

Fraccionamiento químico de carbono en Acrisoles con horizontes sómbricos del Sur de Brasil

Chemical fractionation of carbon on Acrisols with sombric horizon from South Brazil

M. Velasco-Molina¹, J.A. Almeida², P. Vidal-Torrado³ & F. Macías¹

RESUMEN

Los horizontes sómbricos (subsuperficiales, oscuros y con mayor contenido de C) tienen una génesis escasamente conocida, pudiendo funcionar como sumideros de C en condiciones subtropicales. En dos Acrisoles del Estado de Santa Catarina (S-Brasil) se ha comprobado que la máxima acumulación de formas de C ligadas a Fe y Al extraíbles con pirofosfato y oxalato se presenta en horizontes sómbricos, pero que ésta no está relacionada con procesos de podsolización, andosolización, solodización o acumulación de C por condiciones de hidromorfia subóxica. La mayor parte de su C se presenta en formas de oxidabilidad intermedia (oxidable con $K_2Cr_2O_7$, en frío, pero no con $KMnO_4$ 0,2 M). Los porcentajes de C recalcitrante (no oxidable o difícilmente oxidable) son significativos (20-45%) pero variables a pequeñas distancias. Procesos ligados a cambios de uso del suelo con diferente localización del aporte de necromasa y efectos de incendios de la vegetación parecen ligados a su formación.

Palabras-clave: Brasil, C recalcitrante, formas de C, horizonte sómbrico, oxidabilidad de la materia orgánica.

ABSTRACT

Sombric horizons (subsurface, dark and with a high content of C) have a genesis poorly understood and can be conceived as a potential sink of C in subtropical environments. The maximum accumulation of C bound to Fe and Al extracted by pyrophosphate and oxalate solution was observed in sombric horizons of two Acrisols of Santa Catarina State (S-Brazil), but this is not indicative of podzolisation, andosolisation or solodisation processes or accumulation of C due hydromorphy conditions. Most of its C was found at intermediate wet oxidisable fraction (oxidisable with $K_2Cr_2O_7$, cold, but not by $KMnO_4$). Recalcitrant C (non-oxidisable and difficult oxidisable) was an important pool (20-45%), but variable into profile. Changes on land use with different input of necromass and vegetations fire effects seem to be involved in its formation.

¹ Dpto. Edafología y Química Agrícola, USC, Santiago de Compostela, 15782, España, E-mail: mv.molina@usc.es & felipe.macias.vazquez@usc.es; ²Dpto. Solos e Recursos Naturais, CAV - UDESC, Lages, 88520-000, SC - Brasil; ³Dpto. Ciência do Solo, ESALQ - USP, Piracicaba, 13418-900, SP - Brasil

Key-words: Brazil, C fractions, C recalcitrant, oxidisable organic matter, sombric horizon.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, se han incrementado los estudios sobre los sistemas edáficos como fuentes y sumideros de carbono con el objetivo de mitigar los efectos del calentamiento global y minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero resultantes de actividades antrópicas (Batjes, 1999; Lal & Kimble, 2000; Gerzabeck *et al.*, 2006). Estos estudios son particularmente interesantes en regiones tropicales y subtropicales, donde el grado de descomposición de la materia orgánica del suelo (MOS) puede ser 5 veces más elevado que en climas templados (Sánchez & Logan, 1992; Zech *et al.*, 1997). Uno de los horizontes presentes en suelos tropicales menos conocido y que podría tener un importante papel como sumidero de C en estas condiciones es el horizonte sómbrico. Las primeras descripciones fueron realizadas en el Congo (Sys *et al.*, 1961). La Soil Taxonomy, (USDA, 1999) los define como horizontes subsuperficiales, oscuros, de suelos minerales que se forman en condiciones de drenaje libre, conteniendo humus iluvial que no está asociado ni con aluminio ni con dispersión por sodio. Se asocian a condiciones de frío y humedad, en altiplanicies o montañas de regiones tropicales y subtropicales. Parecen horizontes enterrados, pero en contraste con muchos de éstos, los horizontes sómbricos tienden a mantener la forma del relieve superficial (WRB/FAO, 2006).

Aunque los horizontes sómbricos son bien conocidos en áreas elevadas de África Central, poco se sabe de su génesis (Frankart, 1983; Smith, 1986; Baert *et al.*, 2000). Faivre (1990) atribuye su origen en la cordi-

llera andina a una posible migración y precipitación de compuestos arcillo-húmicos; mientras que Caner *et al.* (2003) señalan, como explicación a su presencia en la India, a horizontes A enterrados que sufrieron intensos procesos de humificación seguidos de cambios en la vegetación. En el sur de Brasil, han sido observados horizontes sómbricos en distintos tipos de suelos y bajo diferente vegetación (Modenesi *et al.*, 1982; Volkoff *et al.*, 1984, Cararo & Almeida, 1996, Oenning, 2001). Volkoff & Cerri (1987) descartaron la explicación de un paleohorizontes A enterrado. En el Estado de Santa Catarina, horizontes oscuros subsuperficiales son encontrados con relativa frecuencia, en general como horizontes de transición AB y/o BA o en la parte superficial de horizontes Bt, pero con la diferencia de que aparecen a bajas altitudes, lo que resulta poco usual en los horizontes sómbricos descritos hasta ahora (Almeida *et al.*, 2009, Sobrinho *et al.*, 2009).

El objetivo del presente estudio es cuantificar el contenido de carbono en Acrisoles con horizontes sómbricos del sur de Brasil y caracterizar la importancia de las formas de C presentes, especialmente de las recalci-trantes, en función del grado de oxidabilidad aplicando estos datos, junto con los de las formas de Fe y Al, a la interpretación de los procesos de formación de los horizontes sómbricos.

MATERIAL Y MÉTODOS

Localización y caracterización del área de estudio

Se han utilizado dos suelos localizados en el Estado de Santa Catarina (S-Brasil, 28°40'48"S, 49°18'59"O) y desarrollados a partir de sedimentos limosos con intercalaciones de areniscas (DNPM, 1986),

que se han clasificado como Acrisoles (WRB/FAO, 2006). La vegetación natural es de bosque subtropical subperennifolio, dentro del dominio de la Mata Atlántica (SANTA CATARINA, 1986) caracterizada por un clima mesotérmico, con veranos calientes y sin estación seca definida (Cfa, Köppen), temperatura media anual de 16-18°C y precipitación de 1400 mm (EMBRAPA, 2004). Los dos suelos estudiados se encuentran próximos entre sí (<100 m), en la cima de una pequeña colina dentro de una zona de relieve suavemente ondulado (pendiente <6%); uno bajo un antiguo cultivo de eucalipto y el otro en una zona con diferentes cultivos herbáceos. Su principal característica es la presencia de horizontes B subsuperficiales, oscuros, semejantes a horizontes sómbrios. En el primer suelo (A-1) los horizontes oscuros se encuentran a una profundidad de 40-60 cm (horizonte B1) y 60-80 cm (horizonte B2). En el segundo (A-2) dichos horizontes se sitúan a 50-70 cm y 70-100 cm de profundidad (horizontes B1 y B2, respectivamente). Las principales características de los perfiles estudiados se recogen en la Tabla 1.

Métodos analíticos

Se tomaron muestras de suelo de cada horizonte. El color fue determinado en húmedo (Munsell). Cada muestra se secó al aire, tamizó (<2mm) y homogenizó. Los valores de pH se midieron en H₂O y KCl (relación suelo:agua 1:2,5). Para determinar el % de arcilla y limo se eliminó el material orgánico (con H₂O₂) y los óxidos de Fe y Al (con HCl). El contenido de C y N total (C_T y N_T) fue medido por combustión seca a alta temperatura (>1000°C) en analizador elemental (LECO-Truspec). La cuantificación del Fe, Al y C ligado al material húmico (Fe_p, Al_p y C_p) fue realizada mediante extracción con pirofosfato sódico (Bascomb, 1968) determinándose los elementos metálicos extraídos por absorción atómica. El C fue digerido en solución ácida de K₂Cr₂O₇ y cuantificado por valoración (Bascomb, 1968). Además, se extrajeron los óxidos de Fe y Al con ditionito-citrato-bicarbonato, obteniendo las formas cristalinas de estos elementos (Fe_d y Al_d; Mehra & Jackson, 1960), y solución de oxalato de amonio (Fe_o y Al_o; Schwertmann, 1964), cuantificados todos por espectrometría de plasma (ICP-OES).

Tabla 1 – Principales características físico-químicas de los perfiles estudiados

Perfil	Horizonte	Profundidad(cm)	Color húmedo	pH		C _T (%)	C/N	Arcilla ---- % ----	Limo	Densidad (Mg m ⁻³)
				H ₂ O	KCl					
	Ap	0-10	5YR4/6	5,4	4,3	1,34	13,3	17,4	10,0	1,29
	A	10-40	5YR 4/8	4,6	3,7	0,81	8,7	24,3	6,3	1,27
A-1	B1	40-60	5YR 3/6	4,6	3,7	1,45	12,4	52,0	4,5	1,14
	B2	60-80	2,5YR 3/4	4,6	3,7	1,35	14,5	56,3	5,4	1,13
	Bt-árgico	> 100	2,5YR 4/8	4,5	3,7	0,59	12,2	57,6	4,5	1,09
	Ap	0-20	7,5YR 5/4	4,9	3,8	2,40	13,7	23,2	7,9	1,14
	Ah	20-50	10YR 4/6	4,9	3,9	1,67	13,5	34,3	2,6	1,15
A-2	B1	50-70	7,5YR 3/4	4,8	3,9	1,74	16,8	38,9	4,4	1,11
	B2	70-100	7,5YR 4/6	4,8	3,8	0,98	13,1	44,8	6,0	1,12
	Bt-árgico	100-150	5YR 5/6	4,8	3,9	0,40	12,4	35,6	6,2	1,13

Fraccionamiento químico del carbono

Las formas de carbono presentes en el suelo, se establecieron según el método propuesto por Macías *et al.* (2004) para las formas oxidables. Se parte de la hipótesis de que la oxidación, ya sea por procesos abióticos o metabólicos, es el principal mecanismo de mineralización del carbono edáfico, por lo que las diferencias en el grado de oxidabilidad de las diferentes formas de materia orgánica por condiciones oxidantes de menor a mayor potencial oxidativo son indicativas de su labilidad o recalcitrancia. Para ello, se estudia la resistencia química del C a la siguiente serie de intensidad de oxidación creciente: digestión en solución de KMnO_4 , 0,2 M (OQ_{perm}) (Blair *et al.*, 1995, Tirol-Padre & Ladha, 2004), en solución ácida de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, 1,8N, en frío (temperatura ambiente) (OQ_{25}) y en caliente (105°C) (OQ_{105}) (Walkley & Black, 1934, modificado) y combustión a 1000°C en analizador elemental (considerado como el C_T), estableciendo, por diferencia, los contenidos de C de diferente labilidad frente a la oxidación según se indica en la Tabla 2.

Tabla 2 - Fracciones químicas de C según su oxidabilidad

Fracción de C		Metodología
C fácilmente oxidable	C_{FO}	OQ_{perm}
C de oxidabilidad intermedia	C_{OI}	$\text{OQ}_{25} - \text{OQ}_{\text{perm}}$
C difícilmente oxidable	C_{DO}	$\text{OQ}_{105} - \text{OQ}_{25}$
C oxidable total	C_{OT}	OQ_{105}
C no oxidable	C_{NO}	$\text{C}_T - \text{C}_{\text{OT}}$
C Total	C_T	combustión 1000°C

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características físicas y químicas de los suelos estudiados

Los suelos estudiados son suelos bien desarrollados, de perfil ABC, bien drenados y de reacción ácida, que presentan un claro incremento de arcilla con la profundidad (Tabla 1) y cumplen los criterios de definición de Acrisoles de la WRB, (2006). Su contenido de C es, en general, bajo, pero el color oscuro que se prolonga, e incluso acentúa, en los horizontes B subsuperficiales, está claramente relacionado con un incremento del contenido de C en profundidad (especialmente aparente en el perfil A-1) y con el mantenimiento de contenidos superiores al 1% de C hasta profundidades del orden de 1 m. La relación C/N, variable entre 12 y 16, no oscila excesivamente con la profundidad, a pesar de las variaciones mostradas por el C_T y el C extraíble con pirofosfato, cuyo máximo se asocia claramente con los horizontes sómbricos.

Formas de Al y Fe indicativas de procesos edáficos.

Los contenidos de hierro y aluminio extraíbles por pirofosfato, generalmente atribuidos a formas ligadas a la materia orgánica (aunque este reactivo también puede extraer formas inorgánicas de baja cristalinidad), presentan su máximo coincidente con el máximo de C_p (Figuras. 2, 3 y 4). Esta característica podría hacer pensar en un proceso de podsolización, con migración conjunta de complejos organoférricos y organoaluminicos. Sin embargo, no parece posible la existencia de este proceso, que explicaría la acumulación de materia orgánica subsuperficial, ya que no hay otras evidencias morfológicas, y, además, la iluviación de materia

orgánica debería estar inhibida por el alto contenido de partículas finas (limos y arcillas), el pH no excesivamente ácido y la abundancia de formas de Fe y Al con grados de cristalinidad variable, todo lo cual son condiciones favorables a la rápida flocula-

ción de la materia orgánica y no a procesos de iluviación podsolizante.

Las formas de Al_o y Fe_o (Figuras 2 y 3), también presentan su máximo en los horizontes subsuperficiales oscuros, con una pequeña variación en el Fe_o de uno de los

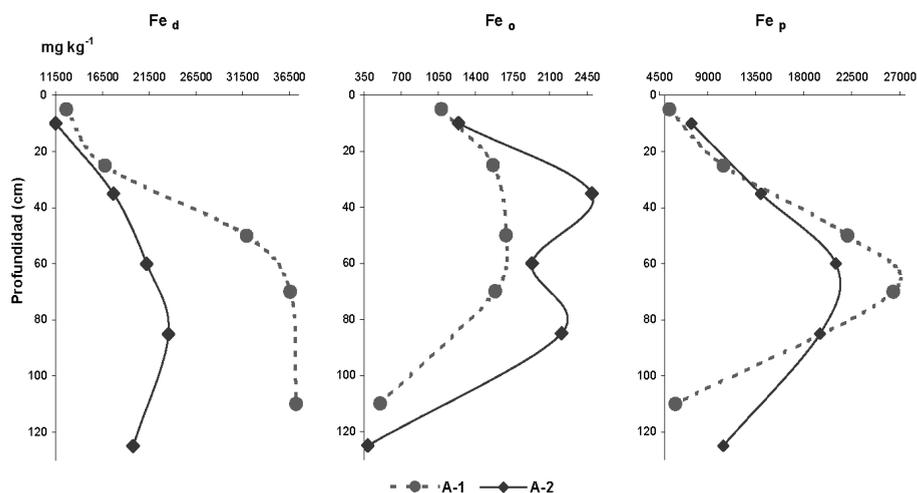


Figura 2 - Contenido de Fe (mg kg^{-1}) extraído con ditionito-citrato-bicarbonato (Fe_d), oxalato de amonio (Fe_o) y pirofosfato sódico (Fe_p) en los perfiles A-1 y A-2

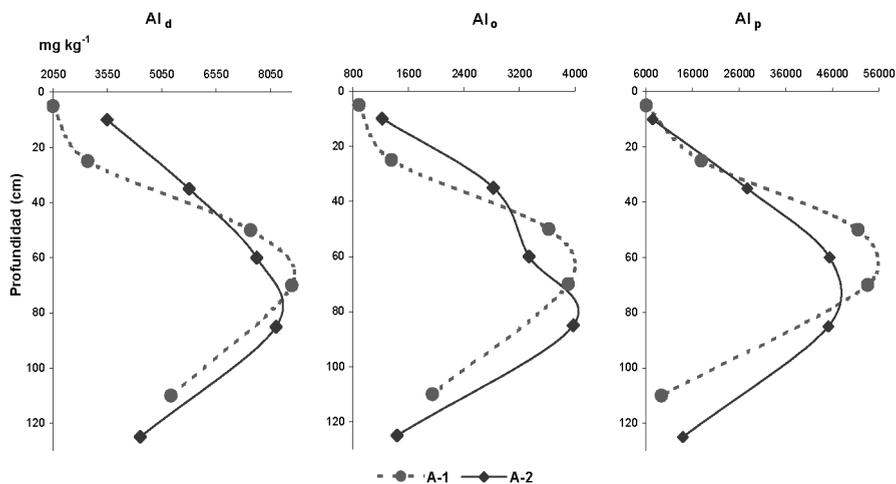


Figura 3 - Contenido de Al (mg kg^{-1}) extraído con ditionito-citrato-bicarbonato (Al_d), oxalato de amonio (Al_o) y pirofosfato sódico (Al_p) en los perfiles A-1 y A-2.

suelos. La existencia de propiedades ándicas en un horizonte subsuperficial podría justificar una elevada fijación de materia orgánica pero eso tampoco parece aplicable a los suelos estudiados, dado que el índice $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ es inferior a 0,5 (Tabla 3), muy alejado del 2% que se requiere para las propiedades ándicas (WRB, 2006), e incluso del 1% requerido para la definición de los subgrupos ándicos (USDA, 1999). Así pues, la acumulación de complejos organometálicos subsuperficial no puede relacionarse con propiedades ándicas producidas por el aporte de materiales téfricos.

Los valores de pH (ácidos) y la morfología, con ausencia de coloraciones que indiquen propiedades redoximórficas, también descarta un proceso de movilización ligado a procesos de alcalinólisis con

solodificación, y los de acumulación de materiales límnicos en procesos hidromórficos de condiciones subóxicas, debiendo concluirse que en el proceso de acumulación de materia orgánica deben descartarse todos los procesos conocidos de iluviación de materia orgánica en procesos edáficos.

Según Almeida *et al.* (2009), el hecho de que las concentraciones de Fe_p y Al_p sean substancialmente mayores que las de Fe_0 y Al_0 evidencia que las formas de Fe y Al no cristalino se encuentran, principalmente, asociadas a compuestos orgánicos, lo que se confirma por la coincidencia en la zona de acumulación del C_p , Al_p y Fe_p . Por otra parte, la baja relación entre las formas de Fe_0 respecto a las de Fe_d (< 15%) indica que la mayor parte del hierro se presenta en formas cristalinas.

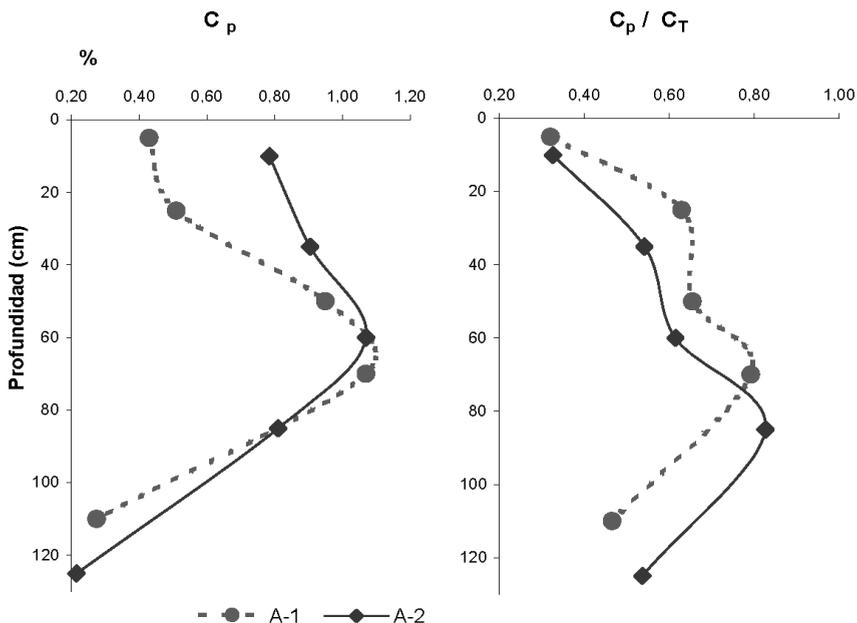
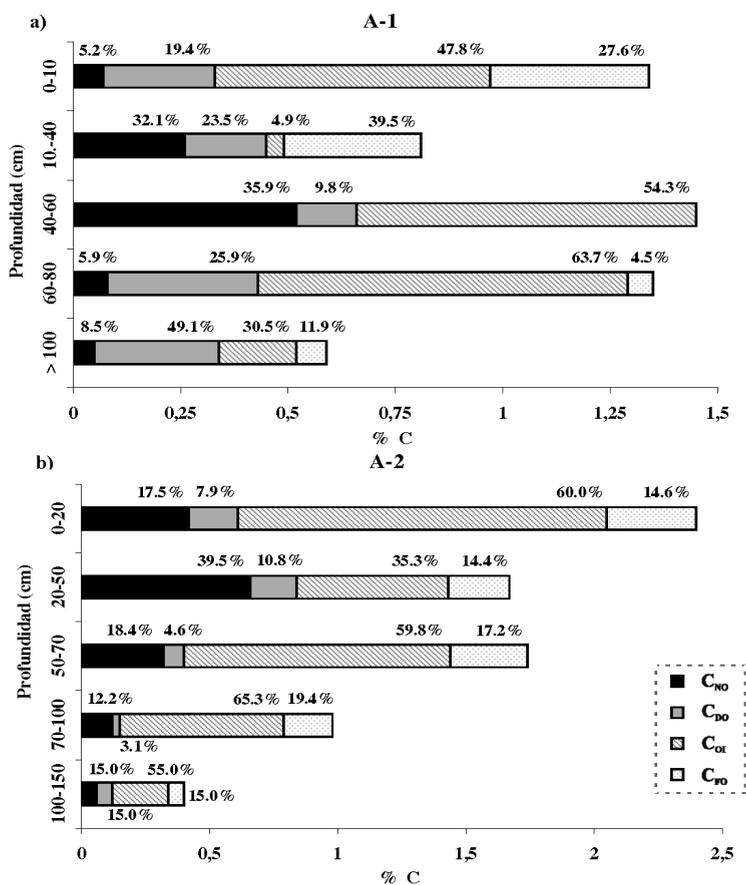


Figura 4 - Contenido de C (%) extraído con pirofosfato sódico y relación C_p/C_T

Tabla 3 - Contenido de Fe y Al determinados por extracción con ditionito-citrato-bicarbonato (Fe_d , Al_d), oxalato de amonio (Fe_o , Al_o) y pirofosfato sódico (Fe_p , Al_p)

Perfil	Horz.	Prof. cm	Fe_d -- mg kg ⁻¹ --	Fe_o	Fe_o/Fe_d %	Fe_p ----- mg kg ⁻¹ -----	Al_d	Al_o	$Al_o+1/2Fe_o$ %	Al_p mg kg ⁻¹
A-1	Ap	0-10	12667	1079	8,5	5422	2049	889	0,14	6118
	A	10-40	16804	1565	9,3	10507	3012	1356	0,21	17975
	B1	40-60	31973	1689	5,3	22117	7506	3624	0,45	51555
	B2	60-80	36616	1585	4,3	26401	8647	3904	0,47	53599
	Bt	> 100	37255	504	1,4	5980	5310	1947	0,22	9419
A-2	Ap	0-20	11503	1240	10,8	7485	3540	1225	0,18	7535
	Ah	20-50	17682	2494	14,1	13984	5807	2826	0,41	27768
	B1	50-70	21264	1934	9,1	21018	7675	3338	0,43	45426
	B2	70-100	23610	2209	9,4	19545	8205	3975	0,51	45124
	Bt	100-150	19788	388	2,0	10467	4459	1436	0,16	14008

**Figura 5** – Contenido de C_T y distribución de las formas de C en A-1 (a) y A-2 (b)

Fraccionamiento químico del carbono

La concentración de C obtenida con los diferentes agentes oxidantes empleados mostró, a lo largo del perfil, un comportamiento general similar al del C_T , acumulándose en los horizontes subsuperficiales oscuros, pero sin que puedan realizarse conclusiones definitivas.

El porcentaje de formas de C fácilmente oxidables (C_{FO}), en el suelo A-1, desciende con la profundidad (Figura 5), poniendo de manifiesto que las formas más lábiles están relacionadas con el aporte actual de materia orgánica fresca. En los horizontes sómbricos su porcentaje es muy reducido (< 5%); sin embargo, en el suelo A-2, el porcentaje máximo de C_{FO} se produce en el horizonte sómbrico. Estas diferencias podrían ser atribuidas al tipo, intensidad y localización del aporte de necromasa reciente (superficial o rizosférico), asociado al diferente uso del suelo. Las formas de oxidabilidad intermedia (C_{OI}), son mayoritarias en todo el suelo, sin que existan diferencias significativas entre los horizontes superficiales y los subsuperficiales oscuros, descendiendo a valores mínimos en los horizontes inferiores. Las formas más recalcitrantes, las formas de C_{DO} y de C_{NO} , se encuentran en porcentajes importantes en todo el perfil, descendiendo fuertemente con la profundidad e indicando una clara diferenciación entre los horizontes profundos árgicos y los sómbricos, que, al menos desde el punto de vista textural, funcionan como la parte superior del árgico.

CONCLUSIONES

La mayor parte del C de los horizontes sómbricos se encuentra ligada a los componentes oxidables con $K_2Cr_2O_7$ en

frío y $KMnO_4$, donde también aparecen los máximos de C extraíble con pirofosfato; es decir, el conjunto de formas lábiles frente a la oxidación que parecen estar más claramente relacionadas con la intensidad de los aportes recientes de necromasa y con el C humificado. Las formas de C no oxidables y las difícilmente oxidables de los horizontes sómbricos representan porcentajes muy diferentes en los suelos estudiados, por lo que puede concluirse que en los horizontes sómbricos existen formas recalcitrantes, pero que su concentración está afectada por el tipo de uso del suelo. También resulta significativo que en los horizontes árgicos, más profundos, estas fracciones pueden representar un porcentaje significativo del total de materia orgánica existente pero, dado su bajo contenido total, resulta poco relevante desde el punto de vista del secuestro de C.

Los datos analíticos obtenidos permiten concluir que la acumulación de C de los horizontes sómbricos no se produce por procesos de podsolización, andosolización de cenizas o materiales téfricos aportados, solodización con dispersión de la materia orgánica por medio de sodio o depósitos de materiales límnicos o similares en condiciones de hidromorfía subóxica. En cambio, hay importantes diferencias a corta distancia, lo que podría estar relacionada con las condiciones de aporte de la necromasa, debiendo realizarse más estudios de la naturaleza de la vegetación original, la zona de aporte (superficie o rizosfera), y la importancia y naturaleza de los incendios forestales (fuegos de copa, combustión en profundidad, aporte de ácidos piroleñosos o incluso consecuencias de la alcalinización producida por las cenizas sobre la materia orgánica preexistente, etc.). La vegetación y uso del suelo actual enmascara gran parte de estos procesos.

AGRADECIMIENTOS

A Carmen P. L. (USC) y Petra M. (TUM) por su apoyo dentro del laboratorio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, J.A., Cararo, D.C. & Uberti, A. 2009. Genesis of the sombric horizon in Ultisols (red Argisols) in Southern Santa Catarina, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33: 405-416.
- Baert, G., Imerzoukene, P., Jamagne, M., Ndayiradjije, S. & Pineros Garcia, J.D. 2000. Carte des sols du Rwanda au 1:50,000. Université de Gand. Belgique.
- Bascomb, C.L. 1968. Distribution of pyrophosphate extractable iron and organic carbon in soils of various groups. *Journal of Soil Science*, 19: 251-256.
- Batjes, N.H. 1999. Management option for reducing CO₂ concentration in the atmosphere by increasing carbon sequestration in the soil. ISRC-Tech. Papers, 30.
- Blair, G.J., Lefroy, R.D. & Lisle, L. 1995. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Soil Research*, 46: 1459-1466.
- Caner, L., Toutain, F., Bourgeon, G. & Herbillon, A.J. 2003. Occurrence of sombric-like horizon subsurface A horizons in some andic soils of the Nilgiri Hills (Southern India) and their paleoecological significance. *Geoderma*, 117: 251-265.
- Cararo, D.C. & Almeida, J.A. 1996. Origem do horizonte subsuperficial escuro em podzólicos da região de Içara, SC. I Reunião Sul Brasileira de Ciência do Solo, Anais. Lages, SC. v.1. pp.129-131.
- DNPM. Departamento Nacional da Produção Mineral. 1986. Mapa geológico do Estado de Santa Catarina. Ministério das Minas e Energia.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2004. Solos do Estado de Santa Catarina. Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento nº 46.
- Faivre, P. 1990. L'Horizon sombrique: une ébauche d'horizon organo-argilique. *Pédologie*, XL-3: 273-297.
- Frankart, R. 1983. The soils with sombric horizons in Rwanda and Burundi. In F.H. Beinroth, H. Neel & H. Eswaran (eds) *Proceedings of the Fourth International Soil Classification Workshop, Rwanda. Part I: Papers*, pp.48-64. Brussels.
- Gerzabek, M.H., Antil, R.S., Kögel-Knabner, I., Knicker, H., Kirchmann, H. & Haberhauer, G. 2006. How are soil use and management reflected by soil organic matter characteristics: a spectroscopic approach. *Eur. J. Soil Science*, 57: 485-494.
- Lal, R. & Kimble, J.M. 2000. Pedogenic carbonates and the global C cycle. In R. Lal *et al.* (eds) *Global climate change and pedogenic carbonates*, pp. 1-25. FL-USA.
- Macías, F., Rodríguez-Lado, L., Pena, J. & Camps, M. 2004. El sumidero de C de los suelos de Galicia. *Edafología*, 11-3.
- Mehra, O.P. & Jackson, M.L. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Proceedings 7th National Conference. Clays and Clay Minerals*, pp. 317-37. Washington, USA.
- Modenesi, M.C., Matsui, E. & Volkoff, B. 1982. Relação ¹³C/¹²C nos horizontes húmiferos superficiais e nos horizontes escuros profundos dos solos de campo e mata da região de Campos do Jordão, São Paulo, Brasil. *Proceedings Regional*

- Colloquium in Soil Organic Matter, pp. 155-160. CENA-PROMOCET. Brasil.
- Oenning, I. 2001. Gênese e classificação de solos argilosos com horizonte B escurecido do Sul do Brasil. Universidade Federal de Viçosa. 107p. Dissertação de Mestrado.
- SANTA CATARINA, 1986. Atlas de Santa Catarina. Gabinete de Planejamento e Coordenação Geral. Subc. Estatística, Geografia e Informática. Rio Janeiro. 176p.
- Sánchez, P.A. & Logan, T.J. 1992. Myths and science about the chemistry and fertility of soil in the tropics. In R. Lal & P.A. Sánchez (eds) Myths and science of soil in the tropics, pp. 38-59. S.S.S.A., Special Publication, 29. Madison, WI, USA.
- Schwertmann, U. 1964. Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalatlösung. Zeitschrift für Pflanzenernährung, 105: 194-202.
- Smith, G. 1986. The Guy Smith Interviews: Rationale for concepts in Soil Taxonomy: sombric horizon. In T.R. Forbes (ed) SMSS. Technical Monograph, 11: 92-93.
- Sobrinho, J.B., Almeida, J.A. & Erhart, J. 2009. Mineralogia, propriedades químicas e classificação de solos das Serras do Leste Catarinense. R.Ci.Agroveterin., 8: 9-24.
- Sys, C., Van Wambeke, A., Frankart, R., Gilson, P., Jongen, P., Pérot, A., Berce, J.M. & Jamagne, M. 1961. La cartographie des sols au Congo. Publication de l'Institut National pour l'Etude Agronomique du Congo (INEAC), 66. Brussels, Belgium.
- Tirol-Padre, A. & Ladha, J.K. 2004. Assessing the reliability of permanganate-oxidizable carbon as an index of soil labile carbon. S.S.S.A.J., 68: 969-978.
- USDA, 1999. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. Agriculture Handbook 436, Washington, DC, USA.
- Volkoff, B. & Cerri, C.C. 1987. Carbon isotopic fractionation in subtropical Brazilian grassland soils. Comparison with tropical forest soils. Plant and Soil, 102: 27-31.
- Volkoff, B., Cerri, C.C. & Melfi, A.J. 1984. Húmus e mineralogia dos horizontes superficiais de três solos de campo de altitude dos Estados de Minas Gerais, Paraná e Santa Catarina. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 8: 277-283.
- Walkley, A. & Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science, 37: 29-38.
- WRB/FAO. 2006. World Reference Base for Soil Resources 2006. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome.
- Zech, W., Senesi, N., Guggenberger, G., Kaiser, K., Lehmann, J., Miano, T., Miltner, A. & Schroth, G. 1997. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. Geoderma, 79: 117-161.