

CARBONO EN SUELOS DE LADERA: FACTORES QUE DEBEN CONSIDERARSE PARA DETERMINAR SU CAMBIO EN EL TIEMPO

CARBON IN HILLSIDES SOIL: FACTORS THAT MUST BE CONSIDERED TO DETERMINE ITS CHANGE OVER TIME

Lucila González-Molina*, Jorge D. Etchevers-Barra y Claudia Hidalgo-Moreno

Edafología. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México (lucilaag@colpos.mx)

RESUMEN

Los factores que intervienen en la reproducibilidad de mediciones de carbono orgánico del suelo (COS) deben ser considerados para monitorear los cambios de C de los ecosistemas en el tiempo. Además de este aspecto puramente analítico, en regiones montañosas debe considerarse que la posición en la ladera puede determinar un patrón específico en la variación espacial de los contenidos de COS. El objetivo del presente trabajo fue analizar algunos factores que deben considerarse en la determinación de los cambios de COS en los terrenos de laderas de la Sierra Norte de Oaxaca. Las mediciones de COS fueron realizadas en muestras recolectadas en parcelas experimentales empleando un procedimiento de medición desarrollado ex profeso. Los factores que más afectaron las determinaciones de cambios de COS que ocurren en el suelo fueron la medición de la densidad aparente del suelo (D_a) y la prolijidad con que fueron eliminados los residuos orgánicos de la muestra. No hubo diferencias significativas en la reproducibilidad de las mediciones analíticas instrumentales de COS entre las diferentes oportunidades de medición de las mismas muestras. Tampoco hubo diferencias en el COS acumulado de la parte superior o inferior de la pendiente en torno a un micrositio georeferenciado. Por tanto, para realizar estudios de cambios de COS en terrenos de laderas es preciso estandarizar la eliminación de los residuos orgánicos de la muestra antes del análisis así como la determinación de la D_a para una alta reproducibilidad en periodos sucesivos de observación.

Palabras clave: Densidad aparente, medición de carbono en suelos, muestreo, posición en la ladera, pretratamiento de la muestra.

INTRODUCCIÓN

El carbono orgánico del suelo (COS) almacenado en los primeros 100 cm es 1462-1548 Pg de C ($1 \text{ Pg} = 1 \times 10^{15} \text{ g}$) en el mundo (Batjes, 1996). Este C forma uno de los principales compartimentos terrestres, mayor que el C biótico (550 Pg C) y que el atmosférico (760 Pg) (Eswaran *et al.*, 1993). El COS

ABSTRACT

Factors that intervene in the reproducibility of soil organic carbon (SOC) measurements must be considered to monitor changes in the ecosystem overall C over time. Aside from this purely analytical aspect, in mountainous regions position on the hillside can determine a specific pattern in the spatial variation of SOC contents. The objective of this study was to analyze some factors that must be considered in determining changes in SOC in hillside land in the Sierra Norte of Oaxaca. SOC measurements were taken in samples collected in experimental plots using a measurement procedure developed specifically for that purpose. The factors that most affected determinations of SOC changes occurring in the soil were measurement of bulk density (D_b) and the diligence with which organic residues were eliminated from the sample. There were no significant differences in reproducibility in analytical laboratory measurements of SOC among the different measurement times in the same samples. Nor were there differences in accumulated SOC in the upper or lower part of the slope of a geo-referenced micro-site. Therefore, in conducting studies of changes in SOC in hillside land, it is necessary to standardize elimination of organic residues of the sample before analysis as well the determination of D_b for high reproducibility in successive periods of observation.

Key words: Bulk density, soil carbon measurement, sampling, position on the slope, sample pre-treatment.

INTRODUCTION

Soil organic carbon (SOC) stored in the first 100 cm is 1462-1548 Pg C ($1 \text{ Pg} = 1 \times 10^{15} \text{ g}$) worldwide (Batjes, 1996). This C forms one of the main terrestrial compartments, greater than biotic C (550 Pg C) or atmospheric C (760 Pg) Eswaran *et al.*, 1993). SOC is an indicator of soil mineral quality and serves to detect changes in C over time (Janzen, 2003). Changes in SOC are difficult to quantify at small and large scales (that is, in plots, regions or the world) because of factors that vary over time and space (Post *et al.*, 2001).

Among the factors that must be considered in determining quantitative changes in SOC stocks over

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: Abril, 2007. Aprobado: Febrero, 2008.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 42: 741-751. 2008.

es un indicador de la calidad de los suelos minerales y sirve para detectar los cambios de C en el tiempo (Janzen, 2003). Los cambios del COS son difíciles de cuantificar en pequeñas y grandes escalas (esto es, en parcelas, regiones o el mundo), debido a factores variables en el tiempo y en el espacio (Post *et al.*, 2001).

Entre los factores que se deben considerar para la determinación cuantitativa de los cambios de los almacenes COS en el tiempo están: 1) la interacción de procesos geomórficos y bióticos (Ellert *et al.*, 2001); 2) la historia de manejo del suelo (Smith, 2003); 3) la variabilidad espacial del COS (Janzen, 2003); 4) el tiempo transcurrido entre dos mediciones sucesivas (Ellert *et al.*, 2001; Post *et al.*, 2001); 5) la época (Skjemstad *et al.*, 2003; Steeffen, 2003) y el diseño de muestreo (Post *et al.*, 2001; Reeder, 2003); 6) la profundidad del suelo (Campbell *et al.*, 2000; Smith, 2003); 7) la estratificación de la profundidad de muestreo (Izaurrealde y Rice, 2006); 8) la densidad aparente (Da) (Lal y Kimble, 2001); 9) la presencia de raíces y fracciones rocosas (Reeder, 2003); 10) la pendiente y grado de erosión del suelo (Lal, 2005); 11) aspectos económicos, como los asociados con las acciones de transacción, monitoreo y auditoría de costos (Izaurrealde y Rice, 2006); 12) el número de muestras recolectadas (Izaurrealde y Rice, 2006; Etchevers *et al.*, 2005); 13) la contaminación en muestras verticales sucesivas (Nortcliff, 1994); 14) la forma de obtención y comprobación de los datos de la muestra (Skjemstad *et al.*, 2003); 15) la forma de almacenamiento de las muestras (Ellert *et al.*, 2001); 16) los métodos de análisis (Izaurrealde y Rice, 2006). No prestar atención a esos factores puede llevar a errores sistemáticos cuando se realizan mediciones o monitoreos de carbono (Post *et al.*, 2001). Sin embargo, poco se sabe acerca de cómo algunos de esos factores cambian los resultados de las investigaciones para medir los almacenes y los cambios de COS, en especial en los paisajes de laderas (Smith, 2003; Monreal *et al.*, 2005).

El Proyecto de Manejo Sostenible de Laderas (PMSL, 2003) realizó mediciones de COS en las laderas de la Sierra Norte de Oaxaca, México, pero algunos resultados no fueron conclusivos. En particular llamaron la atención las discrepancias, mayores a las reportadas por la literatura, en mediciones sucesivas realizadas en mismo micrositio, aunque no en idéntico punto de muestreo. En la presente investigación se analizaron los siguientes factores que pueden afectar los cambios de concentración y los almacenes del COS en terrenos de ladera: 1) la reproducibilidad de las determinaciones de C; 2) la determinación de la Da realizada en años sucesivos en el mismo micrositio, pero en puntos de muestreo distintos; 3) el cálculo de C acumulado (0-30 cm) cuando se usaron Da calculadas

time are: 1) the interaction of geomorphic and biotic processes (Ellert *et al.*, 2001); 2) soil management history (Smith, 2003); 3) SOC spatial variability; 4) passage of time between two successive measurements (Ellert *et al.*, 2001; Post *et al.*, 2001); 5) sampling season (Skjemstad *et al.*, 2003; Steeffen 2003) and design (Post *et al.*, 2001; Reeder, 2003); 6) soil depth (Campbell *et al.*, 2000; Smith, 2003); 7) stratification of sampling depth (Izaurrealde and Rice, 2006); 8) bulk density (Bd) (Lal and Kimble, 2001); 9) presence of roots and rock fragments (Reeder, 2003); 10) slope and degree of soil erosion (Lal, 2005); 11) economic aspects such as those associated with transactions, monitoring and cost audits (Izaurrealde and Rice, 2006); 12) number of samples collected (Izaurrealde and Rice, 2006; Etchevers *et al.*, 2005); 13) contamination in successive vertical samples (Nortcliff, 1994); 14) the manner in which sample data is obtained and confirmed (Skjemstad *et al.*, 2003); 15) sample storage (Ellert *et al.*, 2001); 16) analytical methods (Izaurrealde and Rice, 2006). Not paying attention to these factors can lead to systematic errors when measuring or monitoring carbon (Post *et al.*, 2001). However, little is known of how some of these factors alter the results of SOC stocks and change measurement studies, especially in hillside landscapes (Smith, 2003; Monreal *et al.*, 2005).

The Sustainable Management of Hillside Project (PMSL, 2003) measured SOC in hillsides of the Sierra Norte, Oaxaca, México, but some of the results were not conclusive. Particularly relevant were the discrepancies in successive measurements, higher than those reported in the literature, were found in the same micro-site, although the sampling point was not exactly the same. In our research, the following factors that may affect changes in SOC concentration and stocks were examined on hillsides: 1) reproducibility of SOC determinations; 2) determination of bulk density (Bd) in successive years at different sampling points in the same micro-site; 3) calculation of accumulated SOC (0-30 cm) when using Db calculated with two procedures; 4) reproducibility of SOC determinations in samples in which organic residues had been removed previously; 5) proportion of accumulated SOC at different depth intervals in the measurement years 2000 and 2004; 6) effect of the position of the sampling point (high or low part of the slope) with respect to the geo-referenced center of the micro-site.

MATERIALS AND METHODS

The study was conducted in PMSL experimental sites (PMSL, 2003) in three micro-basins of the Mazatec, Cuicatec, and Mixe regions of the Sierra Norte, Oaxaca, on slopes steeper than 30%, each with slightly different microclimates. The Mazatec region is

por dos procedimientos; 4) la reproducibilidad de determinaciones de COS en muestras donde inicialmente se retiraron residuos orgánicos; 5) la proporción de COS acumulado por aumento de profundidad de los años de medición 2000 y 2004; 6) el efecto de posición del punto de muestreo (parte alta o baja de la pendiente) con respecto al centro georeferenciado del micrositio.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en los sitios experimentales del PMSL (PMLS, 2003) en tres microcuencas de las regiones Mazateca, Cuicateca y Mixe de la Sierra Norte de Oaxaca, en laderas con pendientes mayores a 30% y con microclimáticas ligeramente diferentes. La región Mazateca se localiza a 18° 09' N y 96° 54' O entre 1380 y 1910 m, con precipitación anual mayor a 2000 mm; la Cuicateca a 17° 51' N y 96° 51' O entre 1700 a 2200 m, y de 500 a 700 mm de lluvia; y la región Mixe a 17° 01' N y 96° 53' O entre 1280 a 1520 m, y 1500 a 2000 mm de lluvia. Los suelos dominantes son Inceptisoles¹.

Las coberturas y sistemas de manejo en este estudio fueron: 1) vegetación forestal secundaria de liquidámbar (*Liquidambar* sp) y ailé (*Alnus* sp) en la región Mazateca; 2) *acahual* de 6 años de edad (ACA6), con *Liquidambar* sp, *Alnus* sp, *Quercus* sp, *Rapanea* sp y *Clethra* sp dominantes en la región Mixe; 3) agrícola permanente, café (*Coffea arabica* L.) en la región Mixe y pradera en la región Mazateca; 4) agrícola anual, maíz (*Zea mays* L.), a veces intercalado con frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y alguna cucurbitácea (*milpa*), cultivados con labranza tradicional (LT) o labranza de conservación (LC); 5) agrícola mixto o MIAF (Cortés *et al.*, 2005), ésto es, maíz intercalado con hileras de durazno (*Prunus persica* L.) o café según la temperatura media del lugar y la altura.

El COS fue medido según el procedimiento de Monreal *et al.* (2005), en cinco etapas: 1) Diseño de muestreo. Los sistemas agrícolas fueron establecidos en tres parcelas de 10 m de largo y anchura de 8 a 10 m. Las parcelas (unidades experimentales) tenían tres posiciones de muestreo (relojes o micrositios) (Etchevers *et al.*, 2005) (Figura 1). Cada posición tenía dos puntos de muestreo (hora del reloj o micrositio); en total, 18 muestras para cada aumento de profundidad (0-15, 15-30 y 30-45 cm) (Figura 2). En los sitios con vegetación forestal fueron instaladas cinco parcelas (25×4 m) con dos micrositios de muestreo en cada uno y dos puntos de muestreo por micrositio (20 muestras por sitio). 2) Obtención de la muestra. El muestreo fue realizado con barrenas de 4.18 cm o de 3.17 cm de diámetro, según la condición del suelo y la facilidad para introducirla. 3) Preparación de la muestra. Las muestras de suelo fueron secadas al aire y tamizadas a 2 mm; con unas pinzas se retiraron raíces, restos vegetales y animales y carbón vegetal. 4) Determinación analítica del carbono. De cada muestra homogeneizada fue tomada una

located at 18° 09' N and 96° 54' W, between the altitudes of 1380 and 1910 m, with annual precipitation above 2000 m; the Cuicatec region is at 17° 51' N and 96° 51' W, between 1799 and 2200 m, with 500 to 700 mm rainfall; and the Mixe region is at 17° 01' N and 96° 53' W, between 1280 and 1520 m, and 1500 to 2000 mm rainfall. The dominant soils are Inceptisols¹.

Cover and management systems in this study were: 1) liquidambar (*Liquidambar* sp.) secondary forest vegetation and alder (*Alnus* sp.) in the Mazatec region; 2) 6 year-old secondary *acahual* vegetation (ACA6), with *Liquidambar* sp, *Alnus* sp, *Quercus* sp, *Rapanea* sp, and *Clethra* sp dominating in the Mixe region; 3) permanent crop, coffee (*Coffea arabica* L.) in the Mazatec region; 4) annual crop, maize (*Zea mays* L.) occasionally intercropped with bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and a species of Cucurbitaceae (milpa), cultivated under traditional tillage (LT) or conservation tillage (LC); 5) mixed crops, or MIAF (Cortés *et al.*, 2005), that is, maize intercropped with rows of peach (*Prunus persica* L.) or coffee, depending on the mean temperature and elevation of the site.

SOC was measured following the procedure of Monreal *et al.* (2005) in five steps: 1) Sample design. In the agricultural systems three plots 10 m long and 8-10 m wide were established. The plots (experimental units) had three sampling positions (clocks or micro-sites) (Etchevers *et al.*, 2005) (Figure 1). Each position had two sampling points (hour on the clock or micro-site) for a total of 18 samples per interval of depth (0-15, 15-30, and 30-45 cm) (Figure 2). In the sites with forest vegetation, five plots (25×4 m) were set up with two sampling micro-sites and two sampling points in each micro-site (20 samples per site). 2) Sample collection. Samples were collected with soil probes 4.18 cm or 3.17 cm in diameter, depending on the soil condition and ease with which they could be introduced. 3) Sample preparation. The soil samples were air-dried and sifted with a 2 mm mesh; roots, plant and animal remains, and charcoal were removed with tweezers. 4) Analytical determination of carbon. From each homogenized sample, a 5 g sub-sample was taken, and from this, an aliquot part (100 to 300 mg) was taken to measure C concentration (%) in an automatic C analyzer Shimadzu TOC. 5) Calculation of carbon. SOC was calculated with the formula (1):

$$\text{SOC} = \text{Da} \times \text{Pr} \times \text{C} \quad 1$$

where Da is the bulk density (g cm⁻³), Pr is the soil depth (cm), C is the organic carbon of soil (%). SOC measurements were obtained in 2000 by Monreal *et al.* (2005) and those of 2004 were obtained in 2004 during our study.

The factors analyzed to determine SOC changes in hillsides were the following:

1) Reproducibility of SOC determinations. To confirm the analytical results of previous measurements performed in the same

¹ del Rayo Estrada I. 2007. Tesis de Maestría. especialidad de Edafología. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México (isa_ah@colpos.mx).

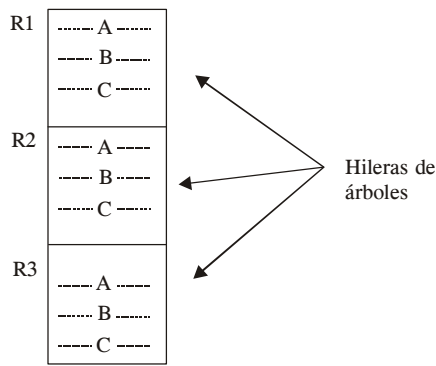


Figura 1. Parcelas experimentales, distribución de las repeticiones (R) y posiciones de muestreo (relojes o microsítios A, B y C) de la milpa intercalada con árboles frutales (Monreal *et al.*, 2005).

Figure 1. Experimental plots, distribution of replications (R), and positions of sampling (clocks or micro-sites A, B, and C), milpa (maize) intercropped with fruit trees (Monreal *et al.*, 2005).

submuestra de 5 g y de ésta una alícuota (100 a 300 mg) para medir la concentración en un analizador automático Shimadzu TOC 5000.
5) Cálculo del carbono. El COS se calculó con la fórmula (1):

$$\text{COS} = \text{Da} \times \text{Pr} \times \text{C} \quad 1$$

donde, Da es la densidad aparente (g cm^{-3}), Pr es la profundidad del suelo (cm), C es el carbono orgánico del suelo (%). Las mediciones de COS en 2000 fueron obtenidas por Monreal *et al.* (2005) y las de 2004 durante el presente estudio.

Los factores analizados para determinar los cambios del COS en laderas fueron:

1) La reproducibilidad de las determinaciones de COS. Para confirmar los resultados analíticos de mediciones anteriores realizadas en el mismo laboratorio, se determinó por segunda ocasión el porcentaje de C de 28 y 23 muestras recolectadas en 2000 y 2004 respectivamente, almacenadas en un banco de suelos. Las muestras fueron tomadas al azar del banco de suelos y correspondieron a las diferentes coberturas y sistemas de manejo de las tres microcuencas del estudio. Con los resultados de estas determinaciones se hicieron las siguientes comparaciones: (i) Los resultados de las 28 muestras recolectadas y analizadas en 2000, se compararon con los resultados de las mismas muestras analizadas en 2005; (ii) las 23 muestras recolectadas y medidas ese mismo año, se compararon con los resultados de los análisis en las mismas muestras analizadas en 2005; (iii) los resultados de los análisis de diferentes submuestras de las 23 muestras recolectadas en 2004, (Serie 5) fueron comparados con los resultados de sus análisis en 2005 (Serie 4); (iv) los resultados de 23 muestras analizadas en 2004 fueron comparados con los análisis en 2005 en diferentes submuestras. En cada caso se determinó la media, desviación estándar de las muestras y se hizo una prueba de t para las series comparadas y de correlación.

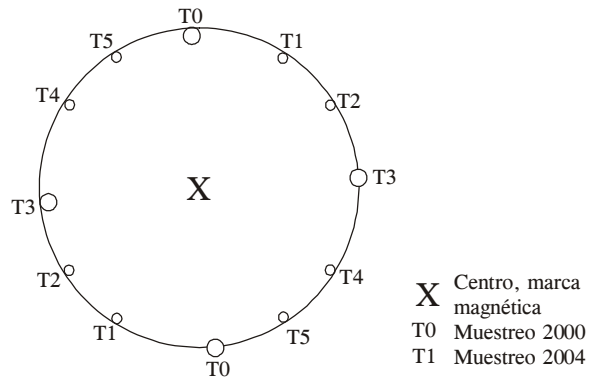


Figura 2. Esquema de muestreo de reloj georeferenciado, con diferentes puntos de muestreo en espacio y tiempo (horas) (Monreal *et al.*, 2005).

Figure 2. Geo-referenced clock sampling scheme with different spatial and temporal sampling points.

laboratory, the percentage of C in 28 and 23 samples collected in 2000 and 2004, respectively, stored in a soil bank was measured a second time in 2005. The samples, from different covers and management systems of the three microbasins under study, were chosen at random from the soil bank. With the results from these determinations the following comparisons were carried out: (i) The results of the analyses of 28 samples collected in 2000 (Series 1) were compared with those of the same samples analyzed in 2005 (Series 2); (ii) the 23 samples collected and analyzed in 2004 (Series 3) were compared with the results of analyses of the same samples analyzed in 2005 (Series 4); (iii) results of the analyses of different subsamples of the 23 samples collected in 2004 (Series 5) were compared with results of their analyses in 2005 (Series 4); (iv) the results from 23 samples analyzed in 2004 (Series 3) were compared with analyses performed in 2005 on a different subsamples. In each case the mean and standard deviation of the samples were determined, and a t-test and correlation were performed for the compared series.

2) The determination of bulk density (Bd). Seventy-nine samples (0.15 cm and 15-30 cm) from 40 sampling points in MIAF, LT, and LC plots located in the three microbasins, whose Db was measured in 2000 and 2004, were measured again in 2005. The samples from 2004 and 2005 were collected in the same micro-site, but at a different point on the circle (clock) (Etchevers *et al.*, 2005) and spatially related to the 2000 sampling point, following the design proposed by Monreal *et al.* (2005) (Figure 2). For the bulk densities measured at the same sampling places in 2000, 2004, and 2005 and their respective percentages of SOC and accumulated SOC, the mean and standard deviation were determined and a t-tests and correlation were also performed.

3) Calculation of accumulated SOC (0-30 cm) with the procedures for determining Bd in Etchevers *et al.* (2005) and Zinke and Stangenberger (2000). In the former, Db is the mineral soil intimately linked to humus. Soil volume is calculated by deducing the volume occupied by rocks, roots and organic remains visible to the naked eye. In the latter, Db was the ratio between soil mass (without

2) La determinación de la Da. Setenta y nueve muestras (0-15 cm y 15-30 cm) provenientes de 40 puntos de muestreo en parcelas MIAF, LT y LC, de las tres microcuencas, cuya Da fue medida en 2000 y 2004, fueron medidas nuevamente en 2005. Las muestras del 2004 y 2005 se recolectaron en el mismo micrositio pero en un punto diferente de un círculo (reloj) (Etchevers *et al.*, 2005), relacionado espacialmente con el punto de muestreo del 2000, según el diseño propuesto por Monreal *et al.* (2005) (Figura 2). Para las Da medidas en las mismas posiciones de muestreo en 2000, 2004 y 2005 y sus respectivos porcentajes de COS y COS acumulado se determinó la media y la desviación estándar, se calculó una correlación y una prueba de t.

3) Cálculo de COS acumulado (0-30 cm) con los procedimientos de determinación de Da de Etchevers *et al.* (2005) y Zinke y Stangenberger (2000). En el primero, la Da es el suelo mineral más el material humificado, íntimamente ligado a éste. El volumen de suelo se calculó descontando el volumen ocupado por piedras, raíces y restos orgánicos visibles al ojo desnudo. En el segundo procedimiento, la Da fue la relación de la masa del suelo (sin eliminar los restos orgánicos, piedras y raíces) y el volumen total de la barrena. Ambos procedimientos se aplicaron a todos los datos de las muestras obtenidas en 2004 (115 muestras) y se obtuvieron los estadísticos: media, desviación estándar y coeficiente de correlación.

4) La reproducibilidad de la cuantificación de los residuos orgánicos. Antes de la determinación inicial de C, se había retirado manualmente de las muestras el máximo posible de residuos orgánicos. Se supuso que tal operación había sido suficiente. Para corroborar la calidad de ese trabajo, se tomaron 66 muestras, seleccionadas de poco de más de 1100, correspondiente a la recolecta realizada en 2004. De cada muestra seleccionada una alícuota de la muestra original fue tomada y limpiada por segunda ocasión antes de determinar nuevamente su concentración de COS. Con los datos se generó un modelo de regresión lineal simple.

5) La proporción de COS acumulado por incremento de profundidad de muestreo de los años de medición. Se hizo una prueba de regresión lineal simple con el COS de 2000 y 2004 con 22 pares de datos. Cada dato corresponde al COS promedio de 18 sitios de muestreo en cada sistema agrícola evaluado y 20 sitios de muestreo en el caso de la vegetación forestales. Las profundidades analizadas fueron 0-15 cm, 15-30 cm, 30-45 cm. Se obtuvo la proporción de COS acumulado por incremento de profundidad considerando 100% en la profundidad 0-45 cm.

6) El efecto de la posición (punto superior o inferior en la pendiente) en torno al centro micrositio de muestreo en la ladera. Con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) se compararon los valores del COS acumulado (0-30 cm) en las muestras recolectadas de un mismo año, en las dos posiciones de muestreo: parte superior y parte inferior de la ladera y en cada cobertura y sistema de manejo. En los sistemas agrícolas se analizaron 18 muestras y 20 en la vegetación forestal.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Reproducibilidad de las determinaciones de COS

La media del porcentaje de C correspondiente a las 28 muestras del banco de suelos, recolectadas y medidas

eliminating rocks, roots and organic remains) and total volume of the soil probe. Both procedures were applied to all the sample data obtained in 2004 (115 samples), and the mean, standard deviation and coefficient of correlation were calculated.

4) Reproducibility of organic residue quantification. Before initial determination of SOC, as much of the organic remains as possible were removed from the samples manually. It was assumed that this operation had been sufficient. To corroborate the quality of this phase of the work, 66 samples were selected from a little over 1100, from the 2004 collection. From each sample selected, an aliquot part from the original sample was taken and cleaned for a second time before again determining the concentration of SOC. With the data, a simple linear regression model was generated.

5) The proportion of accumulated SOC by depth interval of the sampling in the measurement years. A simple linear regression test was conducted with the SOC from the years 2000 and 2004 with 22 pairs of data. Each datum corresponded to the average SOC at 18 sampling sites in the case of forest vegetation. The depths analyzed were 0-15 cm, 15-30 cm, and 30-45 cm. The proportion of accumulated SOC by depth interval was obtained considering 100% in 0-45 cm.

6) The effect of the position (upper or lower part of the slope), with respect to the center of the micro-site on the hillside. With the Tukey test ($p \leq 0.05$), the accumulated SOC values (0-30 cm) were compared for the samples collected in the same year in both sampling positions: upper and lower part of the hillside in each cover and management system. Eighteen samples from agricultural systems and 20 from forest vegetation were analyzed.

RESULTS AND DISCUSSION

Reproducibility of SOC determinations

The mean percentage of C measured in 28 samples from the soil bank, collected and measured in 2000 (Series 1, signed as §1 in Table 1), was 1.49% C. This mean is practically the same as that measured four years later in samples of the same material (1.48% C, §2).

A similar result occurred with the mean percentage of C in 23 samples collected and measured in 2004 (§3) and that of the same 2004 samples analyzed in 2005 (§4). The mean of these series (§3 and §4) was identical (2.49% C). However, the mean of the series §3 and §5, despite the different values were not statistically different (2.49 and 2.10% C). In all of the cases the coefficients of correlation were highly significant: 0.97 to 1.0. The t-test ($p \leq 0.05$) confirmed that these measurements corresponded to the same sample set. With these results, the hypothesis that the factor analytical measurement of C in the laboratory was responsible for the discrepancies obtained in measurements taken in successive samples collected in 2000 and 2004 in the same micro-site, though not in

en 2000 (Serie 1, indicado como §1 en el Cuadro 1), fue 1.49% C, valor prácticamente igual a la media de las mediciones realizadas por segunda vez en muestras del mismo material, cuatro años más tarde (1.48% C, §2).

Algo similar ocurrió con el porcentaje medio de C en las 23 muestras correspondientes a las muestras recolectadas y medidas en 2004 (§3) y el análisis de las mismas muestras 2004 medidas en 2005 (§4). La media de estas series comparadas (§3 y §4) fue idéntica (2.49% C). Sin embargo, la media de las series §3 y §5, a pesar de dar valores diferentes no fueron estadísticamente diferentes (2.49 y 2.10% C). En todos los casos los coeficientes de correlación fueron altamente significativos, entre 0.97 y 1.0. La prueba de t ($p \leq 0.05$) confirmó que los valores de las mediciones anteriores correspondían al mismo grupo de recolecciones. Con estos resultados se desecha la hipótesis de que el factor medición analítica de C en laboratorio fuese responsable de las discrepancias obtenidas en mediciones realizadas en muestras sucesivas recolectadas en 2000 y 2004, en el mismo micrositio, aunque no en idéntico punto, ya que la concentración de C de las muestras en distintas fechas fue la misma. Sin embargo, Janik *et al.* (2002) indican que una fracción significativa de los errores en las mediciones de COS proviene de problemas asociados con las mediciones analíticas en el laboratorio.

Determinación de la densidad aparente

Las medias y estadísticos asociados de las Da, porcentajes de COS y COS acumulado en las muestras recolectadas en los mismos micrositos pero en diferentes puntos de muestreo en las tres microcuencas, se presentan en el Cuadro 2. El porcentaje promedio de COS de las muestras recolectadas en 2004 a 0-15 cm (4.67 %C) y 15-30 cm (3.37 %C), con respecto a las

the exact point, was rejected since the C concentration in the samples from different dates was the same. However, Janik *et al.* (2002) indicate that a significant fraction of the errors in SOC measurements originate from problems associated with analytical measurements in the laboratory.

Determination of bulk density

The means and associated statistics of bulk densities, percentages of SOC, and accumulated SOC in the samples collected in the same micro-sites, but at different sampling points in the three microbasins are presented in Table 2. The average percentage of SOC in the samples collected in 2004 at 0.15 cm (4.67% C) and 15-30 cm (3.37% C), relative to the samples collected in 2000 in the same micro-sites, increased by 1.41% and 0.95%. This means that this variable increased 43% and 28%, relative to the measurement performed in 2000 at the same reference position (although not at the same point). The mean percentage of SOC measured in the 2004 samples was higher than that measured in 2005. In the latter year SOC (%) decreased 0.56%, on average, with respect to 2004 at the depth of 0-15 cm and 0.25% SOC at 15-30 cm.

Bulk densities of the 2004 samples were slightly lower than those obtained in the same micro-sites in 2000 and 2005 at the depths 0-15 cm and 15-30 cm (Table 2). Instrumentation of the procedures was the same for all three dates, but the operators were different.

With these data, changes from 2000 to 2004 in accumulated SOC in the first 15 cm of the profile were calculated; an increase of 9.86 t ha⁻¹ (23.79%) was detected, and a decrease of 4.68 t ha⁻¹ was found for 2005 relative to 2004 (10.03%). The increase in accumulated SOC from 2000 to 2004 was attributed to two factors: a higher percentage of C and a lower bulk density. Basaran *et al.* (2008) found, with different

Cuadro 1. Comparación del porcentaje de C medido de muestras 2000 y 2004 del mismo material recolectado en distintas fechas de medición en tres regiones de Oaxaca.

Table 1. Comparison of percentages of C measured in 2000 and 2004 samples of the same material collected on different measurement dates in three regions of Oaxaca.

Año	n [†]	S [‡]	C promedio %	d. e. ^Φ	Comparación S [§]	R [§]	t _{estimado} [#]	t _{tablas} [#]
2000	28	1	1.49	1.13	1 vs 2	1.00	-0.04	2.00
		2	1.48	1.14				
2004	23	3	2.49	1.84	3 vs 4	1.00	0.01	2.01
		4	2.49	1.77	4 vs 5	0.98	0.80	2.01
		5	2.10	1.44	3 vs 5	0.97	-0.77	2.01

[†] Número de muestras;

[‡] Coeficiente de correlación.

[§]Serie; 1=muestras de 2000 analizadas en 2000; 2=muestras de 2000 analizadas en 2005; 3=muestras de 2004 analizadas en 2004; 4=muestras del 2004 analizadas en el 2005; 5=muestras del 2004 provenientes de diferentes submuestras analizadas en 2005.

^Φ Desviación estándar; #Prueba de t.

Cuadro 2. Porcentaje de COS, Da y COS acumulado de muestras relacionadas espacialmente en 2000, 2004 y 2005.
Table 2. SOC percentages, bulk density (Bd), and accumulated SOC in samples related spatially in 2000, 2004, and 2005.

Variable [†]	Profundidad	n [‡]	Año	Media	Desviación estandar	Años correlacionados	R [§]	t _{estimado} [¶]	T _{tablas} [¶]
% C	0-15	40	2000	3.26	1.95	2000-2004	0.80	-2.68	1.99
			2004	4.67	2.66	2000-2005	0.87	-1.72	1.99
			2005	4.11	2.42	2004-2005	0.81	0.98	1.99
	15-30	39	2000	2.42	1.41	2000-2004	0.80	-2.42	1.99
			2004	3.37	1.79	2000-2005	0.69	-1.69	1.99
			2005	3.12	1.85	2004-2005	0.80	0.61	1.99
Da (g cm ⁻³)	0-15	40	2000	0.92	0.21	2000-2004	0.56	2.63	1.99
			2004	0.80	0.18	2000-2005	0.43	0.69	1.99
			2005	0.88	0.26	2004-2005	0.31	-1.55	1.99
	15-30	39	2000	1.02	0.15	2000-2004	0.50	2.18	2.00
			2004	0.91	0.29	2000-2005	0.27	1.79	2.00
			2005	0.93	0.27	2004-2005	0.31	-0.39	1.99
C (t ha ⁻¹)	0-15	40	2000	41.44	18.06	2000-2004	0.60	-2.17	1.99
			2004	51.30	22.10	2000-2005	0.75	-1.62	1.99
			2005	48.62	21.13	2004-2005	0.75	0.55	1.99
	15-30	39	2000	34.29	17.57	2000-2004	0.67	-2.02	1.99
			2004	42.83	19.19	2000-2005	0.60	-1.33	1.99
			2005	39.57	16.93	2004-2005	0.64	0.79	1.99

[†] Variable: %C=Porcentaje de carbono; Da=Densidad aparente; C=Carbono, orgánico del suelo.

[‡] Número de muestras.

[§] Coeficiente de correlación; [¶]Prueba de t.

muestras recolectadas en 2000 en los mismos micrositos tuvo un aumento de 1.41% y 0.95%. Esto significa que esta variable aumentó 43% y 28%, en relación a la medición realizada en la misma posición de referencia (aunque no en el mismo punto) en el 2000. El porcentaje medio de COS medido en las muestras de 2004 fue superior al de 2005. En este último año el COS (%) disminuyó 0.56%, en promedio, respecto a 2004 en la profundidad 0-15 y 0.25% COS en la profundidad 15-30.

La Da de las muestras recolectadas en 2004 fue ligeramente inferior a las obtenidas en idénticos micrositos en 2000 y 2005 en las profundidades 0-15 cm y 15-30 (Cuadro 2). El instrumental usado en las tres ocasiones fue el mismo, pero los operadores diferentes.

Con estos datos se calculó el cambio en COS acumulado en los primeros 15 cm del perfil, entre el 2000 y 2004; un aumento de 9.86 t ha⁻¹ (23.79%) y un decremento de 4.68 t ha⁻¹ en 2005 con respecto al 2004 (10.03%). El aumento en COS acumulado entre 2000 y 2004 fue atribuido a dos factores: un mayor porcentaje de C y un menor valor de la densidad aparente. Basaran *et al.* (2008) encontraron, con diferentes usos de suelo, que la Da disminuyó en sitios donde el COS fue alto.

En la profundidad 0-15 cm, donde ocurrieron los mayores cambios, el coeficiente de correlación (r) para porcentaje de C fue de 0.80 a 0.87 y en la profundidad

land uses, that Db decreased in sites where SOC was high.

At the depth 0-15 cm, where the greatest changes occurred, the coefficient of correlation (r) for percentage of C was 0.80 to 0.87, and at the depth of 15-30 cm it was 0.69 to 0.80. In contrast, r for Bd was low at both depths (0.27 to 0.56). Bd was a property that was more variable in space and time than the percentage of C, a finding that has been documented (Lal, 2006).

The coefficients of correlation of the associated variables (Table 2) were higher for the analyses corresponding to the first 15 cm of the profile than for the depth of 15-30 cm. Kimble *et al.* (2001) highlight that changes in SOC concentrations in agricultural soils tend to be less pronounced and uniform a few centimeters from the surface because there the soil is more homogeneous.

The three variables presented in Table 2 differed significantly (t-test) only between the samples collected in 2000 and those collected in 2004. This can be explained by the high SOC concentration that was determined in 2004.

The high C percentages and low Bd obtained in 2004 and 2005 resulted in high accumulated SOC values. Therefore, the discrepancies would be related to the spatial and temporal variability of Db and SOC, and the presence of organic residues in the samples. The spatial variability of SOC is consistent with that reported by Vergara (2004) for the same plots.

15-30 cm de 0.69 a 0.80. En contraste, r para la Da fue bajo en ambas profundidades (0.27 a 0.56). La Da fue una propiedad más variable en espacio y tiempo que el porcentaje de C, lo cual está documentado (Lal, 2006).

Los coeficientes de correlación de las variables asociadas (Cuadro 2) fueron más altos para los análisis correspondientes a los primeros 15 cm del perfil que para el incremento de 15-30 cm. Kimble *et al.* (2001) señalan que los cambios en concentración de C en los suelos agrícolas tienden a ser menos pronunciados y uniformes a pocos centímetros de la superficie porque ahí el suelo es más homogéneo.

Las tres variables señaladas en el Cuadro 2 difirieron significativamente (prueba de t) sólo entre las muestras recolectadas en 2000 y 2004, lo cual se puede explicar por la alta concentración de COS determinada en 2004.

Los porcentajes de C altos y las bajas Da obtenidos en 2004 y 2005 dieron como consecuencia valores altos de C acumulado en el suelo. Entonces, las discrepancias estarían relacionadas con la variabilidad espacial y temporal de la Da y el COS, y la presencia de residuos orgánicos en las muestras. La variabilidad espacial del COS es consecuente con la reportada por Vergara (2004) para las mismas parcelas.

COS acumulado (0-30 cm) considerando dos Da calculadas con procedimientos diferentes

El COS acumulado en el suelo (Cuadro 3) considerando los dos procedimientos para calcular la Da (Etchevers *et al.*, 2005; Zinke y Stangenberger, 2000), estuvo altamente correlacionado en las tres microcuencas ($r=0.98$ a 0.99). Todas las medias de COS acumulado en el suelo calculadas con el primer método fueron mayores que con el segundo, pero la desviación estándar fue similar. Las diferencias promedio de COS en las microcuencas Mazateca, Cuicateca y Mixe calculado con el primer y segundo método fue 6.4, 14.65 y 3.98%.

Accumulated C (0-30 cm) considering two Bd calculated with different procedures

The values for SOC accumulated in the soil (Table 3), using two procedures to calculate Bd (Etchevers *et al.*, 2005; Zinke and Stangenberger, 2000), correlated highly in the three microbasins ($r=0.98$ to 0.99). All of the means of accumulated SOC calculated with the first method were higher than those calculated with the second, but the standard deviation was similar. The mean differences in SOC between the first and second method calculated in the Mazatec, Cuicatec, and Mixe microbasins were 6.4, 14.65, and 3.98%.

Reproducibility of the quantification of organic residues

After cleaning the 66 random samples a second time, removing mainly remains of roots and determining the percentage of SOC, the relation and model shown in Figure 3 was generated. The residues left in the samples after the first manual cleaning caused an overestimation of 17% SOC. A larger quantity of organic residues reduces net soil weight and volume and increases the percentage of SOC. Reeder (2003) reported that total removal of roots was impossible; when in a soil sample 0.5% of the root mass remained, there was 12.2 mg SOC g^{-1} soil, and with 1% root remains, SOC increased to 14.4 mg C g^{-1} soil.

Proportion of accumulated SOC by sample depth

SOC accumulated in 2000 and 2004 in all of the systems studied had direct linear behavior in relation with depth (0-15 to 30-45 cm) (Figure 4). Generally, SOC decreases with depth because of the lower concentration of roots and entry of plant remains among other factors (Kimble *et al.*, 2001). However, in spite of the large differences in SOC between 2000 and 2004, the procedure (Monreal *et al.*, 2005) quantifies a similar

Cuadro 3. Carbono determinado con dos procedimientos de Da en las microcuencas.

Table 3. Carbon determinations in microbasins using two procedures for calculating bulk density.

Microc.	+n [†]	Método Etchevers <i>et al.</i> (2005)		Método Zinke y Stangenberger (2000)		r [‡]
		Carbono t ha ⁻¹	Desviación estandar	Carbono t ha ⁻¹	Desviación estandar	
Mazateca	510	96.5	33.7	90.3	30.4	0.98
Cuicateca	333	50.6	28.4	43.2	24.5	0.99
Mixe	272	139.3	58.6	133.8	50.8	0.99

[†] Número de muestras.

[‡] Coeficiente de correlación.

Reproducibilidad de la cuantificación de residuos orgánicos

Después de una segunda limpieza de los residuos orgánicos, principalmente restos de raíces, en las 66 muestras (tomadas al azar) y de determinar su porcentaje de COS, se generó la relación y el modelo que se muestra en la Figura 3. Los residuos en la muestra después de la primera limpieza manual provocaron una sobreestimación de 17% del carbono. A mayor cantidad de residuos orgánicos, el peso neto y el volumen del suelo disminuyó y el porcentaje de COS aumentó. Reeder (2003) reportó que la remoción total de las raíces era imposible; cuando en una muestra de suelo permanecía 0.5 % de la masa de raíces, presentaba 12.2 mg C g⁻¹ de suelo y con 1% de éstas el COS aumentaba a 14.4 mg C g⁻¹ de suelo.

Proporción de COS acumulado por profundidad de muestreo

El COS acumulado en todos los sistemas estudiados, en 2000 y 2004, tuvo un comportamiento lineal directo en relación con la profundidad (de 0-15 a 30-45 cm) (Figura 4). Generalmente el COS disminuye con la profundidad por la menor concentración de raíces y entrada de restos vegetales entre otros factores (Kimble *et al.*, 2001). Pero, a pesar de las grandes diferencias de COS en el periodo 2000 y 2004, el procedimiento (Monreal *et al.*, 2005) cuantifica una proporción similar de COS acumulado en ambos años de medición en cada incremento de profundidad: 44% en 0-15 cm, 31% en 15-30 cm y 25% 30-45 cm; esto es, 75% del carbono se acumula en los primeros 30 cm.

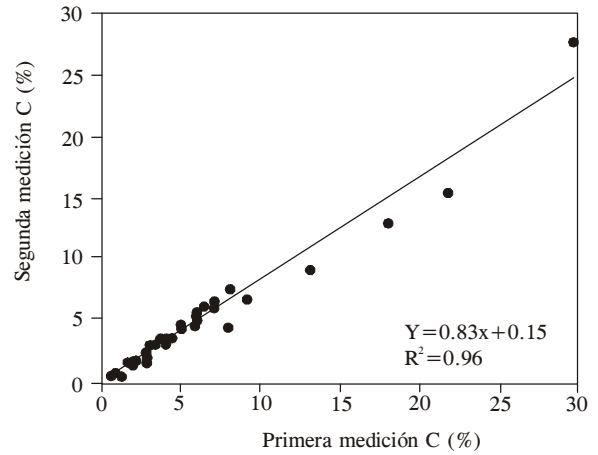


Figura 3. Modelo de ajuste COS (%) de las muestras de 2004 después de una segunda limpieza de residuos.
Figure 3. Adjusted SOC model (%) of 2004 samples after a second removal of residues.

proportion of accumulated SOC in the two years of measurement for each interval of depth: 44% at 0-15 cm, 31% at 15-30 cm, and 25% at 30-45 cm; that is, 75% of the carbon accumulates in the first 30 cm.

Effect of the position of the sampling points in the micro-sites located on hillsides

In most of the systems and covers there was a tendency to a greater quantity of SOC in the lower position of the sampling hillside micro-site, although these were statistically significant only in one case (Table 4). When there were decreases in SOC between the

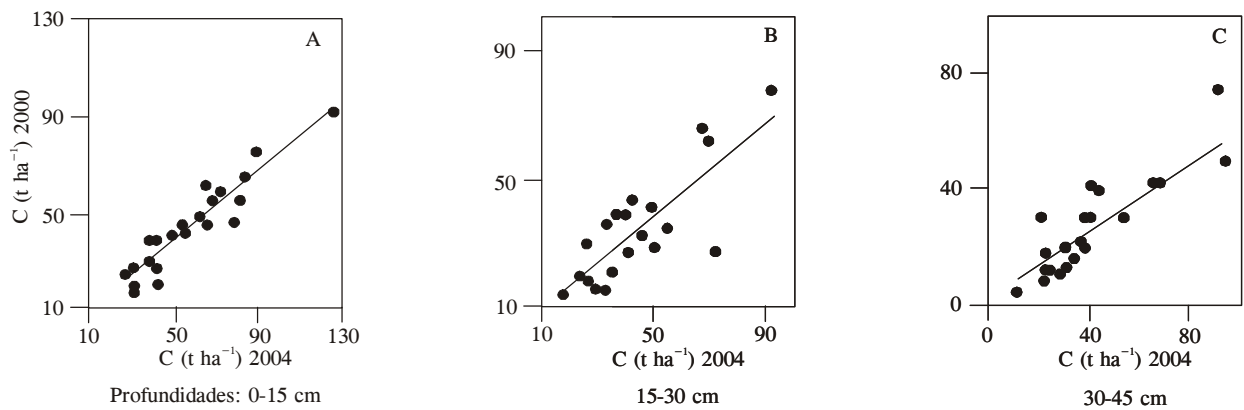


Figura 4. Relación del carbono entre 2000 y 2004. Figuras A, B y C: carbono orgánico del suelo en 0-15 cm, 15-30 cm y 30-45 cm.
Figure 4. Relationship between C in 2000 and 2004. Figures A, B, and C: soil organic carbon in 0-15 cm, 15-30 cm, and 30-45 cm depth intervals.

Efecto de la posición del punto de muestreo en los micrositios ubicados en la ladera

En la mayoría de los sistemas y coberturas hubo una tendencia a presentar mayor cantidad de COS en la posición inferior del micrositio de muestreo en la ladera, aunque éstas fueron estadísticamente significativas sólo en un caso (Cuadro 4). Cuando los sistemas presentaron decrementos de COS entre dos fechas consecutivas de medición, éstos eran generalmente mayores en las posiciones aguas arriba (posición superior del micrositio en la ladera), sitios que son donadores de suelo. Wairiu y Lal (2003) y Cambardella *et al.* (2004) encontraron que las posiciones bajas de la pendiente almacenaban más COS que las altas y medias. Lo anterior se debe a que en las posiciones bajas de la pendiente el mayor contenido de humedad y depósito del suelo determinaban un aumento de la producción de biomasa del cultivo y una menor descomposición del C depositado en el suelo.

CONCLUSIONES

El presente estudio analiza los factores que incluyen en las mediciones de los cambios del COS requeridos

two consecutive dates of measurement, they were generally greater in uphill positions (upper position of the hillside micro-site), which are soil donors. Wairiu and Lal (2003) and Cambardella *et al.* (2004) found that the lower positions on a slope store more SOC than the higher and middle positions. This is due to the fact that in the lower positions the higher contents of moisture and soil deposits determine an increase in crop biomass production and a lower decomposition of SOC deposited in the soil.

CONCLUSIONS

This study examines factors that affect measurements of SOC changes required in studies monitoring SOC in hillsides. These factors were differences in bulk densities of samples collected successively in the same micro-site, but at different sampling points, and the reproducibility of quantifying organic residues in the sample. There was no significant effect of: 1) reproducibility of C determinations in the same samples performed at different times; 2) calculation of accumulated C (0-30 cm) with two procedures for determining Db; 3) effect of the position of the sampling

Cuadro 4. COS acumulado por posición del punto de muestreo en los micrositios ubicados en la ladera en los años 2000 y 2004 y sistemas de estudio.

Table 4. Accumulated SOC by sampling point on hillside micro-sites and system. 2000 and 2004.

Mic [†]	Loc. [‡]	Sis. [§]	^Φ Car-2000	^Φ Cab-2000	DMS	^Φ Car-2004	^Φ Cab-2004	DMS
MA	C. S.	LT	79.4a	80.16a	7.14	88.09a	90.43a	12.02
		MIAF	80.1a	77.39a	9.53	76.27a	78.99a	19.16
		LC	77.8a	73.74a	4.73	66.68b	77.26a	8.70
	S. C.	LT	91.7a	86.57a	14.92	106.01a	115.91a	19.77
		MIAF	67.2a	80.41a	13.94	117.57a	114.45a	26.66
		LC	107.3a	100.4a	18.89	111.14a	107.99a	19.31
		BL	93.24a	89.35a	22.13	115.56a	120.11a	36.22
		AIL	74.57a	70.35a	18.62	120.10a	124.30a	33.91
		CA	62.01a	62.02a	14.16	85.56a	67.95a	22.22
		PR	76.96a	75.99a	10.27	83.72a	79.02a	57.77
CUI	L. C.	LT	55.29a	50.32a	12.27	58.43a	53.87a	15.93
		MIAF	52.25a	44.29a	23.26	55.22a	56.17a	20.36
		LC	39.30a	41.53a	11.28	57.50a	63.05a	18.62
	C. A.	LT	33.28a	29.95a	5.60	62.70a	68.76a	18.87
		MIAF	40.30a	35.15a	8.03	57.94a	58.49a	15.41
		LC	44.10a	39.99a	9.13	74.60a	81.43a	19.31
		PR	46.43a	46.61a	7.46	68.86a	56.97a	14.51
		CA	86.01a	92.17a	15.23	122.39a	123.34a	13.63
MI	Z.	LT	173.37a	164.31a	21.57	219.05a	223.83a	39.33
		LC	122.17a	133.42a	21.45	149.20a	160.47a	25.26
		MIAF	135.76a	147.12a	20.31	146.15a	169.64a	20.90
		ACA6	86.01a	92.17a	15.23	122.39a	123.34a	13.63
		CA	84.64a	75.26a	15.16	125.94a	122.24a	18.39

[†] Microcuenca; MA=Mazateca, CUI=Cuicateca, MI=Mixe.

[‡] Localidad; S. C.=Santa Catarina; C. S.=Centro de Salud; L. C.=La Colorada y C. Y=Camino Yacuay; Z.=Zompantle.

[§] Sistemas; LT=Labranza tradicional; LC=Labranza de conservación; MIAF=Milpa intercalada con árboles; PR=Pradera; CA=Café con sombra; BL=Bosque de Liquidámbar (40 años), Bosque de Aile=BA (10 años), ACA6=Acahual (6 años).

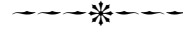
^Φ C (t ha⁻¹); Car=C arriba; Cab=C abajo.

DMS=Diferencia mínima significativa. Letras diferentes dentro de cada sistema indican diferencias significativas (p≤0.05).

en los estudios de monitoreo del COS en terrenos de ladera. Estos factores fueron las diferencias en las densidades aparentes de muestras recolectadas sucesivamente en el mismo micrositio pero en puntos diferentes de muestreo, y la reproducibilidad de la cuantificación de los residuos orgánicos de la muestra. No hubo efecto significativo de: 1) la reproducibilidad de las determinaciones de C en las mismas muestras pero realizadas en distintos tiempos; 2) el cálculo de C acumulado (0-30 cm) con dos procedimientos de determinación de Da; 3) el efecto de la posición del punto de muestreo en la parte superior o parte inferior de la pendiente; 4) la proporción del C acumulado por incremento de profundidad de muestreo.

point in the upper or lower part of the slope; 4) proportion of accumulated SOC within different intervals of samplin depth.

—End of the English version—



LITERATURA CITADA

- Basaran, M., G. Erpul, A. E. Tercan, and M. R. Canga. 2008. The effects of land use changes on some soil properties in Indagi Mountain Pass - Cankiri, Turkey Environ. Monitoring and Assessment 136: 101-119.
- Batjes, N. H. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur. J. Soil Sci.* 47: 151-163.
- Cambardella, C. A., T. B. Moorman, S. S. Andrews, and D. L. Karlen. 2004. Watershed-scale assessment of soil quality in the loess hills of southwest Iowa. *Soil & Tillage Res.* 78: 237-247.
- Campbell, C. A., R. P. Zentner, F. Selles, V.O. Biederbeck, B. G. McConkey, B. Blomert, and P.G. Jefferson. 2000. Quantifying short-term effects of crop rotations on soil organic carbon in southwestern Saskatchewan. *Can. J. Soil Sc.* 80: 193-202.
- Cortés, J. I., A. Turrent, P. Díaz, E. Hernández, R. Mendoza, y E. Aceves. 2005. Manual para el establecimiento y manejo del sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) en laderas. Colegio de Postgraduados. México. 27 p.
- Ellert, B. H., H. H. Janzen, and B.G. McConkey. 2001. Measuring and comparing soil carbon storage. *In: Lal, R., J. M. Kimble, R. F. Follet, and B. A. Stewart. (eds). Assessment Methods for Soil Carbon. CRC Press LLC. Boca Raton Fl. pp: 131-146.*
- Eswaran, H., E. Van Den Berg, and Reich P. 1993. Organic carbon soils of the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:192-194.
- Etchevers, J. D., C. M. Monreal, C. Hidalgo, M. Acosta, J. Padilla, y R. M. López. 2005. Manual para la determinación de carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción en laderas. Colegio de Postgraduados. México. 29 p.
- Izaurrealde, R. C., and C. W. Rice. 2006. Methods and tools for designing a pilot soil carbon sequestration project. *In: Lal, R., C. C. Cerri, M. Bernoux, J. Etchevers, and E. Cerri (eds). Carbon Sequestration in Soils of America Latina. USDA New York. pp: 457-475.*
- Janik, L., L. Spouncer, R. Correll, and J. Skjemstad. 2002. Sensitivity analysis of the Roth-C soil carbon model (ver. 26.3 Excel®). National Carbon Accounting System Technical Report No. 30. SIRO Land and Water and Mathematical and Information Sciences. The Australian Greenhouse Office is the lead Common wealth agency on greenhouse matters. Australia. 53 p.
- Janzen, H. H. 2003. Agricultural soils: their place in the global carbon cycle. *In: Smith, S. (ed). Soil Organic Carbon and Agriculture: Developing Indicators for Policy Analyses. Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa and Organization for Economic Cooperation and Development, Paris, France. pp: 11-20.*
- Kimble, J. M., R. B. Grossman, and S. E. Samson-Liebig. 2001. Methodology for sampling and preparation for soil carbon determinations. *In: Lal, R., J. M. Kimble, R. F. Follet, and B. A. Stewart. (eds). Assessment Methods for Soil Carbon. CRC Press LLC. Boca Raton Fl. pp: 15-30.*
- Lal, R., and J. M. Kimble. 2001. Importance of soil bulk density and methods of its importance. *In: Lal, R., J. M. Kimble, R. F. Follet, and B. A. Stewart. (ed). Assessment Methods for Soil Carbon. CRC Press LLC. Boca Raton Fl. pp: 31-44.*
- Lal, R. 2005. Soil erosion and carbon dynamics. *Soil and Tillage Res.* 81:137-142.
- Lal, R. 2006. Bulk density measurement for assessment of soil carbon pools. *In: Lal, R., C. C. Cerri, M. Bernoux, J. Etchevers, and E. Cerri (eds). Carbon Sequestration in Soils of America Latina. USDA New York. pp: 491-513.*
- Monreal, C. M., J. D. Etchevers, M. Acosta, C. Hidalgo, J. Padilla, R. M. López, L. Jiménez, and A. Velázquez. 2005. A method for measuring above- and below-ground C stocks in hillside landscapes. *Can. J. Soil Sci.* 85: 523-530.
- Nortcliff, S. 1994. Soils in the field. Chapter 1. *In: Soil Science: Rowell, D. L. Methods and Applications. (ed). Longman Group. U. K. pp: 1-15.*
- PMLS-Proyecto Manejo Sostenible de Laderas. 2003. Proyecto Manejo Sostenible de Laderas. Quinta Reunión del Comité Técnico de Coordinación y Seguimiento. Colegio de Postgraduados, Montecillos, México. 200 p.
- Post, W. M., R. C. Izaurrealde, L. K. Mann, and N. Bliss. 2001. Monitoring and verifying of changes of organic carbon in soil. *Climatic change* 51: 73-99.
- Reeder, J. 2003. Overcoming spatial variation in measuring soil carbon stocks and sequestration potential of native rangelands in the western U.S. *In: Smith, S. (ed). Soil Organic Carbon and Agriculture: Developing Indicators for Policy Analyses. Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa and Organization for Economic Cooperation and Development, Paris, France. pp: 193-200.*
- Skjemstad, J. O., N. J. McKenzie, G.P. Richards, and A. A. Webb. 2003. Principles for monitoring soil-carbon change in Australian agricultural lands. *In: Smith, S. (ed). Soil Organic Carbon and Agriculture: Developing Indicators for Policy Analyses. Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa and Organization for Economic Cooperation and Development, Paris, France. pp 65-72.*
- Smith, S. (ed). 2003. Soil Organic Carbon and Agriculture: Developing Indicators for Policy Analyses. Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa and Organization for Economic Cooperation and Development, Paris. 329 p.
- Steffen, B. 2003. Measuring Agricultural Soil Organic Carbon—the Situation in Germany. *In: Smith, S. (ed). Soil Organic Carbon and Agriculture: Developing Indicators for Policy Analyses. Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa and Organization for Economic Cooperation and Development, Paris, France. pp: 105-111.*
- Vergara, S. M. A. 2004. Variabilidad del carbono orgánico en suelos de ladera del sureste de México. *Terra* 22: 359-367.
- Wairiu, M., and R. Lal. 2003. Soil organic carbon in relation to cultivation and topsoil removal on sloping lands of Kolombangara, Solomon Islands. *Soil and Tillage Res.* 70:19-27.
- Zinke, P. J., and A. G. Stangenberg. 2000. Elemental storage of forest soil from local to global scales. *For. Ecol. and Manag.* 138: 159-165.