

CONTENIDO Y DISTRIBUCION GEOGRAFICA DE CARBONO ORGANICO EN SUELOS DEL URUGUAY

A. Durán¹

Recibido: 12 de junio de 1998. Aceptado: 26 de agosto de 1998.

RESUMEN

En años recientes se ha incrementado el interés por el conocimiento del contenido de carbono en los suelos debido a que estos pueden actuar tanto como sumideros o como emisores de algunos gases con efecto invernadero, particularmente anhídrido carbónico, y así contribuir a la reducción o al incremento del contenido de tales gases en la atmósfera y en consecuencia influir sobre su temperatura. La conservación de la materia orgánica del suelo ha pasado así a tener un doble objetivo: (1) contribuir al mantenimiento de buenas propiedades físicas, química y biológicas para asegurar niveles de producción de cultivos y pasturas compatibles con las necesidades del hombre y fortalecer la sustentabilidad de los sistemas productivos agropecuarios, y (2) mitigar la emisión de gases que contribuyen al calentamiento de la atmósfera e influyen así sobre el cambio global. Un elemento básico para el manejo racional de la materia orgánica del suelo con objetivos ambientales es disponer de los mejores inventarios posibles acerca del contenido de carbono orgánico en los diferentes suelos y de su distribución en la profundidad a través del perfil. En este trabajo se presenta una primera contribución al conocimiento del contenido global de carbono orgánico en los suelos del Uruguay desde una doble perspectiva. Por una parte se presentan estimaciones de ese parámetro para los suelos profundos con mayores posibilidades de uso agrícola, tales como Brunosoles (Udolls), Vertisoles, Argisoles (Udolls, Udalfs), Planosoles (Albolls y Aqualfs), Luvisoles (Udalfs p.p.) y Acrisoles (Udults), analizándose los contenidos de carbono en el espesor de un metro y de los primeros 20 y 50 centímetros del perfil para cada Gran Grupo (u Orden). Por otra parte se presenta el contenido de carbono orgánico de cada una de las asociaciones de suelos delineadas en la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay y a partir de la información ofrecida por dicho mapa se concluye en una primera aproximación al contenido total de carbono en el conjunto de los suelos del país. La metodología empleada en las estimaciones es la misma utilizada por diversos autores en trabajos similares para áreas geográficas de diversa extensión y aporta conocimientos para las bases de datos que existen en diversas instituciones de investigación con fines tanto productivos como ambientales.

PALABRAS CLAVE: carbono orgánico, calentamiento global, efecto invernadero.

SUMMARY

CONTENT AND GEOGRAPHICAL DISTRIBUTION OF ORGANIC CARBON IN SOILS OF URUGUAY

In recent years an increasing interest is observed concerning the organic carbon content of the soils because these can be either a sink or a source of some greenhouse gases, particularly carbon dioxide and so they contribute to the increase or the decrease of such gases in the atmosphere and consequently influence on its temperature. Soil organic matter conservation has therefore become an objective aiming to both: (1) contribute to conservation of good physical, chemical and biological soil properties to ensure crops and pasture production levels compatible with human needs and support the sustainability of farming systems, and (2) mitigate the emission of gases which contribute to the warming of the atmosphere and so influence on global change. A basic element needed for a rational management of soil organic matter with environmental purposes is the availability of the best possible inventories of the organic carbon content of different soils and its distribution in depth through the soil profile. In this paper a first contribution to the knowledge of the global organic carbon content of the soils of Uruguay is presented from two different points of view. On one hand, estimates of that parameter are presented for deep soils, suitable for common crops, such as Brunosoles (Udolls), Vertisoles, Argisoles (Udolls, Udalfs), Planosoles (Albolls and Aqualfs), Luvisoles (Udalfs p.p.) and Acrisoles (Udults), discussing the carbon content to a depth of one meter and in the upper 20 and 50 centimeters of the profile in each Great Group (or Order). On the other hand, the organic carbon content of each of the soil mapping units of the Reconnaissance Soil Map of Uruguay is estimated and from the information supplied by the map, a first approximation to an estimate of the carbon content for the whole of the soils in the country is presented. The procedure followed for the computations of soil organic carbon is the same used by different authors working in similar estimates for geographical areas of variable extent and contributes to carbon data bases existing in different research institutions with both productive and environmental objectives.

KEY WORDS: organic carbon, global warming, greenhouse effect.

¹ Cátedra de Edafología, Facultad de Agronomía
Montevideo, Uruguay

INTRODUCCION

Desde muy temprano existió interés en la ciencia del suelo por el conocimiento de los roles y la dinámica de la materia orgánica del suelo en cuanto al balance de ganancias y pérdidas de carbono orgánico del suelo (COS). El énfasis se puso tanto en los procesos naturales que condicionan el origen y la evolución de los suelos como en las modificaciones del contenido de COS bajo diferentes sistemas de utilización de la tierra por el hombre.

Kern y Johnson (1993) citando a diversos autores (Follett *et al.*, 1987; Childs *et al.*, 1989) señalan que la materia orgánica tiene una gran influencia en la sustentabilidad a largo plazo del suelo, y que la conservación de aquella es importante para la nutrición vegetal (Stevenson, 1982), la estructura y compactabilidad del suelo (Soane, 1990) y la capacidad de retención de agua (DeJong *et al.*, 1983). A su vez Post *et al.*, (1990) y Bouwman (1989) citados por Kern y Johnson (1993) expresan respectivamente que la materia orgánica es el mayor reservorio terrestre global de C y que afecta el contenido atmosférico de CO₂, CH₄ y otros gases de efecto invernadero.

Morón (1994) señala también que la materia orgánica es un factor crítico para la sustentabilidad de los sistemas productivos que influye decisivamente sobre numerosas propiedades físicas, químicas y biológicas que afectan directa o indirectamente el crecimiento vegetal. Entre tales propiedades menciona la densidad aparente, la porosidad, la estructura, la infiltración, retención y transmisión del agua en el perfil del suelo, la capacidad de retención de bases intercambiables, el poder amortiguador sobre los cambios de pH, la fijación y liberación de nutrientes esenciales, la cantidad y actividad de la biomasa microbiana y otras de menor importancia.

Más recientemente el conocimiento de la materia orgánica ha cobrado una importancia renovada al incrementarse el conocimiento de la influencia del balance de ganancias y pérdidas del COS sobre el contenido de varios gases atmosféricos relacionados con el mantenimiento o la modificación de la temperatura de la Tierra. Así, la temperatura promedio de la Tierra que es del orden de 15 o 16°C (Lal *et al.*, 1995; Schlesinger, 1995) está en parte determinada por los contenidos de H₂O y CO₂ en la atmósfera cuyo "efecto invernadero" contribuye con 33°C impidiendo que el planeta se convierta en una masa helada. En extremos opuestos, la atmósfera de Marte con una presión total de CO₂ muy baja es causa de la temperatura de -53°C del planeta, en tanto

Venus alcanza una temperatura de 474°C debido a que casi todo el C se encuentra en la atmósfera en forma de CO₂ contribuyendo al efecto invernadero (Schlesinger, 1995).²

Los gases que contribuyen al calentamiento de la atmósfera incluyen principalmente, y además de los ya citados (CO₂ y CH₄), al óxido nitroso (N₂O), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO) y clorofluorcarbono (CFC). Como el carbono y el nitrógeno son componentes principales de la materia orgánica, su emisión en forma gaseosa como resultado de la mineralización de esta contribuye a la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera, en tanto que su captura en los tejidos vivos de plantas y animales y su posterior evolución a materia orgánica reducen el contenido atmosférico de tales gases. Por lo tanto, el suelo puede funcionar como fuente o como sumidero del C atmosférico y puede jugar un rol importante en su secuestro ayudando así a disminuir la acumulación de gases de efecto invernadero y a mitigar el cambio climático global (Johnson y Kern, 1991, citados por Kern y Johnson, 1993).

Las fuentes naturales de tales gases son los ecosistemas terrestres, incluyendo los suelos, la biota, los humedales y las erupciones volcánicas; estas últimas son las que originalmente contribuyeron al CO₂ atmosférico, antes de la aparición de la vida, aunque su rol retomó importancia en períodos de fuerte actividad tectónica, por ejemplo durante el eoceno. De todas maneras y tal como lo indica Berner (citado por Schlesinger, 1995) diversos modelos matemáticos sugieren que la concentración de CO₂ atmosférico disminuyó abruptamente al extenderse el dominio de las plantas en la superficie del planeta, hace alrededor de 350 millones de años.

Existen tres bancos o fuentes de carbono global que son los océanos, la atmósfera y los ecosistemas terrestres (Eswaran *et al.*, 1993; Lal *et al.*, 1995), a los que se agrega un cuarto sistema, el geológico, constituido por las formaciones geológicas que contienen carbono fósil y mineral. Los tres primeros bancos están en equilibrio dinámico, interactuando e intercambiando C unos con otros; el banco geológico está estimado en 65,5 x 10⁶ Pg³ según Kempe (citado por Eswaran *et al.*, 1995) y por oposición a los bancos activos es un sumidero permanente de C.⁴

Eswaran *et al.* (1993) y Lal *et al.* (1995) resumen las relaciones cuantitativas entre los principales bancos "activos" de C (Cuadro 1).

El cuadro 1 muestra que los océanos contienen, según los autores considerados, más del 85 o del 93 por ciento del C de los bancos activos y que los suelos contienen alrededor de tres veces más C que la biota, constituyendo el reservorio más importante luego de los océanos; a su vez, el conjunto los ecosistemas terrestres (suelos y biota) contienen 2.100 Pg de C, poco más o menos del 5 por ciento del C total de los bancos activos (41.000 o 44.800 Pg).

El carbono considerado en los párrafos que anteceden es solamente el orgánico, concentrado cerca de la superficie (normalmente en 1 m de espesor) y para el que existen las estimaciones globales más confiables. Eswaran *et al.*

² La temperatura superficial de Venus es demasiado elevada para permitir la formación de carbonatos minerales.

³ Pg (Petagramo) = 1 x 10¹⁵ g.

⁴ Una fracción muy menor de este banco, unos 4.000 Pg, ocurre en forma de combustibles fósiles cuya explotación por el hombre libera C hacia la atmósfera durante su combustión.

(1993) estimaron en 1.576 Pg el contenido de COS a nivel mundial y ajustaron posteriormente esas estimaciones (Eswaran *et al.*, 1995) a cifras de 1.555, virtualmente coincidentes con las estimaciones de diversos autores resumidas por Lal *et al.* (1995). Aquellos autores estimaron asimismo que el banco total de carbono inorgánico del suelo (CIS) era de unos 1.738 Pg, una cifra aún superior a la del COS, aunque señalan que la estimación del CIS está sujeta a errores mayores y su confiabilidad es menor a la del COS. El CIS se localiza preferentemente en los horizontes profundos del suelo y su intercambio con los otros bancos de C es mucho más limitado y menos activo.

Cuadro 1. Reservas globales de carbono (elaborado por el autor a partir de datos de diversos autores) citados por Eswaran *et al.* (1993) y Lal *et al.* (1995).

SISTEMAS CONSIDERADOS (reservas de C)	Eswaran <i>et al.</i> (1993)		Lal <i>et al.</i> (1995)	
	Pg	%	Pg	%
Océanos	38.000	84,8	38.000	92,7
Atmósfera	750	1,7	750	1,8
Suelos	1.500	3,3	1.550	3,8
Biota	550	1,2	550	1,3
Geológico (combustible fósil)	4.000	8,9	Sd	
Misceláneos	sd	150	0,4	
Total	44.800	100,0	41.000	100,0

sd: sin datos

Los suelos del mundo contienen además alrededor de 95 Teragramos ($Tg = 1 \times 10^{12} g$) de nitrógeno, que junto al aplicado en forma de fertilizantes es el banco principal de N_2O y otros óxidos de nitrógeno (NO_x) liberados a la atmósfera; el 80 por ciento del N almacenado en los suelos se encuentra en los 10 cm superficiales del perfil (Lal *et al.*, 1995).

Cuadro 2. Balance global del para el período 1980-1989 (elaborado por Lal *et al.* en base a diversas fuentes)

FUENTES	SUMIDEROS
Deforestación y uso del suelo: 1,6 Pg.año ⁻¹	Atmósfera: 3,2 Pg.año ⁻¹
Quema de combustibles fósiles: 5,4 Pg.año ⁻¹	Océanos: 2,0 Pg.año ⁻¹
	No explicado: 1,8 Pg.año ⁻¹

Se sabe que el C fijado anualmente por la biota a través de la fotosíntesis está en equilibrio con la liberación de C a

través de la respiración de las plantas y la descomposición de los residuos orgánicos y de la materia orgánica. A su vez, la quema de combustibles fósiles, la deforestación y el uso del suelo son fuentes importantes de emisión de C como CO_2 a la atmósfera. Lal *et al.* (1995) establecen el balance de CO_2 resumido en el cuadro 2, conforme al cual el 25 por ciento de las emisiones - que totalizan 7,0 Pg - no están equilibradas con el secuestro de una cantidad equivalente, lo que no permite cerrar el balance, salvo si se acepta que los ecosistemas terrestres están fijando esa cantidad de CO_2 , de lo que no hay evidencias directas concluyentes para numerosos autores.

Houghton (1995) al plantearse la interrogante de si actualmente los ecosistemas terrestres liberan carbono hacia la atmósfera o por el contrario lo retiran de ella, establece la siguiente ecuación, a cuyos términos aplica los valores en Pg que se indican, en base a estimaciones realizadas por geofísicos y ecólogos:

$$\begin{matrix} \text{Emisiones de combustibles} & = & \text{Incremento} & + & \text{Absorción} & + & \text{Absorción} \\ \text{fósiles} & & & & \text{atmosférico} & & \text{oceánica} & & \text{terrestre} \\ 6 (+/-0,6) & & & & 3 (+/-0,1) & & 2 (+/-0,5) & & ?? \end{matrix}$$

Conforme a este balance, si la absorción terrestre se calcula por diferencia, los ecosistemas terrestres están acumulando alrededor de 1 Pg C año⁻¹ y el balance de carbono está equilibrado. Por el contrario, si el término terrestre se determina en base a los cambios en la superficie ocupada por bosques, los ecosistemas terrestres están liberando alrededor de 1,5 Pg C año⁻¹ y los términos del balance global no están equilibrados. Ello parece inaceptable, pero sin embargo la evidencia obtenida desde los años 80 hasta el presente por análisis directo de los cambios en el uso de la tierra - principalmente la eliminación de bosques para incrementar el área agrícola - muestra consistentemente que los ecosistemas terrestres están liberando carbono hacia la atmósfera. Ello es lo que concluyen Houghton *et al.* (1983, 1985, 1987), Detwiler y Hall (1988), Houghton y Skole (1990), Hall y Uhlig (1991), Houghton (1991) y Flint y Richards (1994), citados por Houghton *et al.* (1995).

El rol de los suelos en el balance global del C continúa siendo una gran interrogante, sobre todo en lo referente a los procesos involucrados en su emisión y secuestro.

Eswaran *et al.* (1995) señalan que el problema del calentamiento global ha resultado en numerosos estudios concertados sobre la cantidad, la clase, la distribución y el comportamiento del C en diferentes sistemas y aunque el propósito de tales investigaciones es el impacto en los cambios climáticos, las contribuciones tienen aplicación en todo lo relativo al uso de la energía y al de los suelos en la agricultura. La mitigación de los efectos del cambio climático global se relaciona así directamente con el uso agrícola del suelo y en particular con el manejo de la materia orgánica.

A los fines indicados, uno de los elementos básicos para conducir experiencias y generar conclusiones válidas sobre el balance del COS es la obtención de estimaciones

precisas sobre el contenido de C en diferentes clases de suelos. Los mayores problemas que se enfrentan al procurar tales estimaciones, enumerados por Eswaran *et al.* (1993, 1995), son:

- muy alta variabilidad espacial del contenido de COS;
- estimaciones poco confiables de la superficie ocupada por las diferentes clases de suelos;
- baja disponibilidad de datos confiables, particularmente de densidad aparente, para computar la composición volumétrica; y
- dificultades metodológicas en la cuantificación de las modificaciones introducidas por los cambios en la vegetación y en el uso de la tierra.

En esta contribución se presenta información sobre el contenido de COS y su distribución en el perfil de los principales suelos agrícolas del país. Se definen como tales a los suelos bien desarrollados, profundos y moderadamente profundos, bien a algo pobremente drenados, no inundables y no alcalinos. Asimismo se computa el contenido de COS total de los suelos del Uruguay y su distribución geográfica, tomando como base la Carta de Reconocimiento de Suelos del país (MAP/DSF, 1976); para tales cálculos se consideraron los suelos dominantes de cada unidad cartográfica y, en algunos casos, la de los principales suelos asociados. Esto último se tomó en consideración en aquellas unidades cartográficas compuestas por asociaciones muy contrastantes en su contenido de COS, por ejemplo, asociaciones de suelos profundos y superficiales tales como Itapebí - Tres Arboles, Cuchilla de Haedo - Paso de los Toros, Curtina, Santa Clara, Sierra Polanco y otras comparables.

MATERIALES Y METODOS

La base cartográfica empleada para los cálculos de COS a nivel del país es la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay a escala 1:1 000 000 (MAP/DSF, 1976) y su memoria explicativa que incluye información morfológica y analítica de perfiles representativos de las 99 unidades delineadas en el mapa. La información aportada por esta base cartográfica se complementó con la proveniente de diversos estudios locales o regionales (Sombroek, 1969; Altamirano *et al.*, 1969; Durán, 1973; Ponce de León, 1980; Durán, datos no publicados; Durán, Ippoliti y Califra, investigación en curso). Al computar el contenido de COS por Grandes Grupos u Ordenes de Suelos de la taxonomía nacional se consideraron solamente los suelos profundos o moderadamente profundos para los cuales existe informa-

ción suficiente: Brunosoles (Argiudolls y Hapludolls), Vertisoles (Hapluderts), Argisoles (Argiudolls y Hapludalfs) y Planosoles (Argialbolls y Albaqualfs)⁵. Los Acrisoles (Hapludults) y Luvisoles (Hapludalfs) no se consideraron separadamente sino en conjunto como Orden (Suelos Desaturados Lixiviados: SDL). A su vez, dentro de los Brunosoles se consideraron también separadamente las Clases Eutrítica y Subéutrítica por presentar diferencias consideradas relevantes⁶, en tanto que en los Vertisoles se analizaron los Háplicos y Rúpticos profundos por un lado y los Rúpticos superficiales por otro, debido a sus notorias diferencias en la distribución del COS en profundidad. No se incluyeron en el análisis perfiles representativos del Orden de Suelos Poco Desarrollados por no existir información suficiente del contenido de COS como es el caso de los Fluvisoles (Udifluvents), Arenosoles (Quartzipsamments) e Inceptisoles (Haplumbrepts y Eutrochrepts), o por estar muy sesgada cuantitativamente hacia algunos componentes del Gran Grupo, como ocurre con los Litosoles (Hapludolls y Udorthents) en los que la información es muy mayoritariamente de perfiles desarrollados sobre basalto. Por falta de información de valor estadístico tampoco se incluyeron en el análisis los Ordenes de Suelos Halomórficos (Natraquolls, Natraqualfs) y Suelos Hidromórficos (mayormente Aquolls).

En los Vertisoles Rúpticos, vistas las grandes diferencias existentes en el contenido de COS de las fases profunda y superficial, el cómputo por unidad de área se realizó asumiendo que la fase profunda ocupa el 65% del terreno y la superficial el 35% restante. Tales proporciones se tomaron del estudio de Ponce de León (1980) por ser el único en el país en que aquellas se determinaron cuantitativamente.

Para unas pocas asociaciones no se dispone de información sobre el contenido de COS, pero la superficie ocupada por las mismas es mínima en el total del territorio nacional.

Como principio, se tomaron solamente en consideración los suelos dominantes de cada asociación cartografiada, pero en algunas pocas se incluyó en los cálculos a los principales suelos asociados, siempre que ocuparan una superficie importante dentro de la unidad cartográfica considerada y que su contenido de COS fuera significativamente diferente al de los suelos dominantes. En estos casos, el contenido de COS de la asociación se ponderó según la proporción ocupada dentro de ella por los diferentes suelos considerados. La ponderación se realizó sobre la base de la información incluida en la memoria descriptiva de la Carta de Reconocimiento de Suelos, la suministrada por otras fuentes cartográficas (Sombroek, 1969; D.G.R.N.R./ CONEAT, 1994) y la proveniente de especialistas con experiencia en levantamiento de suelos en las áreas consideradas. Asimismo en el caso de las unidades cartográficas con un grado significativo de rocosidad, se descontó de la superficie total la ocupada por afloramientos rocosos en base a la información aportada por esas mismas fuentes.

⁵ Entre paréntesis se indica la equivalencia a nivel de Gran Grupo entre la clasificación nacional de suelos y la de EE.UU., utilizándose para esta última la última versión de la clave taxonómica (Keys to Soil Taxonomy, 7th Edition, 1994. United States Department of Agriculture.

El COS se determinó en todos los estudios considerados por el método de Walkley - Black (oxidación con $K_2Cr_2O_7$ y H_2SO_4 , sin aplicación de calor exterior). La densidad aparente (DAP) se estimó mediante el modelo desarrollado por Fernández (1979) cuando no existían medidas directas, lo que ocurrió en la mayoría de los perfiles considerados. Los valores efectivamente medidos de DAP - cuando existen - se determinaron casi siempre con muestreadores cilíndricos y el volumen utilizado en el cálculo corresponde al obtenido con el contenido de agua en el suelo al que se alcanza la máxima expansión, si esta ocurre. En un número menor de perfiles la DAP se determinó en agregados imperturbados, con un contenido de humedad en equilibrio con una succión de 33 kPa, según el procedimiento utilizado por el Soil Survey Laboratory del Departamento de Agricultura de EE.UU. (W. Lynn, com. pers.). El uso de la DAP efectivamente medida se limitó a un número relativamente reducido de perfiles, pero en ellos se compararon tales valores con los estimados por el procedimiento de Fernández (1979), obteniéndose cifras muy similares lo que ratificó la confiabilidad de tal estimación.

Con los valores de COS (porcentaje en peso) y de DAP ($g\ cm^{-3}$) para cada horizonte del perfil, se calculó el contenido de COS por metro cuadrado y hasta una profundidad de un metro, o menor si el perfil tenía un espesor inferior de un metro o la información analítica no llegaba hasta el límite de un metro. Para los cálculos se utilizó el procedimiento utilizado por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales de Estados Unidos (USDA/NRCS, 1995) sin corregir los cálculos por fracciones gruesas (partículas minerales de diámetro mayor a 2 mm), ya que su contenido en los suelos considerados era nulo o despreciable para los fines de este estudio o la información pertinente no estaba registrada. Por igual procedimiento se calculó también el contenido de COS en los primeros 20 y en los primeros 50 centímetros de cada suelo.

RESULTADOS Y DISCUSION

Estimación del C orgánico en suelos profundos

En el cuadro 3 se muestran los valores medios y el coeficiente de variación (CV) del contenido de COS a un metro de profundidad para cada Gran Grupo, Clase u Orden de Suelos considerados.

Las cifras del cuadro 3 verifican los conocimientos existentes en cuanto a que los Vertisoles profundos y Brunosoles Eutricos son los suelos más ricos en materia orgánica. Los valores del CV indican asimismo que estos grupos

poseen una variabilidad relativamente baja (19-23%) en su contenido de COS y lo mismo ocurre con la fase superficial de los Vertisoles.

Cuadro 3. Contenido de carbono orgánico hasta 1 m de profundidad en diferentes agrupamientos de suelos.

Suelos (y número de perfiles analizados)	Media ($Kg\ m^{-2}\ m^{-1}$)*	CV (%)
Brunosoles (48)	15,1	29
Brunosoles Eutricos (25)	17,8	19
Brunosoles Subéutricos (20)	12,4	29
Vertisoles profundos (16)	19,7	23
Vertisoles superficiales (9)	10,7	24
Argisoles (14)	12,6	21
Planosoles (15)	10,6	33
SDL (22)	9,4	24

* En algunos perfiles el espesor considerado es inferior a 1 m, por no alcanzar el perfil dicho espesor o por carecerse de información hasta tal profundidad.

Los Brunosoles Subéutricos y Argisoles aparecen en un segundo lugar, con valores de COS virtualmente idénticos, observándose sin embargo que en los Brunosoles Subéutricos el CV es más alto que en los demás grupos a excepción de los Planosoles. En los Brunosoles Subéutricos, la variabilidad en espesor de los perfiles disponibles para este estudio es bastante mayor que en otros Grandes Grupos o Clases de suelos, existiendo un número significativo de perfiles que no alcanzan a un metro de profundidad.

Cuando se consideran solamente los contenidos de COS hasta 1 m, eliminando del análisis los suelos con información analítica para un espesor menor, los resultados son los indicados en el cuadro 4.

Cuadro 4. Contenido de carbono orgánico hasta un metro de profundidad en diferentes agrupamientos de suelos.

Suelos (y número de perfiles analizados)	Media ($Kg\ m^{-2}\ m^{-1}$)*	CV (%)
Brunosoles Eutricos (17)	17,9	18
Brunosoles Subéutricos (7)	11,4	9
Vertisoles profundos (12)	20,2	25

Se observa que en los Brunosoles Eutricos el número de perfiles que alcanzan efectivamente a 1 m de espesor es mucho menor que el total de suelos considerados en esta Clase (17 vs 25), pero que no hay cambio apreciable alguno en el contenido de COS ni en el CV; ello indica que los

⁶ La Clase Dística no se consideró por separado por disponerse apenas de información analítica de tres perfiles, pero estos se incluyen en el total de perfiles del Gran Grupo Brunosoles.

horizontes profundos - aproximadamente entre 70 y 100 cm de profundidad - no contribuyen significativamente el contenido total de COS y que su no consideración no afecta las cifras. En cambio, en los Brunosoles Subéutricos no solamente el número de perfiles de 1 m de profundidad como mínimo es mucho menor al total para los que existe información (7 vs 20) sino que el contenido de COS es algo menor cuando se consideran solamente los más profundos. A ello se agrega que el CV se reduce fuertemente de 28,7 a 8,9; en esta Clase de suelos, los perfiles más profundos son algo más pobre en COS y ello se debe, al menos en parte, a que ellos son a la vez de granulometría más arenosa, lo que en el país se asocia siempre a contenidos menores de materia orgánica.

Los Vertisoles profundos se comportan de manera similar a los Brunosoles Eutricos en cuanto a la contribución de los horizontes profundos al contenido total de COS, no existiendo diferencias significativas cuando se considera la totalidad de los perfiles o aquellos que alcanzan efectivamente a 1 m de profundidad; compárense a tales fines las cifras pertinentes de los cuadros 3 y 4.

En los SDL no se analizaron por separado los Grandes Grupos que lo componen porque las diferencias que los definen no guardan relación visible con el contenido de COS. El cuadro 3 muestra que el contenido de COS en los SDL es relativamente bajo ($9,4 \text{ Kg m}^{-2} \text{ m}^{-1}$), lo que ratifica el conocimiento de estos suelos, considerados como los más pobres en materia orgánica del país, al menos si no se consideran los Litosoles ni los Arenosoles. El CV es medio (24%) porque en este agrupamiento existe una variación bastante importante en el contenido de C, aún cuando los valores sean siempre bajos en términos relativos a otros grupos de suelos. Pero contrariamente a los otros agrupamientos considerados, dentro de los SDL existen muchos perfiles cuyo espesor es sensiblemente superior a un metro. El conjunto de los suelos estudiados presenta un espesor medio de 1,45 m, aún incluyendo los de espesor menor a 1 m, y los horizontes situados a más de 1 m de profundidad contribuyen significativamente al contenido de COS en el espesor total del perfil. Realizando los cálculos para dicho espesor total, el COS en estos suelos alcanza a $11,5 \text{ Kg m}^{-2}$, una cifra significativamente mayor a la de $9,4 \text{ Kg m}^{-2}$ para el espesor de 1 metro; el CV también baja en grado apreciable, de 24% a 19% para espesores de 1 m y del total del perfil respectivamente.

El cuadro 3 muestra que la diferencia en COS entre los SDL y los Planosoles no es muy importante ($9,4$ vs $10,6 \text{ Kg m}^{-2} \text{ m}^{-1}$), lo que se debe a que los Planosoles con horizontes A y E franco arenosos o arenoso francos, comunes en varias asociaciones de suelos, no difieren mayormente de los SDL en cuanto al contenido y distribución en el perfil del COS; tales suelos tienen un peso importante dentro del conjunto de Planosoles considerados en este estudio. En el total de Planosoles sin embargo, el rango textural del conjunto de horizontes es amplio, lo que se refleja en una

variabilidad también importante en el contenido de COS en el perfil (CV de 33%). Cuando se consideran solamente los Planosoles con horizontes A y E de textura franco limosa o franco arcillo limosa, el COS a 1 m de profundidad alcanza valores medios de 14 a $15 \text{ Kg m}^{-2} \text{ m}^{-1}$, más próximos a los de Argisoles y Brunosoles Subéutricos.

Los valores de CV de los cuadros 3 y 4 son bastante menores que los obtenidos por Alexander *et al.* (1989) para algunos suelos de Alaska (28–42%) y muy inferiores a las registradas por Kimble *et al.* (1990) para Aridisoles, Oxisoles y Ultisoles tropicales y Molisoles y Alfisoles templados (42–70%). Los valores de CV obtenidos en este estudio se comparan favorablemente con los de dichos autores y contribuyen a validar las estimaciones de COS en los suelos del país.

Cuando se comparan los valores de COS del cuadro 3 con los de suelos similares de otras zonas del mundo se constata que los suelos del Uruguay son de alto contenido de C, lo que es particularmente visible en el caso de los Vertisoles, más allá de que la información disponible para los suelos de otras regiones no distingue entre Vertisoles profundos y superficiales en el sentido que se le da a estos términos en la taxonomía nacional: Vertisoles con doble perfil. Tales conclusiones surgen de observar las cifras del cuadro 5.

Cuadro 5. Contenido de carbono orgánico por metro cuadrado y hasta un metro de profundidad en algunos suelos del Uruguay (U) y de otras regiones (O).

Suelos	Uruguay	Kimble <i>et al.</i> , 1990*	Eswaran <i>et al.</i> , 1993
Brunosoles (U)**	15,1		
Molisoles globales (O)			13,1
Molisoles templados (O)		9,1	13,3
Vertisoles profundos (U)	19,7		
Vertisoles superficiales (U)	10,7		
Vertisoles globales (O)			5,8
Vertisoles templados (O)			7,3
Alfisoles globales (O)			6,9
Alfisoles templados (O)		5,5	8,2
SDL (U)***	9,4		*
Ultisoles tropicales (O)		8,3	
Ultisoles (O)			9,3
Ultisoles templados (O)		8,7	

* Citado por Eswaran *et al.* (1995).

** Los Brunosoles equivalen aproximadamente a los Udoles de la taxonomía de EE.UU.

*** Los SDL incluyen a los Grandes Grupos de Suelos de Acrisoles y Luvisoles, los que equivalen de manera aproximada a Ultisoles y Alfisoles de clima húmedo respectivamente en la taxonomía de EE.UU.

Los Brunosoles de Uruguay (Udolls de régimen térmico en la taxonomía de EE.UU.) presentan un contenido de COS superior en $2 \text{ Kg m}^{-2} \text{ m}^{-1}$ al de los Molisoles, tanto en su totalidad como con relación de los de zonas templadas (Eswaran *et al.*, 1993). Si la comparación se lleva a cabo con las cifras mencionadas por Kimble *et al.* (1990), la diferencia es aún mayor, alcanzando a casi $6 \text{ Kg m}^{-2} \text{ m}^{-1}$. Los SDL de Uruguay superan en contenido de COS a parte de sus equivalentes en la taxonomía americana (Alfisolos p.p.) y se asemejan a los Ultisoles de esta última. Pero sin duda la diferencia más destacable es la de los Vertisoles, cuyo contenido de COS en Uruguay supera largamente los valores conocidos en la mayor parte del mundo según se observa en el cuadro 5. Este contenido elevado de COS parece ser común solamente en otros Vertisoles de esta zona de América del Sur, como en Entre Ríos (Argentina) y Río Grande del Sur (Brasil).

En el cuadro 6 se presenta información sobre el contenido de COS de los suelos del cuadro 3 pero limitado a los 20 cm superficiales del perfil, un espesor de importancia por coincidir aproximadamente con la capa arable y estar por lo tanto sujeta a mayores variaciones bajo uso agrícola, al menos con laboreo convencional que es el más generalizado hasta ahora en el país.

Cuadro 6. Carbono orgánico en los primeros 20 cm del suelo, en Kg m^{-2} y como porcentaje del carbono en un metro de espesor en suelos del Uruguay.

Suelos	COS (media) $\text{Kg m}^{-2} \text{ 20 cm}^{-1}$	% sobre el contenido medio de COS en 1 m
Brunosoles	6,3	42
Brunosoles Eutricos	7,2	41
Brunosoles Subéutricos	5,4	45
Vertisoles profundos	7,8	40
Vertisoles superficiales	6,7	64*
Argisoles	4,7	38
Planosoles	4,6	43
SDL	2,9	29

* En este caso el % está referido a la profundidad investigada que casi siempre es menor a 1 m

Se observa en el cuadro 6 que todos los suelos profundos poseen entre el 40 y el 45% del COS en los 20 cm superficiales, con la excepción de los SDL en los que solamente algo menos del 30% ocurre en ese espesor, lo que es consecuencia de la diferente distribución del carbono en el perfil. En los SDL es común la existencia de un segundo máximo de COS en la parte superior del horizonte B_1 y un descenso muy gradual hacia la base del solum (Durán, 1973).

En los Vertisoles superficiales la fuerte concentración del COS en los primeros 20 cm del perfil es consecuencia de la propia naturaleza de este último y de la profundidad total investigada, casi siempre inferior a 1 metro.

Por otra parte, si se ignora la cifra para los Vertisoles superficiales, el valor más alto se observa en los Brunosoles Subéutricos cuya profundidad es frecuentemente menor a 1 m. En consecuencia, el valor de 45% para tales suelos obedece en parte a las mismas razones que en el caso de los Vertisoles superficiales, aunque el espesor de aquellos no está tan limitado como en éstos. El rango de 40-45% es por lo tanto un valor bastante constante para los suelos del país, con las excepciones de Brunosoles Subéutricos y Vertisoles superficiales, y sin duda se debe a las condiciones ambientales de clima y tapiz vegetal que han regulado la evolución de los suelos.

El cuadro 7 muestra el contenido de COS en los 50 cm superficiales de los mismos suelos considerados en el cuadro 6; esa profundidad es aproximadamente la de mayor arraigamiento para la mayoría de los suelos profundos y moderadamente profundos del Uruguay.

Cuadro 7. Carbono orgánico en los primeros 50 cm del suelo, en Kg m^{-2} y como porcentaje del carbono en un metro de espesor en suelos del Uruguay.

Suelos	COS (media) $\text{Kg m}^{-2} \text{ 20 cm}^{-1}$	% sobre el contenido medio de COS en 1 m
Brunosoles	13,0	78
Brunosoles Eutricos	13,8	77
Brunosoles Subéutricos	10,6	81
Vertisoles profundos	14,4	73
Vertisoles superficiales	9,8	85*
Argisoles	9,2	73
Planosoles	8,2	78
SDL	6,0	61

* En este caso el % está referido a la profundidad investigada que casi siempre es menor a 1 m

Las cifras del cuadro 7 siguen la misma tendencia de las del cuadro 6 e indican que entre 73 y 80 por ciento del COS se concentra en los primeros 50 cm de los suelos profundos y moderadamente profundos del país. También los Vertisoles superficiales muestran una concentración mayor del COS en esa profundidad – por las razones ya mencionadas – así como los SDL muestran en cambio una concentración menor a la tendencia general. Para estos últimos debe tenerse en consideración que el espesor de 50 cm no incluye en muchos perfiles ni siquiera la totalidad del horizonte A o del conjunto de los horizontes eluviales (A y E).

Estimación del C orgánico global en los suelos del Uruguay

El contenido de COS en cada una de las unidades cartográficas de la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay arroja los resultados que se resumen en el cuadro 8, en el que se agrupan las asociaciones de suelos según rangos de COS en $\text{Kg m}^{-2} \text{m}^{-1}$.

El máximo contenido medio de COS es de $25,7 \text{ Kg m}^{-2} \text{m}^{-1}$ y corresponde a la asociación Paso Coelho, constituida esencialmente por Vertisoles (Hapluderts), en tanto que el mínimo es de $1,8 \text{ Kg m}^{-2} \text{m}^{-1}$ y ocurre en la unidad Balneario Jaureguiberry donde ocurren solamente Arenosoles (Quartzipsamments). Del cuadro 8 se concluye que el rango más frecuente de COS en las unidades cartográficas del mapa de suelos del Uruguay es de 10 a $15 \text{ Kg m}^{-2} \text{m}^{-1}$ y que las 40 asociaciones dentro de ese rango ocupan 7,4 millones de ha. En segundo lugar se ubica el rango de 15 a $20 \text{ Kg m}^{-2} \text{m}^{-1}$ con 24 asociaciones que ocupan 4,3 millones de ha. En su conjunto ambos grupos de asociaciones, con un rango de 10 a $20 \text{ Kg m}^{-2} \text{m}^{-1}$, ocupan 11,7 millones de ha, lo que es indicativo del contenido en general elevado de COS de los suelos del Uruguay. Ello es más notorio si a esta superficie se le agregan las 890 mil ha ocupadas por las 8 asociaciones con contenidos de COS que superan los $20 \text{ Kg m}^{-2} \text{m}^{-1}$.

En el otro extremo se observa que las 25 asociaciones de suelos con menos de $10 \text{ Kg m}^{-2} \text{m}^{-1}$ de COS ocupan alrededor de 4,3 millones de ha y que, de ellos, apenas dos asociaciones que cubren 65 mil ha poseen menos de $5 \text{ Kg m}^{-2} \text{m}^{-1}$.

Como era de anticipar, en base al cómputo de COS por grupos de suelos, las asociaciones con contenidos de COS de 20 a $25 \text{ Kg m}^{-2} \text{m}^{-1}$ son las constituidas por Vertisoles y/o Brunosoles Eutricos (Hapluderts y Vertic Arguidolls/Hapludolls, respectivamente) como componentes principales. Algunas de las tierras más reconocidas por su alto valor agrícola o ganadero están incluidas en este rango, tales como las zonas de Cololó - Bequeló (asociación Bequeló) y las del valle Fuentes (asociación homónima). En el segundo rango por contenido de COS (15 a $20 \text{ Kg m}^{-2} \text{m}^{-1}$) están incluidas asociaciones algo más heterogéneas en cuanto a sus componentes, pero también con dominancia de Brunosoles Eutricos y Vertisoles; ocasionalmente son dominantes en algunas asociaciones los Brunosoles Subeutricos (Arguidolls) o Argisoles (Arguidolls y secundariamente Hapludalfs). En algunas ocurren incluso suelos superficiales como Litosoles (Lithic Hapludolls mayormente) aunque en baja proporción y asociados a Brunosoles Eutricos y Vertisoles de alto contenido de COS (asociaciones Itapebí - Tres Arboles y Masoller, por ejemplo).

En el rango de 10 a $15 \text{ Kg m}^{-2} \text{m}^{-1}$ dominan, según la asociación considerada, Brunosoles Eutricos y/o Subeutricos, Argisoles y a veces Luvisoles (Hapludalfs); los Vertisoles están generalmente ausentes excepto si se asocian a Litosoles u otros suelos de bajo contenido de COS. Algunas de las tierras incluidas en este grupo tienen una larga historia agrícola (asociaciones Kiyú, Toledo, San Jacinto), en tanto que otras han tenido uso ganadero exclusivamente o ganadero - agrícola de baja intensidad.

Cuadro 8. Contenido de C orgánico en suelos del Uruguay (por unidades cartográficas de la Carta de Reconocimiento de Suelos, MAP/DSF, 1976)

Carbono ($\text{Kg m}^{-2} \text{m}^{-1}$)	Número de asociaciones	Asociaciones incluidas	Superficie (1000 ha)
> 20	8	Arapey, Bequeló, Cuaró, Isla Mala, Paso Coelho, Palleros, Risso, Valle Fuentes	892
15 - 20	24	Bellaco, Baygorria, Cebollatí, Cañada Nieto, El Palmito, Ecilda Paullier - Las Brujas, Espinillar, Fray Bentos, Fraile Muerto, India Muerta, Itapebí - Tres Arboles, José Pedro Varela, La Carolina, Lechiguana, Masoller, Pueblo El Barro, Rincón de la Urbana, San Manuel, San Ramón, Tala - Rodríguez, Trinidad, Villa Soriano, Young, Zapicán	4.311
10 - 15	40	Arroyo Blanco, Alférez, Arroyo Hospital, Algorta, Andresito, Aparicio Saravia, Bacacua, Bañado de Farrapos, Blanquillo, Cuchilla del Corralito, Cuchilla Caraguatá, Cerro Chato, Cuchilla Mangueras, Colonia Palma, Carpintería, Constitución, Curtina, Kiyú, Lascano, Libertad, Los Mimbres, Montecoral, Manuel Oribe, Puntas de Herrera, Paso Palmar, Rincón de Zamora, Sierra de Animas, San Carlos, Santa Clara, San Gabriel - Guaycurú, San Jacinto, San Luis, Sierra Polanco, Salto, Tres Bocas, Tres Islas, Toledo, Valle Aiguá, Vergara, Zapallar	7.437
5 - 10	23	Angostura, Bañado del Oro, Carapé, Cuchilla Corrales, Chapicuy, Cuchilla de Haedo - Paso de los Toros, Cuchilla Santa Ana, El Ceibo, La Charqueada, Laguna Merín, Las Toscas, Queguay Chico, Río Branco, Rincón de Ramírez, Río Tacuarembó, Rivera, Sierra de Aiguá, Sarandí de Tejera, San Jorge, Tacuarembó, Tres Cerros, Tres Puentes, Yi	4.270
< 5	2	Capilla de Farruco, Balneario Jaureguiberry	65
sin datos	2	Islas del Uruguay, Sierra Mahoma	20
Total	99		16.995

En el rango de 5 a 10 Kg m⁻² m⁻¹ de COS se ubican asociaciones en que dominan Luvisoles (Hapludalfs), Acrisoles (Hapludults), Argisoles (Argiudolls o Hapludalfs), Planosoles (Argialbolls y Albaqualfs), Suelos Halomórficos (Natraqualfs mayoritariamente) o Litosoles, a veces asociados entre sí; también ocurren en proporción importante Brunosoles Subéutricos y en algunos casos Arenosoles o Inceptisoles. Muchos de los suelos profundos de este rango de COS son de texturas livianas en los horizontes eluviales, desde franco limosa a franco arenosa o arenosa franca. Los suelos con horizontes superficiales de textura más fina son casi siempre de profundidad muy limitada (Litosoles), lo cual explica su bajo contenido de COS.

El grupo con contenidos de COS de menos de 5 Kg m⁻² m⁻¹, es de importancia mínima en cuanto a la superficie ocupada y está compuesto por Arenosoles (Quartzipsamments) o por Litosoles (Lithic Hapludolls y Lithic Udorthents) de textura franco arenosa.

Los mayores motivos de incertidumbre sobre los cálculos realizados, aparte de los ya enunciados en la introducción, son los siguientes.

1. El número de perfiles analizados disponibles para realizar los cálculos de COS para cada unidad de la Carta de Reconocimiento de Suelos es muy limitado (1 a 3 en la mayoría de los casos). Por otra parte sin embargo, en las asociaciones relativamente homogéneas para las que se dispuso de un número mayor de perfiles, los valores medios computados no difieren significativamente de los obtenidos con el número mínimo.

2. En las asociaciones compuestas por suelos muy contrastantes en su contenido de COS, la proporción asignada a cada componente tiene un fuerte contenido de subjetividad, aunque para ello se hayan tomado en consideración diversas fuentes de información y se las haya cruzado para verificar coincidencias y diferencias.

3. Lo mismo ocurre con relación al cálculo de la superficie ocupada por afloramientos rocosos en aquellas asociaciones en que la rocosidad no puede ignorarse; la información disponible sobre área cubierta por afloramientos es solamente una aproximación. Si bien son pocas las asociaciones con rocosidad importante, la superficie ocupada por el conjunto de ellas es muy extendida, lo que incrementa los posibles errores en los cálculos de COS. Como contrapartida, para estas últimas en particular se dispuso de un mayor número de perfiles analizados por asociación (10 o más en algunos casos).

4. La variabilidad en el padrón de suelos, y consecuentemente en el contenido de COS, es muy significativa en el caso de la mayoría de las asociaciones de suelos de zonas bajas (planicies aluviales inundables). Para ellas, el número de perfiles disponibles para el estudio no estima seguramente con suficiente precisión el contenido ponderado de COS.

5. No se pudo computar el contenido de COS para los Histosoles (Histosols) ni para los Gleysoles Hísticos (Histic Endoaquolls) por no disponerse de valores de DAP para los horizontes orgánicos ni de modelos para estimarla a partir de otros parámetros. El área total ocupada por este tipo de suelos es poco extensa pero está incluida – por razones de escala – en una única asociación de la que representa cerca del 20 por ciento de su superficie. Para esta unidad (India Muerta) el contenido global de COS está sin duda subestimado.

El cómputo de COS para la totalidad del territorio arroja la cifra de 2,3 Pg como contenido global de los suelos del país. Sobre una superficie de 17 millones de ha consideradas, según la cartografía utilizada, ello supone un contenido medio de COS de 13,4 Kg m⁻² m⁻¹, una cifra elevada más allá de que no tiene otro valor indicativo, ya que el rango total es muy amplio, como fuera expresado. En todo caso, dicha cifra supera a la media mundial que surge de los datos disponibles a ese nivel de generalización. En efecto, sobre la base de los contenidos de COS (Eswaran *et al.*, 1995) y superficie ocupada por los suelos del mundo, clasificados según la taxonomía de EE.UU. (Eswaran *et al.*, 1993), se computa un contenido medio de COS de 11,5 Kg m⁻² m⁻¹. El valor medio para Uruguay supera a dicha cifra en un 17 por ciento.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta una primera aproximación a la estimación del contenido de COS en el perfil de los principales suelos con potencial agrícola y de los suelos dominantes de las asociaciones representadas en la Carta de Reconocimiento de Suelos del país.

Se han obtenido estimaciones confiables para los Grandes Grupos de Suelos de Brunosoles, Vertisoles, Argisoles y Planosoles así como para el Orden de Suelos Desaturados Lixiviados; para los Brunosoles se ha generado asimismo información desagregada al nivel de Clases: Eutricos y Subéutricos.

Para las unidades cartográficas del mapa de suelos del país, la estimación es menos confiable porque solamente se dispone de información en cantidad limitada para la mayoría de ellas. No obstante, el nivel alcanzado es superior al existente en la mayoría de los países o regiones donde se han conducido estudios similares. Así, el cuerpo técnico del WSR-SCS⁷ del Departamento de Agricultura de Estados Unidos ha elaborado una amplia base de datos en base al Mapa Mundial de Suelos de FAO-UNESCO (1971 – 1981) y a información procedente de un número importante de perfiles para EE.UU. – del orden de 15.000 – pero muy bajo para el resto del mundo, para el cual se dispone de 1.000 perfiles para 45 países, principalmente en el trópico (Eswaran *et al.*, 1993). En este estudio se dispuso de información analítica para 97 de las 99 asociaciones de la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay y si bien

⁷ WSR-SCS: World Soil Resources-Soil Conservation Service.

para muchas de ellas no existen más de uno o dos perfiles representativos analizados, para otras existe información mucho más abundante. Por ello, el total de suelos incluidos en el estudio es de alrededor de 200, una densidad por unidad de superficie mucho mayor a la disponible en casi todos los otros estudios conocidos.

Los cómputos realizados indican la existencia en los suelos del país de contenidos elevados de COS cuando se les compara con el de suelos similares de otras zonas del mundo y por lo tanto, un contenido también elevado por unidad de superficie para la mayor parte del Uruguay, aunque a nivel territorial la variabilidad es obviamente muy amplia.

Tomando en consideración que los suelos del país ocurren mayormente en superficies estables y están en equilibrio con el clima y la vegetación, no puede esperarse que ellos constituyan sumideros del C atmosférico, una situación similar a la existente en la mayor parte del mundo.

Por el contrario, ellos pueden ser potenciales emisores de CO₂ (y de otros gases de efecto invernadero) en función de los cambios en el uso de la tierra, si la tendencia es hacia la intensificación con laboreo convencional. Las pérdidas así generadas no serían significativas en el corto plazo según lo indican los resultados obtenidos por Díaz-Rosello (1992) en un suelo de la asociación Ecilda Paullier - Las Brujas, para el cual la disminución anual de materia orgánica bajo diferentes sistemas de cultivo con agricultura todos los años varió entre 643 y 929 Kg ha⁻¹, lo que implica una pérdida de COS de 37 y 54 g m⁻² año⁻¹ respectivamente. En el mediano o largo plazo, tal reducción puede sin embargo alcanzar niveles muy importantes si se produce sostenidamente (Díaz-Rosello, 1994) y se considera que el suelo en el que se realizó el experimento posee, según datos obtenidos en este estudio, 13 Kg m⁻² m⁻¹ de COS, de los cuales 6,6 Kg ocurren en los primeros 20 cm y 10,6 Kg en los primeros 50 cm del perfil. Tal escenario de agricultura sostenida en un mismo suelo todos los años es sin embargo poco plausible como sistema productivo comercial, por lo cual la pérdida de COS en condiciones más próximas a la realidad sería sin duda menor.

Es muy probable que las pérdidas de COS por mineralización o por erosión hídrica en los suelos del país hayan tendido a la baja en las últimas décadas, ya que tales pérdidas se asocian siempre al uso agrícola y el área bajo cultivos anuales y permanentes ha disminuido entre 1950 y 1990 de 1,34 a 0,83 millones de hectáreas o sea 38%.⁸ El cambio en el uso de la tierra en Uruguay en el pasado inmediato, contrariamente a lo verificado en muchos países en vías

de desarrollo, contribuye a mitigar y no a incrementar la pérdida de COS. Más aún, la incorporación progresiva del laboreo conservacionista - labranza reducida o siembra directa - aunque aún muy incipiente en el país y de desarrollo futuro por ahora impredecible en términos cuantitativos, contribuiría, siquiera en menor medida, a dicha tendencia. En igual sentido influye la sustitución de la agricultura continua por rotaciones de cultivos y pasturas mixtas (Díaz-Rosello, 1994; Baethgen *et al.*, 1994), que constituye en cambio una práctica ya aceptada y extendida, por lo que su influencia es más notoria y generalizada a una superficie significativa del área agrícola del país.

Otro cambio en el uso de la tierra en el Uruguay que tiende a mitigar la emisión de C en forma gaseosa hacia la atmósfera es el desarrollo forestal de los últimos años. W. Baethgen y A. Morón⁹ presentaron información sobre el balance de C en el sector forestal y conforme al modelo utilizado concluyen que dicho sector era un emisor neto de C en 1990 (unos 520 Gg año⁻¹)¹⁰ con 80.000 ha forestadas, estimándose que en 1996, con 165.000 ha de bosque artificiales, la fijación y la liberación anuales estaban casi equilibradas, con una emisión neta de alrededor de 30 Gg. Conforme al escenario proyectado para el año 2000, con 200.000 ha de bosques artificiales en crecimiento, dichos autores concluyen que para entonces el sector forestal sería un fijador neto de C atmosférico con un secuestro estimado de 200 Gg año⁻¹.

Tanto del punto de vista del cambio climático global como en lo relativo al manejo sustentable del recurso suelo, resulta importante contar con datos confiables del contenido de COS, sus tendencias en el corto y en el largo plazo en función de la evolución en el uso del suelo y de sus relaciones con los otros bancos o reservorios de C. Para las condiciones del Uruguay se procuró con este estudio aportar una primera contribución para iniciar una base de datos sobre el contenido de COS en el país, utilizable también a nivel internacional en los programas ya existentes con igual objetivo.

BIBLIOGRAFIA

- ALTAMIRANO, A.; DURAN, A.; TERRA, J.; y VICTORA, C. 1972. Estudio de Suelos. Arca Yaguarón, Departamento de Cerro Largo. MGAP/PELS. Montevideo.
- BAETHGEN, W. E.; MORON, A. y DIAZ-ROSELLO, R. M. 1994 Modelling Long-term Soil Organic Carbon Changes in Six Cropping Systems of SW Uruguay. Transactions 15th World Congress of Soil Science. pp 300-301. Acapulco, México, Julio 1994.

⁸ Según datos de los censos agropecuarios desde 1951 a 1990.

⁹ Taller Nacional sobre Mitigación de Gases de Efecto Invernadero - Sector Agropecuario (Montevideo, Dirección Nacional de Medio Ambiente, noviembre de 1996).

¹⁰ Gg = Gigagramo: g 10⁹

- DIAZ-ROSELLO, R. 1992. Evolución de la materia orgánica en rotaciones de cultivos con pasturas. Rev. INIA Inv. Agr., N°1, Tomo I:103-110
- DIAZ-ROSELLO, R. M. 1994 Long-term Changes of Soil Carbon and Nitrogen under Rotation of Legume Pastures and Arable Crops. Transactions 15th World Congress of Soil Science pp 304-305. Acapulco, México, Julio 1994.
- ESWARAN, H.; VAN DEN BERG, E. y REICH, P. 1993. Organic carbon in soils of the world. Soil Sci. Soc. Am. J. 57:192-194.
- ESWARAN, H.; VAN DEN BERG, E.; REICH, P. y KIMBLE, J. 1994. Global soil carbon resources. In: Soils and Global Change. Advances in Soil Science. Ed: Lal, R., Kimble, J.; Levine, E. y Stewart, B. A.; Lewis Publishers.
- HOUGHTON, R. A. 1995. Changes in the storage of terrestrial carbon since 1950. In: Soils and Global Change. Advances in Soil Science. Ed: Lal, R.; Kimble, J.; Levine, E. y Stewart, B. A.; Lewis Publishers.
- KAPLAN, A. y PONCE DE LEON, J. 1981. Caracterización de un Vertisol de la unidad "La Carolina" I. Propiedades físicas. Tesis Ing. Agr. Fac. Agron. Montevideo.
- KERN, J. S. y JOHNSON, M. G. 1993. Conservation tillage impacts on national soil and atmospheric carbon levels. Soil Sci. Soc. Am. J. 57:200-210.
- LAL, R.; KIMBLE, J.; LEVINE, E. y WHITMAN, C. 1995. World soils and greenhouse effect: an overview. In: Soils and Global Change. Advances in Soil Science. Ed: Lal, R.; Kimble, J.; Levine, E. y Stewart, B. A.; Lewis Publishers.
- MAP/DSF 1976. Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay a escala 1:1 000 000. Ministerio de Agricultura y Pesca, Dirección de Suelos y Fertilizantes. Montevideo.
- MAP/DSF 1976. Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay - Vol. 3 y apéndices. Ministerio de Agricultura y Pesca, Dirección de Suelos y Fertilizantes. Montevideo.
- MORON, A. 1994. La materia orgánica del suelo en los sistemas productivos. Manejo y Fertilidad de Suelos. Serie Técnica 42:5-10. INIA La Estanzuela.
- MORON, A. 1995. El rol del carbono en los sistemas productivos agropecuarios. II Curso de Actualización Técnica en Manejo y Fertilidad de Suelos. INIA La Estanzuela.
- MORON, A. y BAETHGEN, W. E. 1994. Soil Organic Matter Mineralization in Four Cropping Systems. Transactions 15th World Congress of Soil Science, pp 298-299. Acapulco, México, Julio 1994.
- SCHLESINGER, W. 1995. An overview of the carbon cycle. In: Soils and Global Change. Advances in Soil Science. Ed: Lal, R.; Kimble J.; Levine, J. y Stewart, B. A.; Lewis Publishers.
- SOMBROEK, W. G. 1969. Soil Studies in the Merim Lagoon Basin. CLM/PNUD/FAO. LM-131. Treinta y Tres.
- USDA/NRCS 1995. Soil Survey Laboratory Information Manual. National Soil Survey Center, Soil Survey Laboratory, Lincoln, Nebraska. Soil Survey Investigations Report N° 45. Version 1.0.