acumulación de C en los tepetates ocurrió, en aquellos casos en que se practicó la labranza cero. En éstos se observó una acumulación de C que puede llegar a ser más del doble que aquella donde hay sistemas con labranza convencional. Esto se debió a que la labranza tradicional favoreció la oxidación del C y la pérdida de éste en forma de CO₂, mientras que en la labranza cero se retuvo una porción importante de los residuos orgánicos, al no labrar el terreno. Zibilske (1994) mencionó que la oxidación biológica del carbono en el suelo ocupa una posición clave en el ciclo global del carbono y es determinante entre lo que es fijado o retornado a la atmósfera como CO₂. La labranza cero por el hecho de favorecer el incremento del porcentaje de C en el suelo puede ser recomendada para aumentar la fertilidad de estos tepetates. Además, el cultivo de ornamentales, como el agapando, asociado con esta práctica puede ser más redituable económicamente que el cultivo de maíz.

La concentración promedio de C en los sistemas con leguminosas y adición de abundante estiércol fue similar a la de parcelas con labranza cero, mientras que el tepetate en los invernaderos con riego mostró una acumulación de C aproximadamente 15% mayor que el manejado con labranza cero y los sistemas agrícolas con leguminosas y adición de abundante estiércol. Es evidente que las condiciones de temperatura y humedad de los

sistemas agrícolas en invernadero, que son más intensas que en los casos anteriores, favorecen el secuestro de carbono a más corto plazo

En los sistemas agrícolas que se trataron como cama de invernadero, con uso del riego, además de una continua incorporación de diversos abonos orgánicos y una mayor intensidad de laboreo (la clase IX en este trabajo), se favoreció considerablemente el aumento en el contenido de C del suelo. El porcentaje promedio de C en estos últimos fue de cerca de 4%. En esta clase, la incorporación de varios tipos de abonos orgánicos y el tratamiento especial que se dio antes de incorporarlos (seco y molido) pudo tener una mayor respuesta en la acumulación de C; sin embargo, es importante señalar que la incorporación de madera podrida molida (de pino) al suelo, fue probablemente la enmienda orgánica que aportó más cantidad de C al suelo. James *et al.* (1986) mencionaron que la biodegradación de madera de pino es muy lenta, debido a que contiene compuestos que son muy recalcitrantes.

El análisis de varianza para la variable C (carbono orgánico), mostró diferencias altamente significativas ($P < 0.05$) entre las diferentes clases de manejo agronómico establecidas (Cuadro 11). El modelo tuvo una $r = 0.95$, la cual indica una estrecha asociación C vs manejo agronómico.

Cuadro 11. ANOVA para la variable carbono orgánico.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	significancia
Clases	8	35.67	4.46	<0.001**
Error	87	4.10	0.047	
Total	95	39.77		

R^2	Coefficiente de variación	Error estándar	Media
0.90	26	0.22	0.82

Los tepetates después de ser roturados prácticamente no contienen C pero éste tiende a acumularse progresivamente con el tiempo dependiendo del manejo agronómico empleado. La acumulación de C se relacionó con los procesos de degradación del suelo, la incorporación de biomasa, manejo de cultivos, tipo de labranza y uso del riego en las clases de manejo agrícola establecidas. El grado de acumulación dependió del manejo agronómico que se haya dado a las parcelas de tepetate. Varios autores han demostrado que la cantidad de C en los suelos agrícolas depende del manejo agronómico (Grant *et al.*, 2001; Lal, *et al.*, 1999; Reeves *et al.*, 1997).

Uno de los principales factores que influyeron negativamente en la acumulación de C fue la erosión hídrica, por lo cual es necesario que se planeen y ejecuten obras de conservación de suelo si se desea aumentar la fertilidad de los tepetates, ya que la erosión es uno de los principales factores que ocasionan la degradación de los suelos (Lal *et al.*, 1999).

5.1.4. Carbono orgánico y tiempo de cultivo del tepetate

En la Figura 9 se muestra la correlación entre C y tiempo de cultivo de los tepetates.

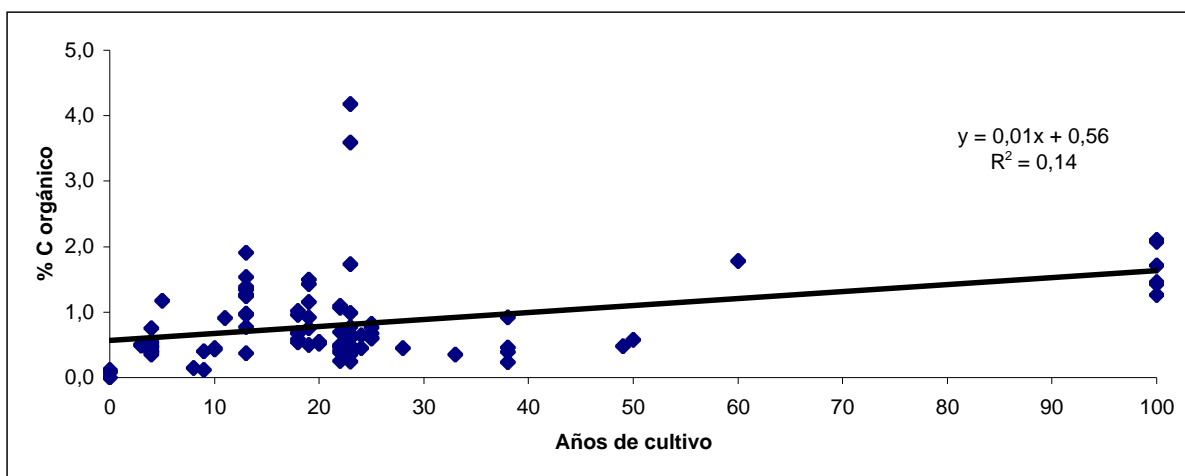


Figura 9. Relación general entre carbono orgánico y tiempo de cultivo en tepetates habilitados para la agricultura sin discriminar por sistema de cultivo.

La comparación del tiempo de cultivo, incluyendo de manera general todos los sistemas agrícolas, con el contenido de C, muestra que no existió una relación estrecha entre ambas variables. Por lo tanto, el grado de acumulación de C en los tepetates cultivados no depende exclusivamente del tiempo de cultivo, sino también de otros factores. El manejo agronómico determina en cierta medida la acumulación de C en estos sustratos, tal posibilidad se explora en la próxima sección.

5.1.5. Carbono orgánico y tiempo de cultivo en cuatro sistemas de cultivo a través del tiempo

Al reagrupar los datos anteriores de una manera distinta, se pudieron establecer tres diferentes condiciones de manejo agronómico (monocultivo, uso eventual de leguminosas y tratamiento frecuente con estiércol y/o labranza cero), y se observó un comportamiento muy consistente en cuanto a la acumulación del C a través del tiempo (Figura 10).

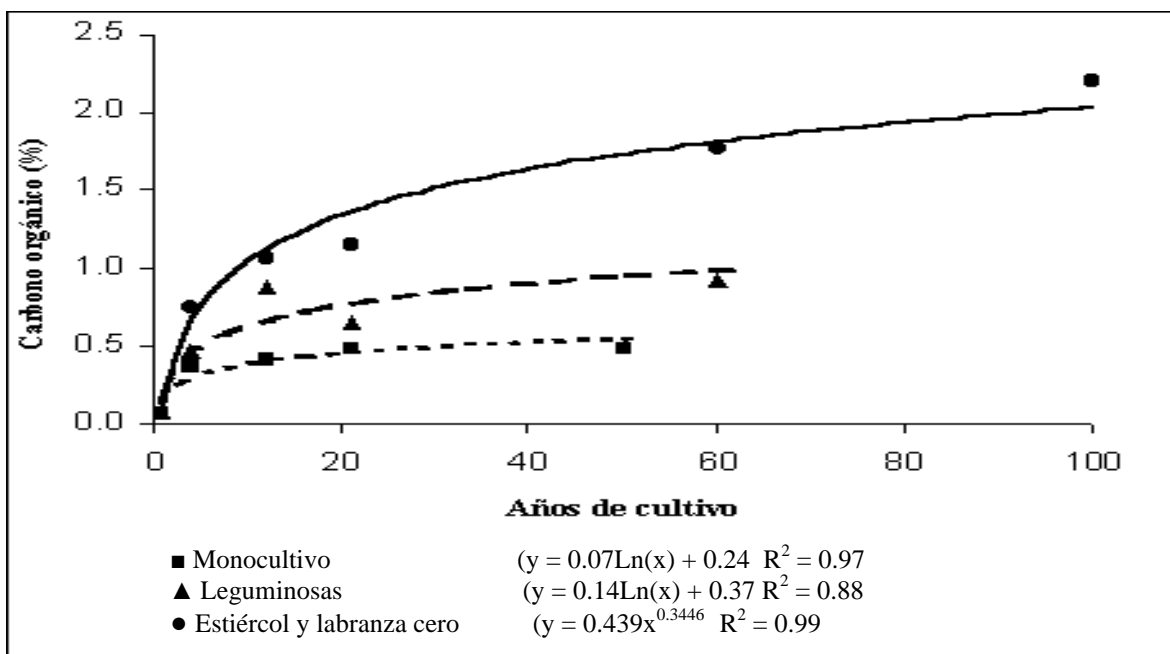


Figura 10. Carbono orgánico a través del tiempo en tepetates cultivados en diferentes sistemas de cultivo.

La acumulación de C en los tepetates cultivados a través del tiempo, dependió de la incorporación de abonos orgánicos y otras condiciones de manejo agronómico (dosis de abono, frecuencia de aplicación, tipo de cultivos y tipo de labranza) como se acaba de mostrar.

Las curvas de acumulación de C en el tiempo se ajustaron a modelos logarítmicos (en el caso del monocultivo y las leguminosas). Los sistemas agrícolas con estiércol y labranza cero presentaron aumentos de C a través del tiempo muy parecidos, por lo que se decidió juntar los datos y ajustarles un solo modelo. El modelo estadístico más apropiado en este caso resultó ser un potencial.

Si bien no se contó con series completas de información que abarcaran hasta los 100 años de cultivo para los tres casos, las tendencias fueron muy claras e indicaron que el porcentaje de C aumenta con el tiempo. Dicho aumento es más rápido durante los primeros 10 años pero después de ese tiempo se hace más lento. Esto ocurre así porque al roturar o fragmentar el lecho endurecido se proporciona un espacio donde pueden penetrar fácilmente las raíces de las plantas, se favorece la circulación de aire y agua, se aumenta la capacidad de almacenamiento de agua y se genera más espacio poroso para la retención de la solución del suelo. Por consecuencia, se tiene un aumento significativo en la acumulación de materia orgánica al aumentar la actividad biológica y desarrollarse rápidamente en el suelo flora, microflora y microfauna. Dichos organismos intervienen muy activamente en el ciclo del carbono y debido a que el substrato recién roturado no contiene prácticamente C, tiene un alto potencial para la captura de éste. Con el transcurrir del tiempo el aumento relativamente rápido que ocurre durante los primeros años de cultivo, tiende a alcanzar un equilibrio natural entre el carbono que se incorpora al suelo y

el que se pierde como CO₂, por lo que la acumulación se hace más lenta. Para lograr mayores incrementos posteriormente, depende definitivamente de la frecuente incorporación de biomasa a estos tepetates, de modo que la adición de C sea mayor que las pérdidas por oxidación. Follett (2001) mencionó que los niveles de C en el suelo a largo plazo, dependen del balance entre la adición y las pérdidas de este elemento.

En el caso particular de los sistemas agrícolas con monocultivos de cereales, lo más común en la zona, se observó que la acumulación de C se estabilizó después de la primera década. La tendencia de la curva hace pensar que será difícil que se logre acumular en estas condiciones más de 0.5 % de C, aún mucho después de 50 años de cultivo, y es posible que aún después de más 100 años de cultivo. Este comportamiento parece explicable porque en este tipo de manejo agrícola no se incorpora casi nada de biomasa al suelo, solamente lo que proviene de las raíces de los cultivos, y pequeños tallos que quedan en el terreno después de que los agricultores retiran los esquilmos agrícolas. Pérez *et al.* (2000) concluyeron que el aporte nutrimental de estos residuos en tepetates es insuficiente para cubrir la demanda de los cultivos. Aunado a ello, las gramíneas son grandes consumidoras de nitrógeno, elemento que limita la producción de biomasa de no agregarse en cantidades adecuadas. En tales circunstancias es difícil obtener mayores incrementos de C en ese sistema agrícola.

En el caso del sistema agrícola con uso frecuente de leguminosas, se observó que la acumulación de C fue mayor que en el monocultivo. La curva de acumulación cuando tiende a estabilizarse ($r= 0.94$) contiene más del doble de C que el monocultivo. El uso frecuente de leguminosas asegura una mayor incorporación de biomasa en el suelo debido a

que estas plantas tiran todas las hojas al llegar a la senectud y aunque generalmente los agricultores de la región retiran los tallos después de la cosecha, aproximadamente la mitad de la biomasa de la planta (residuos más raíces) es incorporada 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 favorablemente el medio (Puget y Drinkwater, 2001). En ambos casos se favorece la captura de carbono. Sin embargo, el nivel de acumulación de C disminuirá 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 caso del sistema agrícola con incorporación de estiércoles y residuos se mostró un comportamiento similar al observado con la labranza cero ($r= 0.99$). El incremento promedio del C 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, necesariamente favorecieron 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 después de más de 100 años de cultivo con labranza tradicional en un tepetate cultivado, es de sólo 2 % en promedio, es un valor relativamente bajo, principalmente si se toma en cuenta que después de la primera década de cultivo había un poco más de 1% de C, es decir, que pasaron más de 90 años para que se lograra incrementar en un 1% más el C en el suelo. Esto se explica porque hay una constante transformación del C del suelo en CO₂ y probablemente el C no llega a estabilizarse o formar asociaciones permanentes con componentes inorgánicos del suelo. Al respecto James *et al.* (1986) y Jenkinson (1971) demostraron que 60 a 70% del

carbono adicionado al suelo es transformado en CO₂. Estos autores mencionaron que los resultados son más o menos los mismos para climas tropicales, climas templados o invernaderos, y al mismo tiempo añaden que la producción de CO₂ ocurre como parte del ciclo del carbono durante la biodegradación de los residuos orgánicos, de modo que de 55 a 75% retorna como CO₂ al ambiente, 5 a 10% queda formando parte de la biomasa de las partes más recalcitrantes y el resto pasa a formar parte del nuevo humus, pero incluso una parte de éste también es susceptible de ser transformado a CO₂, y solamente las sustancias más recalcitrantes permanecen más tiempo en el suelo como las ligninas, melaninas y ácidos húmicos. De este modo podemos suponer que el grado de acumulación de C en el suelo no sólo depende de la incorporación de abonos orgánicos al suelo, sino de la permanencia de estos en el suelo y su calidad.

Es importante destacar que el sistema agrícola con labranza cero, tuvo un comportamiento similar al que recibió continuamente estiércol. Esto indica que al no remover el suelo se favorece la permanencia de carbono en éste y se disminuye la pérdida de carbono por oxidación a CO₂. Reicosky y Lindstrom (1993) han señalado claramente que la labranza de conservación minimiza la alteración de los suelos, favorece acumulación de C en la superficie, protege al suelo contra la erosión, conserva humedad y como resultado se incrementa el rendimiento de los cultivos. Etchevers *et al.* (2000) concluyeron preliminarmente que la labranza cero contribuía a secuestrar mayor cantidad de carbono que la labranza convencional en agricultura de ladera. Otro aspecto que se puede resaltar con relación a la labranza cero, aunque sea para un tiempo determinado (20 años), es la cantidad de C acumulada por determinados cultivos (Figura 11).

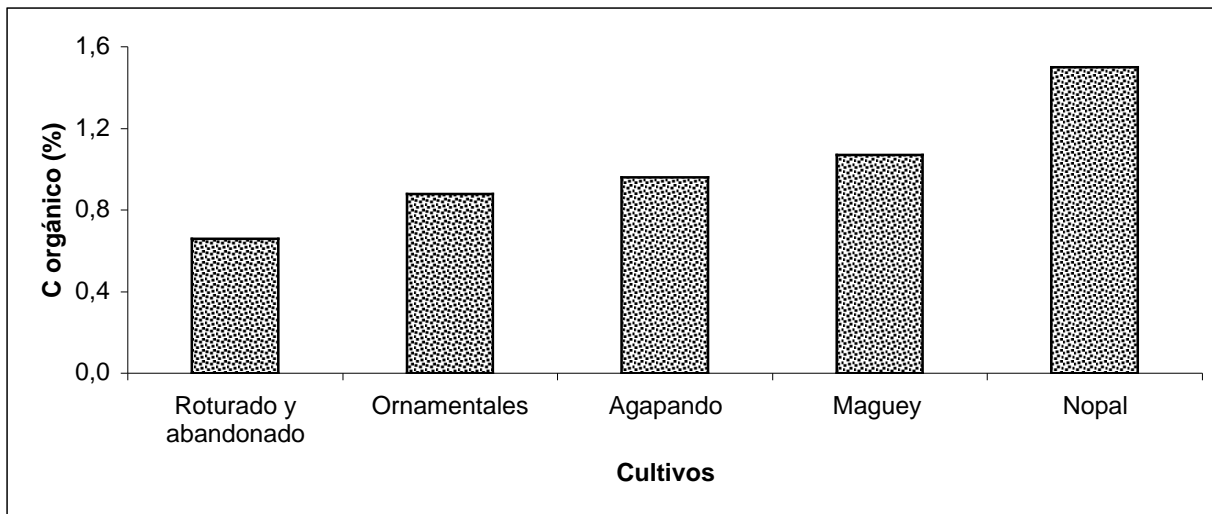


Figura 11. Acumulación de carbono orgánico en tepetates sometidos a diferentes sistemas de cultivos sin labranza después de 20 años.

Es importante señalar que aún después de roturar un tepetate y no labrarlo nunca (ornamentales y agapando), se llega a acumular una mayor cantidad de C que en los sistemas de monocultivo que se mencionaron anteriormente. Finalmente, cultivos permanentes como el nopal y el maguey, son una buena opción para el suelo de los bordes de las terrazas de tepetate ya que pueden acumular de 1 a 1.5 % de C.

5.1.6 Carbono orgánico y fósforo extractable en los tepetates

La concentración de fósforo extractable en los tepetates recién roturados fue extremadamente baja (< 2 ppm), la cual es insuficiente para satisfacer las necesidades de los cultivos en su totalidad; sin embargo, cuando se adicionaron grandes cantidades de materia orgánica, la concentración se elevó hasta aproximadamente 80 ppm.

El contenido de fósforo extractable Olsen se correlacionó positiva y significativamente ($r=0.85$) con el contenido de C (Figura 12).

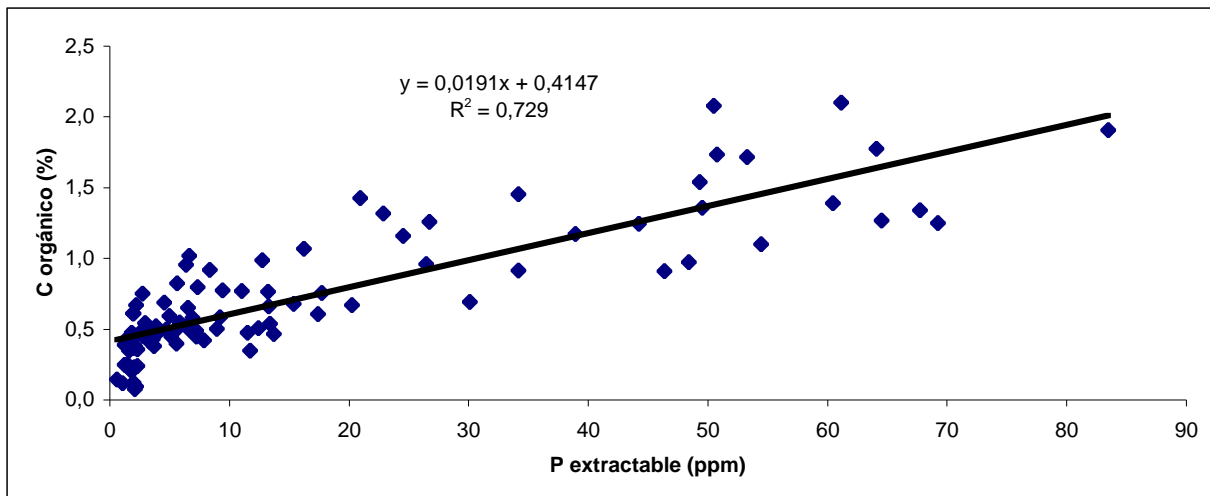


Figura 12. Relación entre contenido de carbono orgánico y fósforo extractable Olsen en tepetates cultivados.

Este resultado indicó que gran parte del fósforo disponible para las plantas en los tepetates cultivados se asocia con la fracción orgánica y probablemente éste es el mayor reservorio de este elemento para el abastecimiento de las plantas.

5.1.6.1. Fósforo extractable y sistemas de cultivo

El fósforo extractable Olsen promedio en las nueve clases establecidas entre las diferentes clases de manejo agronómico en los tepetates cultivados (I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII y IX), presentó un comportamiento similar al caso del carbono (Figura 13).

En tepetates recién roturados se pueden encontrar de 2 a 3 ppm de fósforo y éste aumenta progresivamente según el manejo agrícola empleado. En parcelas con erosión, el fósforo extractable Olsen fue muy similar al de aquellas recién roturadas. Los incrementos más significativos se encontraron en donde se incorporó frecuentemente materia orgánica en combinación con uso frecuente de leguminosas (clase VI). En las clases donde se usó el riego, la concentración de fósforo fue mayor, por el mejor manejo agrícola que se dio al suelo en estos casos. Es importante destacar que la clase VII con labranza cero,

incorporación de estiércol y uso de riego tuvo una concentración de fósforo semejante a la encontrada en tepetates cultivados bajo invernadero, los cuales tuvieron condiciones de temperatura y humedad más intensivas. Esto pone de manifiesto las bondades de la labranza de conservación y confirma lo dicho por algunos autores en México: que remover el suelo trae consigo una disminución en la fertilidad de los suelos (Figuroa y Morales, 1996; Etchevers *et al.*, 2000).

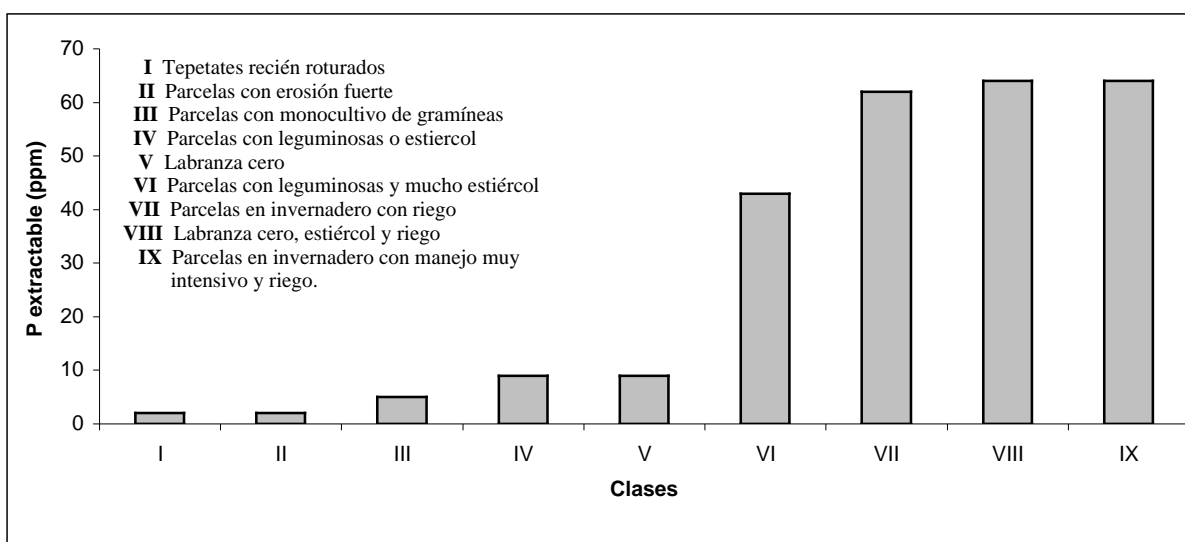


Figura 13. Contenido de fósforo extractable Olsen en tepetates cultivados según el manejo agronómico.

El análisis de varianza de fósforo extractable Olsen mostró diferencias altamente significativas ($P < 0.05$) para las clases asignadas de manejo agronómico (Cuadro 12). El modelo tuvo una $r = 0.90$, sin embargo, el coeficiente de variación fue alto.

Cuadro 12. ANOVA para la variable fósforo extractable.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	significancia
Tratamiento	8	35443	4430	$< 0.001^{**}$
Error	87	7493	86	
Total	95	42935		
R^2	Coeficiente de variación	Error estándar	Media	
0.82	51	9.3	18.1	

5.1.6.2. Fósforo extractable en cuatro sistemas de cultivo a través del tiempo

La concentración de P en los tepetates cultivados tuvo un comportamiento parecido a la acumulación de carbono. Cuando la concentración de P extractable se correlacionó considerando todos los sistemas de cultivo con el tiempo de cultivo, no se encontró relación alguna ($R^2 = 0.096$), sin embargo, al agrupar los datos de igual manera que el caso del C, se pudo confirmar que el contenido de P aumenta con el tiempo (Figura 14).

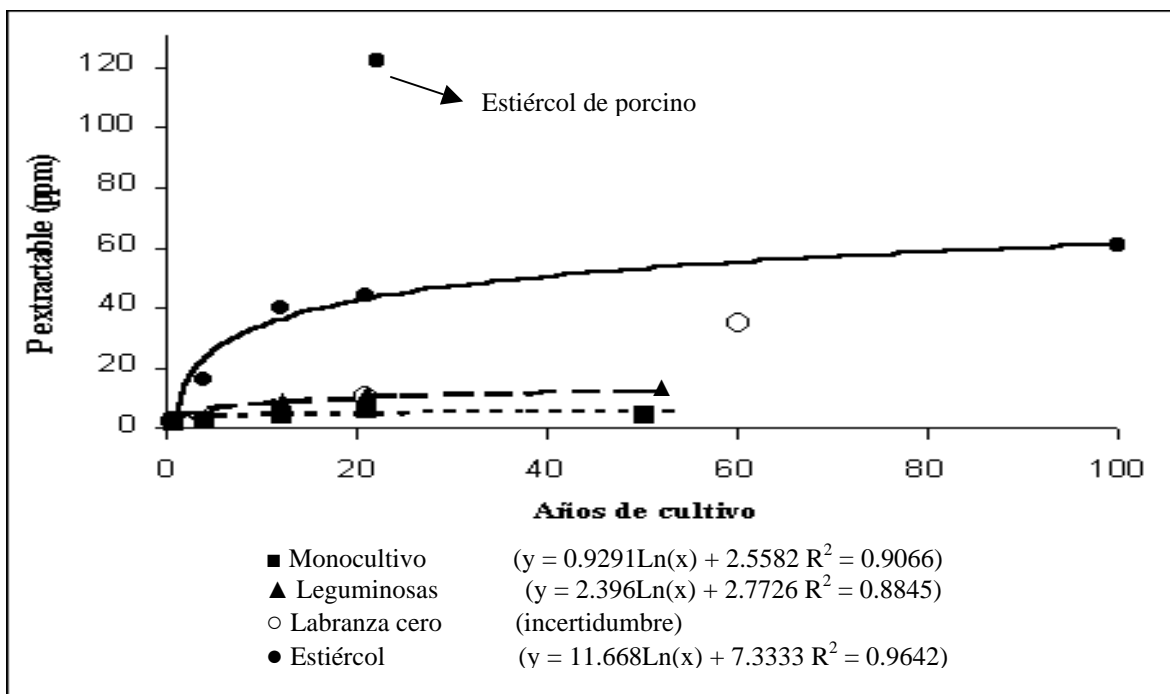


Figura 14. Acumulación de fósforo a través del tiempo en tepetates cultivados en diferentes sistemas de cultivo.

Las curvas de acumulación de P extractable Olsen se ajustaron a modelos logarítmicos en todos los casos. Sin embargo, para los sistemas agrícolas donde se usaron las leguminosas y la labranza cero, hay cierta incertidumbre porque los datos que explican el fósforo para 40 y 60 años están influenciados por algunas condiciones especiales de manejo agrícola que los hacen tener un comportamiento que impide ajustarlos al modelo estadístico apropiado.

En el monocultivo de cereales la concentración de P fue muy baja, semejante a la del tepetate recién roturado (2 ppm). La tendencia indicó ($r=0.82$) que no podría acumularse mucho más de 5 ppm de P extractable Olsen entre 10 y 50 años de cultivo con el actual

manejo. La labranza cero y el uso frecuente de leguminosas al parecer tuvieron un comportamiento semejante, sin embargo, no se pudo reunir información suficiente para estudiar mejor su comportamiento ($r=0.78$). El uso frecuente de leguminosas tuvo una concentración de P que fue casi el doble que en el monocultivo de cereales ($r=0.78$), pero ésta aún es insuficiente para satisfacer los requerimientos de los cultivos. Se sabe que las leguminosas poseen algunos mecanismos de adaptación cuando se cultivan en suelos poco fértiles. Por medio de su sistema radical pueden solubilizar P del suelo que se encuentre en formas no aprovechable para las plantas, dejando así, pequeñas porciones de P en forma disponible para éstas (Neumann y Römheld, 1999). Sin embargo, en los tepetates cultivados de este estudio, el P extractable estuvo estrechamente relacionado con la adición de abonos orgánicos, como ya se explicó anteriormente. Por lo tanto el aumento en la concentración de P en este sistema de cultivo, podría deberse a que las leguminosas aportan un poco de más materia orgánica a los suelos que los cereales, porque los campesinos acostumbran a retirar los esquilmos agrícolas de los campos de cultivo, y una parte de la biomasa de las leguminosas no puede ser retirada, como se explicó en el punto 5.1.5.

Los sistemas agrícolas con incorporación frecuente de estiércol mostraron una mayor cantidad de P extractable Olsen en el suelo ($r= 0.93$). La tendencia indicó que durante la primera década de cultivo hubo un rápido incremento de aquél, que alcanzó hasta 45 ppm, pero la tendencia tiende a estabilizarse después de alcanzar ese valor. Sólo existe un punto de referencia después de 20 años de cultivo, sin embargo, hay información suficiente en todos los sistemas agrícolas hasta los 20 años de cultivo.

Es importante destacar que hubo un caso particular en una parcela donde se incorporó mucho estiércol de porcino durante 20 años, y después de ese periodo la concentración de P extractable medida fue de más de 120 ppm de fósforo (Figura 14). Si se toma en cuenta este

punto, se puede apreciar que la acumulación de P con el tiempo puede ser muy grande en comparación con la incorporación de estiércoles de bovino, ovino, equino o simplemente pajas. Esto se explica porque la alimentación porcina regularmente se hace con base en grano, que es la parte de las plantas donde se acumula la mayor cantidad de fósforo, aunado a que los cerdos son monogástricos y no alcanzan a digerir totalmente el alimento, por lo tanto los excrementos pueden contener mayor cantidad de P que el de los rumiantes. No se encontró información suficiente para comparar más detalladamente el contenido de P con diferentes tipos de estiércoles, sin embargo, es posible inferir que el aumento del P extractable Olsen a través del tiempo puede depender también del tipo de estiércol que se incorpore. En un estudio sobre la composición química de estiércol de ganado vacuno Donahue *et al.* (1993) reportaron que el contenido de P varía desde 0.2 hasta 1%, según la calidad alimenticia del ganado. Es importante señalar que la alimentación del ganado vacuno en la zona de estudio durante la mayor parte del año, es con base en paja de maíz, y es posible que el estiércol obtenido de este ganado contenga muy poco fósforo. Contreras (1994), evaluó el efecto de la porqueraza en el rendimiento de maíz y determinó que el estiércol de porcino podía contener más de 2.5% de fósforo. Por lo tanto, el estiércol de porcino puede aportar más P que el estiércol de bovino.

5.1.7. Carbono orgánico en seis parcelas experimentales de tepetate

Se contaba con información muy precisa de seis parcelas experimentales en cuanto al manejo agronómico (Cuadro 13), y ésta se utilizó para relacionarla con el C.

El C de las parcelas roturadas a 60 cm de profundidad (T1) y de aquellas donde se alcanzó la mayor fineza en la preparación del terreno (T4) fue parecido a lo obtenido en T5 donde la roturación y preparación del terreno fue convencional.

Cuadro 13. Resultados de parcelas de tepetate experimentales en San Miguel Tlaixpan, Texcoco.

Trat	Sistema de cultivo	pH	CE mmhos cm ⁻¹	C %	MO %	P ppm	Arena %	Limos %	Arcilla %
T1	Asociación gramínea-leguminosa, profund.	7.02	0.111	0.41	0.71	3	25.7	38.5	35.8
T2	Monocultivo de maíz	7.07	0.130	0.40	0.69	2	22.8	40.1	37.1
T3	Asociación gramínea-leguminosa + estiércol	7.39	0.195	0.76	1.31	18	23.2	41.0	35.8
T4	Asociación gramínea-leguminosa + DL	7.02	0.099	0.46	0.80	2	27.1	40.6	32.3
T5	Asociación gramínea-leguminosa	7.03	0.088	0.47	0.81	4	28.0	44.8	27.2
T6	suelo	6.26	0.067	0.83	1.43	1	33.0	26.3	40.7

DL: doble labranza para mullir más el terreno. CE: conductividad eléctrica

Siguiendo el mismo criterio de agrupación que en los casos anteriores se establecieron algunas clases de manejo: I. Tepetate recién roturado, II. Monocultivo de cereales, III, Asociación gramínea-leguminosa (AGL), IV. AGL más Estiércoles y V. Suelo de referencia (no es tepetate). Cuando se comparó el C promedio de estas clases con las de un suelo de referencia se observó que el manejo se relacionaba claramente con el porcentaje de C. Algo similar ocurrió en el fósforo Olsen, salvo que en este caso el fósforo del suelo de referencia fue muy bajo (Figura 15).

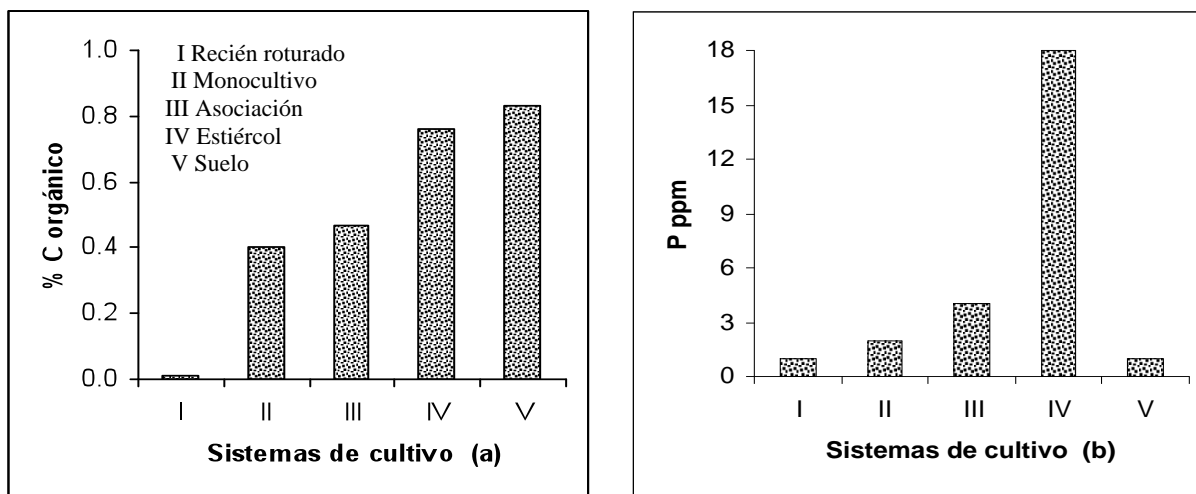


Figura 15. Carbono orgánico (a) y fósforo extractable (a) en las parcelas de tepetate experimentales.

La acumulación de C y P extractable Olsen durante los primeros años de cultivo mostró un comportamiento similar a lo explicado anteriormente; es decir, de menor a mayor grado según el sistema de cultivo empleado. Es posible resaltar que en la clase IV después de 4

años de cultivo se acumuló casi la misma cantidad de C que en el suelo de referencia, y la acumulación de fósforo fue de 6 a 9 veces mayor que en las otras parcelas de tepetate. Estos resultados confirman la eficiencia de la incorporación de estiércol, como una práctica de manejo agronómico adecuada para la rápida incorporación de los tepetates a la agricultura.

Fue notable que la referencia de suelo no tuvo casi nada de P extractable Olsen, aún después de haber incorporado esquilmos agrícolas y fertilizantes químicos. Su carencia puede asociarse a propiedades parecidas a los suelos andosoles.

La cantidad de C promedio por año que se acumuló en estos tepetates después de 4 años de cultivo, fue de 0.1 a 0.2%, según el manejo agronómico. Si se toma en cuenta que la densidad aparente promedio de estos tepetates cultivados es de 1.1 (Rugama, 1997), entonces se puede estimar que se acumularon de 2.2 Mg ha⁻¹ a 4.8 Mg ha⁻¹ de C por año respectivamente. El contenido tan bajo de carbono que tienen los tepetates durante los primeros años de cultivo y comparando con lo que se puede acumular bajo ciertas condiciones de manejo agrícola explicados anteriormente, ponen de manifiesto que estos tepetates son unos grandes almacenes de carbono. Esta tasa de acumulación, ocurrió así durante los primeros años de cultivo del tepetate, cuando éste no contiene prácticamente C. Después de 10 años de cultivo, la tasa de acumulación se hace más lenta, como ya se explicó en el punto 5.1.5. Sin embargo, se puede inferir que en tepetates donde hubo más de 4 % de C, el cual se acumuló en un tiempo determinado y en una condición de manejo agrícola específica, hay más de 88 Mg ha⁻¹ de carbono que fue capturado. Este resultado nos da una idea del potencial de almacenamiento de C que tienen estos tepetates.

5.2. Carbono orgánico y algunas mediciones físicas del tepetate

5.2.1. Carbono orgánico y estabilidad de agregados en húmedo

Los resultados de las pruebas estabilidad de agregados en húmedo (EAH) se agruparon en tres clases de manejo agrícola según la resistencia que tuvieron a esta prueba de humedecimiento: labranza convencional (barbecho, rastra, aporque), invernadero y labranza cero (Figura 16). En la primera clase se incluyeron la mayor parte de las observaciones y en las otras dos clases solamente hubo una observación por clase; sin embargo, éstas fueron las únicas que tuvieron en promedio más de 90% de agregados (apéndice 5) que fueron consistentes, en contraste con todos los sistemas agrícolas de labranza convencional. La EAH en estos sistemas agrícolas según Kaúrichev (1984) fueron buena, excelente y excelente respectivamente.

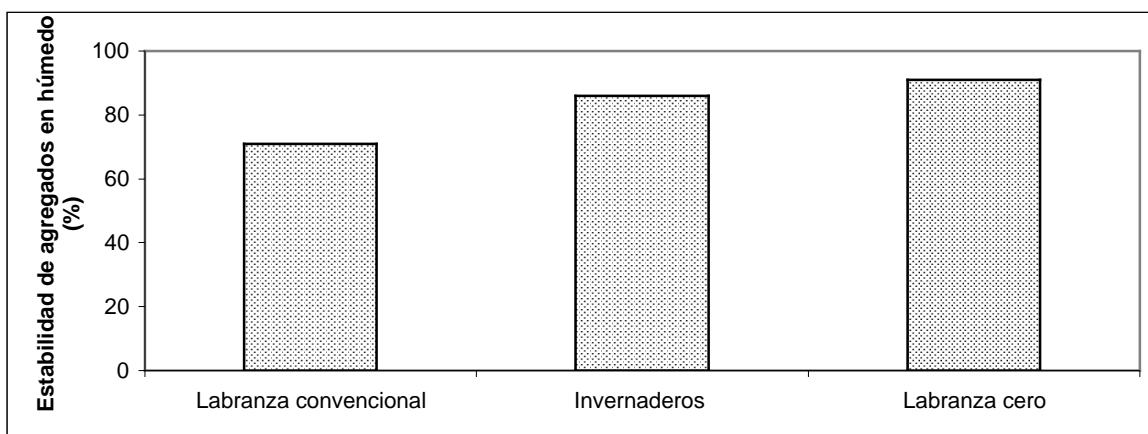


Figura 16. Estabilidad de agregados en húmedo en tepetates.

Es importante señalar que la EAH en los sistemas agrícolas con labranza convencional estuvo influenciada por los fragmentos provenientes del material original, los cuales son de consistencia dura y resistieron muy bien a dicha prueba. Cuando las muestras fueron sometidas al equipo Yoder, ningún agregado resistió la prueba, y en los tamices solamente quedaron fragmentos que se distinguieron claramente. Por lo tanto, se infirió que no hubo agregados estables en húmedo en estos sistemas agrícolas, sino fragmentos de tepetate

estables. El C promedio ponderado por tamaño de partícula de estas muestras fue desde trazas hasta 2%.

Los agregados que había en los sistemas agrícolas con labranza cero y en el invernadero fueron de consistencia más dura que los anteriores y resistieron muy bien la prueba de humedecimiento. La labranza cero correspondió a una parcela que ha sido cultivada con plantas ornamentales (agapando), medicinales y frutales por más de 60 años, donde se cuenta con riego y se incorporan regularmente abonos orgánicos. El promedio ponderado de C (por tamaño de partícula) en este tepetate fue de 4.2%.

El invernadero correspondió a una parcela donde se cultivó de manera intensiva flores ornamentales, principalmente crisantemos; se usa el riego, se incorporaron varios tipos de abonos orgánicos como pajas, estiércol de bovino y madera podrida molida en descomposición. El promedio ponderado (medido por tamaño de partícula) en este tepetate fue de 3.5% de C.

Cabe destacar que los sistemas agrícolas que tuvieron EAH más alta, también tuvieron la cantidad más alta de C promedio de todas las muestras incluidas en este estudio. Esto indicó que el C juega un papel muy importante en la estabilidad de agregados.

Cabe señalar que la prueba EAH simula fuerzas de desintegración y cuantifica la cantidad de agregados resistentes a dichas fuerzas (Montenegro y Malagón, 1990). Ésta depende de que las partículas que estén firmemente unidas entre sí. Las prácticas inadecuadas de manejo del suelo constituyen la principal causa del deterioro de la estructura de éste, porque provocan la desintegración y pulverización de los agregados expuestos a las fuerzas producidas por la labranza, la erosión, el humedecimiento y secado. Existe un rompimiento drástico de los agregados como consecuencia de la energía aplicada al suelo durante la labranza (Oades y Waters, 1991). En el caso de los tepetates la falta de obras de

conservación de suelos, la excesiva labranza, la siembra constante de gramíneas, el retiro de los esquilmos agrícolas y la falta de incorporación de materia orgánica, constituyen los principales factores de degradación del tepetate (Báez, 1998). Con la labranza se propicia el rompimiento de macroagregados lo que da lugar a los microagregados y éstos a la disociación de las partículas primarias, teniendo como resultado la pulverización de los agregados del suelo. En contraste, buena agregación facilita la infiltración de agua, la retención de humedad, la aireación y el drenaje, lo cual propicia una eficiente retención y asimilación de nutrimentos por las plantas. La distribución y estabilidad de los agregados del suelo depende de la cantidad de materiales cementantes orgánicos (microorganismos, polisacáridos, compuestos fenólicos, polímeros etc.) e inorgánicos (sílice, carbonatos, óxidos, arcillas) que se encuentran presentes en el suelo y que se unen entre sí por medio de enlaces covalentes y cargas electrostáticas, formando así los agregados del suelo (James *et al.*, 1986; Six *et al.*, 2000; Stevenson, 1994). Los agregados con sus distintos tamaños, formas, porosidad, resistencia mecánica y resistencia al agua conforman la estructura del suelo (Kaúrichev, 1984). Midiendo estas características de los agregados es posible determinar algunos índices que indiquen la calidad de la estructura del suelo.

5.2.2. Carbono orgánico y estado estructural del suelo

El estado estructural del suelo (EES) en seco y en húmedo se presentan en la Figura 17. Se muestran los tres sistemas de cultivos que ya fueron descritos anteriormente (labranza convencional, invernadero y labranza). El EES húmedo fue bueno para labranza convencional y excelente para invernaderos y labranza cero. Mientras que el EES seco fue excelente para todos los casos.

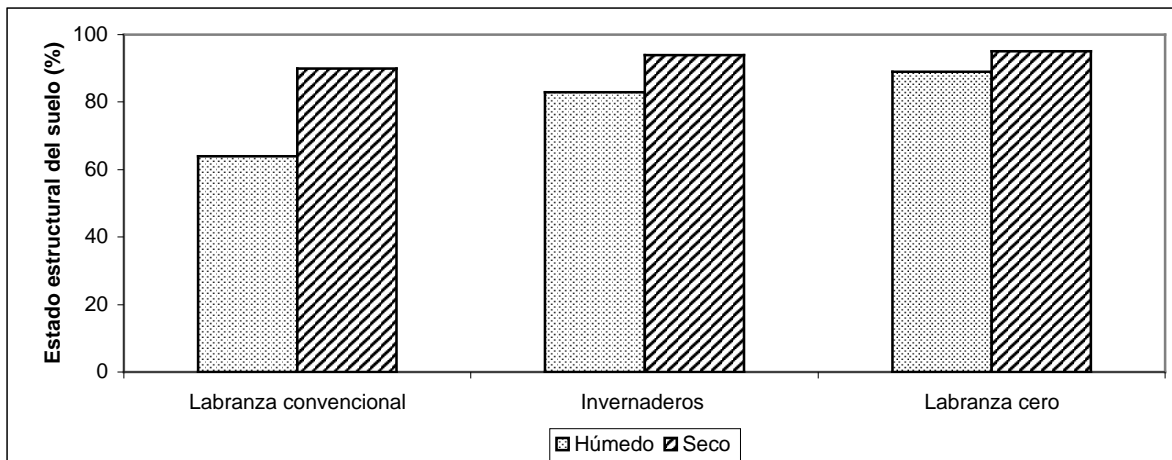


Figura 17. Estado estructura del suelo en tres sistemas agrícolas en tepetates cultivados.

El EES húmedo de los sistemas agrícolas con labranza convencional, correspondió en realidad al de los fragmentos de tepetate, tal como se explicó en el punto anterior; es decir, que no hubo EES húmedo para los agregados encontrados en estos sistemas agrícolas. Mientras que el EES seco para este mismo caso, estuvo fuertemente influenciado por los fragmentos de tepetate. Se observó de forma cualitativa que los agregados en seco fueron muy frágiles, es decir, que se desmoronaban fácilmente al tamizar; tanto en los sistemas agrícolas con labranza convencional para monocultivos (<0.5% C), como en donde se incorporaron abonos orgánicos (1-2% C). Se sabe que los fragmentos son de consistencia más dura que los agregados y que contiene muy poco C. Con base en esto se trató de evidenciar la interferencia que tuvieron los fragmentos en la prueba de EES seco, al relacionar de manera general el contenido de C con el EES seco de los sistemas agrícolas con labranza convencional (Figura 18). Se observó que hubo una tendencia negativa que indicó que el contenido de C fue mayor donde el EES fue menor ($r=0.85$).

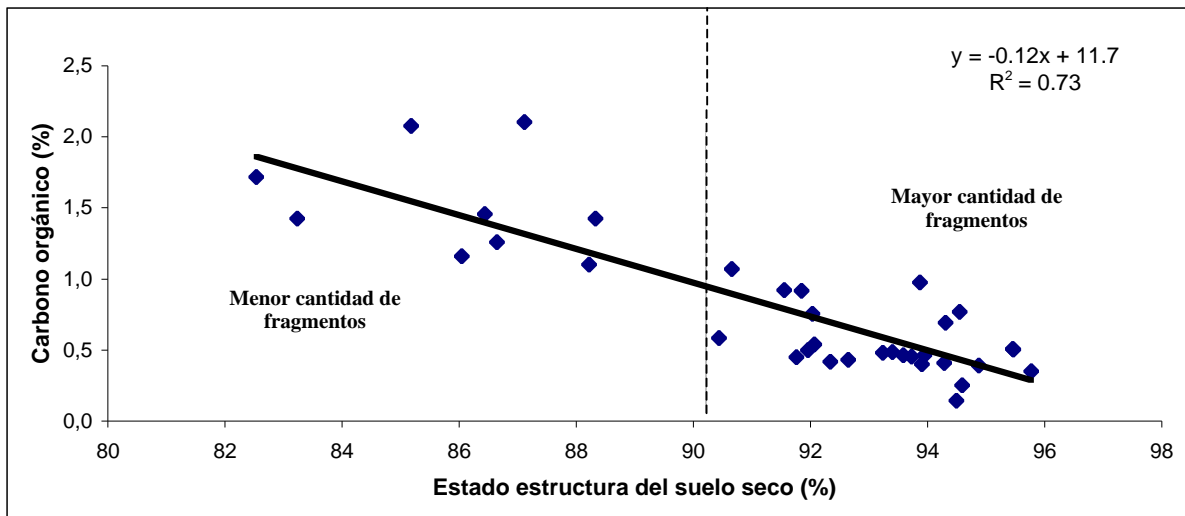


Figura 18. Relación entre carbono orgánico y estabilidad de agregados en sistemas agrícolas con labranza convencional en tepalcates.

Esto demuestra que donde hubo un mayor EES seco, en los sistemas agrícolas con labranza convencional, hubo una mayor cantidad de fragmentos.

En los sistemas agrícolas de invernadero y labranza cero, los agregados fueron muy consistentes y por eso tuvieron una excelente EES tanto en húmedo como en seco. Las explicaciones son las mismas a lo indicado en el punto anterior.

La intensificación de la labranza de un suelo, hace que el contenido de materia orgánica decrezca con un correspondiente decremento de la estabilidad de agregados (Angers y Mehuis, 1989). El rompimiento de los agregados del suelo trae como consecuencia un aumento de la superficie específica de las partículas del suelo, una continua exposición a microorganismos del suelo y una mayor oxidación del C en forma de CO₂ que está presente en los compuestos que tienen cohesión con la fracción mineral (cementantes orgánicos) del suelo. Por lo tanto, la pérdida de la estructura del suelo también ocasiona una disminución en la fertilidad del suelo. La materia orgánica, por su parte, incrementa la cohesión de los agregados del suelo a través de uniones de las partículas minerales por

medio de polímeros orgánicos o enlaces de partículas con raíces finas u hongos (Tisdall y Oades, 1982). En la Figura 19 se presenta un ejemplo ilustrativo del deterioro de la estructura ocasionada por el rompimiento de los agregados del suelo.

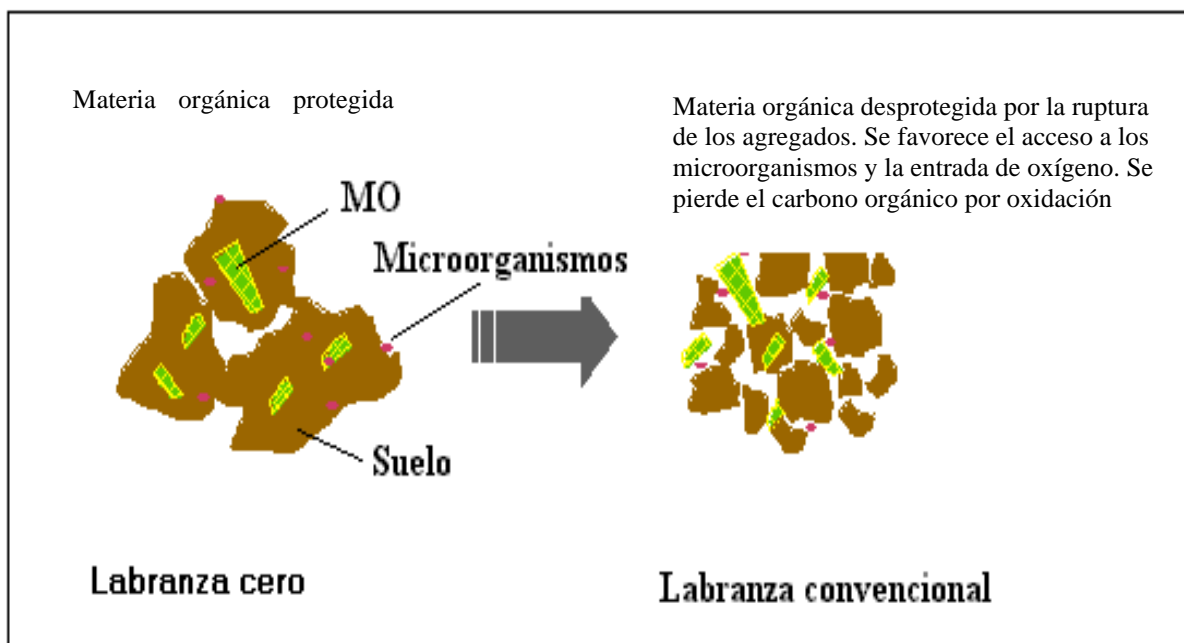


Figura 19. Rompimiento de agregados y deterioro de la estructura del suelo (Brinkman *et al.*, 2001).

En el caso del tepetates cultivado, las labores agrícolas asociadas a la labranza convencional (barbecho, rastreo, aporque) tienen un impacto más destructivo sobre los agregados que en otros tipos de suelo. Los tepetates no son propiamente suelos, sino substratos que pueden ser acondicionado artificialmente para practicar la agricultura, pero inicialmente no contiene agregados, sólo fragmentos inertes procedentes del material original (tepetate). La producción de agregados se encuentra limitada por su continua desintegración y pulverización.

Por otra parte, cabe señalar que estos tepetates cultivados, pueden considerarse como suelos muy jóvenes en proceso de formación, y su fertilidad está limitada en gran parte por algunas características físicas que son desfavorables para el buen desarrollo de los cultivos (estructura, porosidad, retención de humedad, formación de costras semipermeables).

Navarro (1992) ha establecido que las limitantes de la producción agrícola en los tepetates están determinadas, en su mayor parte, por algunas características físicas que impiden el buen desarrollo de los cultivos. Los tepetates después de la roturación tienen una gran cantidad de poros grandes ($> 120 \mu\text{m}$), pero carecen de poros pequeños y medianos (0.2 a $10 \mu\text{m}$) para el almacenamiento de agua aprovechable para los cultivos (Werner, 1992). Sin embargo, si se recompacta un poco el material roturado con maquinaria pesada, se pueden reducir las grietas grandes, y mejorar la distribución de poros, hasta alcanzar 51% de porosidad total, con 20% de poros gruesos, 20% de poros medianos y 11% de poros finos. Pero en estas condiciones las lluvias intensas pueden reducir la aireación e infiltración de agua por la formación de costras superficiales. Lauffer *et al.* (1997) estudiaron estas costras superficiales que se forman en los tepetates cultivados y concluyeron que ocasionaron problemas para el desarrollo de los cultivos, como la obstrucción de la emergencia de las semillas pequeñas (cebada, trigo, veza, etc), retraso de la emergencia de semillas más grandes (maíz, frijol, haba, ayocote etc.) y limitan la infiltración de agua en el suelo y aireación. La formación de estas costras se debe en parte a la falta de estructura en los tepetates durante los primeros años de cultivo.

La disponibilidad de nutrimentos puede ser modificada con la adición de abonos químicos y orgánicos (Navarro y Flores, 1997; Prat y Báez, 1998) pero la fertilidad física del suelo solamente puede aumentar con el mejoramiento de la estructura de éste. El C orgánico juega un papel muy importante en la producción de agregados estables. Los productos de la descomposición de la MO en el suelo y sus cambios químicos se asocian estrechamente con las partículas minerales del suelo, y la MO tiende a estabilizarse químicamente y físicamente, es decir, que se hace más resistente a la biodegradación (Denis y Claire, 1998). De este modo la asociación organo-mineral provoca la aglutinación de las partículas

primarias del suelo formando microagregados (< 0.25 mm) que a la vez se aglutinan y forman los macroagregados (> 0.25 mm). La MO atrapada dentro de los macroagregados queda protegida al acceso de microorganismos y contribuye a la producción de agregados estables que prolongan su permanencia en el suelo. Todo esto se traduce en un mejoramiento en la estructura del suelo.

5.2.3. Carbono orgánico y coeficiente de estructuración

Se relacionó el C con el coeficiente de estructuración del suelo (E). Cuanto mayor es el valor de E, mayor es la estructuración del suelo (Kaúrichev, 1984). Los resultados de E se muestran en la Figura 20, donde se observa que los sistemas agrícolas con labranza convencional tuvieron un mayor E, mientras que los sistemas agrícolas en invernadero y labranza cero tuvieron una E baja. Es importante señalar que los bajos valores de E de estos últimos, se debió a que tuvieron una gran cantidad de partículas >11.5 mm.

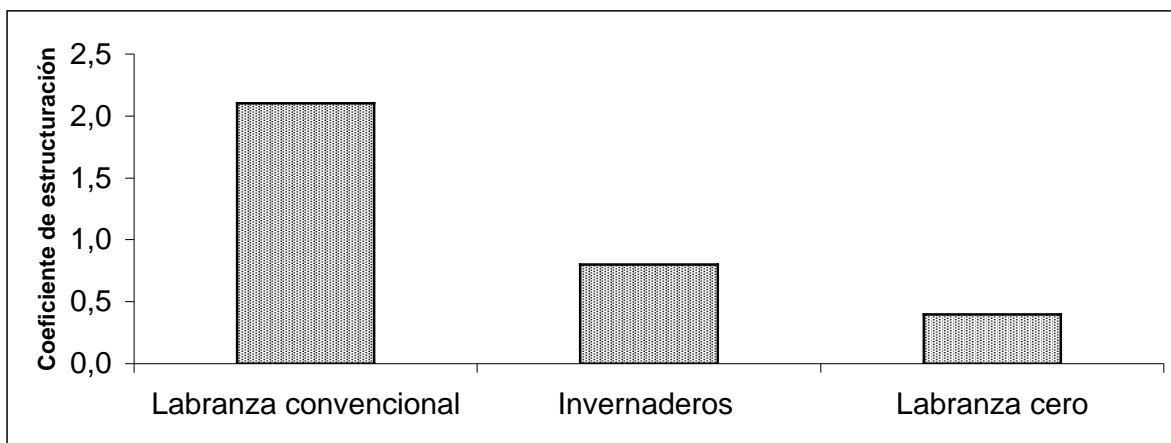


Figura 20. Coeficiente de estructuración en tres sistemas agrícolas en tepetates cultivados.

El concepto de E se deriva de la relación que existe entre el porcentaje de partículas entre 0.25 mm y 11.5 mm (que se consideran agrónomicamente la más valiosa) y el resto de las partículas del suelo. Mientras que los sistemas agrícolas con invernaderos y labranza cero

tuvieron 50 y 70% respectivamente, de partículas >11.25 mm, en los sistemas agrícolas con labranza convencional hubo en promedio 30% de estas partículas. Es importante puntualizar que el sistema agrícola con labranza cero, hubo más de 53 % de partículas >50.3 mm. Se observó cualitativamente que los agregados en este caso se encontraban fuertemente unidos y contenían una gran cantidad de raíces y lombrices en contraste con los demás sistemas de cultivo, aunado a que fue uno de los casos donde se hubo mayor cantidad de C.

Dentro de los sistemas agrícolas con labranza convencional el E varió de 1 a 3. Sin embargo, no se encontró ninguna relación con el contenido de C. (Figura 21).

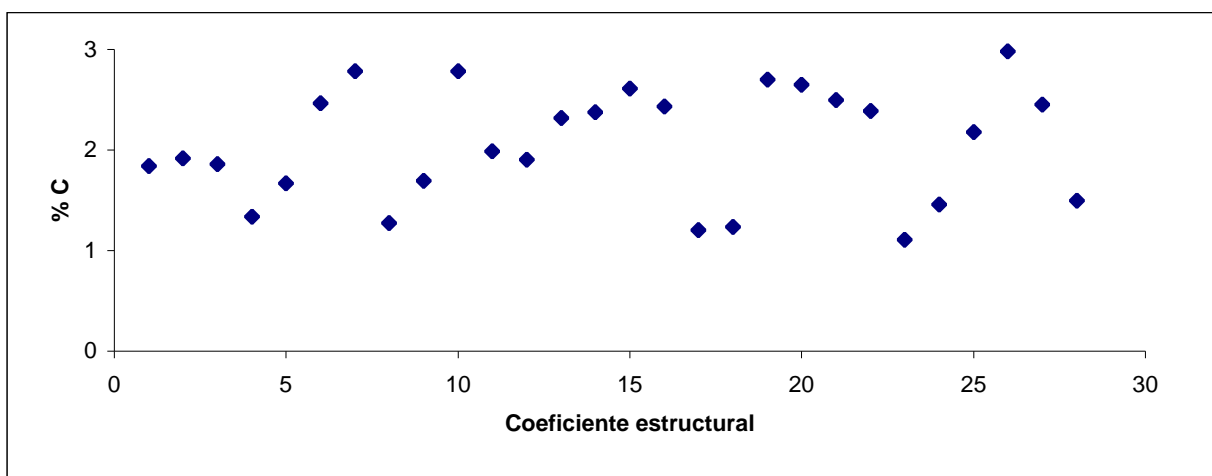


Figura 21. Carbono orgánico y coeficiente de estructuración en tepetates.

Esto se atribuyó a que no son agregados propiamente tales, pero que participan en la fracción indicada, es decir, que hubo mucha interferencia de los fragmentos procedentes del material original. También fue frecuente encontrar en las muestras bloques de tepetate mayores de 11.5 mm de diámetro que constituyeron una parte importante en el peso total de las partículas. Por otra parte, se observó cualitativamente una gran variación en cuanto a la dureza del material original en los distintos tamaños de partícula medidos, de modo que en donde los fragmentos eran más frágiles, los E fueron más altos y viceversa. Más adelante se

explican los resultados obtenidos de las mediciones de la dureza de los fragmentos y agregados en distintos tamaños de partícula.

5.2.4. Carbono orgánico en macropartículas y micropartículas

Las partículas (agregados + fragmentos) del tepetate cultivado se dividieron en dos clases: macropartículas (MA) con diámetro mayor a 0.25 mm y micropartículas (MI) con diámetro menor a 0.25 mm (Kaúrichev, 1984). La proporción relativa de MA y MI fue medida en las tres clases de manejo agrícola que se mencionaron anteriormente (Figura 22). Los tepetates de los sistemas agrícolas de labranza cero y cama de invernadero tuvieron alrededor de 95% de MA y muy pocos MI (2% y 5%, respectivamente). Los sistemas agrícolas con labranza convencional presentaron también una gran cantidad de MA, pero tuvieron de 4 a 10 veces más MI que en los casos anteriores.

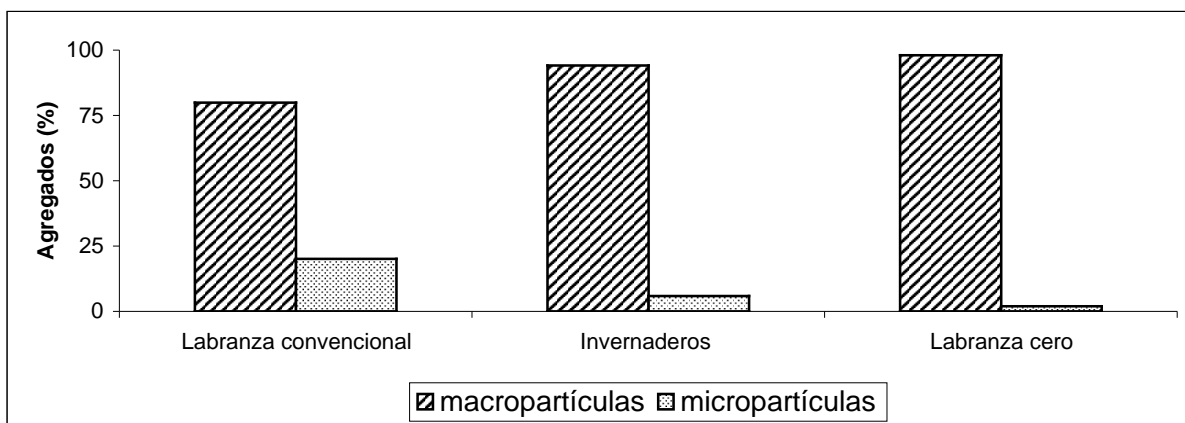


Figura 22. Macropartículas y micropartículas en tres sistemas de cultivo en tepetates cultivados.

En estos últimos hubo un mayor rompimiento de las partículas del tepetate ocasionado por la energía aplicada al suelo mediante los diversos implementos agrícolas (rastra, arados, surcadores etc.) que son utilizados en este tipo de agricultura. Por lo tanto, el grado de dispersión de las partículas del suelo en este sistema agrícola, fue más alto que en los otros

casos. Con base en esto, se infirió que el grado de estructuración del suelo en los sistemas agrícolas con labranza convencional es bajo.

Para comprobar si el C en los tepetates cultivados con labranza convencional se encuentra en mayor cantidad en las partículas inferiores a 0.25 mm de diámetro, se correlacionó la cantidad de estas partículas separadas por la prueba de estabilidad de agregados en seco, con el contenido de carbono. También se correlacionó la cantidad de partículas > 0.25 mm con el contenido este último. Los resultados se muestran en la Figura 23.

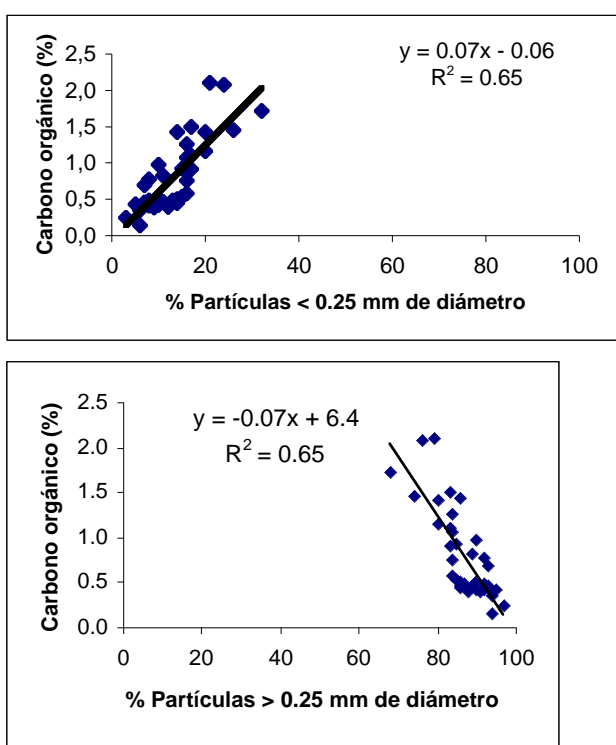


Figura 23. Microagregados, macroagregados y carbono orgánico en sistemas agrícolas con labranza convencional en tepetates cultivados.

La cantidad de C se relacionó positivamente con MI ($r=0.80$) y negativamente ($r=0.80$) con MA. Esto confirma que la cantidad de C en este tipo de sistema de labranza es mayor en MI. Al incrementar la intensidad de la labranza se induce la pérdida de C de MA y a la ganancia de C en MI, pero a costa de una pérdida global del C del suelo (Six *et al.*, 2000). Según Jastrow *et al.* (1996) en los MA se encuentra mayor cantidad de C soluble que es

más fácilmente oxidable y en las partículas más finas se encuentra mayor cantidad de C más resistente a la biodegradación. Monreal *et al.* (1997) mencionaron que en los compuestos orgánicos que se encuentran asociados con macroagregados están constituidos por carbohidratos, ligninas, lípidos, monómeros y fenoles, compuestos alifáticos y aromáticos. Mientras que los microagregados está asociados con moléculas altamente humificadas.

En el caso de tepetates cultivados con labranza convencional; esto es, agregados sometidos a una continua pulverización, es posible que haya una menor cantidad de C soluble y que éste quede atrapado en las partículas más finas del suelo. En la Figura 24 se presenta una ilustración sobre la permanencia de la materia orgánica en distintos tamaños de agregados.

La fracción arcillosa puede interaccionar con materia orgánica humificada y bacterias, los microagregados están vinculados con materia orgánica estable y hongos, pero éstos a su vez pueden estar unidos a agregados más grandes por medio de materia orgánica más joven, raíces y materia orgánica muy reciente (Oades y Waters, 1991).

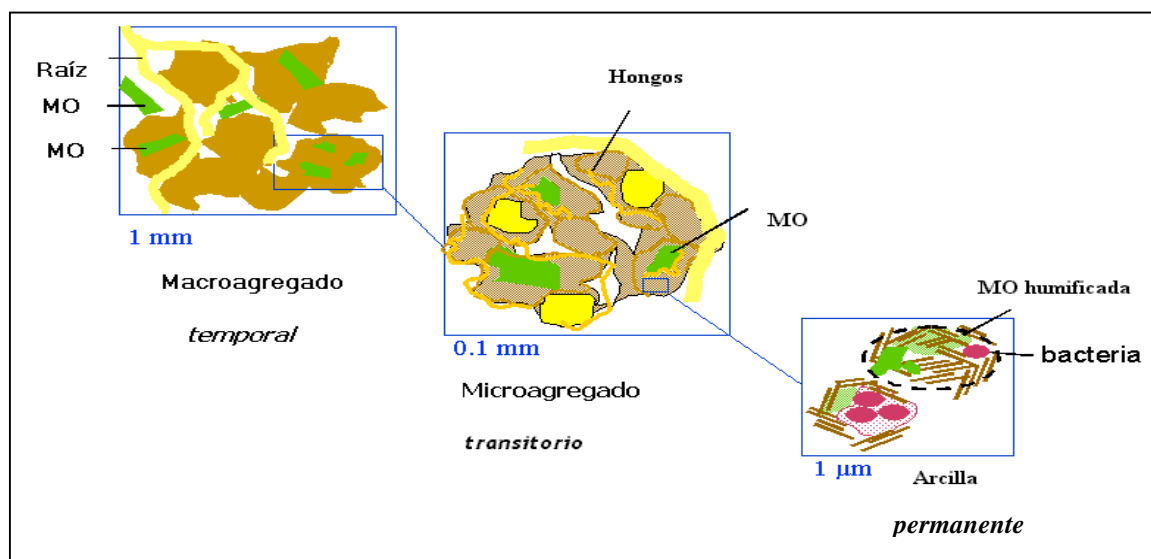


Figura 24. Tiempo de permanencia de la materia orgánica del suelo en macroagregados y microagregados. (Brinkman *et al.*, 2001).

5.2.5. Carbono orgánico en distintos tamaños de partículas

Se midió la cantidad de C en partículas de 13 diámetros medios distintos, para 10 casos particulares, seleccionados por ser representativos de la condición de manejo agrícola que presentaron. Las relaciones entre C y diámetro medio de partícula se muestran en la Figura 25. Se evidenció el contraste que hubo entre el porcentaje de C del tepetate recién roturado, con el menor nivel, y el invernadero, que tuvo la concentración más alta de carbono. Es obvio que los demás sistemas de cultivo aquí presentados, se encuentran entre este rango.

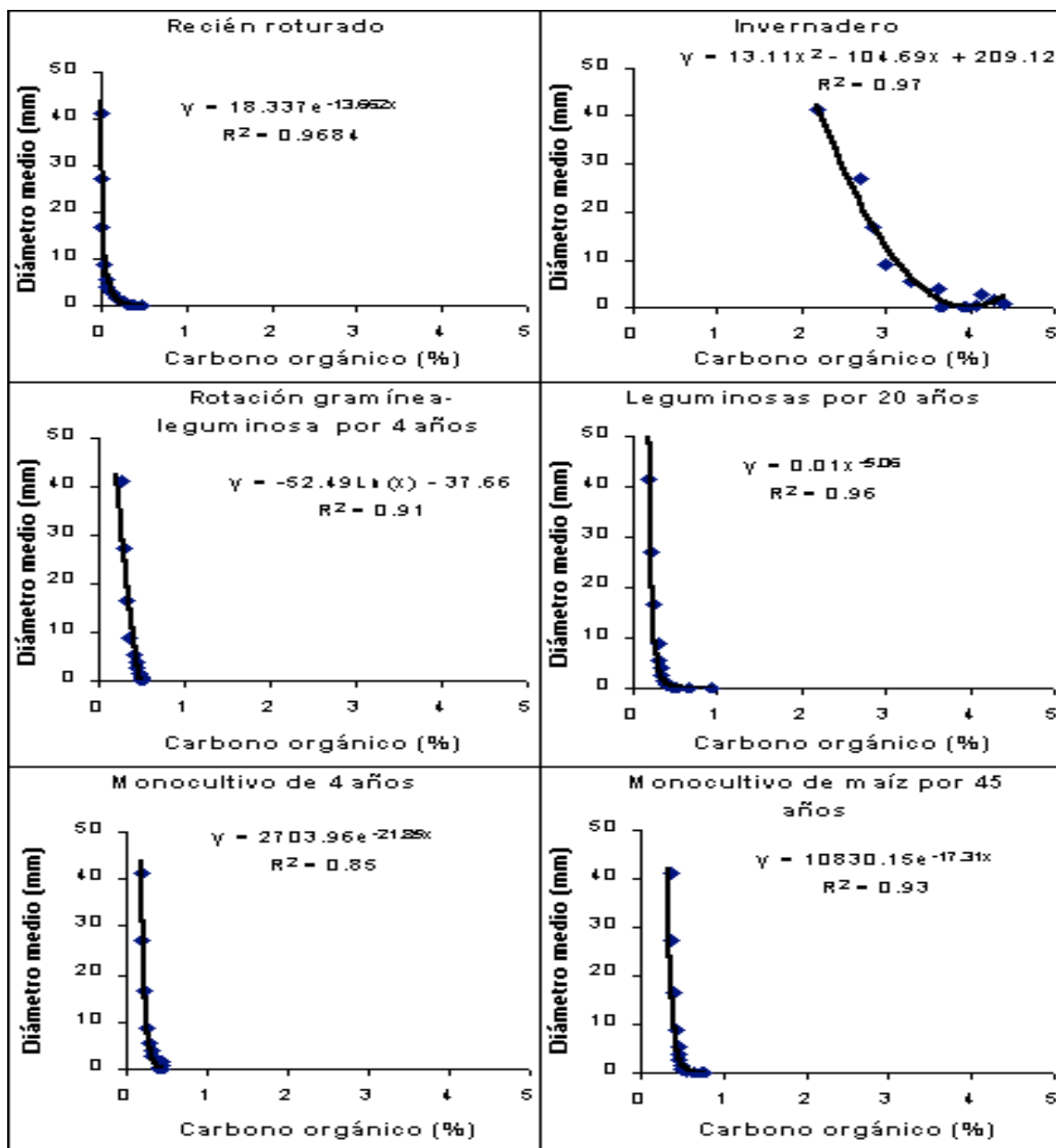


Figura 25. Carbono orgánico y diámetro medio de partícula en distintos sistemas agrícolas en tepetates cultivados.

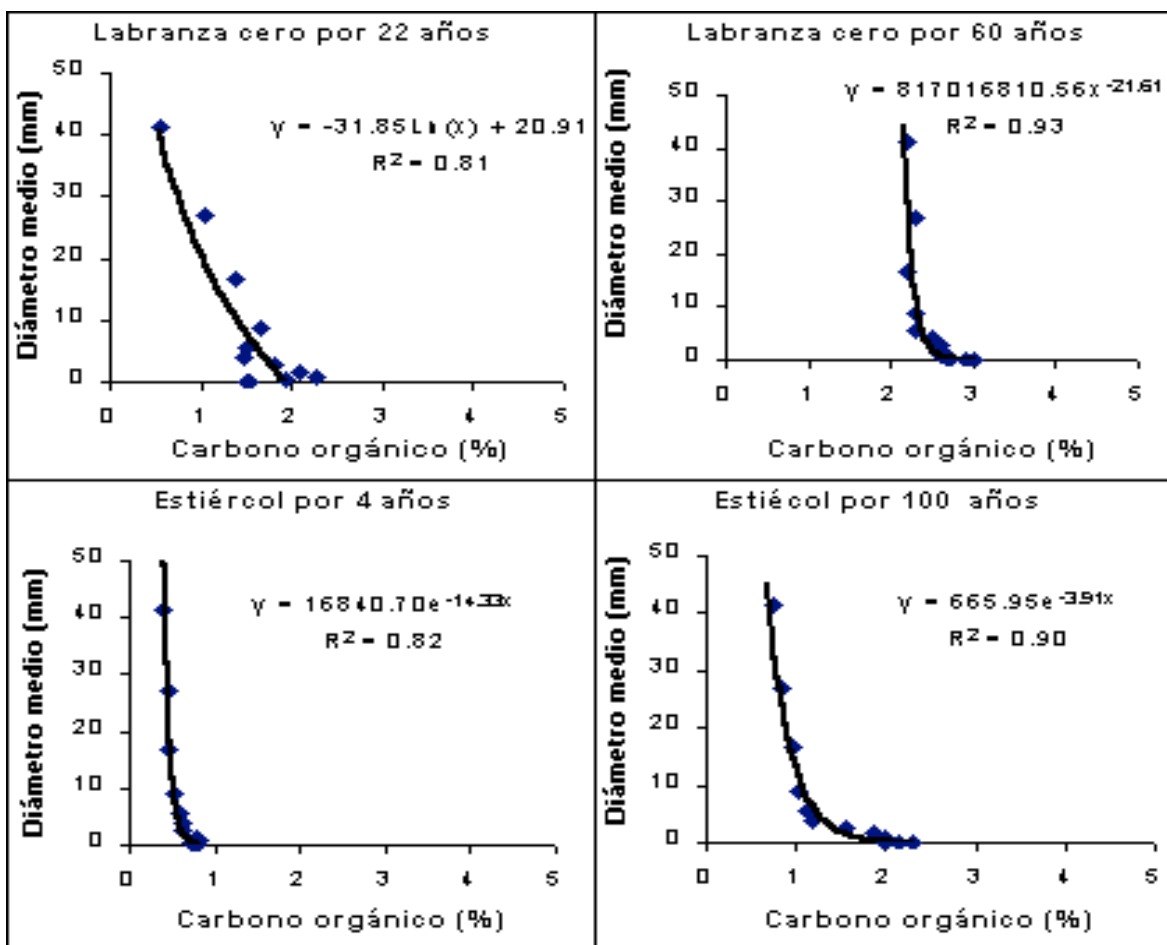


Figura 25. (Continuación)

En el tepetate recién roturado no se encontró C en las partículas >20 mm, mientras que en las partículas más finas (<0.05mm) la máxima cantidad de C determinada fue de 0.5% de C, lo cual fue muy bajo. La cantidad de C por tamaño de partícula aumentó con el tiempo de cultivo según el manejo agronómico. En un monocultivo de maíz de 4 años, se observó un aumento de 0.2% de C en las partículas >10 mm con respecto al tepetate recién roturado, sin embargo, en las partículas más finas no hubo aumento de carbono. Después de 45 años de cultivo con monocultivo de cereales, el porcentaje de C fue casi el doble, respecto al monocultivo de 4 años. Sin embargo, este aumento fue muy bajo, lo cual confirma que la acumulación de C en estos sistemas de cultivos es muy escasa.

Cuando se utilizaron abonos orgánicos y leguminosas, el aumento de la concentración de C en los distintos tamaños de partícula fue mayor que en el caso del monocultivo. De este modo, el sistema agrícola con incorporación de estiércol por 4 años, tuvo el doble de C que el monocultivo de 4 años, y después de 100 años de cultivo con adición de estiércol hubo de 1% en las partículas más grandes >10 mm y más de 2% de C en las partículas <10 mm. Cabe destacar que esta concentración de C fue muy similar a la que hubo en el sistema agrícola de labranza cero por 22 años (cultivo de agapando), sin embargo, fue aproximadamente 50% menor que en sistema agrícola de labranza cero por 60 años. Estos resultados reafirman lo explicado anteriormente en el punto 5.1.5, donde se analiza la situación del C en estos dos sistemas de cultivo a través del tiempo.

La rotación gramínea-leguminosa por 4 años ($r=0.96$) no se pudo comparar con el cultivo de leguminosas por 20 años, porque este último correspondió a un tepetate blanco (t1), donde algunas características físicas como dureza y cantidad de agregados y fragmentos fueron distintas que en el tepetate t3, lo cual se explica más adelante. Sin embargo, la rotación gramínea-leguminosa por 4 años, tuvo ligeramente más concentración de C que el monocultivo de 4 años. Esto confirma que el uso de leguminosas aporta C al suelo.

El tepetate con invernadero tuvo el mayor porcentaje de C de todos los sistemas agrícolas estudiados. En las partículas de 10 a 45 mm hubo de 2 a 3% de C y en las partículas más finas (<0.25 mm) hubo hasta 4.5% de carbono. Esto se debió a la frecuente incorporación de abonos orgánicos, principalmente madera molida, y a las condiciones de temperatura y humedad que favorecen la presencia de microorganismos.

Fue notable que independientemente de la cantidad de C que se encontró en cada sistema de cultivo en particular, la distribución del C por tamaño de partícula mostró un patrón de comportamiento muy definido, esto es, que el porcentaje de C fue mayor a medida que

disminuía el tamaño de partícula. Los coeficientes de ajuste de los modelos empleados fueron relativamente altos ($r^2 > 0.80$) en todos los casos, lo cual confirma la consistencia de los resultados obtenidos. Las diferencias en la cantidad de C fueron más pequeñas entre partículas más grandes (hasta partículas > 10 mm) y a medida que disminuyó el tamaño de partícula (< 10 mm) las diferencias tendieron a ser mayores. El aumento de C fue mayor desde los diámetros inferiores a 3 o 4 mm, pero la máxima acumulación ocurrió en las partículas menores de 0.25 mm. Esta forma de acumulación de C por tamaño de partícula, dio como resultado en la mayoría de los casos, las tendencias se ajustaron a modelos estadísticos logarítmicos, potenciales y exponenciales negativos.

Existió una interacción entre el tamaño de partícula medio y la cantidad de C, sin embargo, fue necesario exponer de forma particular cada sistema de cultivo, porque de otra manera no se verían claras las interacciones. Fue evidente que el manejo agronómico que se dio a los tepetates cultivados, tuvo un impacto diferencial en cada sistema de cultivo. (Curtin *et al.*, 2000; Grant *et al.*, 2001; Lal *et al.*, 1999; Reeves *et al.*, 1997; Robinson *et al.*, 1996).

5.2.5.1. Carbono orgánico en fragmentos y agregados

Se midió la cantidad de agregados y fragmentos en las partículas con diámetro mayor a 3.36 mm, y el promedio de éstos se relacionó con el porcentaje de C promedio presente en los agregados y fragmentos correspondientes. Los resultados se muestran en la Figura 26.

La concentración de C se relacionó positivamente con la cantidad de agregados en los tepetates cultivados ($r=0.83$), y negativamente con la cantidad de fragmentos ($r=0.90$). El C se acumuló en una mínima cantidad en los fragmentos que provienen del material original y la mayor parte del C se acumuló en los agregados estables en seco.

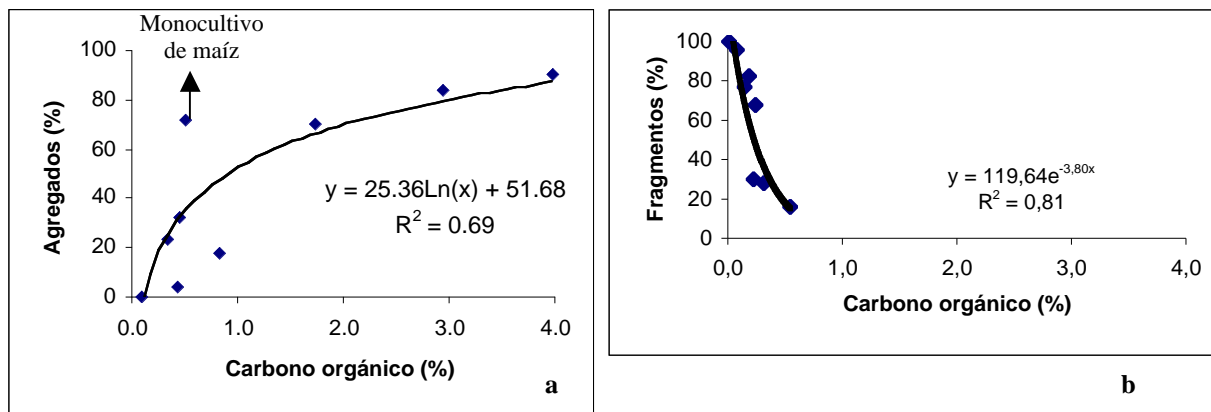


Figura 26. Carbono orgánico en agregados (a) y fragmentos (b) en tepetates cultivados.

En la Figura 26a, hubo un punto que se alejó de la curva de ajuste, donde se muestra el monocultivo de maíz. Este caso particular correspondió a una parcela de tepetate cultivada así por más de 45 años, y tuvo un menor porcentaje de C de lo esperado en sus agregados. Esto se debió a que en este sistema de cultivo siempre se retiraron los esquilmos agrícolas y casi nunca se incorporaron abonos orgánicos. Por el tiempo que tenía de ser labrada, las partículas de suelo se encontraban muy dispersas y los agregados presentes, probablemente debían su formación más a la cohesión de las partículas del suelo por cementantes inorgánicos (óxidos, sílice o arcillas) que por los cementantes orgánicos; sin embargo, su estabilidad fue mínima. Al incluir este sistema de cultivo en la relación, la r^2 es de 0.69, y si se soslayaba como punto de influencia se tendría un coeficiente de correlación más alto ($r^2=0.84$). Este caso ilustra los problemas que se tuvieron para analizar la información presentada y la justificación de agrupar los datos de manera discreta para destacar las tendencias que eran evidentes, soslayando puntos de influencia en los que intervienen otros factores.

En la Figura 27 se muestra el contenido de C en nueve diferentes sistemas agrícolas representativos, que fueron seleccionados para inferir el comportamiento del C en los agregados.

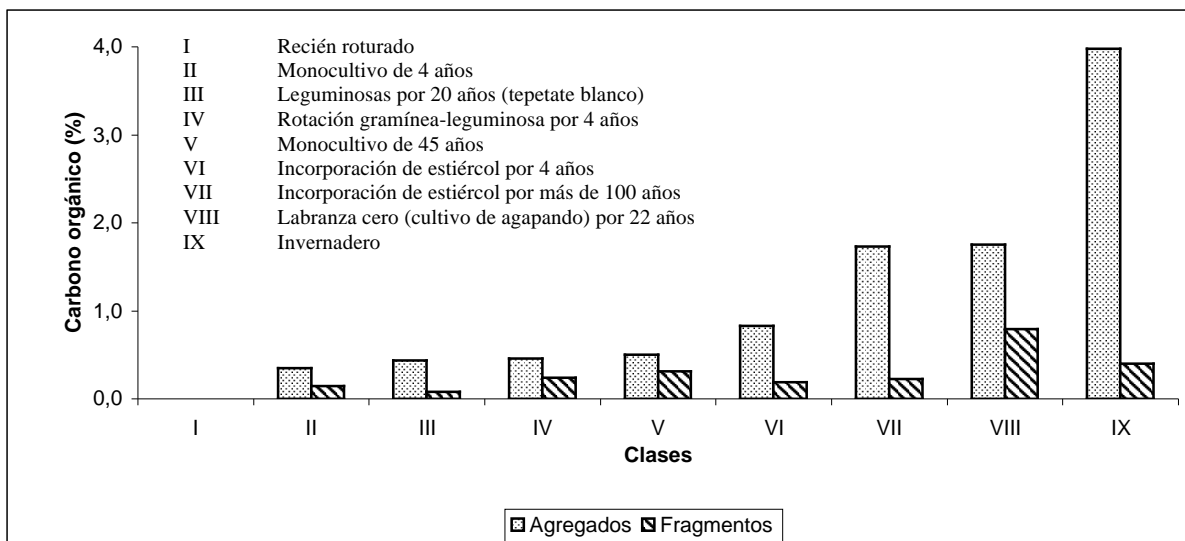


Figura 27. Carbono orgánico contenido en agregados y fragmentos en diferentes condiciones de manejo agrícola.

En los agregados de los tepetates cultivados se encontró la mayor cantidad de C y, en los fragmentos, la menor. En el caso del tepetate recién roturado, que no tuvo agregados, solamente se encontraron trazas de carbono. Mientras que en el tepetate cama de invernadero, que tuvo la mayor cantidad de agregados (90%), el porcentaje de C en las partículas más pequeñas (<0.05 mm) llegó hasta 4%. Es obvio que a una mayor cantidad de fragmentos en los tepetates había una menor cantidad de agregados y viceversa. El C atrapado en los agregados fue muy variable y dependió del tiempo del cultivo y el manejo agronómico de cada caso en particular.

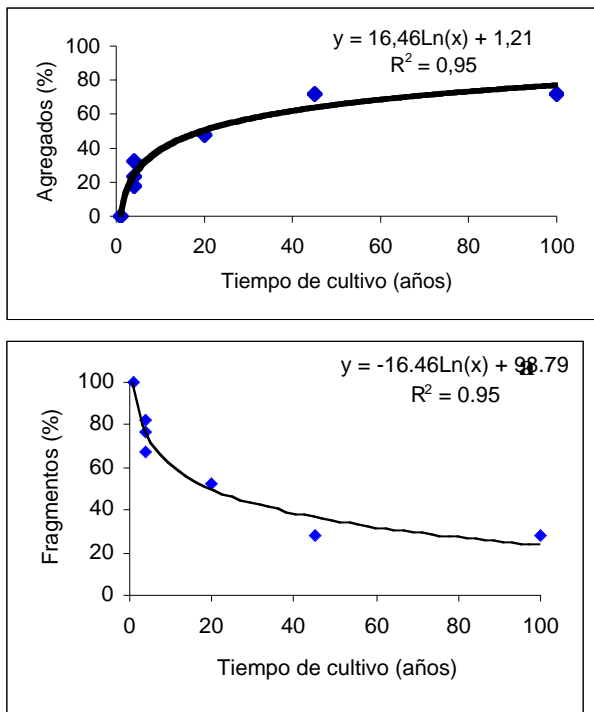
El C en los agregados tuvo un comportamiento semejante a lo explicado en el punto 5.1.3, esto es, muy escaso en los sistemas agrícolas con monocultivo de cereales y en aumentó en donde se incorporaban regularmente abonos orgánicos. La labranza cero mostró una mayor eficiencia en acumulación de C y fue semejante a lo encontrado en el sistema agrícola con más de 100 años de cultivo e incorporación regular de estiércol. Es importante destacar que, en la labranza cero, los fragmentos tuvieron más del doble de C que los otros sistemas

agrícolas. Esto se debió a que las raíces del agapando producen abundantes y vigorosas raíces, capaces de penetrar los fragmentos de tepetate. Esto hecho era visible a simple vista en los fragmentos más grandes y también en los más pequeños cuando fueron observados en el microscopio. Se infirió que el contacto directo de las raíces del agapando con los fragmentos de tepetate, favoreció la actividad biológica y la acumulación de carbono.

La producción de agregados en los tepetates comienza con su roturación y acondicionamiento para la siembra. Al principio solamente hay fragmentos en el substrato roturado, pero al favorecerse la penetración de las raíces de las plantas, agua y oxígeno, aumenta la reproducción de organismos del suelo como anélidos, insectos, microflora y microfauna que provocan un aumento en la actividad biológica (Álvarez, *et al.*, 2000). Durante esta, se generan exudados radicales, excretas, secreciones, sustancias orgánicas derivadas de los distintos grados de descomposición de la MO (fenoles, polisacáridos, ácidos húmicos, ácidos fúlvicos, etc.) que desembocan en la producción de algunos agentes cementantes orgánicos como polisacáridos gomosos, que al combinarse con las partículas del suelo, forman complejos organo-minerales que aglutinan las partículas del suelo para formar los agregados del suelo (Oades y Waters, 1991). La velocidad de formación de éstos depende también en gran medida de la temperatura y humedad, que a su vez determinan la intensidad de la actividad biológica.

5.2.5.2. Dinámica de los fragmentos y agregados y tiempo de cultivo

En los sistemas agrícolas con labranza convencional, el porcentaje de agregados y fragmentos promedio de las partículas >3.36 mm, se relacionó con el tiempo de cultivo. Los resultados se muestran en la Figura 28.



b

Figura 28. Evolución de agregados (a) y fragmentos (b) mayores de 3.36 mm a través del tiempo en tepetates cultivados.

En el tiempo cero, se tuvo al tepetate recién roturado, donde solamente se colectaron fragmentos (Figura 28b). Sin embargo, después de 100 años de cultivo la cantidad de agregados aumentó (Figura 28a) hasta cerca de 80%. La tendencia de cambio se ajustó a un modelo logarítmico. La cantidad de agregados estables en seco aumentó relativamente rápido durante los primeros 5 años de cultivo, pero luego dicho aumento fue más lento. Mientras tanto la cantidad de fragmentos disminuyó con el tiempo de forma inversa a la formación de agregados. Cabe destacar la curva que muestra la relación entre la cantidad de agregados y tiempo de cultivo (Figura 28b), la cual fue semejante a la que resultó de la relación entre el contenido de C y el tiempo de cultivo en los distintos sistemas agrícolas mostrados en el punto 5.1.5. Esta similitud confirma que la cantidad C en los tepetates cultivados depende la cantidad de agregados estables que puedan formarse o persistir en el

suelo. Con base en lo anterior, se infirió que los agregados en los tepetates cultivados juegan un papel importante en la captura de carbono.

Cabe destacar los sistemas agrícolas en cama invernadero (con 20 años de cultivo) y labranza cero con riego (con 60 años de cultivo), mencionados anteriormente, tuvieron en promedio más de 90% agregados >3.36 mm (Apéndice 5). No se reunió información suficiente para estudiar la tendencia de éstos en el tiempo; sin embargo, se infirió que también pueden ajustarse a un modelo logarítmico, pero obviamente, con un porcentaje más alto de agregados que en los sistemas agrícolas con labranza convencional. Acevedo y Flores (1997) y Velásquez y Flores (1997) estudiaron la formación de agregados en tepetates en condiciones de invernadero y macetas experimentales, las cuales fueron tratadas con materia orgánica, riego y varias especies vegetales (leucaena, pastos y eucalipto). Después de 1 año de observaciones, concluyeron que había aproximadamente 10% de agregados. En los tepetates cultivados con labranza convencional por 4 años se encontraron en promedio 18% de agregados, es decir, menor cantidad que lo que pudiera haber en tepetates cama invernadero en 4 años. Esto confirma que la producción de agregados en condiciones de cama invernadero y riego, es mayor que en la labranza convencional. Donde la formación de agregados esta sometida a un manejo agrícola extensivo y en condiciones de temporal, y las prácticas de labranza (barbecho, rastra, aporque) propician la pulverización constante de los agregados, lo que trae como consecuencia una frágil estabilidad de éstos.

5.2.5.3. Carbono orgánico y dureza en agregados y fragmentos

El tepetate tiene un gran rango de dureza amplio, desde blandos, que han sido considerados como fragipanes, hasta duros considerados como duripanes (Peña *et al.*, 1992). El tipo de

tepetate incluido en el presente estudio correspondió al de tipo fragipán, según su dureza; sin embargo, dentro de esta clasificación también existe mucha variación para un mismo perfil o área determinada.

En la Figura 29 se presenta el promedio de la dureza de los fragmentos y agregados y su relación con el diámetro medio de las partículas.

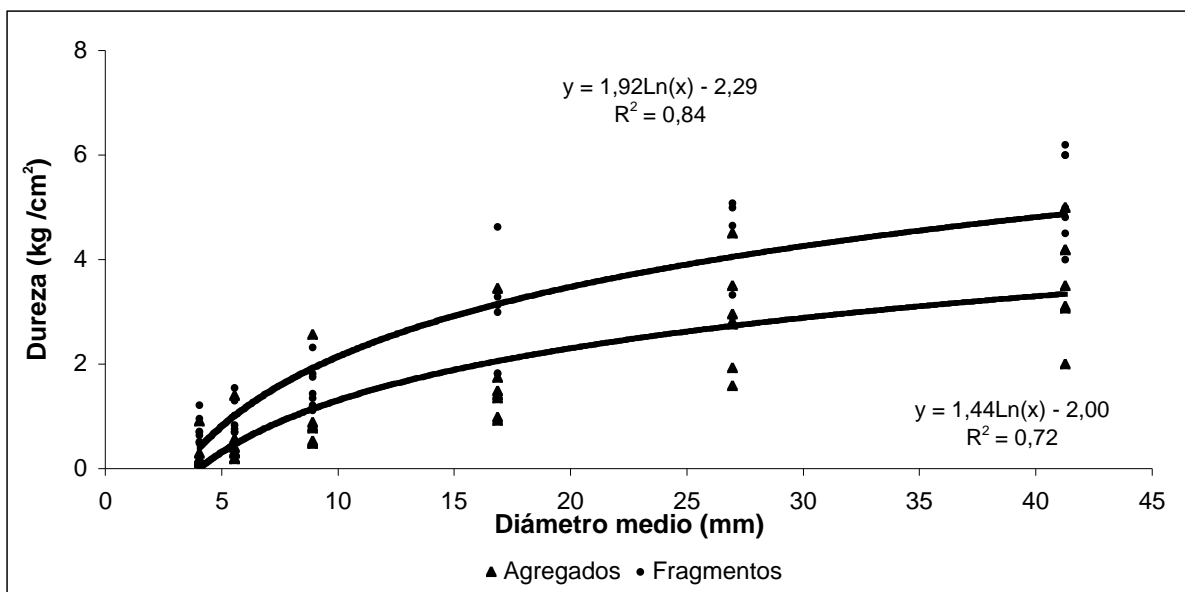


Figura 29. Dureza y tamaño de partícula de fragmentos y agregados en tepetates cultivados

La dureza de los fragmentos fue mayor que los agregados, y ésta aumentó de manera logarítmica a medida que el tamaño de partícula aumentaba. La diferencia de dureza entre fragmentos y agregados en las partículas más pequeñas fue de 20 a 30%, y en las partículas más grandes fue de 70 a más de 100%, es decir, más del doble.

En la Figura 30 se presenta la dureza de fragmentos y agregados con diámetros medios de 4, 6, 9, 17, 27 y 41 mm, en tepetates provenientes de distintas condiciones de manejo agrícola. Es importante destacar dos sistemas agrícolas particulares: labranza cero con riego y el invernadero con manejo intensivo, mencionados anteriormente. Cuyos agregados tuvieron una dureza igual o mayor que los fragmentos. Esto explica la alta estabilidad que

presentaron cuando fueron procesados en húmedo, como fue indicado en el punto 5.2.1. Con base en estos resultados, se infirió que el grado de agregación y de estabilidad de agregados, dependieron en gran parte de la dureza, de la cantidad C y del tipo de labranza utilizado; que a la vez, son influenciados por factores climáticos, cantidad de arcilla, cantidad de MO, manejo agrícola, etc.

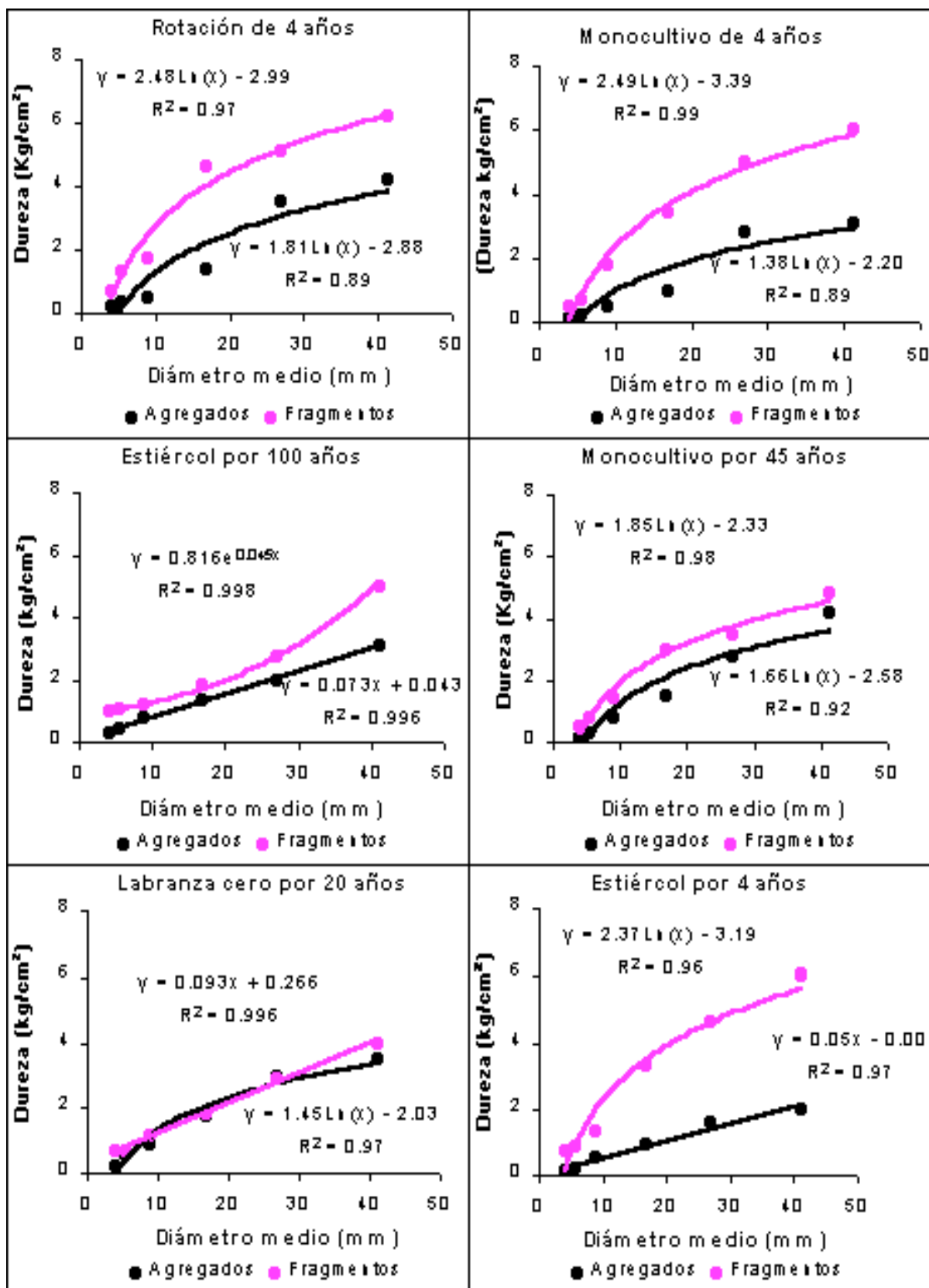


Figura 30. Dureza de fragmentos y agregados de nueve casos sistemas de cultivo en tepetates cultivados.

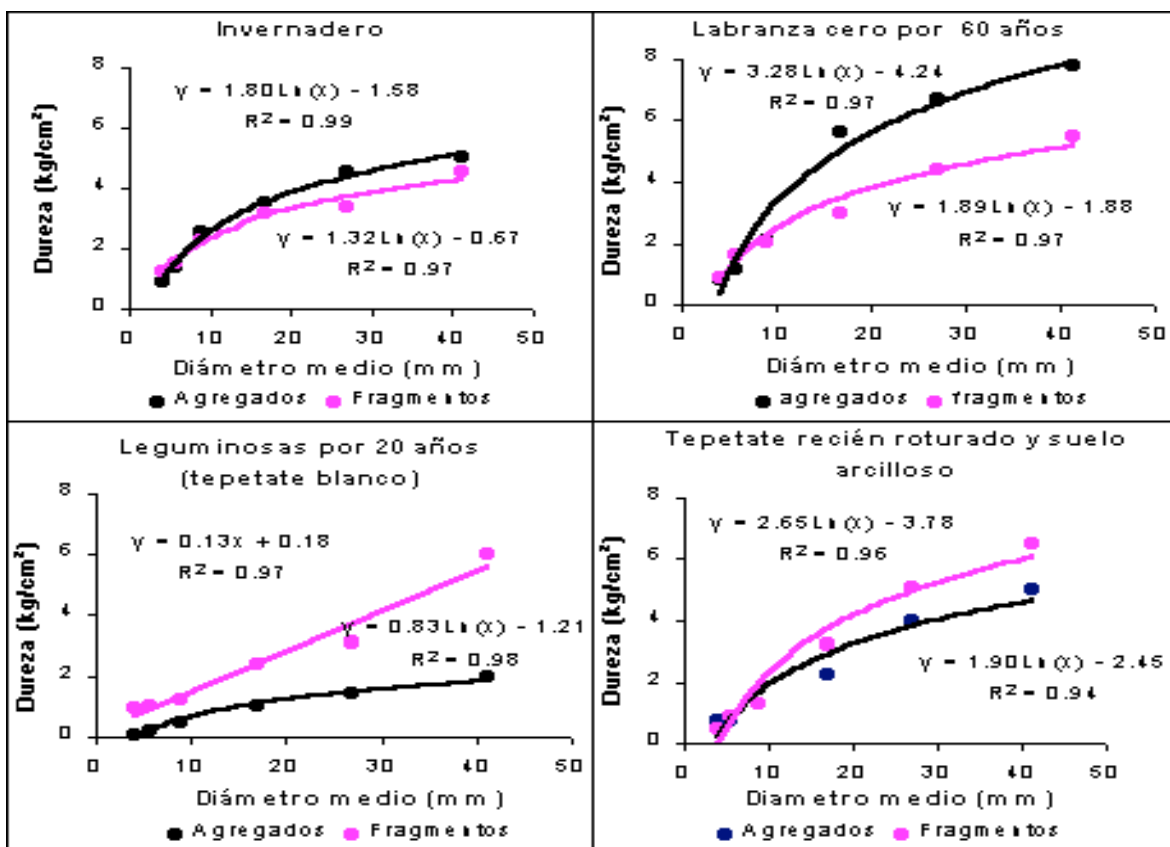


Figura 30. (continuación)

En los sistemas agrícolas con la labranza convencional, que correspondieron al restos de los casos presentados en esta figura, hubo una menor dureza de los agregados. Esto se explica, porque las labores agrícolas que se hacen con labranza convencional, ocasionan un continuo desmoronamiento de los agregados, como se ha explicado anteriormente. Se ocasionan pérdidas de C, haciéndose este último más susceptible al ataque de la biomasa microbiana del suelo y a la oxidación (Lal *et al.*, 1999).

En el caso del sistema agrícola de labranza cero con riego, cabe mencionar que la mayor humedad disponible y el hecho de no remover el suelo, favorecieron un aumento de la población de lombrices, que se observaron cualitativamente en abundancia durante el muestreo, en contraste con el resto de las parcelas de tepetate incluidas en este estudio, donde no se percibieron lombrices a simple vista. Estos anélidos se sabe que mejoran la

estructura y la calidad agrícola de los suelos, y contribuye a la dureza y estabilidad de agregados. Mientras tanto, la labranza convencional contribuye a disminuir las poblaciones de algunos organismos benéficos para la fertilidad de los suelos como las lombrices (Elliott, 1986), aunado a las pérdidas de C por oxidación y ataque microbiano, trae como consecuencia que los agregados sean más frágiles e inestables.

En el caso del tepetate cama invernadero, con manejo intensivo, se encontró la mayor cantidad de C de todas las muestras incluidas en este estudio, lo cual confirmó que los cementantes orgánicos, en el caso de los tepetates, son los que influyen más en la cohesión de las partículas de suelo que dan dureza y resistencia de los agregados del suelo.

Se hizo la correlación de la dureza de los agregados y fragmentos en diámetros medio de 4, 6, 9, 17, 27 y 41 mm, con el porcentaje de C de los sistemas de cultivo mostrados anteriormente. (Figura 31). La tendencia fue muy consistente en todos los casos e indicó una relación inversamente proporcional, tanto en agregados como en fragmentos. Por otra parte fue notable que hubo una mayor concentración de C en los agregados que en los fragmentos (1 a 3 veces). Esto confirma lo explicado en el punto 5.2.5.1, donde se evidenció que el aumento en el porcentaje de C en los tepetates cultivados dependía de la producción de agregados.

Fue notable el contraste que hubo en la concentración de C entre agregados y fragmentos, del tepetate recién roturado (solo fragmentos) y el invernadero, semejante a lo explicado en el punto 5.2.5. La dureza de los agregados aumentó con el porcentaje de C.

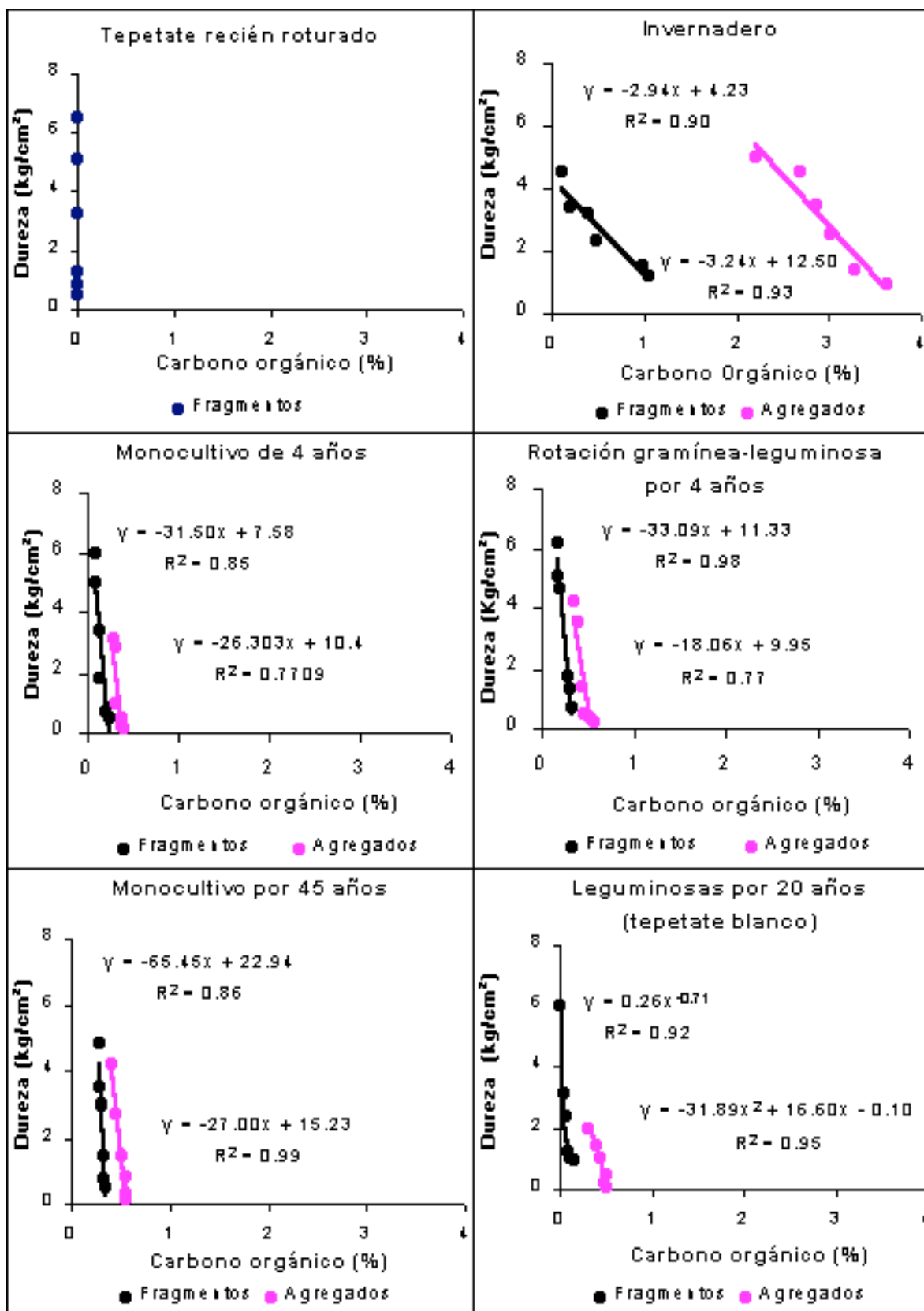


Figura 31. Dureza de fragmentos y agregados y contenido de carbono orgánico en nueve sistemas de cultivo en tepetates cultivados.

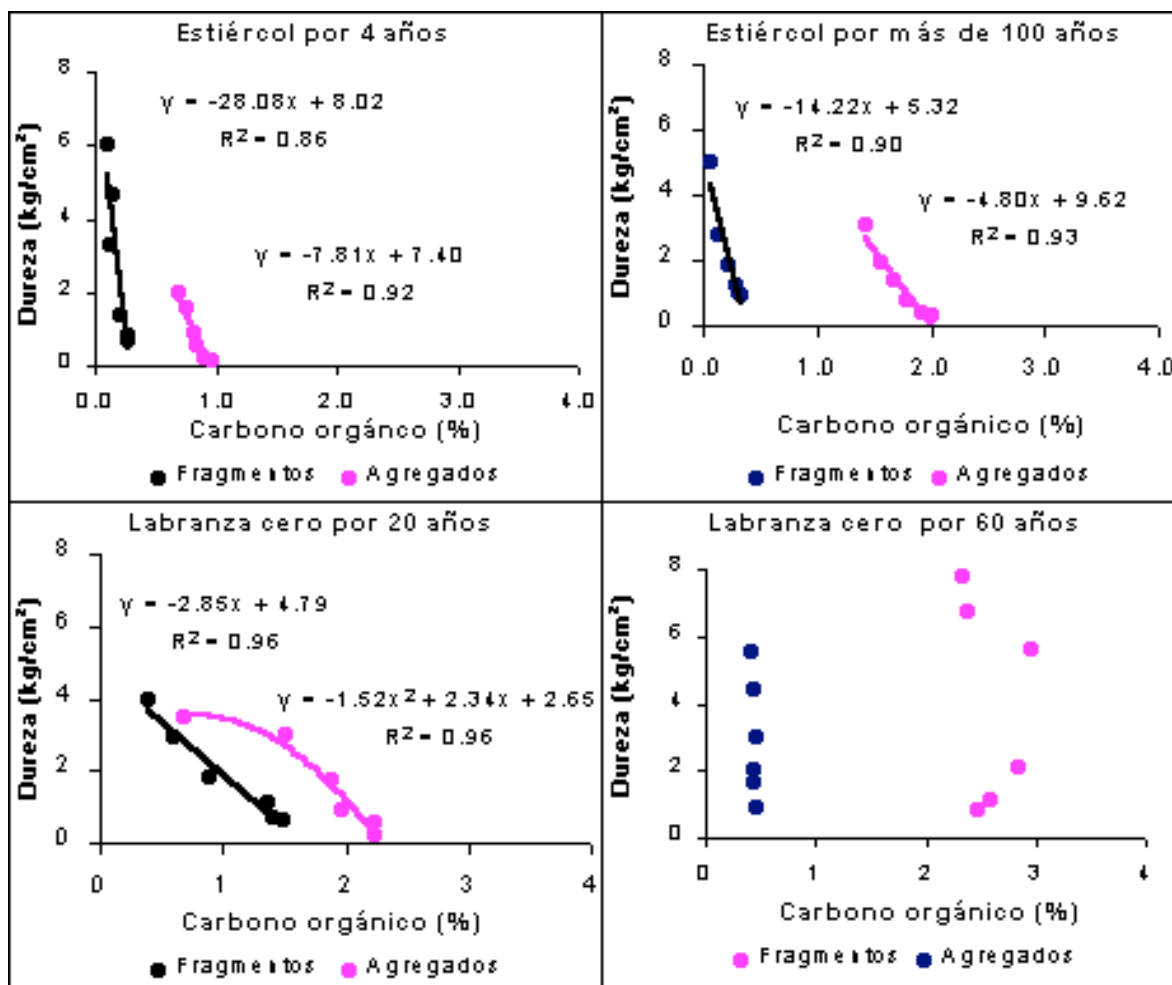


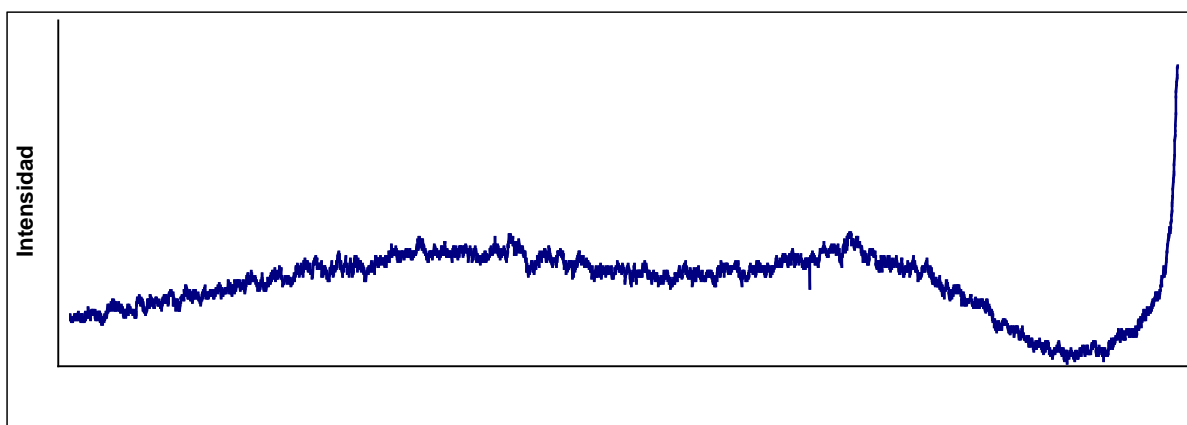
Figura 31. (Continuación)

Los fragmentos también acumularon un pequeño porcentaje de C respecto al que tuvieron los agregados, según el tiempo de cultivo y el manejo agrícola. Sin embargo, fue evidente que el aumento global en la concentración de C en estos tepetates, dependió la producción y resistencia de los agregados. Lo cual dependió sustancialmente del manejo agronómico.

La mayor parte de las relaciones correspondieron a modelos lineales, sin embargo, hubo un caso en el que la tendencia se ajustó a un modelo logarítmico, en donde se cultivaron leguminosas por 20 años. Esta parcela correspondía a un tepetate blanco, donde se percibió que la dureza de los fragmentos era mayor que en los otros tepetates y la dureza de los agregados era muy débil.

5.3. Minerales de arcilla

La identificación de los minerales de arcilla en los tepetates evidenció la presencia de materiales amorfos en el área de estudio; sin embargo, también fue posible identificar arcillas del tipo 1:1. Después de someter las muestras de estudio a 10 lavados con NaOH 0.5 N, no se pudo distinguir la presencia de arcillas cristalinas silicatadas. Se seleccionaron 10 muestras a las que se les realizaron 10 lavados más con NaOH 0.5 N para identificar las arcillas presentes. En las Figuras 32, 33, 34, 35 y 36 se muestran algunos difractogramas correspondientes a los resultados obtenidos. El número excesivo de lavados que se realizó, permitió deducir la presencia de cantidades considerables de materiales amorfos en estos tepetates. Las reflexiones de primer orden variaron de 0.725 nm a 0.775 nm en las preparaciones naturales (Cuadro 14), indicaron la presencia de arcillas del tipo 1:1 (Figuras 33, 34 y 35). También fue frecuente encontrar reflexiones (0.35 y 0.35 nm) asociadas a minerales primarios como los feldespatos (Figuras 33, 34, 35 y 36). El número de lavados con NaOH 0.5 N (10 a 20) mejoró los difractogramas (Figura 33 y 35). Sin embargo, en algunos casos aún después de 20 lavados, no se eliminó el material amorfo (Figura 36).



20

Figura 32. Difractograma de la fracción fina (< 2 μm) de un tepetate blanco de Nativitas (t1) después de 10 lavados con NaOH 0.5 N.

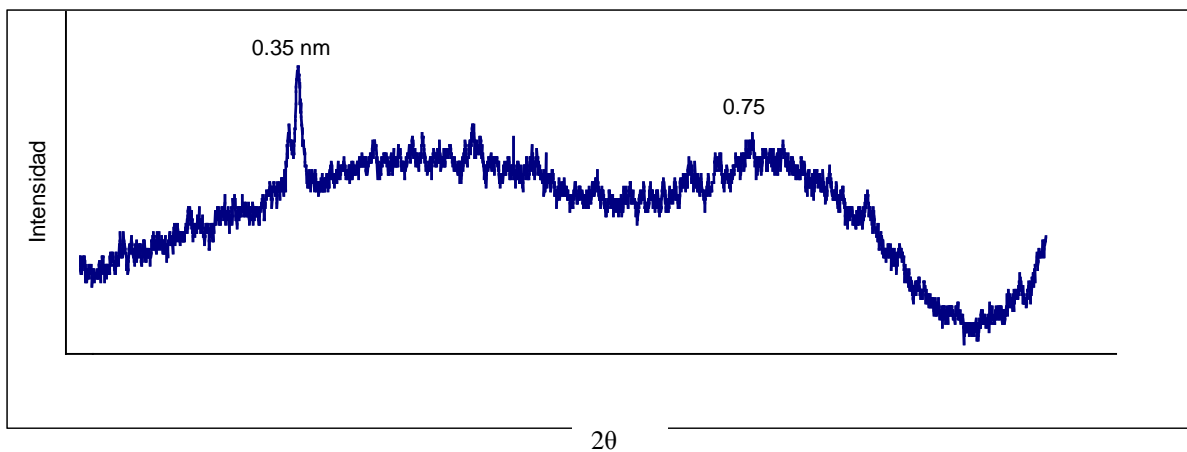


Figura 33. Diffractograma de la fracción fina (< 2 μm) de un tepetate blanco de Nativitas (t1) después de 20 lavados con NaOH 0.5 N.

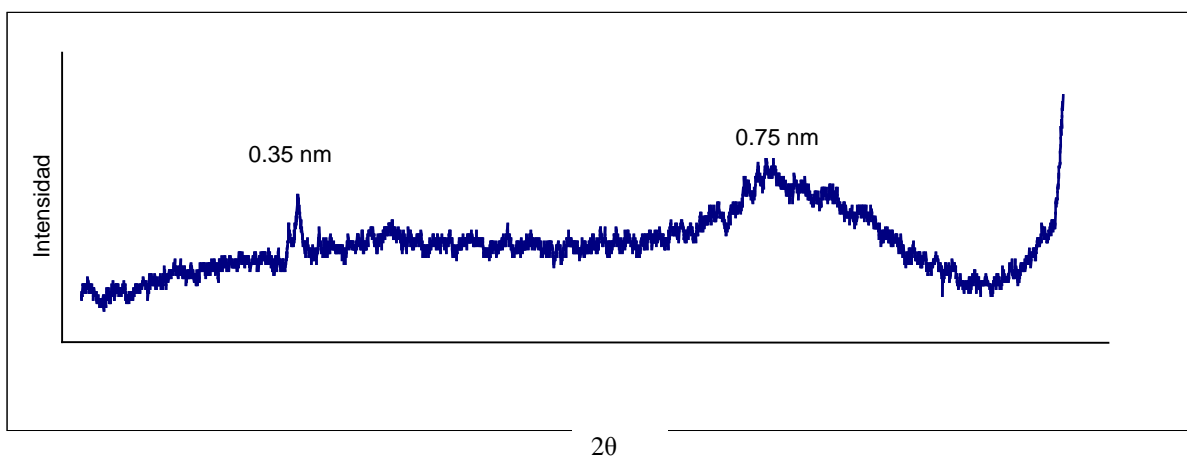


Figura 34. Diffractograma de la fracción fina (< 2 μm) de un tepetate amarillo (t3) de San Miguel Tlaixpan después de 10 lavados con NaOH 0.5 N.

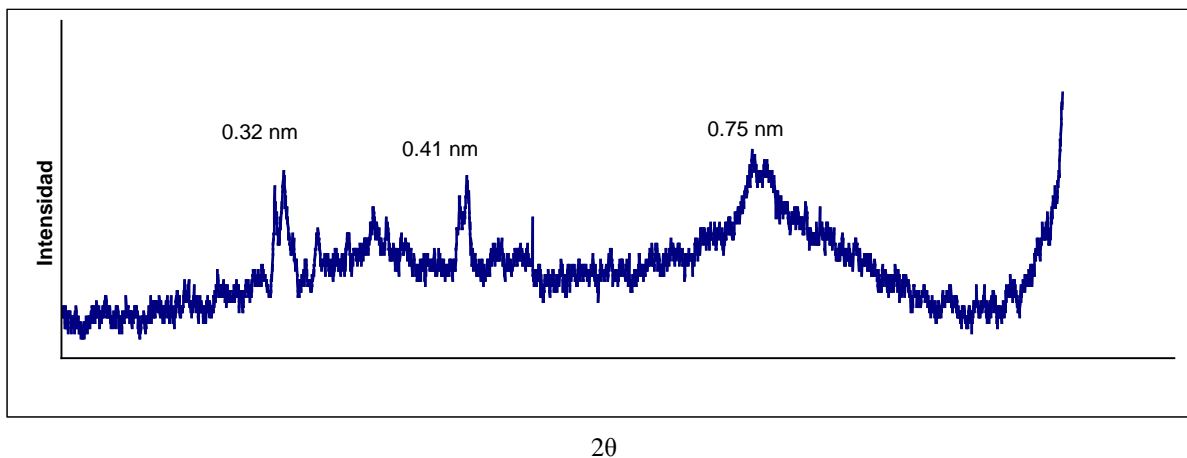


Figura 35. Diffractograma de la fracción fina (< 2 μm) de un tepetate amarillo (t3) de San Miguel Tlaixpan después de 20 lavados con NaOH 0.5 N.

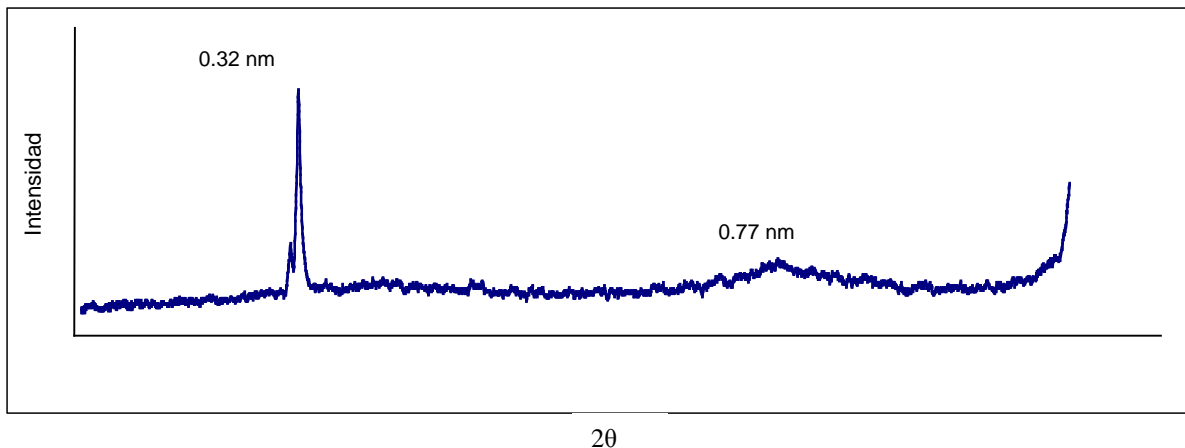


Figura 36. Difractograma de la fracción fina (< 2 μm) de un tepetate blanco (t3) después de 20 lavados con NaOH 0.5 N.

La prueba del etilenglicol y la calcinación a 490 °C confirmaron la presencia de arcillas del tipo 1:1. De lo anterior se concluyó que en los tepetates usados en este estudio, abundan los materiales amorfos y sólo una porción pequeña corresponde a arcillas silicatadas cristalinas del tipo 1:1. La presencia de materiales amorfos en estos tepetates también ha sido reportada por Cajuste y Cruz (1987), Hidalgo (1996) y Oleschko *et al.* (1992).

Aunque no se realizaron análisis específicos para identificar exactamente al tipo de arcilla 1:1 encontrada en estos tepetates, se infirió que se trata de haloisitas, ya que éstas han sido reportadas por Hidalgo *et al.* (1997), Oleschko *et al.* (1992) y Quantin *et al.* (1993). Estos autores han mencionado también que en estos tepetates se encuentran arcillas del tipo 2:1, como esmectitas y arcillas 1:1 y 2:1 interestratificadas, en ocasiones mal cristalizadas.

Los materiales amorfos se sabe que son abundantes en suelos originados de ceniza volcánica (Duchaufour, 1984). Los tepetates son tobas volcánicas parcialmente alteradas (Bertaux y Quantin 1994) con edades que varían desde 20 mil hasta 40 mil años (Miehlich, 1992, Zebrowski, 1992; Quantin *et al.*, 1993). Estos pueden ser considerados desde el punto de vista geológico, como materiales muy recientes, por lo tanto, los minerales

presentes se encontrarían poco intemperizados. Esto explicaría la débil cristalización de los minerales de arcilla encontrados en estos tepetates, los cuales presentan un desorden en su estructura. La cristalización obedece a procesos de intemperismo, en el cual las condiciones climáticas, principalmente la precipitación y la temperatura, influyen en la velocidad de meteorización. La cristalización según la literatura puede ocurrir después de 10, 000 o 20, 000 años dependiendo de las condiciones climáticas (Duchaufour, 1984).

Por otra parte se sabe que con la disminución gradual de la temperatura se forman minerales de arcillas del grupo 2:1, sin embargo, no se encontraron arcillas de este tipo en los tepetates cultivados incluidos en este estudio.

Los minerales primarios encontrados en los tepetates estudiados fueron principalmente vidrios volcánicos, cuarzo, proporciones variables de plagioclasas y horblenda (Hidalgo *et al.*, 1997). Los vidrios volcánicos se alteran muy rápidamente, lo que conduciría a la formación de los amorfos, los cuales son frecuentes en los suelos jóvenes.

En el cuadro 14 se muestran los tipos de arcilla encontrados en los tepetates estudiados y se relacionan con distintos sistemas de cultivo, tipo de tepetate, años de cultivo, y otras características. Fue evidente que a pesar de la heterogeneidad de los tepetates de la zona de estudio en cuanto al sitio, al manejo agrícola, el tiempo de cultivo, el tipo de tepetate, la composición mecánica, el pH y otras características físicas y químicas, los minerales de arcillas parecen ser los mismos, sin embargo, la cantidad es variable.

Cuadro 14. Arcillas presentes en los tepetates incluidos en este estudio.

Sistema	Comunidad	Tipo de	Años	pH	C	P	Arena	Limo	Arcilla	Lavados	Angulo	DI	Tipo de arcillas
Cultivo				agua						OHNa			

		tepetate	Cultivo	2:1	%	ppm		%		0.5 N	2θ	nm	
M	San Pablo Ixayoc	t3	10	7.1	0.96	6	36	36.0	28	0	11.4	0.775	Amorfos y 1:1
A	Apipilhuasco	t3	4	7.8	0.54	3	38	53	9	10	*	*	Amorfos
E + A	Apipilhuasco	t3	19	7.0	1.16	25	33	38	27	20	11.8	0.749	Amorfos y 1:1
E + A	Apipilhuasco	t3	100	7.6	1.46	34	42	32	26	0	12.0	0.725	Amorfos y 1:1
I	Nativitas	t1	13	7.9	1.36	50	56	31	13	20	11.4	0.775	Amorfos y 1:1
R	Nativitas	t1	22	7.5	0.50	5	58	34	8	10	*	*	Amorfos
A	Nativitas	t1	22	7.2	0.48	12	36	31	33	20	11.8	0.749	Amorfos y 1:1
R	San Miguel Tlaixpan	t3	3	7.3	0.49	7	30	44	26	20	11.8	0.749	Amorfos y 1:1
A + E	San Miguel Tlaixpan	t3	4	7.4	0.76	18	23	41	36	10	*	*	Amorfos
A	San Miguel Tlaixpan	t3	4	7.0	0.41	3	26	38	36	0	11.6	0.762	Amorfos y 1:1
M	Santa M. Tecuanulco	t3	50	7.7	0.58	7	24	36	40	10	*	*	Amorfos
R	San Pablo Ixayoc	t1	38	5.9	0.46	3	63	26	11	20	11.8	0.749	Amorfos y 1:1
I	San Pablo Ixayoc	t3	23	6.4	1.74	51	46	36	18	10	*	*	Amorfos
A	San Pablo Ixayoc	t3	38	4.8	0.92	34	61	26	13	10	*	*	Amorfos
M	San Pablo Ixayoc	t3	23	7.6	0.67	20	57	32	11	20	11.8	0.749	Amorfos y 1:1
M	Santa Catarina	t3	18	7.1	1.02	7	35	31	34	10	*	*	Amorfos
M	Santa Catarina	t3	20	6.3	0.55	6	50	28	22	20	11.8	0.749	Amorfos y 1:1
M	Tepetlaustoc	t2	25	8.1	0.67	2	56	33	11	20	11.8	0.749	Amorfos y 1:1
A	Tequexquahuac	t3	11	8.1	0.91	36	60	32	8	10	*	*	Amorfos
A + E	Tequexquahuac	t3	13	7.8	0.97	48	35	51	14	20	11.8	0.749	Amorfos y 1:1
LC y Ri	San Pablo Ixayoc	t3	60	7.1	1.78	64	44	31	25	0	11.6	0.762	Amorfos y 1:1
F + E	San Juan Tezontla	suelo	-	6.2	3.9	19	25	34	41	20	11.8	0.749	Amorfos y 1:1

A: asociación gramínea-leguminosa , DI: Distancia interlamina, E: estiércol, F: frutales, I: invernadero LC: Labranza cero, M: monocultivo, R: rotación gramínea-leguminosa , Ri: riego, *: No se distinguió el pico con 10 lavados

5.3.1. Carbono orgánico y contenido de arcilla

Se relacionó el C con el porcentaje de la fracción arcillosa de los tepetates y no se encontró una relación clara; sin embargo, se apreció una distribución normal (Figura 37). Es decir, que los porcentajes de C más altos se encontraron distribuidos entre 15 y 30% de arcilla.

La asociación entre el C y la cantidad de arcilla no es clara. Nichols (1984) y Spain (1990) encontraron una fuerte relación entre estos elementos. Percival *et al.* (1999) mencionaron que el contenido de arcilla no se relaciona con el contenido de C del suelo. Al parecer los minerales y tipo de arcillas influyen en la acumulación del carbono del suelo. Monreal y Kodama (1997) y Monreal *et al.* (1997) han encontrado que el C contenido en los

agregados del suelo se relacionó fuertemente con el tipo de arcillas expandibles (2:1) como esmectitas, vermiculitas y vermiculitas cloritizadas.

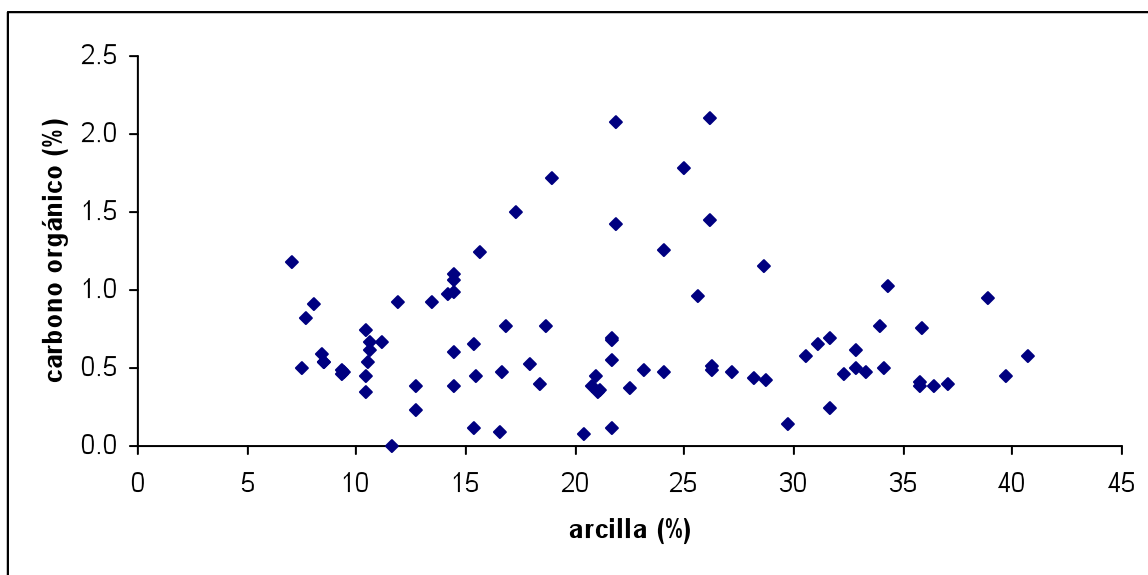


Figura 37. Relación entre carbono orgánico y cantidad de arcilla en los tepetates cultivados.

Los materiales amorfos y la pequeña porción de arcillas del tipo 1:1 encontrados en los tepetates parecen no asociarse de manera definida con compuestos orgánicos de los agregados. Sin embargo, fue evidente que en los tepetates donde hubo mayor cantidad de C, hubo mayor estabilidad de agregados. Esto sugiere que la acumulación de C y la estabilidad de agregados en los tepetates depende en mayor medida de la incorporación de materia orgánica. Otros autores han mencionado que el C del suelo podría asociarse más con óxidos de Fe y Al (Mizota y Reeuwijk, 1989; Sollins *et al*, 1996; Torn *et al.*, 1997). Así mismo Homann *et al.* (1998) y Burke, *et al.* (1989) han sugerido que el clima es el que controla la acumulación de C del suelo, especialmente en condiciones de alta humedad.

6. CONCLUSIONES

El impacto de los diferentes sistemas de cultivo y manejo de residuos orgánicos, en la concentración de C orgánico y P extractable Olsen dependió del manejo agronómico y tiempo de cultivo de los tepetates.

El C varió desde trazas hasta 4.2%, y el P de 1 a 122 ppm P-Olsen. La concentración mínima de estos elementos se encontró en los tepetates recién roturados, con erosión fuerte y con monocultivo de gramíneas. Mientras que la mayor concentración estuvo asociada con los tepetates cultivados con labranza cero, adición de estiércoles y que son empleados como cama de invernadero.

La concentración de C y P fue mayor en los sistemas agrícolas con incorporación de estiércoles y con labranza cero y menor en el monocultivo de cereales. La concentración de ambos aumentó a medida que se incrementaban los años de cultivo. Las tendencias tuvieron un patrón bien definido en todos los casos, ajustándose a modelos logarítmicos o potenciales; el C y P se acumularon rápidamente durante los primeros 10 años pero después la tasa de incremento disminuyó. La tasa de acumulación de C durante los primeros 4 años de cultivo fue de 2.2 a 4.4 Mg ha⁻¹ por año, según el manejo agronómico, y potencialmente de más de 88 Mg ha⁻¹, según el máximo porcentaje de C registrado en estos tepetates.

El porcentaje de C orgánico en los tepetates se asoció mayormente con las partículas <0.25 mm. El tepetate recién roturado (el más bajo) tuvo 0.5% de C en estas partículas, mientras que en el tepetate empleado como cama de invernadero (el más alto) hubo cerca de 4% de carbono. Todos los demás sistemas de cultivo estuvieron dentro de este rango. Sin

embargo, una mayor cantidad de partículas $<0.25\text{mm}$ indicó una mayor pulverización del suelo y por lo tanto una menor estructura.

El aumento en el porcentaje de C orgánico en los tepetates cultivados, dependió de la cantidad, dureza y estabilidad de los agregados, cuya producción estuvo influenciada por el manejo agronómico. Los agregados tuvieron de 1 a 3 veces más C que los fragmentos y estos últimos tuvieron una dureza de 1 a 3 veces mayor que los agregados.

Los sistemas agrícolas más eficientes para almacenar C fueron: labranza cero y los tepetates empleados como cama de invernadero, con una acumulación promedio de 3 y 4% de C, respectivamente. Estos fueron los únicos sistemas agrícolas que tuvieron una dureza de agregados igual o mayor que la de los fragmentos.

El tipo de arcilla y la cantidad de éstas, no influyeron claramente en la acumulación de C orgánico en estos tepetates. Los materiales arcillosos dominantes fueron amorfos, con bajo contenido de arcillas del tipo 1:1. No se encontraron arcillas del tipo 2:1. No se encontró una relación clara entre el C orgánico de los tepetates y la cantidad de fracción arcillosa. La concentración de C en los tepetates estuvo relacionada más claramente con la incorporación de residuos orgánicos o la permanencia éstos en el suelo.

7. BIBLIOGRAFIA

Acevedo S., O. y D. Flores. 1997. Efecto de especies vegetales en la agregación y disgregación en dos tipos de tepetates del estado de México, en condiciones de invernadero. *In:* Tercer simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos. Zebrowski, C., Quantin, P y Trujillo, G. (ed.). ORSTOM. Quito, Ecuador. pp: 178-184.

Aeppli, G. y E. Escönhals. 1975. Los suelos de la cuenca alta de Puebla-Tlaxcala y sus alrededores. Fundación Alemana para la Investigación Científica. Proyecto Puebla-Tlaxcala. VI. pp: 26.

Alfaro S., G., K. Oleschko y M. Meza S. 1992. Rasgos micromorfológicos de los tepetates de Hueyoxotla (Estado de México). *In:* Primer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos Endurecidos (Uso y manejo de tepetates). Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. Terra 10 (Número especial). pp: 253-257.

Álvarez D., J. 1992. Análisis de la microflora asociada al manejo agroecológico en la recuperación de tepetates. *In:* Primer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos Endurecidos (Uso y manejo de tepetates). Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. Terra 10 (Número especial). pp: 419

Álvarez D., J., R. Ferrera C. y J. D. Etchevers B. 2000. Actividad microbiana en tepetates con incorporación de residuos orgánicos. *In:* Agrociencia 34. pp: 523-532.

Angers, D. and R. Mehuis, G. 1989. Effects of cropping on carbohydrate content and water stable aggregation of a clay soil. *Canadian Journal of Soil Science.* 69:373-380.

Angers, D. and Chenu, C. 1998. Dynamics of soil aggregation and C sequestration. *In:* Soil processes and the carbon cycle. Lal, R., Kimble, J., Fllett, R. and Stewart (ed.). Chapter 1. CRC. Boca Raton, Florida pp: 199-223.

Arias R., H. M. 1992. Rehabilitación de tepetates: Una alternativa para la producción agropecuaria y forestal. *In:* Primer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos Endurecidos (Uso y manejo de tepetates). Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. Terra 10 (Número especial). pp: 309-317.

Arias R., H. M., M. E. Miranda M. y D. Gabriels. 1992. Dinámica de la erosión en tepetates roturados. *In:* Primer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos Endurecidos (Uso y manejo de tepetates). Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. Terra 10 (Número especial). pp: 370-373.

Báez, A. 1998. Capacidad productiva de un tepetate recién roturado y terraceado, cultivado con cebada y veza en condiciones de temporal. Tesis de licenciatura de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlan. Universidad Nacional Autónoma de México. pp: 36-56

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.

Baumann, J. y G. Werner. 1997. Erodibility of volcanic ash soils in the Central Mexican Highlands. *In:* Tercer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos. Zebrowski, C., Quantin, P y Trujillo, G. (*eds.*). ORSTOM. Quito, Ecuador. pp: 343-350.

Beare M., H., F. Heldrix and C. Coleman. 1994. Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional and no tillage soil. *Soil Science Society of America Journal* 58:777-786.

Bertaux, J. et P. Quantin. 1994. Relation géométrique et variations minéralogiques des différents termes d'une séquence d'altération de tufs pyroclastiques de la région de Texcoco (México). *In:* 15 Congreso Internacional de la Ciencia del Suelo. Acapulco, México. Vol. 5. pp. 232-233.

Blair, G., Lefroy, R. D.B. y Lisle, L. 1995 Soil carbon fractions based on their degree of oxidation and development of a carbon management index for agricultural system. *In:* Australian Journal of Agricultural Research. 46: 1456-1459.

Braunack, M. and R. Dexter. 1989. Soil aggregation in the seedbed: A review. II. Effect of the aggregate sizes on plant growth. *Soil and Tillage Research.* 14:281-298.

Bremer, E., H. Ellert and H. Janzen. 1995. Total and light-fraction carbon dynamics during four decades after cropping changes. *Soil Science Society of America Journal.* 59:1398-1403.

Brinkman, R., J. Antoine, F. Nachtergaele, P. Koohafkan, J. Benites and R. Dudal. 2001. Carbon sequestration: proposal land management. *In:* Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. pp 14-33.

Buchanan, M. and D. King. 1992. Seasonal fluctuation in soil microbial biomass carbon, phosphorus, and activity in not-till and reduced-chemical-input maize agroecosystems. *Biology and Fertility of Soil.* 13:211-217.

Buckman H. y C. Brady. 1991. Naturaleza y propiedades de los suelos. Edit. UTEHA, Grupo Noriega Editores, México. pp: 185.

Burke, I., M. Yonker, C. Parton, C. Cole, K. Flach, and S. Schimel. 1989. Texture, climate and cultivation effects on soil organic matter content in U. S. grassland soil. *Soil Science Society of America Journal.* 53:800-805.

Buyanovsky, G., S. Aslam and H. Wagner. 1994. Carbon turnover in soil physical fractions. *Soil Science of America Journal.* 58:1167-1173.

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.

Campbell, C., B. McConkey, R. Zentner, F. Dyck, F. Selles, and D. Curtin. 1995. Carbon sequestration in a Brown Chernozem as affected by tillage and rotation. *Canadian Journal of Soil Science.* 75:449-458 p.

Castorena G., M. C. 1988. Estudio micromorfológico de los cementantes de algunos tepetates del Valle de México y Tlaxcala. Tesis de maestría en ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillos, México.

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.* Science Publishers. Inc. USA. pp. 115-131

Chenu, C., Y. Le Bissonnais, and Arrouays D. 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal.* 64:1479-1486.

Contreras H., J. R. 1994. Efecto de la porqueraza en combinación con N y P en rendimiento de maíz en los andosoles de la sierra Tarasca. Tesis de maestría del Colegio de Postgraduados. Montecillos, México.

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 Science Society of America Journal.* 62:1035-1041.

Curtin, D., H. Wang, F. Selles, B. G. McConkey, and C. A. Campbell. 2000. Tillage effects on carbon in continuous wheat and fallow – Weath rotations. *In: Soil Science Society of America Journal.* 64:2080-2086.

De León G., F. y Etchevers B, J. D. 1999. Materia orgánica en el suelo y disponibilidad de nitrógeno. *In: memoria 14 Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo (CD-ROM).* Pucón, Chile.

Denis, A. and C. Claire. 1998. Dynamic of soil aggregation and C sequestration. *In: Soil Processes and the carbon cycle.* CRC Press. pp: 199-205.

Donahue, R., R. Miller, W. Schicklauna. 1993 An introduction to soil and plant growth. Prentice-Hall, Inc. pp: 208-233.

Dormar, J. 1983. Chemical properties of soil and water-stable aggregates after sixty-seven years of cropping to spring wheat. *Plant and Soil.* 75:51-56

Dubroeuq, D. 1992. Los tepetates de la región de Xalapa, Veracruz (México): Un endurecimiento de tipo pedológico. *In: Primer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos Endurecidos (Uso y manejo de tepetates)*. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. Terra 10 (Número especial). pp: 233-240.

Dubroeuq, D., Quantin, P. y Zebrowski, C. 1989. Los tepetates de origen volcánico en México. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. *In: Terra 7*. pp. 4-12.

Duchaufour, P. H. 1984. Edafología, edafogenesis y clasificación. Masson, S. A. México, D. F. pp. 215-219.

Edwards, J. H., Wood, D. L., Turlouw and Ruf, M. E. 1992. Tillage and crop rotation effects on fertility status of a Hapludult soil. *Soil Science Society of America Journal*. 58:123-130.

Elliot, E T. 1986. Aggregates structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated. *Soil Science Society of America Journal*. 50:627-633.

Etchevers B., J. D. 1985. Análisis químico de suelos y el por qué de sus fallas. *In: Serie de cuadernos de edafología. Número 4*. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.

Etchevers B., J. D. y H. Brito. 1997. Levantamiento nutrimental de los tepetates de México y Tlaxcala. *In: Tercer simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. Zebrowski, C., Quantin, P y Trujillo, G. (eds.). ORSTOM. Quito, Ecuador. pp.:202-212

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. (eds.). ORSTOM. Quito, Ecuador. pp.:213-224

Etchevers B., J. D., R. M. López, C. Zebrowski y D. Peña. 1992a. Características químicas del tepetate de referencia de los estados de México y Tlaxcala, México. *In: Primer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos Endurecidos (Uso y manejo de tepetates)*. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. Terra 10 (Número especial). pp: 171.

Etchevers B., J. D., R. M. López, C. Zebrowsky y D. Peña. 1992b. Fertilidad de los tepetates de la vertiente occidental de la sierra nevada (México). *In: Primer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos Endurecidos (Uso y manejo de tepetates)*. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. Terra 10 (Número especial). pp: 383.

Etchevers B, J. D., L. Cruz H., J. Mares A. y C. Zebrowski. 1992c. Fertilidad de los tepetates. I. Fertilidad actual y potencial de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada (México). *In: Primer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos Endurecidos (Uso y manejo de tepetates)*. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. Terra 10 (Número especial). pp: 379-384.

Etchevers B., J. D., Fischer, R. A., Vidal, I., Sayre, K. D., Sandoval, M. A., Olechko, K., Román, S. 2000. Labranza de conservación, índices de calidad del suelo y captura de carbono. *In: Simposio Internacional de Labranza de Conservación (CD-ROM)*. Culiacán, Sinaloa. México.

Fechter, U., A. Vera y G. Werner. 1997. Erosión hídrica en un suelo volcánico endurecido (tepetate t3) en el bloque Tlaxcala, México. *In: Tercer simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. Zebrowski, C., Quantin, P y Trujillo, G. (ed.). ORSTOM. Quito, Ecuador. pp: 358-358.

Ferrera C., R. 1992. Papel de los microorganismos en la recuperación de suelos marginales. *In: Primer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos Endurecidos (Uso y manejo de tepetates)*. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. Terra 10 (Número especial). pp: 408-414

Ferrera C., R., A. Ortiz, J. Delgadillo y S. Santamaría. 1997. Uso de la materia orgánica en la recuperación de tepetates y su influencia en los microorganismos. *In: Tercer simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. Zebrowski, C., Quantin, P y Trujillo, G. (eds.). ORSTOM. Quito, Ecuador. pp: 225-237.

Figueroa S., B. 1982. La investigación en labranza en México. *In: XV Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo*. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo (ed.). México, D. F. pp: 34.

Figueroa S., B. y F. Morales F. 1996. Manual de producción de producción de cultivos con labranza de conservación. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural (ed.). Colegio de Postgraduados. San Luis Potosí, México. pp: 22-45.

Fisher, R. 1995. Soil Organic Matter: Clue or Conundrum?. *In: Carbon form and functions in forest soil*. McFee, W. and M. Kelly (Ed.). Soil Science Society of America. Madison, Winsconsin. USA. pp: 1-3.

Follett, R. F. 2001. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soil. *Soil and Tillage Research*. 61:77-92.

Fuller, L. G., Goh T B., and Oscarson D. W. 1995. Cultivation effects on dispersible clay of soil aggregates. *Canadian Journal of Soil Science*. 75:101-107.

Galvis S., A. 1998. Diagnóstico y simulación del suministro de nitrógeno edáfico para cultivos anuales.. Tesis de doctorado del Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. Capitulo 3.

García, E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen. Universidad Nacional Autónoma de México. México. pp. 16-21.

Grant, R., G. Juma N., A. Robertson J., C. Izaurralde, 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 Science Society of America Journal*. 65:205-214.

Haider, J., y K. Azad. 1991. Estimation of microbial biomass carbon and nitrogen. *Bangladesh Soil Science and Plant Nutrition*. 37:591-559.

Hans, K. 1996. *Soil sampling, preparation, and analysis*. Marcel Dekker, Inc. New York, USA. pp: 28-35.

Hashimoto, I., and M. L. Jackson. 1960. Rapid dissolution of allophane, kaolinite and allosite after dehydration. *In: Clays and Clays Minerals, 7th Conf.* pp: 102-113.

Hernández X., E. 1987. Etnobotánica de Tlaxcala. *In: Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*. Ruiz F., F. (ed.). Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. pp: 1-8.

Hidalgo M., C. 1991. Contribution à l'étude des sols volcaniques indurés ("tepetates") de la région de México (cimentation, induration). D. E. A. de Pédologie, Université de Nancy I-ORSTOM, France. pp: 57.

Hidalgo M., C. 1995. Étude d'e horizons indurés à comportement de fragipan, appelés tepetates, dans les sols volcaniques de la vallée de México. Tesis doctoral. Paris, Francia.

Hidalgo M., C., P. Quantin, y C. Zebrowski, 1992. La cementación de los tepetates: Estudio de la silicificación. *In: Primer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos Endurecidos (Uso y manejo de tepetates)*. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. Terra 10 (Número especial). pp: 192-200.

Hidalgo M., C., P. Quantin y F. Elsass. 1997. Caracterización mineralógica de los tepetates tipo fragipán del Valle de México. *In: Tercer simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos*. Zebrowski, C., Quantin, P y Trujillo, G. (eds.). ORSTOM. Quito, Ecuador. pp: 65-71.

Homann, P., P. Sollins, M. Fiorella, T. Thorson and S. Kern, J. 1997. Regional Soil Organic Carbon Storage estimates for western Oregon by multiple approaches. *Soil Science Society of America Journal*. 62:789-796.

Infante G., S. y G. Zarate de L. 1998. *Métodos estadísticos, un enfoque interdisciplinario*. Editorial Trillas, quinta edición. pp: 401-425.

Jackson, L. M. 1976. *Análisis químicos de suelos*. Tercera Edición. Beltrán, J (traductor). Ediciones Omega. Barcelona, España. pp: 282-283.

James, P. and H. Konrad 1986 Influence of mineral colloids on turnover rates of soil organic carbon. *In: Interactions of soil minerals with natural organics and microbes*. Soil Science Society of America. Special publication no. 17. Madison, EU. pp: 283-303.

Jenkinson , D. S. 1971. Studies on decomposition of ¹⁴C labeled organic matter in soil. *Science* 111:64-70.

Jastrow, J. 1996. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral associated organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*. 28:656-676.

Kaúrichev I., S. 1984. *Prácticas de edafología*. Editorial Mir. Moscú, Rusia. pp: 79-85.

Kemper, W. and Rosenau, C. 1986. Aggregate stability and size distribution. *In: Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. Klute, A. (ed.). Agronomy No. 9. 2nd edition. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA. pp: 425-442.

Kern, J. 1994. Spatial patterns of soil organic carbon in the contiguous U. E. *Soil Science Society of America Journal*. 58: 439-455.

Lal, R., Kimble M., Follet, F. and Stewart, A. 1998. Pedospheric processes and the carbon cycle. *In: Soil processes and the carbon cycle*. Lal, R., Kimble, J., Fllett, R. and Stewart (ed.). Chapter 1. CRC. Boca Raton, Florida, USA. pp: 1-7.

Lal, R. 1996. Low input agriculture and greenhouse gas emissions. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. *Terra* 15:109-118.

Lal, R. 1999. Soil quality and food security: The global perspectives. *In: Soil Quality and soil erosion*. Lal, R. (ed.). CRC. Boca Raton, Florida, USA. pp: 3-15.

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, USA. pp: 237-245.

Lauffer, M., Y. Leroux, C. Prat y J. L. Janeau. 1997. Organización superficial de los tepetates cultivados, Texcoco (México). *In: Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural*. Ruiz F., F. (eds.). Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo. Estado de México. pp: 343-356.

Lee, K. E. And Foster, R. C. 1991. Soil fauna and soil structure. *Australian Journal of Soil research*. 29:745-755.

Mann, L. K. 1986. Changes in soil carbon storage after cultivation. *Soil Science*. 142:279:288.

Miehlich, G. 1992. Formation and properties of tepetate in the central highlands of Mexico. *In: Primer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos Endurecidos (Uso y manejo de tepetates)*. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. *Terra* 10 (Número especial). pp: 136-144.

Mizota, C., and L. P. van Reeuwijk. 1989. Clay mineralogy and chemistry of soil formed in volcanic material in diverse climatic regions. ISRIC. Soil monograph. Wageningen. Pp: 128-130

Monreal, C. M. and H. Kodama. 1997. Influence of aggregate architecture and minerals on living habitats and soil organic matter. Canadian Journal of Soil Science. 77:367-377.

Monreal, C. M., H. R. Schulten and H. Kodama, 1997. Age, turnover and molecular diversity of soil organic matter in aggregates of a Gleysol. Canadian Journal of Soil Science. 77:379-388.

Montenegro, H. y Malagón, D. 1990. Propiedades físicas de los suelos. Instituto Geográfico "Agustín Codazzi". Subdirección Agroecológica. Bogota, Colombia. pp: 183-228.

Navarro G., H. 1992. Análisis agronómico comparativo en tepetates. *In:* Primer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos Endurecidos (Uso y manejo de tepetates). Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. Terra 10 (Número especial). pp: 454-459.

Navarro G., H y D. Flores S. 1997. Manejo agronómico diferencial de la asociación maíz-haba en tepetate de quinto año de uso agrícola. *In:* Tercer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos. Zebrowski, C., Quantin, P y Trujillo, G. (eds.). ORSTOM. Quito, Ecuador. pp.:287-295.

Neumann, G. and V. Römheld. 1999. Root excretion of carboxylic acids and protons in phosphorus-deficient plants. Plant and soil. 211: 121-130.

Nichols, J. D. 1984. Relation of organic carbon to soil properties and climate in the Southern Great Plains. Soil Science Society of America Journal. 48:1382-1384.

Nimlos, T. 1987. La nomenclatura de los horizontes endurecidos en los suelos de ceniza volcánica. *In:* Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. Ruiz F., F. (ed.). Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo. Estado de México. pp: 11-18.

Oades, J. M. 1988. The retention of organic matter in soils. *In:* Biogeochemistry 5:35-70

Oades, J. M., and G. A. Waters, 1991 Aggregates hierarchy in soil. Australian Journal Soil Research. 29:815-828.

Oleschko, K., C. Zebrowski, P. Quantin, y N. Fedoroff, 1992. Patrones micromorfológicos de organización de arcillas en tepetates (México). *In:* Primer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos Endurecidos (Uso y manejo de tepetates). Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. Terra 10 (Número especial). pp: 183-191.

Olsen, S. R., and L. A. Dean. 1965. Phosphorus. *In: Methods of soil analysis. Part 2.* American Society of agronomy. C. A. Black (*ed.*). Madison, Winsconsin. pp: 1035-1049.

Olson, K. R., D. L. Mokma, R. Lal, T. E. Schumacher and M. J. Lindstrom 1999. Erosion impacts on crop yield for selected soil of the north central United States. *In: Soil Quality and Soil Erosion.* Lal R. (*ed.*). CRC Press. Boca Raton, Florida, USA. pp. 250-265.

Oropeza M., J. L., J. D. Ríos B. y J. Salazar L. 1997. Uso de modelos matemáticos de erosión hídrica para la optimización de la rehabilitación de tepetates con fines agrícolas. *In: Tercer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos.* Zebrowski, C., Quantin, P y Trujillo, G. (*eds.*). ORSTOM. Quito, Ecuador. pp.:384-396.

Ortiz V., B., y C. Ortiz A. 1995. Edafología. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, Estado de México. pp: 135-138.

Pacheco L., M. C. 1987. Cartografía y caracterización mineralógica de los tepetates del oriente del Valle de México. *In: Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural.* Ruiz F., F. (*ed.*). Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo. Estado de México. pp: 31-37

Peña, D., M. E. Miranda, C. Zebrowski, y H. Arias. 1992. Resistencia de tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada. *In: Primer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos Endurecidos (Uso y manejo de tepetates).* Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. Terra 10 (Número especial). pp: 164:182.

Peña, D. y C. Zebrowski. 1992. Caracterización Física y Mineralógica de los tepetates de la Vertiente Occidental de la Sierra Nevada. *In: Primer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos Endurecidos (Uso y manejo de tepetates).* Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. Terra 10 (Número especial). pp: 156-163.

Peña, D. y C. Zebrowski, 1993. 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. Anexo 2: Descripción de perfiles. Contrato CCE/ORSTOM No. 0212. pp: 1-16.

Percival, H., R. Parfitt, and A. Scott 1999. Factors controlling soil carbon levels in New Zealand grasslands: Is clay content important?. *Soil Science Society of America Journal.* 34:1623-1630.

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. pp 115-125.

Prat, C. 1997. Análisis de las características de las precipitaciones de 1992 a 1995 en San Miguel Tlaixpan, Texcoco, México. *In: Tercer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos.* Zebrowski, C., Quantin, P y Trujillo, G. (*eds.*). ORSTOM. Quito, Ecuador. pp.:359-370.

Prat, C. y A. Báez. 1998. Condiciones de habilitación agrícola de una toba volcánica endurecida (*tepetate*) en México. *In:* 16 Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo. Registro científico no. 2547, simposio no. 38 (CD-ROM). Montpellier, Francia.

Prat, C., A. Báez y A. Márquez. 1997. Erosión y escurrimiento en parcelas de tepetate t3 en Texcoco, México. *In:* Tercer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos. Zebrowski, C., Quantin, P y Trujillo, G. (*eds.*). ORSTOM. Quito, Ecuador. pp.:371-383 p.

Puget, P. and E. Drinkwater L. 2001. Short-Term Dynamics of Root- and Shoot-Derived Carbon from a Leguminous Green Manure. *Soil Science Society of America Journal* 65:771-779.

Quantin, P. 1992. L'Induration des matériaux volcaniques pyroclastiques en Amérique Latine: Processus géologiques et pédologiques. *In:* Primer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos Endurecidos (Uso y manejo de tepetates). Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. Terra 10 (Número especial). pp: 24-32.

Quantin, P., A. Arias, J. Etchevest, 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). pp: 1-25.

Quiroga, A., Buschiazzo, D., and Peinemann, N. 1996. Soil organic matter particle size fractions in soils of the semiarid Argetina Pampas. *Soil Science.* 161:104-105.

Reeves, M., R. Lal, T. Logan and J. Sigarán. 1997. Soil nitrogen and carbon response to maize cropping system, nitrogen source, and tillage. *Soil science Society of America Journal.* 61:1387-1392.

Reicosky, D. and Lindstrom, M. 1993. Effect of fall tillage on short term carbon dioxide flux from soil. *Agronomy Journal.* 85:1237-1243.

Rice, C. W., Smith, M. S. and Blevins, R. L. 1986. Soil nitrogen availability after long-term continuous no tillage and conventional tillage corn production. *Soil Science Society of America Journal.* 50:1206-1210.

Robinson, C A., Cruce, R. M. and Ghaffarzadeh. 1996. Cropping system and nitrogen effects on Mollisol organic carbon. *Soil Science Society of America Journal.* 60:246-269.

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.

Ruíz F., J. F. 1979. Evaluación de cinco tipos de terrazas en suelos de ladera de la cuenca del río Texcoco. Tesis de Maestría en Ciencia del Colegio de Postgraduados. Montecillos México. pp: 8-21.

Ruiz F., J. F. 1987. Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. Ruiz F., F. (*ed.*). Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo. Estado de México.

Schnitzer, M. 1982. Organic Matter characterization: Chemical and microbiological properties. *In: Methods of soil analysis, Part 2. Charper 30., ASA-SSSA.* pp: 677.

Simeon, R. 1885. Dictionnaire de la langue Nahuatl ou mexicaine. 9 ed. 1992 Diccionario de la lengua Nahuatl o mexicana. Siglo XXI, D. F., México. pp: 784.

Six, J., K. Paustian, and C. Combrink. 2000. Soil structure matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate associated carbon. *Soil Science Society of America Journal.* 64:681-689.

Spain, A. 1990. Influence of environmental conditions and some soil chemical properties on the carbon and nitrogen contents of some tropical Australian rainforest soil. *Australian Journal of Soil Research.* 28: 825-839.

Soil Survey Staff. 1975. Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. *In: Soil Conservation service USDA. Agriculture Handbook.* pp: 754.

Sollins, P., Homann, P. and Caldwell, B. A. 1996. Stabilization and destabilización of soil organic matter: Mechanisms and controls. *Geoderma* 74:65-105.

Sparks, D. L. 1988. Soil physical chemistry. CRC Press. Boca Raton, Florida. pp: 180-181

Stevenson, F. 1994. Humus chemistry. Department of agronomy University of Illinois. Second edition. Edit. John Wiley and Sons. Inc. pp. 429-450.

Stevenson, F. and M. Cole. 1999. Cycles of soil, second edition. Edit. John Wiley and Sons. CRC. Inc. Boca Raton, Florida. pp: 2-20.

Stott, D., A. Kennedy A. and C. Cambardella. 1999. Impacts of soil organisms and organic matter on soil structure. *In: Soil Quality and Soil Erosion. Rattan, L. (ed.). CRC Press.* pp: 57-60.

Tan, K. 1996. Soil sampling, preparation, and analysis. Marcel Dekker, CRC. Inc. Boca, Raton, FloridaNew. USA. pp: 140-148.

Tisdall, J. and Oades J. 1982. Organic matter and water-stable aggregates. *Journal of Soil Science.* 33:141-163.

Torn, M., S Trumbore, A Chadwick, P. Vitousek, and D. Hendricks. 1997. Mineral control of soil organic carbon storage and turnover. *Nature:*389:170-173.

Valdés M.A., 1970. Características morfológicas y mineralógicas de los suelos de tepetate de la cuenca de México. *In*: Tesis de licenciatura de la Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México. pp: 15-18.

Van R., L. P. (Editor) 1999. Procedimientos para análisis de suelos. Gutierrez C., M. y Ortiz S., C. (traductores). Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México. pp: 7-16.

Velásquez R., A. y D. Flores. 1997. Formación de agregados estables a partir de un duripan del estado de Morelos (México) por parte de especies vegetales perennes en condiciones de invernadero. *In*: Tercer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos y Endurecidos. Zebrowski, C., Quantin, P y Trujillo, G. (eds.). ORSTOM. Quito, Ecuador. pp: 170-177.

Voroney, R., E. Paul, and A. Anderson. 1989. Decomposition of algal cells and components and their stabilization through complexing with model humic acid-type phenolic polymers. *Soil Biology and Biochemistry*. pp: 8:85-90.

Werner, G. 1992. Suelos volcánicos endurecidos (tepetates) en el estado de Tlaxcala: Distribución, rehabilitación, manejo y conservación. *In*: Primer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos Endurecidos (Uso y manejo de tepetates). Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. *Terra 10* (Número especial). pp: 318-331.

Zibilske, L. M. 1994. Methods of Soil Analysis, Part 2. *In*: Carbon mineralization. SSSA Book Series, no. 5. pp: 835-837.

Zebrowski, C. 1992. Los suelos volcánicos endurecidos de América Latina. *In*: Primer Simposio Internacional: Suelos Volcánicos Endurecidos (Uso y manejo de tepetates). Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. *Terra 10* (Número especial). pp: 15-23.

Zebrowski, C., C. Prat, J. D. Etchevers, H. M. Arias y M. E. Miranda. (eds.). 1992. Suelos Volcánicos Endurecidos. Primer Simposio Internacional. *Terra 10* (Número especial). México.

Zebrowski, C., P. Quantin y G. Trujillo. (eds.). 1997. Suelos Volcánicos Endurecidos. Tercer Simposio Internacional. ORSTOM. Quito, Ecuador.

8. APÉNDICE

Apéndice 1. Posición geográfica de las parcelas de tepetate

	Productor	Comunidad	LN			LO		
			o	,	“	o	,	“
1	Arturo Caballero	Apipilhuasco	19	32	9	98	44	7
2	Arturo Caballero	Apipilhuasco	19	32	9	98	44	7
3	Arturo Caballero	Apipilhuasco	19	32	9	98	44	7
4	Arturo Caballero	Apipilhuasco	19	32	9	98	44	7
5	Arturo Caballero	Apipilhuasco	19	32	9	98	44	7
6	Arturo Caballero	Apipilhuasco	19	32	9	98	44	7
7	Arturo Caballero	Apipilhuasco	19	32	9	98	44	7
8	Arturo Caballero	Apipilhuasco	19	32	9	98	44	7
9	Felipe A.	Apipilhuasco	19	32	32	98	44	12
10	Felipe Ramírez	Apipilhuasco	19	32	7	98	44	7
11	Recién roturado	Apipilhuasco	19	32	51	98	44	8
12	Vicente ayala	Apipilhuasco	19	32	51	98	44	8
13	Vicente ayala	Apipilhuasco	19	32	51	98	44	8
14	Vicente Ayala 2	Apipilhuasco	19	32	51	98	44	8
15	Angel Meraz Linares	Nativitas	19	29	58	98	50	13
16	Calletano Febre Hernandez	Nativitas	19	29	58	98	50	13
17	Calletano Febre II	Nativitas	19	29	58	98	50	13
18	Ciriaco Meraz 2BIV	Nativitas	19	29	41	98	50	0
19	Ciriaco Meraz 6B1	Nativitas	19	29	41	98	50	0
20	Ciriaco Meraz 8C3	Nativitas	19	29	41	98	50	0
21	Ciriaco Meraz 11AII	Nativitas	19	29	41	98	50	0
22	Ciriaco Meraz 1AIV	Nativitas	19	29	41	98	50	0
23	Ciriaco Meraz 9AII	Nativitas	19	29	41	98	50	0
24	Ciriaco Meraz SDP	Nativitas	19	29	41	98	50	0
25	Noe Sanchez	Nativitas	19	28	41	98	47	38
26	Ana montes	San Dieguito	19	29	34	98	48	51
27	Cirilo Meraz	San Dieguito	19	29	58	98	48	44
28	Ernesto Gonzales Hidalgo 1	San Dieguito	19	29	8	98	48	39
29	Fidel Gonzalez	San Dieguito	19	29	6	98	48	51
30	Justa Meraz	San Dieguito	19	29	32	98	48	43
31	Justa Meraz	San Dieguito	19	29	32	98	48	43
32	San Dieguito	San Dieguito	19	29	36	19	48	43
33	San Dieguito (abandonado)	San Dieguito	19	29	36	19	48	43
34	Comuneros T1	San Miguel Tlaixpan	19	29	10	98	47	6

Apéndice 1. (Continuación).

	Productor	Comunidad	LN			LO		
			o	1	“	o	1	“
35	Comuneros T2	San Miguel Tlaixpan	19	29	10	98	47	6
36	Comuneros T3	San Miguel Tlaixpan	19	29	10	98	47	6
37	Comuneros T4	San Miguel Tlaixpan	19	29	10	98	47	6
38	Comuneros T5	San Miguel Tlaixpan	19	30	0	98	47	6
39	Comuneros T6	San Miguel Tlaixpan	19	30	0	98	47	6
40	Comuneros T7	San Miguel Tlaixpan	19	30	0	98	47	45
41	Comuneros	San Miguel Tlaixpan	19	30	0	98	47	6
42	Comuneros	San Miguel Tlaixpan	19	30	0	98	47	6
43	Anacleto Sánchez	San Pablo Ixayoc	19	28	43	98	47	49
44	Angel Huescas	San Pablo Ixayoc	19	28	9	98	47	9
45	Angel Huescas 1	San Pablo Ixayoc	19	28	9	98	47	9
46	Angel Huescas 2	San Pablo Ixayoc	19	28	9	98	47	9
47	Artemio Pineda	San Pablo Ixayoc	19	29	12	98	47	93
48	Catarino vivar	San Pablo Ixayoc	19	29	51	98	47	29
49	Catarino Vivar de la Rosa	San Pablo Ixayoc	19	29	50	98	47	31
50	Francisco Huescas	San Pablo Ixayoc	19	29	17	98	48	3
51	Francisco Huescas	San Pablo Ixayoc	19	29	17	98	48	3
52	Francisco Huescas	San Pablo Ixayoc	19	29	12	98	47	9
53	Francisco Huescas	San Pablo Ixayoc	19	29	17	98	48	27
54	Francisco Huescas	San Pablo Ixayoc	19	29	12	98	47	9
55	Guadalupe Vivar	San Pablo Ixayoc	19	28	27	98	48	0
56	Inocencio Gonzalez Sanchez	San Pablo Ixayoc	19	28	27	98	48	0
57	Inocencio Gonzalez Sanchez	San Pablo Ixayoc	19	28	27	98	48	0
58	Inocencio Sanchez	San Pablo Ixayoc	19	28	57	98	48	47
59	Inocencio Sanchez	San Pablo Ixayoc	19	28	57	98	48	5
60	José Vivar Altamirano	San Pablo Ixayoc	19	28	9	98	48	16
61	José Vivar Altamirano	San Pablo Ixayoc	19	28	9	98	48	16
62	Las cruces	San Pablo Ixayoc	19	29	17	98	48	3
63	Mariano Sanchez	San Pablo Ixayoc	19	29	17	98	48	27
65	Monclasevas	San Pablo Ixayoc	19	29	17	98	48	3
65	Pedro Sanchez	San Pablo Ixayoc	19	28	6	98	47	8
66	Pedro Sanchez	San Pablo Ixayoc	19	28	6	98	47	8
67	Simón Vivar	San Pablo Ixayoc	19	28	59	98	47	8
68	Sostenes Galicia	San Pablo Ixayoc	19	28	59	98	47	8
69	Ana corona	Santa Catarina del Monte	19	29	9	98	47	0
70	Anselmo Velásquez	Santa Catarina del Monte	19	29	8	98	47	0
71	Elías Torres Espejel	Santa Catarina del Monte	19	24	48	98	46	29

Apéndice 1. (continuación).

	Productor	Comunidad		LN		LO		
			o	i	“	o	i	“
72	Francisco Reyes Cornejo	Santa Catarina del Monte	19	27	21	98	46	8
73	Francisco Reyes Cornejo	Santa Catarina del Monte	19	27	1	98	46	8
74	Jacinto Velasco olivares	Santa Catarina del Monte	19	24	48	98	46	29
75	Jacinto Velasco olivares	Santa Catarina del Monte	19	24	48	98	46	29
76	Jacinto Velasco olivares	Santa Catarina del Monte	19	30	1	98	47	38
77	Juventino Velásquez	Santa Catarina del Monte	19	29	10	98	47	23
78	Anastacia Velásquez	Santa Catarina del Monte	19	24	48	98	46	29
79	Guadalupe López	Santa María Tecuanulco	19	29	9	98	45	9
80	Guadalupe López 2	Santa María Tecuanulco	19	29	9	98	45	9
81	Rosalio	Tepetlaoxtoc	19	34	33	98	48	8
82	Juan Ramírez	Tepetlaoxtoc	19	34	33	98	48	8
83	Juan Ramírez	Tepetlaoxtoc	19	34	33	98	48	8
84	Anonimo	Tepetlaoxtoc	19	31	16	98	47	9
85	Procoro cahuanzi	Tepetlaoxtoc	19	34	17	98	47	9
86	Rosalio	Tepetlaoxtoc	19	34	33	98	48	8
87	Rosalio	Tepetlaoxtoc	19	34	33	98	48	8
88	Salome Hernández Rojas	Tepetlaoxtoc	19	34	22	98	47	9
89	Salome Hernández Rojas	Tepetlaoxtoc	19	34	22	98	47	9
90	Bonifacio Sánchez	Tequexquinahuac	19	28	42	98	48	5
91	El Chilo Méndez	Tequexquinahuac	19	28	42	98	48	5
92	Filiberto Hernández 1	Tequexquinahuac	19	28	35	98	48	50
93	Filiberto Hernández 2	Tequexquinahuac	19	28	35	98	48	50
94	Filiberto Hernández 3	Tequexquinahuac	19	28	35	98	48	5
95	Juan Hernández	Tequexquinahuac	19	28	23	98	48	39
96	Juan Hernández	Tequexquinahuac	19	28	23	98	48	39
97	Recién roturado	Tequexquinahuac	19	28	42	98	48	5
98	Reyes Franco	Tequexquinahuac	19	27	9	98	48	7
99	Reyes Franco	Tequexquinahuac	19	27	9	98	48	7
100	Reyes Franco	Tequexquinahuac	19	27	9	98	48	7

Apéndice 2. Cultivos y abonos orgánicos utilizados en las parcelas de tepetate

	Productor	Comunidad	Cultivos	Labranza	Abonos orgánicos	Riego
1	Arturo Caballero	Apipilhuasco	47 años maíz + haba + calabaza + frijol, 3 maíz	Tradicional	Compostas y estiércol, se observa mucho	no
2	Arturo Caballero	Apipilhuasco	Maíz + haba + calabaza + frijol	Tradicional	Compostas y estiércol, se observa mucho	no
3	Arturo Caballero	Apipilhuasco	Maíz + haba + calabaza + frijol	Tradicional	Compostas y estiércol, se observa mucho	no
4	Arturo Caballero	Apipilhuasco	47 años maíz + haba + calabaza + frijol, 3 maíz	Tradicional	Compostas y estiércol, se observa mucho	no
5	Arturo Caballero	Apipilhuasco	47 años maíz + haba + calabaza + frijol, 3 maíz	Tradicional	Compostas y estiércol, se observa mucho	no
6	Arturo Caballero	Apipilhuasco	47 años maíz + haba + calabaza + frijol, 3 maíz	Tradicional	Compostas y estiércol, se observa mucho	no
7	Arturo Caballero	Apipilhuasco	47 años maíz + haba + calabaza + frijol, 3 maíz	Tradicional	Compostas y estiércol, se observa mucho	no
8	Arturo Caballero	Apipilhuasco	47 años maíz + haba + calabaza + frijol, 3 maíz	Tradicional	Compostas y estiércol, se observa mucho	no
9	Felipe A.	Apipilhuasco	Maíz todo el tiempo	Tradicional	Nunca	no
10	Felipe Ramírez	Apipilhuasco	Maíz y cebada	Tradicional	Muy poco estiércol	no
11	Recién roturado	Apipilhuasco	Recién roturado			
12	Vicente Ayala	Apipilhuasco	Maíz, haba, frijol, cebada	tradicional	Estiércol y pajas	no
13	Vicente Ayala	Apipilhuasco	Recién roturado			
14	Vicente Ayala	Apipilhuasco	Maíz, haba, frijol, cebada	tradicional	Estiércol y pajas	no
15	Ángel Meraz	Nativitas	Maíz, frijol, haba	Tradicional	Poco estiércol	Si
16	Calletano Febre	Nativitas	Maíz +calabaza +frijol siempre	Tradicional	20 m ³ de estiércol de bovino cada año	Si
17	Calletano Febre	Nativitas	Maíz +calabaza +frijol siempre	Tradicional	20 m ³ de estiércol de bovino cada año	Si
18	Ciriaco Meraz	Nativitas	Crisantemos y margaritas	Otra	Pajas de trigo, maíz y compostas	Si
19	Ciriaco Meraz	Nativitas	Crisantemos y margaritas	Otra	Pajas de trigo, maíz y compostas	Si
20	Ciriaco Meraz	Nativitas	Crisantemos y margaritas	Otra	Pajas de trigo, maíz y compostas	Si
21	Ciriaco Meraz	Nativitas	Crisantemos y margaritas	Otra	Pajas de trigo, maíz y compostas	Si
22	Ciriaco Meraz	Nativitas	Crisantemos y margaritas	Otra	Pajas de trigo, maíz y compostas	Si
23	Ciriaco Meraz	Nativitas	Crisantemos y margaritas	Otra	Pajas de trigo, maíz y compostas	Si
24	Ciriaco Meraz	Nativitas	Crisantemos y margaritas	Otra	Pajas de trigo, maíz y compostas	Si
25	Noe Sánchez	Nativitas	Trigo y cebada (abandonado varias veces)	Tradicional	Nunca	Si

Apéndice 2. (continuación).

	Productor	Comunidad	Cultivos	Labranza	Abonos orgánicos	Riego
26	Ana montes	San Dieguito	Sin cultivar muchos años	Cero	Nunca	no
27	Cirilo Meraz	San Dieguito	7 años maíz, el resto frijol, calabaza y haba	Tradicional	Nunca	no
28	Ernesto Gonzáles	San Dieguito	Maíz siempre	Tradicional	Nunca	no
29	Fidel González	San Dieguito	Maíz, haba, y últimos 5 años calabaza	Tradicional	Un poco de estiércol de bovino	no
30	Justa Meraz	San Dieguito	Maíz, avena, haba, frijol	Tradicional	Nunca	no
31	Justa Meraz	San Dieguito	Maíz	Tradicional	Nunca	no
32	San Dieguito	San Dieguito	Maíz siempre	Tradicional	Nunca	no
33	San Dieguito	San Dieguito	sin cultivar muchos años	Cero	Nunca	no
34	Comuneros T1	San Miguel Tlaixpan	1 año medicago, 1 maíz + haba, 2 cebada	Tradicional	Toda la paja (experimental)	no
35	Comuneros T2	San Miguel Tlaixpan	2 años cebada + veza, (1) maíz + frijol + haba, (1) maíz + haba	Tradicional	Toda la paja (experimental)	no
36	Comuneros T3	San Miguel Tlaixpan	2 años cebada, 2 años maíz	Tradicional	Toda la paja (experimental)	no
37	Comuneros T4	San Miguel Tlaixpan	2 años cebada+ veza, (1) maíz + frijol + haba, (1) maíz + haba	Tradicional	Paja + 40 Mg ha ⁻¹ estiércol (experimental)	no
38	Comuneros T5	San Miguel Tlaixpan	1 año cebada + veza, (1) maíz + frijol + haba, (1) maíz + haba	Tradicional	Toda la paja (experimental)	no
39	Comuneros T6	San Miguel Tlaixpan	1 año cebada + veza, (1) maíz + frijol + haba, (1) maíz + haba	Tradicional	Toda la paja (experimental)	no
40	Comuneros T7	San Miguel Tlaixpan	2 años cebada+ veza, (1) maíz + frijol + haba, (1) maíz + haba	Tradicional	Toda la paja (experimental)	
41	Comuneros	San Miguel Tlaixpan	3 años maíz + haba	Tradicional	Estiércol vacuno (área experimental)	no
42	Comuneros	San Miguel Tlaixpan	3 años maíz + haba	Tradicional	Estiércol vacuno (área experimental)	no
43	Anacleto Sánchez	San Pablo Ixayoc	Maíz todo el tiempo	Tradicional	Nunca	no
44	Ángel Huescas	San Pablo Ixayoc	17 años maíz y 6 flores en invernadero	Tradicional	Estiércol, hojas de encino, madera podrida	si
45	Ángel Huescas	San Pablo Ixayoc	20 años maíz y 3 flores en invernadero	Tradicional	Estiércol, hojas de encino, madera podrida	si
46	Ángel Huescas	San Pablo Ixayoc	17 años maíz y 6 flores en invernadero	Tradicional	Estiércol, hojas de encino, madera podrida	si
47	Artemio Pineda	San Pablo Ixayoc	Maíz	Tradicional	Plumas de aves de corral y vísceras (mucho)	no
48	Catarino vivar	San Pablo Ixayoc	Agapando (todo el tiempo)	Cero	Estiércol vacuno 2 o 3 años	Si
49	Catarino Vivar	San Pablo Ixayoc	Agapando y flores de ornato (todo el tiempo)	Cero	Estiércol vacuno 2 o 3 años	Si
50	Fco. Huescas	San Pablo Ixayoc	22 años maíz y 3 años frijol	Tradicional	Mucho estiércol	no
51	Fco. Huescas	San Pablo Ixayoc	21 años maíz y 3 años frijol	Tradicional	Estiércol de puerco, burro y vacuno (1 vez)	no

Apéndice 2. (continuación).

	Productor	Comunidad	Cultivos	Labranza	Abonos orgánicos	Riego
52	Fco. Huescas	San Pablo Ixayoc	20 años frijol	Tradicional	Poco estiércol	no
53	Fco. Huescas	San Pablo Ixayoc	16 años maíz y 2 años frijol	Tradicional	Una vez equino y vacuno (capa de 5 cm)	no
54	Fco. Huescas	San Pablo Ixayoc	21 años maíz y 2 años frijol	Tradicional	Poco estiércol	no
55	Guadalupe Vivar	San Pablo Ixayoc	Maíz, frijol o maíz, haba	Asociación	Mucho estiércol de bovino	no
56	Inocencio González	San Pablo Ixayoc	Maíz y frijol (rotación de 2 x2)	Tradicional	Ocasionalmente estiércol de bovino	no
57	Inocencio González	San Pablo Ixayoc	Maíz y frijol (rotación de 2 x2)	Tradicional	Ocasionalmente estiércol de bovino	no
58	Inocencio Sánchez	San Pablo Ixayoc	Maíz y frijol (rotación de 2 x2)	Tradicional	Ocasionalmente estiércol de bovino	no
59	Inocencio Ssánchez	San Pablo Ixayoc	Maíz y frijol (rotación de 2 x2)	Tradicional	Ocasionalmente estiércol de bovino	no
60	José Vivar	San Pablo Ixayoc	Siempre maíz y un poco de avena	Tradicional	Poco estiércol de bovino	no
61	José Vivar	San Pablo Ixayoc	Casi siempre frijol	Tradicional	Nunca	no
62	Las cruces	San Pablo Ixayoc	10 años maíz y 13 años frijol	Tradicional	Poco estiércol	no
63	Mariano Sánchez	San Pablo Ixayoc	Maíz, haba, frijol,	Tradicional	Poco	no
64	Monclasevas	San Pablo Ixayoc	Maíz	Tradicional	Poco estiércol	no
65	Pedro Sánchez	San Pablo Ixayoc	Avena y maíz	Tradicional	Nunca	no
66	Pedro Sánchez	San Pablo Ixayoc	Avena y maíz	Tradicional	Nunca	no
67	Simón Vivar	San Pablo Ixayoc	La mayor parte maíz, 2 frijol, 3 haba	Tradicional	Poco estiércol	no
86	Sostenes Galicia	San Pablo Ixayoc	Maíz	Tradicional	Ocasionalmente estiércol de bovino	no
69	Ana corona	Santa Catarina	Maíz	Tradicional	Nunca	no
70	Anselmo Velásquez	Santa Catarina	10 años maíz, 4 haba, 1 frijol, 3 Zempazuchitl, 1 agapando	Tradicional	Estiércol vacuno y equino 4 años	no
71	Elías Torres	Santa Catarina	Maíz, haba, frijol, alberjón, zanahoria, nube, trigo, cebada	Tradicional	Poco	si
72	Francisco Reyes	Santa Catarina	12 años maíz, 3 haba, 2 cebada, 1 trigo	Tradicional	Durante 5 años de equino y borrego	no
73	Francisco Reyes	Santa Catarina	20 años maíz, 3 cebada, 3 trigo, 2 haba	Tradicional	Un poco de lama	no
74	Jacinto Velasco	Santa Catarina	10 años maíz, 3 alberjón, 3 trigo, 1 frijol	Tradicional	Lama, estiércol de bovino	no
75	Jacinto Velasco	Santa Catarina	11 años maíz, 3 alberjón, 3 trigo, 1 frijol	Tradicional	Nunca	no
76	Jacinto Velasco	Santa Catarina	13 años maíz, 6 trigo, 1 cebada	Tradicional	Nunca	no
77	Juventino Velasco	Santa Catarina	12 años maíz, 3 frijol, 5 haba, 2 avena	Tradicional	Nunca	no

Apéndice 2. (continuación).

	Productor	Comunidad	Cultivos	Labranza	Abonos orgánicos	Riego
78	Anastacia Velásquez	Santa Catarina	20 años agapando	cero	Poco durante 4 años	no
79	Guadalupe López	Santa María T.	Maíz, cebada, trigo	Tradicional	Poco de borregos y equinos	no
80	Guadalupe López	Santa María T.	Maíz, frijol	Tradicional	Nunca	no
81	Rosalio	Tepetlaoxtoc	Maíz y cebada	Tradicional	Nunca	no
82	Juan Ramírez	Tepetlaoxtoc	7 años maíz, 3 trigo, 1 cebada, 2 ayocote	Tradicional	18 m3 de estiércol de bovino, 1 año pajas	
83	Juan Ramírez	Tepetlaoxtoc	2 años frijo, 2 nopal, otros agricultores puro frijol	Tradicional	Nunca	no
84	Anónimo	Tepetlaoxtoc	Nopal	cero	Nunca	
85	Procoro Cahuanzi	Tepetlaoxtoc	Frijol ,cebada, y ayocorte (rotación)	Tradicional	Paja de frijol y ayocote	no
86	Rosalio	Tepetlaoxtoc	Maíz	Tradicional	Nunca	no
87	Rosalio	Tepetlaoxtoc	Maíz y frijol	Tradicional	Nunca	no
88	Salome Hernández	Tepetlaoxtoc	Frijol, maíz, cebada, trigo (rotación)	Tradicional	Nunca	
89	Salome Hernández	Tepetlaoxtoc	Frijol, maíz, cebada, trigo (rotación)	Tradicional	Nunca	
90	Bonifacio Sánchez	Tequexquinahuac	Haba + frijol y 2 años maíz	Tradicional	Nunca	no
91	El Chilo Mendez	Tequexquinahuac	Recién roturado			
92	Filiberto Hernández	Tequexquinahuac	1-2 años frijol+haba por 1-2 años de maíz calabaza	Tradicional	Muy poco de bovino	no
93	Filiberto Hernández	Tequexquinahuac	La mayor parte maíz y frijol + haba	Tradicional	Muy poco de bovino	no
94	Filiberto Hernández	Tequexquinahuac	Maíz	Tradicional	Mucho estiércol	no
95	Juan Hernández	Tequexquinahuac	Maíz, haba, frijol, veza	Tradicional	Poco estiércol	no
96	Juan Hernández	Tequexquinahuac	Maguey	cero	Poco estiércol	no
97	Recién roturado	Tequexquinahuac				
98	Reyes Franco	Tequexquinahuac	Maíz + haba + frijol o alberjón (siempre)	Tradicional	Estiércol de puerco, burro y vacuno (poco)	no
99	Reyes Franco	Tequexquinahuac	Maíz + haba + frijol o alberjón (siempre)	Tradicional	Estiércol de puerco, burro y vacuno (mucho)	no
100	Reyes Franco	Tequexquinahuac	Maíz + haba + frijol o alberjón (siempre)	Tradicional	Estiércol de puerco, burro y vacuno	no

Apéndice 3. Carbono orgánico y fósforo extractable en las clases designadas

Clase	C %	P ppm	Clase	C %	P ppm
I	0.00	5.8	IV	0.91	46.4
Tepetate recién roturado	0.08	2.1	Leguminosas o estiércol	0.99	12.7
	0.09	1.5		1.02	6.7
	0.12	2.0		0.40	1.7
Media	0.07	1.8		0.92	8.4
Varianza	0.00	0.1		0.41	3.3
Desviación estándar	0.05	0.3		0.42	7.9
Coefficiente de variación	71	18		0.45	1.6
II	0.12	1.1		0.45	5.2
Parcelas con erosión fuerte	0.15	0.6		0.46	2.7
	0.23	2.1		0.46	2.0
	0.24	2.3		0.47	13.7
	0.25	2.7		0.47	3.9
Media	0.20	1.8		0.48	1.8
Varianza	0.00	0.8		0.48	11.5
Desviación estándar	0.06	0.9		0.49	7.3
Coefficiente de variación	30	50		0.49	39.0
III	0.35	11.7		0.49	5.5
Monocultivo de gramíneas	0.40	5.6		0.39	1.8
	0.50	8.9		0.50	4.7
	0.35	1.6		0.51	12.4
	0.36	2.3		0.52	3.9
	0.37	2.0		0.53	3.1
	0.38	2.1		0.54	13.4
	0.38	3.7		0.54	2.9
	0.38	1.6		0.55	5.8
	0.39	1.2		0.58	9.2
	0.65	6.5		0.59	5.0
	0.48	4.1		0.61	17.4
	0.47	2.5		0.61	1.7
	0.50	6.7		0.66	13.3
	0.43	3.6		0.67	20.2
	0.45	7.2		0.67	2.2
	0.58	6.9		0.68	15.4
Media	0.44	4.6		0.69	4.5
Varianza	0.01	9.1		0.69	30.1
Desviación estándar	0.09	3.0		0.75	2.7
Coefficiente de variación	20	66		0.76	17.7
				0.77	13.2
				0.77	11.0
				0.77	9.4
			Media	0.60	8.9
			Varianza	0.03	63.2
			Desviación estándar	0.16	8.0
			Coefficiente de variación	27	89

Apéndice 3. (continuación)

Clase	C %	P ppm	Clase	C %	P ppm
V	0.61	2.0	VII	1.91	83.5
Labranza cero	1.07	16.2	Invernaderos	1.27	64.5
	0.83	5.6		1.34	67.7
	1.50	6.4		1.36	49.5
	0.96	6.4		1.39	60.4
Media	1.09	8.7		1.25	69.2
Varianza	0.08	25.5		1.54	49.3
Desviación estándar	0.29	5.1		1.74	50.7
Coficiente de variación	26.71	58.4	Media	1.47	61.9
VI	0.92	34.1	Varianza	0.06	142.5
Leguminosas y mucho estiércol	0.96	26.5	Desviación estándar	0.24	11.9
	0.97	48.4	Coficiente de variación	16.00	19.3
	1.10	54.5	VIII		
	1.16	24.5	Labranza cero, estiércol y riego	1.78	64.1
	1.17	38.9			
	1.25	44.2	IX	3.59	68.5
	1.26	26.7	Invernaderos con uso intensivo	4.18	47.2
	1.43	21.0	Media	3.88	57.8
	1.43	122.4	Varianza	0.17	227.3
	1.46	34.2	Desviación estándar	0.42	15.1
	1.72	53.3	Coficiente de variación	10.72	26.1
	2.08	50.5			
	2.10	61.1			
Media	1.19	43.2			
Varianza	0.04	800.6			
Desviación estándar	0.19	28.3			
Coficiente de variación	16.22	65.5			

Apéndice 4. Comparación de medias para las clases establecidas según Tukey (< 0.05)

Carbono orgánico			Fósforo extractable Olsen		
Clase	Contraste	Significancia	Clase	Contraste	Significancia
9	8	***	8	7	NS
9	7	***	8	9	NS
9	6	***	8	6	NS
9	5	***	8	4	***
9	4	***	8	5	***
9	3	***	8	3	***
9	2	***	8	1	***
9	1	***	8	2	***
8	9	***	7	8	NS
8	7	NS	7	9	NS
8	6	NS	7	6	***
8	5	***	7	4	***
8	4	***	7	5	***
8	3	***	7	3	***
8	2	***	7	1	***
8	1	***	7	2	***
7	9	***	9	8	NS
7	8	NS	9	7	NS
7	6	NS	9	6	NS
7	5	***	9	4	***
7	4	***	9	5	***
7	3	***	9	3	***
7	2	***	9	1	***
7	1	***	9	2	***
6	9	***	6	8	NS
6	8	NS	6	7	***
6	7	NS	6	9	NS
6	5	***	6	4	***
6	4	***	6	5	***
6	3	***	6	3	***
6	2	***	6	1	***
6	1	***	6	2	***
5	9	***	4	8	***
5	8	***	4	7	***
5	7	***	4	9	***
5	6	***	4	6	***
5	4	***	4	5	NS
5	3	***	4	3	NS
5	2	***	4	1	NS

Apéndice 4. (Continuación).

Carbono orgánico			Fósforo extractable Olsen		
Clase	Contraste	Significancia	Clase	Contraste	Significancia
5	1	***	4	2	NS
4	9	***	5	8	***
4	8	***	5	7	***
4	7	***	5	9	***
4	6	***	5	6	***
4	5	***	5	4	NS
4	3	NS	5	3	NS
4	2	***	5	1	NS
4	1	***	5	2	NS
3	9	***	3	8	***
3	8	***	3	7	***
3	7	***	3	9	***
3	6	***	3	6	***
3	5	***	3	4	NS
3	4	NS	3	5	NS
3	2	NS	3	1	NS
3	1	NS	3	2	NS
2	9	***	1	8	***
2	8	***	1	7	***
2	7	***	1	9	***
2	6	***	1	6	***
2	5	***	1	4	NS
2	4	***	1	5	NS
2	3	NS	1	3	NS
2	1	NS	1	2	NS
1	9	***	2	8	***
1	8	***	2	7	***
1	7	***	2	9	***
1	6	***	2	6	***
1	5	***	2	4	NS
1	4	***	2	5	NS
1	3	NS	2	3	NS
1	2	NS	2	1	NS

Apéndice 5. Carbono orgánico por diámetro de partícula, fragmentos, agregados y dureza

Tamiz Mm	DM mm	Masa %	CDM %	A C %	F C %	A Dureza kg/cm ²	F Dureza kg/cm ²	A Masa %	F Masa %
Parcela no. 35 de los apéndices 1 y 2. Rotación gramínea-leguminosa (4 años)									
50.8 - 31.7	41	6	0.26	0.35	0.17	4.2	6.2	28	72
31.7 - 22.2	27	4	0.29	0.40	0.18	3.5	5.1	47	53
22.2 - 11.5	17	12	0.31	0.43	0.20	1.4	4.6	25	75
11.5 - 6.35	9	12	0.37	0.45	0.28	0.5	1.8	30	70
6.35 - 4.75	6	2	0.42	0.53	0.31	0.3	1.3	35	65
4.75 - 3.36	4	9	0.45	0.58	0.33	0.2	0.7	30	70
3.36 - 2.00	3	11	0.44						
2.00 - 1.00	1.5	7	0.48						
1.00 - 0.46	0.7	4	0.50						
0.46 - 0.25	0.4	23	0.49						
0.25 - 0.10	0.2	5	0.49						
0.10 - 0.049	0.1	3	0.48						
<0.049	0.0	0.3	0.43						
Parcela no. 36 de los apéndices 1 y 2. Monocultivo de maíz (4 años)									
50.8 - 31.7	41	3	0.19	0.30	0.08	3.1	6.0	10	90
31.7 - 22.2	27	6	0.20	0.31	0.08	2.8	5.0	25	75
22.2 - 11.5	17	10	0.23	0.31	0.14	1.0	3.4	31	69
11.5 - 6.35	9	11	0.25	0.37	0.13	0.5	1.8	27	73
6.35 - 4.75	6	2	0.30	0.38	0.21	0.2	0.7	23	77
4.75 - 3.36	4	8	0.32	0.40	0.24	0.1	0.5	24	76
3.36 - 2.00	3	10	0.32						
2.00 - 1.00	1.5	7	0.43						
1.00 - 0.46	0.7	4	0.42						
0.46 - 0.25	0.4	28	0.41						
0.25 - 0.10	0.2	8	0.42						
0.10 - 0.049	0.1	4	0.42						
<0.049	0.0	0.4	0.45						
Parcela no. 91 de los apéndices 1 y 2. Recién roturado									
50.8 - 31.7	41	2	0.00				5.1		100
31.7 - 22.2	27	5	0.00				2.2		100
22.2 - 11.5	17	11	0.00				1.3		100
11.5 - 6.35	9	10	0.00				0.9		100
6.35 - 4.75	6	2	0.00				0.5		100
4.75 - 3.36	4	7	0.00						
3.36 - 2.00	3	7	0.13						
2.00 - 1.00	1.5	6	0.19						
1.00 - 0.46	0.7	2	0.26						
0.46 - 0.25	0.4	24	0.30						
0.25 - 0.10	0.2	8	0.35						
0.10 - 0.049	0.1	6	0.38						
<0.049	0.0	0.6	0.48						

A: Agregados, CDP: carbono orgánico por diámetro de partícula, DM: Diámetro medio, F: Fragmentos.

Apéndice 5. (continuación).

Tamiz mm	DM mm	Masa %	CDM %	A C %	F C %	A Dureza kg/cm ²	F Dureza kg/cm ²	A Masa %	F Masa %
Suelo arcilloso de San miguel Tlaixpan									
50.8 - 31.7	41	1	0.84	0.84		6.5		100	
31.7 - 22.2	27	6	0.87	0.87		4.0		100	
22.2 - 11.5	17	10	0.87	0.87		4.0		100	
11.5 - 6.35	9	11	0.80	0.80		2.3		100	
6.35 - 4.75	6	2	0.81	0.81		1.3		100	
4.75 - 3.36	4	9	0.84	0.84		0.8		100	
3.36 - 2.00	3	12	0.83						
2.00 - 1.00	1.5	6	0.84						
1.00 - 0.46	0.7	3	0.89						
0.46 - 0.25	0.4	23	0.95						
0.25 - 0.10	0.2	11	0.84						
0.10 - 0.049	0.1	7	0.94						
<0.049	0.0	0.8	1.10						
Parcela no. 3 de los apéndices 1 y 2. Leguminosas y estiércol (más de 100 años de cultivo)									
50.8 - 31.7	41	3	0.75	1.44	0.07	3.1	5	61	39
31.7 - 22.2	27	1	0.85	1.57	0.13	1.9	2.8	57	43
22.2 - 11.5	17	4	0.95	1.68	0.23	1.4	1.8	48	52
11.5 - 6.35	9	7	1.04	1.78	0.29	0.8	1.2	84	16
6.35 - 4.75	6	1	1.11	1.92	0.30	0.4	1.0	83	17
4.75 - 3.36	4	5	1.16	2.00	0.33	0.3	1.0	88	12
3.36 - 2.00	3	8	1.57						
2.00 - 1.00	1.5	5	1.85						
1.00 - 0.46	0.7	3	1.99						
0.46 - 0.25	0.4	28	2.02						
0.25 - 0.10	0.2	17	1.98						
0.10 - 0.049	0.1	14	2.31						
<0.049	0.0	0.2	2.14						
Parcela no. 68 de los apéndices 1 y 2. Monocultivo de maíz (49 años)									
50.8 - 31.7	41	9	0.35	0.41	0.29	4.2	4.8	92	8
31.7 - 22.2	27	7	0.37	0.45	0.29	2.8	3.5	80	20
22.2 - 11.5	17	10	0.41	0.51	0.30	1.5	3.0	76	24
11.5 - 6.35	9	9	0.43	0.54	0.32	0.8	1.4	63	37
6.35 - 4.75	6	2	0.44	0.55	0.34	0.3	0.8	57	43
4.75 - 3.36	4	6	0.45	0.55	0.35	0.2	0.5	63	37
3.36 - 2.00	3	9	0.43						
2.00 - 1.00	1.5	6	0.45						
1.00 - 0.46	0.7	4	0.39						
0.46 - 0.25	0.4	23	0.43						
0.25 - 0.10	0.2	5	0.65						
0.10 - 0.049	0.1	4	0.75						
<0.049	0.0	0.4	0.72						

A: Agregados, CDP: carbono orgánico por diámetro de partícula, DM: Diámetro medio, F: Fragmentos.

Apéndice 5. (continuación).

Tamiz mm	DM mm	Masa %	CDM %	A C %	F C %	A Dureza kg/cm ²	F Dureza kg/cm ²	A Masa %	F Masa %	Tamiz mm
Parcela no. 52 de los apéndices 1 y 2. Leguminosas por 20 años (tepetate blanco)										
2	50.8 - 31.7	41	5	0.00	0.30	0.01	2.0	6.0	2	98
3	31.7 - 22.2	27	11	0.22	0.40	0.04	1.5	3.1	2	98
4	22.2 - 11.5	17	12	0.25	0.44	0.06	1.0	2.4	2	98
5	11.5 - 6.35	9	11	0.29	0.50	0.09	0.5	1.2	4	96
6	6.35 - 4.75	6	2	0.30	0.49	0.11	0.2	1.0	6	94
7	4.75 - 3.36	4	7	0.33	0.50	0.16	0.1	1.0	10	90
8	3.36 - 2.00	3	10	0.33						
9	2.00 - 1.00	1.5	6	0.35						
10	1.00 - 0.46	0.7	2	0.40						
11	0.46 - 0.25	0.4	17	0.43						
12	0.25 - 0.10	0.2	6	0.47						
13	0.10 - 0.049	0.1	4	0.67						
14	<0.049	0.0	0.5	0.91						
Parcela no. 45 de los apéndices 1 y 2. Invernadero con uso intensivo (1)										
2	50.8 - 31.7	41	4	2.86	2.20	0.10	5.0	4.5	100	0
3	31.7 - 22.2	27	6	3.01	2.70	0.20	4.5	3.3	100	0
4	22.2 - 11.5	17	6	2.20	2.86	0.39	3.5	3.1	87	13
5	11.5 - 6.35	9	13	2.70	3.01	0.47	1.6	2.3	75	25
6	6.35 - 4.75	6	4	3.29	3.29	0.98	1.4	1.6	67	33
7	4.75 - 3.36	4	14	3.62	3.62	1.04	0.9	1.2	76	24
8	3.36 - 2.00	3	18	4.12						
9	2.00 - 1.00	1.5	9	4.27						
10	1.00 - 0.46	0.7	3	4.40						
11	0.46 - 0.25	0.4	18	4.08						
12	0.25 - 0.10	0.2	4	3.92						
13	0.10 - 0.049	0.1	2	3.95						
14	<0.049	0.0	0.5	3.67						
Parcela no. 46 de los apéndices 1 y 2. Invernadero con uso intensivo (2)										
2	50.8 - 31.7	41	15	4.7			6.1		100	
3	31.7 - 22.2	27	9	4.6			5.1		100	
4	22.2 - 11.5	17	14	4.1			4.5		100	
5	11.5 - 6.35	9	14	3.2			3.3		100	
6	6.35 - 4.75	6	2	3.5			2.1		100	
7	4.75 - 3.36	4	6	3.8					100	
8	3.36 - 2.00	3	10	4.3					100	
9	2.00 - 1.00	1.5	4	4.9					100	
10	1.00 - 0.46	0.7	2	5.2					100	
11	0.46 - 0.25	0.4	7	4.6					100	
12	0.25 - 0.10	0.2	2	4.1					100	
13	0.10 - 0.049	0.1	2	3.9					100	
14	<0.049	0.0	0.2	3.4					100	

A: Agregados, CDP: carbono orgánico por diámetro de partícula, DM: Diámetro medio, F: Fragmentos.

Apéndice 5. (continuación).

Parcela no. 78 de los apéndices 1 y 2. Labranza cero (20 años)									
Tamiz	DM	Masa	CDM	A	F	A	F	A	F
mm	mm	%	%	C	C	Dureza	Dureza	Masa	Masa
				%	%	kg/cm²	kg/cm²	%	%
50.8 - 31.7	41	1	0.54	0.69	0.39	3.5	4.0	82	18
31.7 - 22.2	27	2	1.05	1.50	0.60	3.0	2.9	68	32
22.2 - 11.5	17	10	1.39	1.88	0.90	1.7	1.8	20	80
11.5 - 6.35	9	14	1.66	1.96	1.36	0.9	1.1	42	58
6.35 - 4.75	6	2	1.82	2.23	1.40	0.6	0.7	31	69
4.75 - 3.36	4	10	1.87	2.24	1.50	0.2	0.6	42	58
3.36 - 2.00	3	12	1.81						
2.00 - 1.00	1.5	6	2.09						
1.00 - 0.46	0.7	4	2.26						
0.46 - 0.25	0.4	17	1.92						
0.25 - 0.10	0.2	6	1.49						
0.10 - 0.049	0.1	4	1.53						
<0.049	0.0	0.1	1.52						
Parcela no. 46 de los apéndices 1 y 2. Labranza cero y riego (60 años)									
50.8 - 31.7	41	8	2.2	2.33	0.42	7.8	5.5	95	5
31.7 - 22.2	27	4	2.3	2.37	0.45	6.7	4.4	93	7
22.2 - 11.5	17	5	2.2	2.97	0.46	5.6	3.0	90	10
11.5 - 6.35	9	9	2.3	2.84	0.43	2.1	2.0	91	9
6.35 - 4.75	6	2	2.3	2.59	0.43	1.2	1.6	92	8
4.75 - 3.36	4	5	2.5	2.48	0.47	0.9	0.9	89	11
3.36 - 2.00	3	5	2.6						
2.00 - 1.00	1.5	3	2.59						
1.00 - 0.46	0.7	1	2.61						
0.46 - 0.25	0.4	4	2.44						
0.25 - 0.10	0.2	1	2.72						
0.10 - 0.049	0.1	1	2.87						
<0.049	0.0	0.1	2.99						
Parcela no. 37 de los apéndices 1 y 2. Leguminosas y estiércol (4 años)									
50.8 - 31.7	41	6	0.40	0.70	0.10	2.0	6.0	18	82
31.7 - 22.2	27	4	0.45	0.76	0.14	1.6	4.7	20	80
22.2 - 11.5	17	12	0.47	0.82	0.13	0.9	3.3	11	89
11.5 - 6.35	9	12	0.52	0.84	0.20	0.5	1.4	14	86
6.35 - 4.75	6	2	0.58	0.90	0.27	0.2	0.8	16	84
4.75 - 3.36	4	9	0.62	0.97	0.27	0.1	0.7	28	72
3.36 - 2.00	3	11	0.52						
2.00 - 1.00	1.5	7	0.77						
1.00 - 0.46	0.7	4	0.91						
0.46 - 0.25	0.4	23	0.73						
0.25 - 0.10	0.2	5	0.75						
0.10 - 0.049	0.1	3	0.78						
<0.049	0.0	0.3	0.60						

A: Agregados, CDP: carbono orgánico por diámetro de partícula, DM: Diámetro medio, F: Fragmentos.