

Juan F. GALLARDO LANCHO (Ed.)

LA CAPTURA DE CARBONO EN ECOSISTEMAS TERRESTRES IBEROAMERICANOS

RED POCAIBA

**Red Iberoamericana
de Física y Química Ambiental**

<www.sifyqa.org.es>

**SOCIEDAD IBEROAMERICANA DE FÍSICA Y QUÍMICA AMBIENTAL
SALAMANCA (ESPAÑA)**

COORDINADOR

Juan F. GALLARDO LANCHO (Presidente SiFyQA).

REVISORES

Han actuado como revisores (por pares) anónimos de los artículos publicados los siguientes científicos, a los que se hace constancia de agradecimiento: Adriana ABRIL, Julio CAMPO, Carlos E. P. CERRI, Jorge D. ETCHEVERS, Juan A. GALANTINI, Juan F. GALLARDO, Felipe GARCIA-OLIVA, A. Afonso MARTINS, Agustín MERINO, Raúl PONCE, Christina SIEBE y Belén TURRION.

Esta obra es producto de la Red POCAIBA, integrada dentro de la **Red Rifyqa** (Red Iberoamericana de Física y Química Ambiental), y del apoyo de la S.E.U.I. (Ministerio de Educación y Ciencia español).

© **SiFyQA** <www.sifyqa.org.es>

RESERVADOS TODOS LOS DERECHOS.
PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE ESTA
OBRA POR CUALQUIER PROCEDIMIENTO, INCLUIDA
LA FOTOCOPIA, SIN PERMISO ESCRITO DEL EDITOR.

I.S.B.N.: 978-84-611-9622-7
Depósito legal: S. 1821-2007

GRÁFICAS CERVANTES, S.A.
Ronda de Sancti-Spíritus, 9-11
37001 SALAMANCA (España)

Impreso en España
Printed in Spain



BALANCE DE CARBONO DEL SUELO SEGÚN EL USO DE LA TIERRA EN LA REGIÓN ÁRIDA-SEMIÁRIDA CENTRAL DE ARGENTINA

A. Abril y L. Noé

Microbiología Agrícola. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina. <aabril@agro.uncor.edu>

Resumen: Es ampliamente aceptado que una gran proporción del CO₂ atmosférico proviene de la degradación del suelo debido a disturbios antrópicos (fuego, deforestación, conversión de bosques en cultivos, etc.). La región árida-semiárida central de Argentina es muy extensa y en los últimos años ha sufrido un importante cambio en el uso de la tierra pasando de sitios sobrepastoreados a campos agrícolas o forrajeros. El objetivo de este trabajo fue evaluar el balance de C del suelo (relación CO₂/[C del suelo + C de los restos vegetales superficiales]) en sitios con diferentes manejos productivos con la finalidad de cuantificar su importancia en términos de contribución a las emisiones de CO₂ a la atmósfera y para establecer criterios de manejo y restauración de áreas degradadas. Se procesaron resultados de 136 análisis de suelo realizados en los últimos 16 años en sitios con diferentes sistemas productivos en tres ecoregiones: a) Chaco Semiárido: sobrepastoreo, desmontes para agricultura (convencional o sostenible) y desmontes para cultivo de pasturas; b) Chaco Árido: sobrepastoreo; y c) Monte: sobrepastoreo y agricultura bajo riego. En todos los ambientes originales y en las pasturas del Chaco Semiárido el balance de C fue muy estable (valores = 1: pérdidas balanceadas con los ingresos), mientras que los sitios altamente modificados presentaron un balance de C negativo (valores >1: pérdidas mayores a los ingresos), excepto la situación con agricultura sostenible en el Chaco Semiárido y el sobrepastoreo del Monte que presentaron balances positivos (valores <1). El sitio sobrepastoreado del Chaco Árido es el que presentó mayor rango de variación entre los datos (valores entre 0,2 y 1,9) a causa de las condiciones climáticas extremas de los ambientes de desierto. Se concluye que el balance de C del suelo en la región árida-semiárida central de Argentina no sigue un patrón general según el uso de la tierra, sino que responde a la combinación entre el tipo de manejo y las condiciones climáticas dentro del gradiente de déficit hídrico.

Palabras clave: Chaco, Monte, CO₂, Materia orgánica del suelo, Hojarasca.

Soil-C balance and land use in the arid area of Central Argentina

Abstract: It has been widely documented that a great proportion of the CO₂ released into the atmosphere is a consequence of soil degradation driven by anthropogenic disturbances (fire, deforestation, conversion of forests into croplands, etc.). The vast arid-semiarid region of central Argentina has been subjected to important changes in land use, ranging from overgrazed areas to agricultural or area rangelands in the last years. In this study we evaluated the soil C balance (CO₂/[soil C + litter C ratio]) at sites under different management systems with the aim of quantifying the importance of soil C in terms of its contribution to atmospheric CO₂ emissions and of defining criteria for the management and restoration of degraded areas. Results of 136 soil analyses conducted in the last 16 years at sites with different land use systems in three ecoregions were processed: a) Semiarid Chaco: overgrazing, land clearing for conventional or sustainable agriculture, and land clearing for pastures; b) Arid Chaco: overgrazing; and c) Monte: overgrazing and irrigated agriculture. At all the undisturbed sites and in the pastures of the Semiarid Chaco, C balance was very stable (values = 1: balanced losses and gains), whereas at the highly modified sites, C balance was negative (values >1: losses higher than gains), except for the sustainable agriculture situation at the Semiarid Chaco and the overgrazed situation at Monte, where C balance was positive (values <1). Data obtained in the overgrazed site in the Arid Chaco exhibited the greatest variation range (values between 0,2 and 1,9) due to the severe climatic conditions in the desert environments. Soil C balance in the arid-semiarid region of central Argentina does not only respond to land use, but to the combination of type of management and climatic conditions along the water deficit gradient.

Key words: Chaco, Monte, CO₂, Soil organic matter, Litter.

INTRODUCCIÓN

La materia orgánica del suelo es la mayor fuente/depósito de C en los ecosistemas terrestres (Schlesinger 1993; Vitousek *et al.* 1997; Maestre y Cortina 2003; Lal 2004). Según Houghton (1995), los suelos del mundo contienen unos 1400-1500 Pg (10¹⁵ g) de C orgánico, unas tres veces el contenido de C en la vegetación. La cantidad de C almacenado en el suelo depende del balance que se establece entre el aporte de C por los restos vegetales y las pérdidas de CO₂ producido por la actividad biológica (Fernández *et al.* 1997; Tiessen *et al.* 1998; Abril y Bucher 2001; Reeder *et al.* 2001).

En suelos explotados por el hombre mucho del CO₂ liberado a la atmósfera es resultado de las prácticas de manejo, principalmente por deforestación, quemas, laboreos y sobrepastoreo (Jackson *et al.* 2002; Abril *et al.* 2005a). Debido a ello se ha hecho un esfuerzo considerable para evaluar el balance de C en los ecosistemas productivos, particularmente en las regiones tropicales y subtropicales que fueron transformadas de selvas a tierras de cultivo y pasturas (Fernández *et al.* 1997; Neill *et al.* 1998).

Las regiones áridas-semiáridas ocupan casi la mitad de las tierras del Planeta. Según estimaciones de los expertos de las Naciones Unidas el secuestro anual de C en las tierras áridas podría ser de aproximadamente 1,0 a 1,3 Gt (Squires 1998). Sin embargo, en la mayoría de los casos las tierras áridas están sometidas a explotación humana con fuerte tendencia a la desertificación (Xie y Steinberger 2001; Feng *et al.* 2002). Por tales motivos se requiere un claro entendimiento del balance de C en estas regiones, no sólo desde el punto de vista de sus contribuciones de CO₂ a la atmósfera, sino también por su importancia en términos de manejo y restauración de áreas degradadas.

La dinámica del C en zonas áridas es muy compleja debido a que el clima posee alta variabilidad estacional e interanual, lo que provoca pulsos en la actividad biológica, afectando el balance emisión/secuestro de C (Abril y Bucher 1999; Maestre y Cortina 2003; Austin *et al.* 2004). Asimismo, el uso de la tierra es muy cambiante dependiendo de esos ciclos de humedad y las posibilidades de acceso al agua. Todo ello hace que las regiones áridas tengan dinámicas de C diferentes lo que impide la generalización de la escasa información disponible (Xie y Steinberger 2001; Feng *et al.* 2002).

El área central de Argentina es un claro ejemplo de esta situación. Argentina posee un área central árida-semiárida muy extensa (Cabrera 1976) que varía en aridez de NE a SO (700 a 100 mm a⁻¹ de precipitación anual) y que históricamente ha sido explotada dependiendo de la accesibilidad (camino y ferrocarril) y la disponibilidad de agua (Bucher 1982). En los últimos años, debido a la presencia de un ciclo de mayor humedad y a mejores condiciones del mercado internacional, muchas zonas han sufrido grandes modificaciones pasando de sitios sobrepastoreados a campos agrícolas o forrajeros.

Estos grandes cambios en el uso de la tierra han tenido un fuerte impacto en el balance de C que no ha sido suficientemente analizado. Si bien existe información aislada correspondiente a diferentes áreas y sistemas productivos (Abril y Bucher 2001; Abril *et al.* 2005a; Abril y Noé 2007), no se dispone de un patrón general según el uso de la tierra para la zona árida-semiárida de Argentina que permita estimar la magnitud del impacto ni la tendencia a ganar o perder C según las prácticas de manejo.

El objetivo de este trabajo fue determinar el balance de C del suelo en la región árida-semiárida central de Argentina, procesando la información disponible sobre contenido de C de los restos vegetales y el suelo, y la emisión de CO₂ en campos con diferentes manejos productivos. Se pretende también, a partir de los resultados, establecer pautas generales sobre el impacto del uso de la tierra en zonas áridas que permitan mejorar la sustentabilidad de la región y reducir el aporte de CO₂ a la atmósfera.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se procesaron resultados obtenidos en 136 casos analizados durante un periodo de 16 años en la zona árida-semiárida central de Argentina que incluye tres ecorregiones claramente delimitadas: Chaco Semiárido, Chaco Árido y Monte (Figura 1).

El Chaco Semiárido es un ecosistema de bosque xerófito subtropical donde los árboles dominantes son *Schinopsis quebracho-colorado* (quebracho colorado) y *Aspidosperma quebracho-blanco* (quebracho blanco) con un denso estrato arbustivo (3-4 m de alto) dominado por especies de *Acacia*, *Mimosa*, *Prosopis* y *Celtis*, y una cubierta del suelo de pastos y cactáceas (Bucher 1982). En el Chaco Semiárido las precipitaciones varían entre 500 y 700 mm a⁻¹ según los años y están concentradas en el verano (Octubre-Marzo). La estación seca se extiende de abril a Septiembre con balance hídrico negativo que provoca déficit de agua en el perfil del suelo. La temperatura media del mes más cálido (enero) es de 28,8 °C y la del mes más frío (Julio) 16,6 °C. Los suelos son profundos, de origen eólico y fluvial, de textura franca, neutros, no salinos ni sódicos y con alto contenido de materia orgánica (3,5%; Abril y Bucher 1999).

El Chaco Árido es un bosque chaqueño marginal donde los árboles dominantes *Aspidosperma quebracho-blanco* y *Prosopis flexuosa* son de escaso porte y con un abundante estrato arbustivo de 2 a 3 m de altura, dominado por especies de *Larrea*, *Celtis*, *Mimozyanthus* y *Acacia*. En los lugares abiertos, el suelo se cubre de un estrato herbáceo donde predominan gramíneas perennes de crecimiento estival como *Trichloris crinita*, *Gouinia paraguayensis*, *Setaria* spp. y *Pappophorum* spp. (Cabido *et al.* 1993). El promedio de lluvias en el Chaco Árido varía entre 400 y 500 mm a⁻¹ concentrados en el verano (Diciembre-Marzo) con una estación seca más larga y con mayor déficit hídrico que el Chaco Semiárido. La temperatura media es de 24° C en Enero y de 10° C en Junio. Los suelos se clasifican como *Ustifluent mólico*, son de origen aluvial, de pH neutro, textura franco arenosa, no salinos ni sódicos y con un contenido de materia orgánica cercano al 2,5% (Abril *et al.* 2005a)

El Monte es un extenso arbustal dominado por *Larrea* spp, intercalado con algunos árboles de *Prosopis flexuosa* (Cabrera 1976). El estrato



Figura 1. Ecorregiones de la región árida-semiárida central de Argentina: Chaco Semiárido, Chaco Árido y Monte.

herbáceo está constituido por pastos perennes de crecimiento estival como *Pappophorum caespitosum*, *Digitaria californica*, *Trichloris crinita*, *Aristida mendocina* y *Sporobolus cryptandrus*. Los suelos son arenosos de origen eólico y fluvial, salinos, ligeramente alcalinos y con escaso contenido de materia orgánica (1,5%; Abril *et al.* en prensa). El clima del Monte

es templado y seco con un régimen de precipitaciones con variaciones estacionales e interanuales. La media anual de precipitación varía entre 100 y 300 mm a⁻¹ y existe déficit hídrico durante todo el año. La temperatura media anual es de 15,6° C, con una media máxima en verano de 23,8° C y una media de invierno de 7,6° C (Claver y Roig-Juñent 2001).

En cada ecorregión se seleccionaron resultados de análisis de suelos de sitios con diferentes situaciones de manejo y de sitios no alterados representativos de las condiciones originales de cada ecosistema. Las situaciones analizadas fueron:

Chaco Semiárido

1. Bosque original (11 casos): Estación Biológica Los Colorados (Departamento Anta, Provincia de Salta); 24° 43' S y 63° 17' O, cerrada a la explotación forestal y ganadera en el año 1960 (ChS-BO).
2. Sobrepastoreo (7 casos): Sitios que soportan tala y continuo y severo pastoreo principalmente por vacas y cabras desde hace 50 años. Los sitios están ocupados por campesinos en condiciones de extrema pobreza, con un pozo artesiano como única fuente de agua para ellos y el ganado. El ganado está libre, sin ningún tipo de manejo y la vegetación está fuertemente degradada. Los sitios presentan el suelo desnudo con escasos árboles, y arbustos no palatables y ausencia total de pastos y hierbas (ChS-SP).
3. Desmonte total con quema y laboreo (7 casos): A partir de la década de 1980 muchos sitios de bosque original se han desmontado con maquinaria pesada (topadoras y cadenas). El material arrancado es acordonado y quemado y el suelo sometido a un fuerte laboreo para distribuir las cenizas y proceder a la siembra de un cultivo extensivo, generalmente soja (ChS-DQL).
4. Desmonte total con quema y siembra de pastos para ganadería (5 casos): Este manejo se comenzó a aplicar a partir de la década de 1990. El bosque original es desmontado de manera similar al caso anterior, salvo que se reemplaza el cultivo anual por la siembra de gramíneas estivales perennes para uso ganadero de alta eficiencia y rentabilidad (ChS-DPG).
5. Desmonte total y siembra directa con rotación de cultivos (22 casos): Desde fines de la década de 1990 se introdujo en el Chaco la práctica de la siembra sin laboreo, favorecida por un ciclo de mayores precipitaciones que permitieron los cultivos en secano. El desmonte se realiza también con maquinaria pesada, pero no se elimina el material leñoso sino que la madera de valor económico se extrae manualmente y el material fino remanente es triturado con rolo a medida que se siembra el cultivo. Son campos con alta tecnología

agrícola que realizan fertilización y rotación de cultivos estivales, generalmente soja-maíz (**ChS-DSDR**).

Chaco Árido

1. Bosque original (18 casos): *Reserva Provincial Chancaní* (Departamento Pocho, Provincia de Córdoba); 32° 24' S y 65° 33' O, cerrada a la explotación forestal y ganadera en el año 1980 (**ChA-BO**).
2. Sobrepastoreo (12 casos): sitios que han sido talados y sufren una larga e intensa presión de pastoreo. La ganadería es para subsistencia de una población rural empobrecida. El ganado incluye vacas, cabras y ovejas sin ningún tipo de manejo. La vegetación se reduce a un arbustal improductivo intercalado con cactáceas y bromeliáceas, con amplios sectores de suelo desnudo (**ChA-SP**).

Monte

1. Arbustal original (24 casos): *Reserva Provincial Ñacuñán* (Departamento Santa Rosa, Provincia de Mendoza); 34° 03' S y 67° 58' O, cerrada a la explotación forestal y ganadera en el año 1970 (**M-AO**).
2. Agricultura bajo riego (12 casos): sitios típicos de los oasis regados mediante la sistematización del agua de deshielo de la Cordillera de los Andes. Antes de ponerlos en producción, los sitios son laboreados para eliminar la vegetación y lavados para disminuir la salinidad. Se producen cultivos de alta rentabilidad (vid, ajo y frutales) con un manejo intensivo que implica alta frecuencia de laboreos, riegos y altas dosis de fertilización química y orgánica (**M-AR**).
3. Sobrepastoreo (18 casos): sitios altamente degradados con ganadería de subsistencia principalmente de cabras. La vegetación se reduce a un arbustal ralo y gran proporción de suelo desnudo (**M-SP**).

Análisis

Todos los análisis de suelo fueron realizados en el Laboratorio de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Córdoba, utilizando igual metodología en relación a diseño de muestreo y parámetros analizados. En todos los casos por cada muestra se tomaron 10 submuestras de suelo del horizonte 0-20 cm y se recolectaron los restos vegetales superficiales de un cuadrado de 20 x 20 cm². Los parámetros analizados fueron: a) concentración de C orgánico del suelo (COS) determinado mediante el método de Walkley y Black (Nelson y Sommer 1986), b) emisión de CO₂ (C-CO₂) mediante incubación (10 días) y captación en álcali (Alef 1995); c) cantidad de restos vegetales por gravimetría; y d) concentración de C en los restos vegetales (COR) mediante el método de Walkley & Black modificado (Abril *et al.* 2005a).

Con los datos obtenidos se calculó el balance de C por unidad de área utilizando la fórmula $C-CO_2 / [COS+COR]$ (Abril y Bucher 2001) y se estimaron las pérdidas de C del suelo comparando los valores de cada situación de manejo con los valores de los sitios sin disturbar para cada ecorregión. Debido a que los datos corresponden a muestreos realizados en distintas fechas y lugares los datos presentados expresan la media y el rango de valores para cada variable.

RESULTADOS

La concentración de C en el suelo fue muy variable entre situaciones (Tabla 1). En los sitios con vegetación original, los valores más altos correspondieron al Chaco Semiárido y los más bajos al Monte. En general los sitios bajo explotación presentaron menor concentración de C que los no perturbados, excepto en el Monte con agricultura bajo riego (M-AR) que presentó algunos valores de C superiores al Monte original. Los sitios con menor contenido de C en el suelo fueron los sobrepastoreados y, en particular el Monte sobrepastoreado (M-SP).

Dentro de cada sitio se detectó gran variación entre los datos de C del suelo incluso en los sitios en condiciones originales (Tabla 1). La amplitud de valores en cada sitio aumentó con el incremento de la aridez. Por ejemplo, en el Chaco Semiárido las fluctuaciones entre muestras variaron entre 25 y 55%, mientras que en el Monte las variaciones en el rango de datos fueron superiores al 100%. En el sitio sobrepastoreado del Monte (M-SP) con condiciones de extrema aridez el rango de variación de los datos fue del 2400%.

La cantidad de restos vegetales superficiales también fue muy variable (Tabla 1). Los suelos sobrepastoreados del Chaco Semiárido (Ch-SP) y los laboreados del Chaco Semiárido y el Monte (Ch-DQL y M-AR) no presentaron restos superficiales, mientras que los mayores valores se detectaron en los suelos desmontados con rotación de cultivos y siembra directa (ChS-DSDR) y en el bosque original del Chaco Semiárido (ChS-BO). El porcentaje de C de los restos vegetales fue muy homogéneo dentro y entre sitios (Tabla 1).

La emisión de CO_2 fue tan variable como la concentración de C del suelo. Los valores más altos se registraron en el suelo sobrepastoreado del Chaco Árido (ChA-SP) y los más bajos en los sobrepastoreados del Monte (M-SP). La variabilidad dentro de cada sitio fue menor en los suelos en condiciones originales y fue muy alta en las situaciones de mayor degradación. Los valores con menor rango de variación se detectaron en el bosque original del Chaco Semiárido (5%), mientras que el sitio sobrepastoreado del Monte (M-SP) la variación entre los valores fue de 1900% (Tabla 1).

Tabla 1. Media y rango de valores de C orgánico del suelo (%), cantidad de hojarasca (g MS m⁻²), C de la hojarasca (%) y emisión de CO₂ (mg g⁻¹), en las situaciones de manejo y ambientes originales de las tres ecorregiones áridas y semiáridas analizadas.

	C orgánico del suelo (%)	Masa de restos vegetales (g m ⁻²)	C en restos vegetales (%)	Emisión de CO ₂ (mg g ⁻¹ 10 d ⁻¹)
Chaco Semiárido				
Bosque original (ChS-BO)	3,2 (2,7 - 3,9)	850 (300 - 1000)	46 (40 - 48)	0,87 (0,85 - 089)
Sobrepastoreo (ChS-SP)	0,5 (0,4 - 0,6)	0	0	0,28 (0,22 - 0,40)
Desmonte-quema-monocultivo-laboreo (ChS-DQL)	1,1 (0,9 - 1,4)	0	0	0,87 (0,80 - 0,90)
Desmonte-quema- pasturas, ganadería (ChS-DPG)	1,4 (1,2 - 1,5)	160 (150 - 200)	43 (40 - 45)	0,56 (0,55 - 0,60)
Desmonte-rotación- siembra directa (ChS-DSDR)	2,3 (1,8 - 2,5)	1300 (900 - 1500)	51 (49-55)	0,35 (0,25 - 0,57)
Chaco Árido				
Bosque original (ChS-BO)	2,2 (2,1 - 2,4)	480 (450 - 500)	46 (45 - 50)	0,50 (0,45 - 0,60)
Sobrepastoreo (ChA-SP)	1,1 (0,8 - 1,6)	320 (280 - 550)	45 (43 - 50)	0,48 (0,15 - 1,12)
Monte				
Arbustal original (M-AO)	0,7 (0,5- 1,4)	115 (100-150)	45 (40 - 48)	0,44 (0,35 - 0,50)
Agricultura bajo riego (M-AR)	0,7 (0,4 - 0,8)	0	0	0,55 (0,40 - 0,62)
Sobrepastoreo (M-SP)	0,2 (0,0 - 0,5)	55 (2 - 120)	42 (38 - 46)	0,11 (0,01 - 0,20)

El cálculo del balance de C fue cercano a uno (balance de C estable) en todos los sitios de ambientes originales, mientras que en las situaciones con diferentes manejos el balance fue muy variable. Los sitios altamente modificados (ChS-SP, ChS-DQL y M-AR) presentaron un balance de C negativo (valores superiores a la unidad), mientras que ChS-DSDR y M-SP presentaron balance positivo (valores menores a uno). El sitio manejado con pastos del Chaco Semiárido (ChS-DPG) y el sobrepastoreado del Chaco Árido presentaron valores cercanos a la unidad (Fig. 2).

El rango de valores encontrados en cada sitio fue muy variable (Fig. 2). El bosque original y el desmonte con quema y laboreo del Chaco

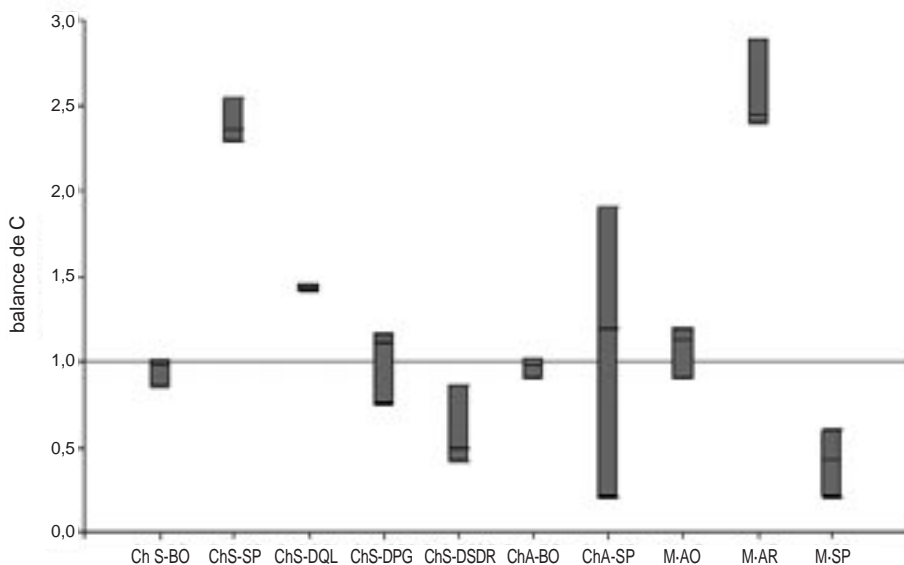


Figura 2. Media y rango de valores de **balance de C del suelo** (relación $C-CO_2$ / [C del suelo + C de la hojarasca]) en las situaciones analizadas: **ChS-BO**: Bosque original del Chaco Semiárido; **ChS-SP**: Sobrepastoreado en el Chaco Semiárido; **ChS-DQL**: Agricultura con desmonte, quemas y laboreo en el Chaco Semiárido; **ChS-DPG**: Ganadería con desmonte y cultivo de pasturas en el Chaco Semiárido; **ChS-DSDR**: Agricultura sustentable (siembra directa y rotación de cultivos) en el Chaco Semiárido; **ChA-BO**: Bosque original del Chaco Árido; **ChA-SP**: Sobrepastoreo en el Chaco Árido; **M-AO**: Arbustal original del Monte; **M-AR**: Agricultura bajo riego en el Monte; y **M-SP**: Sobrepastoreo en el Monte.

Semiárido (ChS-BO y ChS-DQL) presentaron estrechos rangos de datos (3% en ambos casos), mientras que el sitio sobrepastoreado del Chaco Árido (ChA-SP) fue el que presentó mayor variación entre los valores calculados (950%).

La cantidad absoluta de C del suelo perdido en los sitios con manejos productivos fue muy importante (Fig. 3). Los sitios que perdieron más cantidad de C fueron el sobrepastoreado y el quemado y laboreo del Chaco Semiárido (ChS-SP y ChS-DQL), y el que menos perdió fue el sitio con agricultura bajo riego en el Monte (M-AR). Expresado como porcentaje en relación al C del suelo original de cada ecorregión los sistemas de manejo que perdieron más C (hasta 98%) se detectaron en el sitio sobrepastoreado del Monte (M-SP) y los casos con menos pérdidas (ganaron hasta un 74% de C) fueron en el Monte con agricultura bajo riego (M-AR).

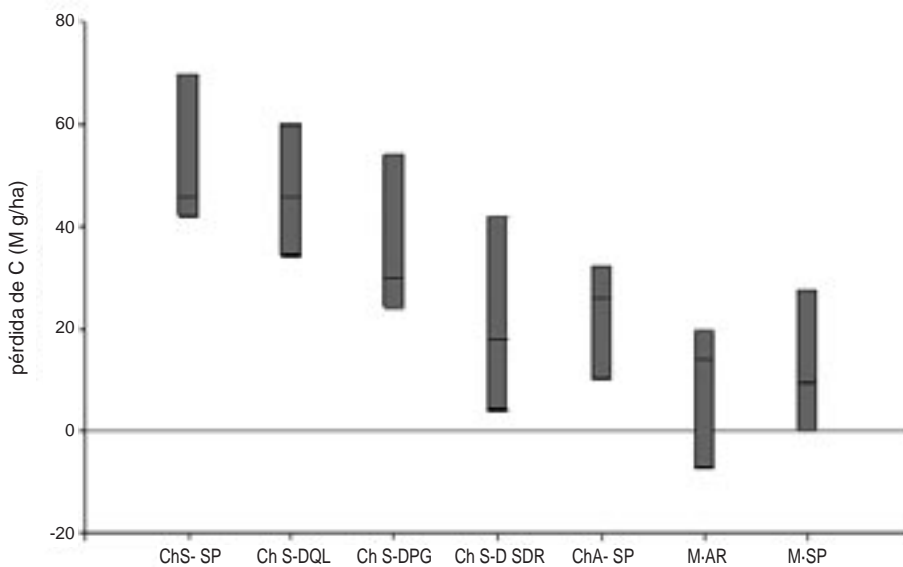


Figura 3. Media y rango de valores de **pérdidas de C del suelo** (Mg C ha^{-1}) (C del suelo original–C del sitio modificado) en las situaciones analizadas: **ChS-SP**: Sobrepastoreo en el Chaco Semiárido; **ChS-DQL**: Agricultura con desmonte, quemas y laboreo en el Chaco Semiárido; **ChS-DPG**: Ganadería con desmonte y cultivo de pastos en el Chaco Semiárido; **ChS-DSDR**: Agricultura sostenible (siembra directa y rotación de cultivos) en el Chaco Semiárido; **ChA-SP**: Sobrepastoreo en el Chaco Árido; **M-AR**: Agricultura bajo riego en el Monte; y **M-SP**: Sobrepastoreo en el Monte.

DISCUSIÓN

Por consiguiente el uso de la tierra modificó sustancialmente la dinámica del C en los suelos de la región árida-semiárida central de Argentina. La magnitud de las modificaciones está fuertemente influenciada por el tipo de manejo y por las condiciones climáticas particulares de cada ecorregión.

Chaco Semiárido

En el Chaco Semiárido la ganadería extensiva sin manejo durante 50 años ejerció una fuerte presión de sobre pastoreo y de degradación sobre los suelos. Esta situación fue generada cuando se extrajeron los árboles maderables y los espacios abiertos fueron cubiertos por grandes extensiones de pastizales, favoreciendo la introducción de la ganadería

(Bucher *et al.* 1998). Los resultados de balance y cantidad pérdida de C del suelo en sitios sobrepastoreados son consistentes con la enorme extracción de biomasa vegetal y escaso retorno de restos orgánicos al suelo como consecuencia de la ganadería (Abril y Bucher 2001).

La ganadería convencional en el Chaco Semiárido produce pérdidas de C semejantes a los sitios sobrepastoreados por 50 años, debido a que la quema de la biomasa del desmonte, los laboreos frecuentes y las condiciones climáticas del verano provocan gran emisión de CO₂ y falta total de retorno de C al suelo (Abril 2002; Feral *et al.* 2003; Abril *et al.* 2005b). En los casos que la tala y la quema es seguida de implantación de pastos para forraje del ganado las pérdidas de C son menores, aunque con alta variación entre los datos de balance de C. Esto podría deberse a diferencias en la carga animal de cada caso que condiciona la cantidad de C que retorna al suelo y a las variaciones climáticas de cada fecha de muestreo. Es bien conocido que durante la estación húmeda y cálida se activan los procesos microbianos y que la hojarasca de gramíneas es fácilmente degradable (Scholes *et al.* 1997; Abril y Bucher 2001; Abril *et al.* 2005a). Por tales motivos el balance de C negativo corresponde a muestras tomadas durante la estación húmeda (alta emisión de CO₂), mientras que los valores positivos se corresponden con la estación seca.

La introducción de agricultura con criterio sostenible en grandes extensiones de terreno produce un gran cambio en el balance de C del suelo, resultado de la gran cantidad de restos vegetales provenientes del desmonte y de los rastrojos de los cultivos en rotación bajo siembra directa (Panigatti *et al.* 2001; Abril *et al.* 2005b). Este gran aporte de C al suelo (que en algunos casos supera la cantidad colectada en el bosque original), hace que el balance de C sea positivo y que las pérdidas de C sean las más bajas de la ecorregión (11%).

La alta variación de los datos de pérdida de C podría deberse al estado de la vegetación de los campos desmontados y a la cantidad de años bajo siembra directa. Por ejemplo, algunos datos corresponden a desmontes de sitios altamente degradados por sobrepastoreo, mientras que otros son desmontes de bosques sin perturbar. Asimismo, los casos analizados varían entre uno y 10 años de agricultura con siembra directa. Los casos con menores pérdidas de C corresponden a sitios de bosque original recientemente desmontados, debido a la permanencia de gran cantidad de restos de leñosas de mayor calidad de humificación que los rastrojos de los cultivos (Abril *et al.* 2005b).

Chaco Árido

Aunque el tipo de sobrepastoreo en el Chaco Árido es muy similar al del Chaco Semiárido, la dinámica de C es muy diferente. El Chaco Árido sobrepastoreado presenta mayor cantidad de restos vegetales y de C orgánico del suelo y mayor variación en la producción de CO₂ y el balance de C.

La mayor cantidad de restos superficiales y C del suelo podría deberse a la densa cobertura de cactáceas y bromeliáceas no palatables que crecen en los lugares sobrepastoreados (Abril y Noé 2007), mientras que la mayor variación en las emisiones de CO₂ sería resultado de fluctuaciones climáticas. A diferencia con el Chaco Semiárido varios de los casos analizados en el Chaco Árido fueron muestreados inmediatamente después de un evento de lluvia. Es ampliamente conocido que eventos de lluvias superiores a los 25 mm provocan gran emisión de CO₂ en los desiertos debido a que saturan los poros del suelo liberando el CO₂ acumulado en los periodos de sequía (Huxman *et al.* 2004) y porque desencadenan la actividad microbiana (Austin *et al.* 2004; Abril y Noé 2007). Asimismo, los valores extremadamente bajos de CO₂ corresponden a muestras tomadas en el verano donde muy frecuentemente la temperatura del suelo supera el umbral de la actividad microbiana (41-42°C; Maestre y Cortina 2003; Fernández *et al.* 2006).

Ambas características climáticas (pulsos de lluvia y altas temperaturas) hacen que los cálculos de balance y pérdidas de C no sean indicadores adecuados del grado de impacto del manejo en el Chaco Árido. Por ejemplo, a causa de que las altas temperaturas reducen la actividad microbiana y por ende la producción de CO₂, en los sitios de suelo altamente degradado se detectan casos con valores de balance de C inferiores a uno, lo que indicaría ganancia de C (Abril 2003).

Monte

Las situaciones de explotación en el Monte son muy diferentes a las otras dos ecorregiones analizadas debido al mayor grado de aridez y a la posibilidad de riego con agua de deshielo de la Cordillera de los Andes. Los sistemas agrícolas en los oasis de regadío del Monte son muy productivos; se trata de sistemas intensivos altamente tecnificados que provocan cambios sustanciales en el suelo debido a la disponibilidad de agua, la frecuencia de laboreos y la aplicación de abonos y fertilizantes (Hudson *et al.* 1990; Del Monte *et al.* 1994).

Los resultados de la dinámica del C obtenidos en este trabajo claramente reflejan el manejo de los suelos con agricultura bajo riego: a) la falta total de restos orgánicos superficiales es resultado del laboreo e incorporación de los abonos; b) los casos con valores de C mayores a los del Monte original corresponden a muestreos inmediatamente después de la incorporación de abonos orgánicos; c) el balance de C superior a 2 indica grandes pérdidas de C por laboreo; y d) la escasa fluctuación en las emisiones de CO₂ es resultado de la estabilidad en las condiciones de humedad del suelo a causa de los riegos frecuentes (Abril *et al.* 2005b; Ros *et al.* 2006; Tejada y González 2006).

En los sitios sin riego las condiciones de aridez del Monte sólo permiten el uso de la tierra para ganadería de subsistencia con un fuerte impacto sobre el suelo. La dinámica del C observada en este trabajo resulta principalmente del efecto de la gran proporción de suelo desnudo de textura arenosa, sin C orgánico ni restos vegetales (Abril *et al.*, en prensa). En estos suelos la insolación del verano provoca muy altas temperaturas que inhiben la actividad microbiana, lo cual justifica los resultados de balance positivo de C y las menores pérdidas de C en relación a los suelos de regadío (Conant *et al.* 2004; Abril y Noé 2007).

CONCLUSIONES:

1. El balance de C del suelo en la región árida o semiárida central de Argentina no tiene un patrón general según el uso de la tierra, sino que responde a la combinación entre tipo de manejo y las condiciones climáticas dentro del gradiente de déficit hídrico.
2. Los cálculos de balance de C del suelo no son muy adecuados como indicadores de sostenibilidad en regiones con condiciones climáticas extremas y con grandes fluctuaciones.
3. La contribución de C a la atmósfera a partir de sitios degradados en el Chaco Semiárido es equiparable a la de zonas húmedas. Sin embargo, bajo condiciones de manejo sostenible se logra una significativa retención de C en el suelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abril A. 2002. La microbiología del suelo: Su relación con la agricultura sustentable. En: S. J. Sarandon (ed.). *Agroecología. El Camino hacia una Agricultura Sustentable*. Ediciones Científicas Americanas, La Plata, 129-150 pp.
- Abril A. 2003. ¿Son los microorganismos edáficos buenos indicadores de impacto productivo en los ecosistemas? *Ecología Austral*, 13: 195-204.
- Abril A., P. Barttfeld y E.H. Bucher. 2005a. The effects of fire and overgrazing disturbs on soil carbon balance in the dry Chaco forest. *Forest. Ecol. Manage.*, 206: 399-405.
- Abril A. y E.H. Bucher. 1999. The effects of overgrazing on soil microbial community and fertility in the Chaco dry savannas of Argentina. *Appl. Soil Ecol.*, 12: 159-167.
- Abril A. y E.H. Bucher. 2001. Overgrazing and soil carbon dynamics in the Western Chaco of Argentina. *Appl. Soil Ecol.*, 16: 243-249.

- Abril A. y L. Noé. 2007. Soil C sink and CO₂ flux in a marginal dry forest of western Argentina. En: N.C. Verne (edt.). *Forest Ecology Research Horizons*. Nova Science Publishers, Inc. Nueva York, 191-202 pp.
- Abril A., P. Salas, E. Lovera, S. Kopp y N. Casado-Murillo. 2005b. Efecto acumulativo de la siembra directa sobre las características del suelo en la región semiárida central de Argentina. *Ciencia del Suelo*, 23: 179-188.
- Abril A., P. Villagra y L. Noé. En prensa. Spatiotemporal heterogeneity of surface soil dynamics in the Monte desert (Argentina). *J. Arid Environ.*
- Alef K. 1995. Soil respiration. En: K. Alef y P. Nannipieri (eds.). *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press, Londres, 214-219 pp.
- Austin A., L. Yahdjian, J. Stark, J. Belnap, A. Porporato, U. Norton, D. Ravetta y S. Schaeffer. 2004. Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems. *Oecologia*, 141: 221-235.
- Bucher E.H. 1982. Chaco and Caatinga- South American arid savannas. Woodlands and Thickets. En: B.J. Huntley y B.H. Walker (eds.). *Ecology of Tropical Savannas*. Berlin, Springer-Verlag, 48-79 pp.
- Bucher E.H., P. Huszar y C. Saravia-Toledo. 1998. Sustainable land use management in the South American Gran Chaco. *Advances in GeoEcology*, 31: 905-910.
- Cabrera A. 1976. Regiones fitogeográficas Argentinas. *Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería*. Editorial Acme, Buenos Aires.
- Cabido M., C. González, A. Acosta y S. Díaz. 1993. Vegetation changes along a precipitation gradient in Central Argentina. *Vegetation*, 109: 5-14.
- Claver S. y S.A. Roig-Juñent. 2001. *El desierto del Monte: La Reserva de Biosfera de Ñacuñán*. IADIZA-MAB-UNESCO, Mendoza, Argentina, 226 pp.
- Conant R.T., P. Dalla-Betta, C.C Klopatek y J.M Klopatek. 2004. Controls on soil respiration in semiarid soils. *Soil Biol. Biochem.*, 36: 945-951.
- Del Monte R.F., C.A. Mathey y M.E.Quiroga. 1994. Eficiencia comparativa entre sistemas de labranza y coberturas de flora natural en viticultura regada. *Horticultura Argentina*, 13: 87-98.
- Feng Q., K.N. Endo y C. Guodong. 2002. Soil carbon in desertified land in relation to site characteristics. *Geoderma*, 106: 21-43.
- Feral C.J.W., H.E. Epstein, L. Otter, J.N. Aranibar, H.H. Shugart, S.A. Macko y J. Ramontsho. 2003. Carbon and nitrogen in the soil-plant system along rainfall and land-use gradient in southern Africa. *J. Arid Environ.*, 54:327-343.
- Fernández E.C.M., P.P. Montavalli, C. Castilla y L. Mukurumbira. 1997. Management control of soil organic matter dynamics in tropical land-use systems. *Geoderma*, 79: 49-67.
- Fernández D.P., J.C Neff, J. Belnap y R.L. Reynolds. 2006. Soil respiration in the cool desert environment of the Colorado Plateau (USA): abiotic regulators and the thresholds. *Biogeochemistry*, 78: 247-265.

- Houghton R.A. 1995. Changes in the storage of terrestrial carbon since 1850. En: R. Lal, J.M. Kimble, E. Levine y V.A Stewart (eds.). *Soil and Global Change*. Lewis Publ. CRC, Boca Ratón, 45-65 pp.
- Hudson R.R., A. Aleska, H.T. Masotta y A. Muro. 1990. *Atlas de suelos de la República Argentina*. Provincia de Mendoza. INTA-CIRN/PNUD. Buenos Aires, 71-106 pp.
- Huxman T.E., K.A. Snyder, D. Tissue, A.J. Leffler, K. Ogle, W.T. Pockman, D.R. Sandquist, D.L Potes y S. Schwinning. 2004. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems. *Oecologia*, 141: 254-268.
- Jackson R.B., J.L. Banner, E.G. Jobbagy, W.T. Pockman y D.H. Wall. 2002. Ecosystem C loss with woody plant invasion of grasslands. *Nature*, 418: 623-626.
- Lal R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304: 1623-1625.
- Maestre F.T. y J. Cortina. 2003. Small-scale spatial variation in soil CO₂ efflux in a Mediterranean semiarid steppe. *Appl. Soil Ecol.*, 23: 199-209.
- Neill C., C. Cerri, J.M. Melillo, B.J. Feigl, P.A. Steward, J.F.L. Moraes y M.C. Piccolo. 1998. Stocks and dynamics of soil carbon following deforestation for pasture in Rondonia. En: R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follet y B.A. Stewart (eds.). *Soil Processes and the Carbon Cycle*. CRC Press, Boca Ratón, 9-28 pp.
- Nelson D.W. y L.E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. En A.L. Page, R.H. Miller y D.R. Keeney (eds.). *Methods of soil analysis: Chemical and microbiological properties*. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI, 539-580 pp.
- Panigatti J.L., H. Marelli y D. Buschiazzi (eds.). 2001. *Siembra Directa II*. INTA, Buenos Aires, Argentina, 377 pp.
- Reeder J.D., C.D. Franks y D.G. Milchunas. 2001. Root biomass and microbial processes. En: R.F. Follet, J.M. Kimble y R. Lal (eds.). *The potential of U.S. grazing lands to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect*. Lewis Publishers, Boca Ratón, 139-166 pp.
- Ros M, J.A. Pascua, C. García, M.T. Hernández y H. Insam. 2006. Hydrolase activities, microbial biomass and bacterial community in a soil after long-term amendment with different compost. *Soil Biol. Biochem.*, 38: 3443-3452.
- Schlesinger W.H. 1993. Response of the terrestrial biosphere to global climate change and human perturbation. *Vegetatio*, 104: 295-305.
- Scholes M.C., D. Powlson y G. Tian. 1997. Input control of organic matter dynamics. *Geoderma*, 79: 25-47.
- Squires V.R. 1998. Dryland soils: their potential as a sink for carbon and an agent in mitigating climate change. En: H.P. Blume, H. Eger, E. Fleischhauer, A. Hebel, C. Reij y K.G. Steiner (eds.). *Towards Sustainable Land Use*. Advances in GeoEcology, 31: 209-215.
- Tejada M. y J.L. González. 2006. The relationships between erodibility and erosion in a soil treated with two organic amendments. *Soil Till. Res.*, 91: 186-198.

- Tiessen H., E. Cuevas y I.H. Salcedo. 1998. Organic matter stability and nutrient availability under temperate and tropical conditions. En: H.P. Blume, H. Eger, E. Fleischhauer, A. Hebel, C. Reij y K.G. Steiner (eds.). *Towards Sustainable Land Use*. Advances in GeoEcology 31: 415-422.
- Vitousek P.M., H.A. Mooney, J. Lubchenco y J.M. Melillo. 1997. Human domination on earth's ecosystems. *Science*, 277: 494-499.
- Xie G. y Y. Steinberger. 2001. Temporal patterns of C and N under shrub canopy in a loessial soil desert ecosystem. *Soil Biol. Biochem.*, 33: 1371-1379.