

SIEMBRA DIRECTA, ROTACIONES Y FERTILIDAD PARA UNA AGRICULTURA SOSTENIBLE CON ÉNFASIS EN LAS CONDICIONES DE SANTA CRUZ DE LA SIERRA, BOLIVIA

Fernando O. García*

Introducción

La demanda global de alimentos, forrajes, fibras y biocombustibles en los últimos años ha impulsado un fuerte aumento en la producción de granos en los países de América del Sur. Los costos crecientes de la tierra y de otros recursos e insumos, en muchos casos no son compensados por los precios de los granos, condición a la que se le suma la incertidumbre de las condiciones económicas y climáticas para el futuro cercano. En este marco, la intensificación productiva sostenible, definida como la mayor y más eficiente producción por unidad de recurso y/o insumo utilizado, se presenta como una alternativa válida. Esta intensificación busca mejorar la eficiencia en términos agronómicos, económicos y ambientales e involucra sistemas de producción y no solamente cultivos.

Los principales aspectos que deben considerarse en la implementación de sistemas intensificados sostenibles son:

- ◆ Rotaciones
- ◆ Siembra directa
- ◆ Balance de nutrientes y nutrición adecuada de cultivos y suelos
- ◆ Genética
- ◆ Manejo integrado de plagas, enfermedades y malezas.

La sostenibilidad en el contexto de la producción agrícola, implica preservar y/o mejorar la capacidad productiva del sistema desde el punto de vista agronómico, económico y ambiental, así como preservar la calidad de los recursos renovables y no renovables incluidos en el sistema productivo (suelo, agua, aire, biodiversidad). Entre estos recursos, se destaca el suelo como recurso finito no renovable. El suelo debe proveer un medio para el crecimiento de las plantas, regular y direccionar el flujo del agua y servir como un amortiguador ambiental que atenúe el efecto o degrade los compuestos ambientalmente peligrosos.

La calidad del suelo se define en términos de sus propiedades químicas, físicas y biológicas. Entre estas propiedades, la materia orgánica (MO) es considerada como uno de los más importantes indicadores de la

calidad de suelo y de la sostenibilidad de los sistemas agrícolas (Robinson et al., 1994). La MO es la fracción orgánica del suelo en la cual se incluyen los residuos vegetales y animales en descomposición (10-20 %), la biomasa microbiana (1-5 %) y el humus (50-85 %). Se excluyen los residuos vegetales y animales sin descomponer. La determinación analítica de la MO involucra la determinación del carbono (C) orgánico del suelo que constituye aproximadamente el 58 % de la MO, por lo que suelen usarse indistintamente los términos MO ó C orgánico ($MO = C \text{ orgánico} * 1.72$). La importancia de la MO radica en su relación con numerosas propiedades del suelo como se describe a continuación:

- ◆ **Propiedades físicas:** Densidad, capacidad de retención de agua, agregación y estabilidad de agregados (**Figura 1**), color y temperatura.
- ◆ **Propiedades químicas:** Reserva de nutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S) y otros, pH, capacidad de intercambio catiónico, capacidad tampón, formación de quelatos.
- ◆ **Propiedades biológicas:** Biomasa microbiana, actividad microbiana (respiración), fracciones lábiles de nutrientes.

El contenido de MO está determinado por los factores de formación del suelo (tiempo, clima, vegetación,

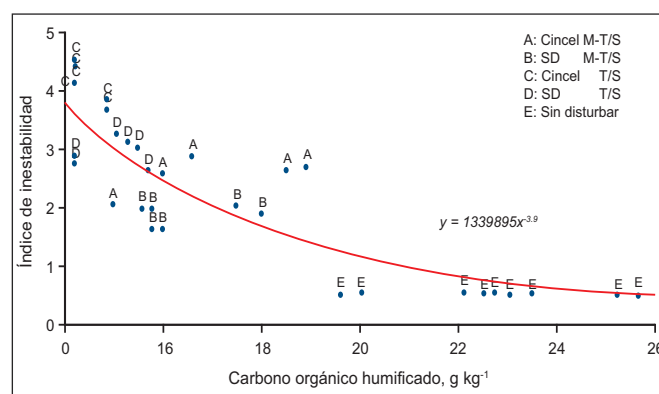


Figura 1. Relación entre el C orgánico humificado y el índice de inestabilidad de los agregados del suelo para distintas rotaciones con doble cultivo trigo/soja (T/S) y maíz (M), sistemas de labranza (Cíncel y Siembra directa, SD) y una situación prístina (sin disturbar) en el sur de Santa Fe (Argentina). Fuente: Gómez et al. (2001).

* Director del International Plant Nutritión Institute (IPNI). Oficina para el Cono Sur de Latinoamérica. Correo electrónico: fgarcia@ipni.net

material parental, topografía, manejo). El manejo del suelo afecta el contenido de MO y los principales factores de cambio son el número de años de agricultura, cultivos, labranza, rotaciones, manejo del cultivo, fertilización y períodos de barbecho.

La siembra directa (SD), la rotación de cultivos y el mantener o elevar los niveles de fertilidad contribuyen a estabilizar los contenidos de MO del suelo a través de la incorporación de una alta cantidad de residuos de buena calidad (Walters et al., 2007; Galantini et al., 2008; Ferrari et al., 2010; Prior et al., 2010; Quincke et al., 2010) (Figura 2). Estas tres prácticas de manejo interactúan entre sí para promover la acumulación de MO, condición que mejora las propiedades químicas, físicas y biológicas que definen la calidad del suelo y la sostenibilidad de los sistemas de producción.

Este artículo discute los efectos de la SD, las rotaciones y la fertilidad sobre acumulación de MO, como indicador de la calidad del suelo y de la sostenibilidad de los sistemas de producción de granos. Asimismo, se presentan algunas alternativas para el manejo de estas prácticas en sistemas de producción de granos en la región este de Bolivia. Como se mencionó anteriormente, existe una marcada interacción entre los efectos de estas tres prácticas, que a su vez interactúan con otras prácticas de manejo de suelos y cultivos. La variabilidad de los resultados obtenidos con el manejo de las prácticas mencionadas, generada por las condiciones ambientales locales (suelo, clima, tecnología, condiciones económicas), amerita un análisis específico para el sitio de cada situación.

Siembra directa y materia orgánica del suelo

El hecho de no remover el suelo y mantener los residuos de cosecha en la superficie en los sistemas bajo SD promueve la acumulación de MO en las capas superficiales del suelo, en comparación con los sistemas de labranza convencional (LC) que remueven el suelo (Díaz Zorita et al., 2002; Studdert y Echeverría, 2002a; Alvarez, 2005; Amado et al., 2006; Andriulo et al., 2008; Galantini et al., 2008) (Figura 3). Este efecto se explica por la menor oxidación de los residuos orgánicos, la menor erosión y, eventualmente, la mayor producción de residuos promovida por el mejoramiento de la fertilidad y otras características del suelo bajo SD.

Estudios conducidos por Sá et al. (2001), en oxisoles del sur de Brasil, reportaron incrementos importantes en el contenido de C orgánico del suelo ($806 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) en la capa de 0-20 cm en sistemas de producción bajo SD. Los aumentos de C orgánico del suelo estuvieron estrechamente relacionados con la cantidad de residuos aportados ($R^2 = 0.74$). Los autores atribuyen el incremento a la mayor protección del C orgánico en el suelo a través de la formación de agregados estables del tamaño de arenas y limos, especialmente en la capa de 0-10 cm de profundidad. Los datos de Bayer et al.

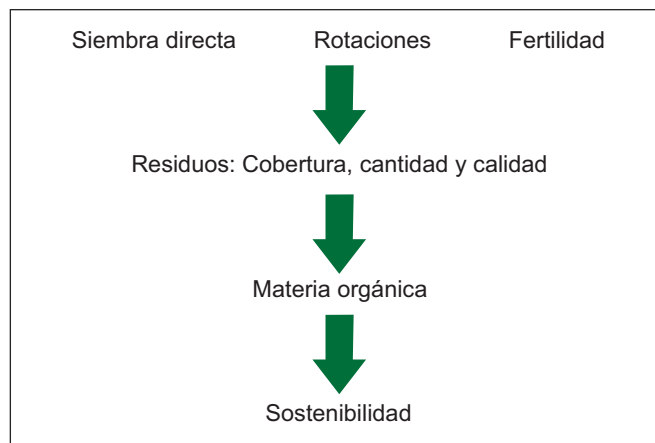


Figura 2. Relación de la siembra directa, rotaciones y fertilidad con la materia orgánica y la sostenibilidad de los sistemas agrícola-ganaderos.

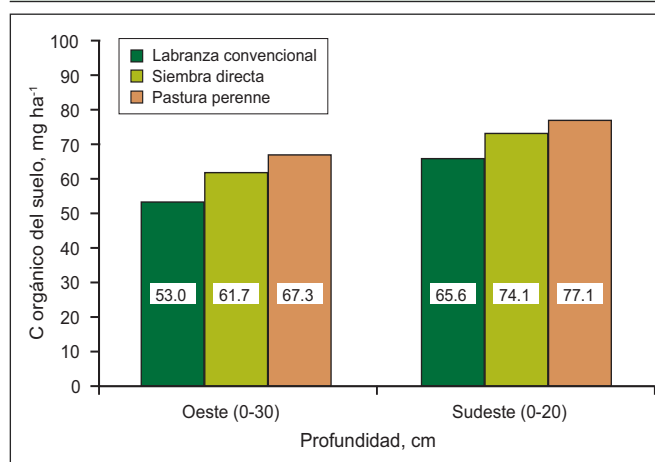


Figura 3. Carbono (C) orgánico del suelo bajo labranza convencional, siembra directa y pastura perenne en el oeste (0-30 cm de profundidad) y el sudeste (0-20 cm de profundidad) de la región pampeana argentina. Fuente: Díaz Zorita et al. (2002) y Studdert y Echeverría (2002b).

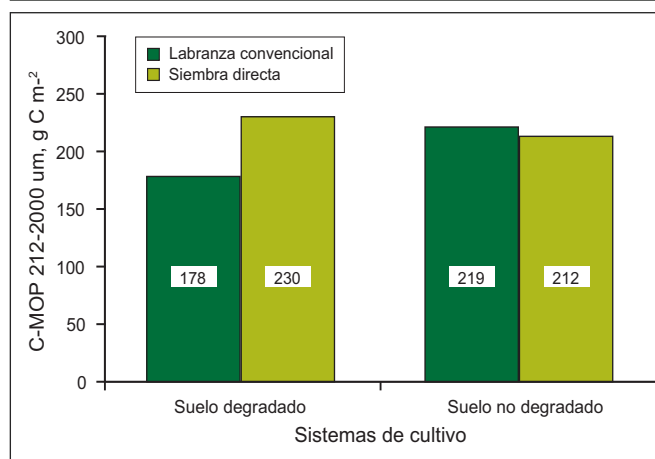


Figura 4. Carbono (C) orgánico del suelo en la fracción particulada de 212-2000 μm bajo labranza convencional y siembra directa en un suelo de prolongada historia agrícola (degradado) (izquierda) y un suelo con historia de pasturas (no degradado) (derecha) en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Fuente: Fabrizzi et al. (2003).

Tabla 1. Rendimiento en grano, C humificado, pérdida de C y balance de C para dos rotaciones agrícolas en el sudeste de Córdoba, Argentina. Fuente: Alejandro Thomas (com. personal).

A. Trigo/Soja - Maíz, tres cultivos en dos años				
Cultivos	Trigo/Soja	Maíz	Promedio	
Rendimiento, kg ha ⁻¹	3 529 / 2 771	11 000		
C humificado, kg ha ⁻¹	2 993	3 359	3 176	
Pérdida de C, kg ha ⁻¹	3 505	2 713	3 109	
Balance de C, kg ha ⁻¹	-512	646	67	
B. Trigo/Soja - Maíz-Soja, cuatro cultivos en tres años				
Cultivos	Soja	Trigo/Soja	Maíz	Promedio
Rendimiento, kg ha ⁻¹	3 500	3 529 / 2 771	11 000	
C humificado, kg ha ⁻¹	1 763	2 993	3 359	2 705
Pérdida de C, kg ha ⁻¹	2 713	3 505	2 713	2 977
Balance de C, kg ha ⁻¹	-950	-512	646	-273

Tabla 2. Tasa de secuestro de C en suelos tropicales y subtropicales de Brasil. Fuente: T. Amado y C. Bayer (datos no publicados), citado por Bayer et al. (2010).

Región	Manejo	Tasa estimada de secuestro de C mg C ha ⁻¹ año ⁻¹
Subtropical (Sur)	Monocultura/Rotación de cultivos tradicional	0.12 ± 0.06
	Rotación de cultivos intensiva	0.36 ± 0.09
Tropical (Cerrados)	Monocultura/Rotación de cultivos tradicional	0.03 ± 0.07
	Rotación de cultivos intensiva	0.42 ± 0.06

(2001) obtenidos en ultisoles de Rio Grande do Sul, Brasil, sugieren que la estabilización del C orgánico se debe a la interacción de los compuestos orgánicos con minerales de carga variable (caolinitas y óxidos de hierro). Los efectos positivos de la SD sobre la fracción orgánica del suelo se observan también cuando se evalúan los contenidos de N orgánico (Morales Sá, 1996) y las fracciones lábiles de C orgánico del suelo (Fabrizzi et al., 2003; Amado et al., 2006) (**Figura 4**).

Estudios realizados en los últimos años para evaluar la acumulación de C orgánico a mayores profundidades en sistemas de producción bajo SD han reportado resultados contradictorios. Baker et al. (2006) y Blanco-Caqui y Lal (2008) no encontraron diferencias de acumulación de C entre sistemas de LC y SD al evaluar la masa de C incluyendo horizontes subsuperficiales. Los efectos de la SD en la acumulación de C orgánico dependen de las condiciones iniciales del sitio, del tipo de suelo y del clima (Alvarez, 2005; Bayer et al., 2010).

Rotaciones y materia orgánica del suelo

La rotación de cultivos tiene varias ventajas si se compara con los sistemas de monocultivo. Las principales ventajas son:

- ◆ Posibilidad de acumular mayor cantidad de residuos de diferentes características lo que produce significativos aportes de C para el suelo.
- ◆ Mayor intensidad de uso del suelo.

- ◆ Mayor eficiencia de uso del agua.

Existen numerosos ejemplos a nivel mundial de las ventajas de la intensificación del manejo de las rotaciones en el incremento de los niveles de MO y en el mejoramiento de otros índices de calidad del suelo y/o en la eficiencia de uso de los recursos (Gregory y Drury, 1996; Peterson et al., 1998; Amado et al., 2006; Andriulo et al., 2008; Galantini et al., 2008). La mayor acumulación de MO se produce, entre otras razones, por la mayor producción de residuos provenientes de rendimientos más altos, por la reducción de los períodos bajo barbecho y por el uso más eficiente del agua.

En general, la inclusión de gramíneas en la rotación mejora el balance de C del suelo, tanto por la cantidad como por la calidad de los residuos y porque se logra una mayor cobertura del suelo. La **Tabla 1** muestra el balance de C del suelo de dos rotaciones en el sudeste de Córdoba, Argentina. En la rotación que tiene una mayor frecuencia de gramíneas (trigo y maíz), el balance de C es positivo, pero el balance es negativo en la rotación con mayor frecuencia de soja. El impacto negativo en el contenido de MO que se presenta cuando existe una mayor frecuencia de soja en las rotaciones, con respecto a cultivos como maíz o sorgo, ha sido descrito por varios autores en diversas regiones del mundo (Havlin et al., 1990; Studdert y Echeverría, 2000).

Una alternativa para mejorar el balance de C en el suelo es la utilización de cultivos de cobertura. Esta práctica

Tabla 3. Aporte de C de residuos y C humificado en un ciclo de la rotación maíz-trigo/soja de cuatro tratamientos de fertilización en dos sitios del sudeste de Córdoba, Argentina. Los tratamientos NP y NPS incluyeron dosis de nutrientes según diagnóstico y el tratamiento NPS-Rep dosis de nutrientes según reposición de los nutrientes extraídos en grano. Elaborado a partir de información de Vicente Gudelj y col. (com. personal).

Tratamiento	Aporte C residuos *	C humificado **
	----- (kg C ha ⁻¹) -----	
Don Osvaldo		
Testigo	6 144	-815
NP	8 061	31
NPS	10 353	1 082
NPS-Rep	11 381	1 532
Los Chañaritos		
Testigo	8 358	173
NP	10 377	1 071
NPS	11 019	1 359
NPS-Rep	11 747	1 677

* Estimado a partir del índice de cosecha y la concentración de C en residuos.
 ** Según modelo AMG (Andriulo et al., 1999).

está muy difundida en numerosas zonas de Brasil, donde se utiliza avena negra entre la rotación entre dos cultivos de grano en verano (por ejemplo soja y maíz) (Fiorin, 1999). En estos sistemas, la inclusión de leguminosas como cobertura (lablab, mucuna, caupí, vicia o guandú) mejora la acumulación de MO (Figura 5) (Amado et al., 2006; Vieira et al., 2009). En climas templados, la inclusión como cultivos de cobertura de gramíneas como centeno o avena, o de leguminosas como vicia o trébol encarnado, es también una buena alternativa para fijar una mayor cantidad de C atmosférico en el suelo (Ruffo, 2003).

Un reciente resumen presentado por Bayer et al. (2010) muestra que las tasas de secuestro de C en sistemas bajo SD en Brasil están directamente relacionadas con el aporte anual de C de los cultivos. Las estimaciones regionales de T. Amado y C. Bayer (datos no publicados) indican que los sistemas de rotaciones intensivas de cultivos permiten alcanzar retenciones de C significativas, comparadas con secuencias de baja intensidad de cultivos (Tabla 2).

Fertilidad y materia orgánica del suelo

La MO es reserva de nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas. Si se considera que la MO contiene aproximadamente un 58 % de C y se estima que la relación C/N/P/S es de 140:10:1.3:1.3, cada 1 % de MO en la capa superficial de 0 a 20 cm de suelo, con una densidad de 1.1 t m⁻³, representa 22 000 kg ha⁻¹ de

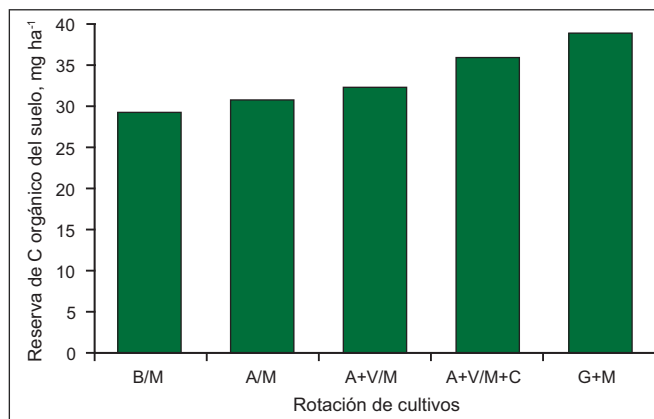


Figura 5. Reservas de C orgánico del suelo (0-17.5 cm) medidas a los 19 años del establecimiento de cinco rotaciones en la Estación Experimental Agronómica de la Universidad Federal de Rio Grande do Sul, RS, Brasil. B/M = Barbecho/Maíz; A/M = Avena/Maíz; A+V/M = Avena+Vicia/Maíz; A+V/M+C = Avena+Vicia/Maíz+Caupí; M+G = Maíz+Guandú. Fuente: Vieira et al. (2009).

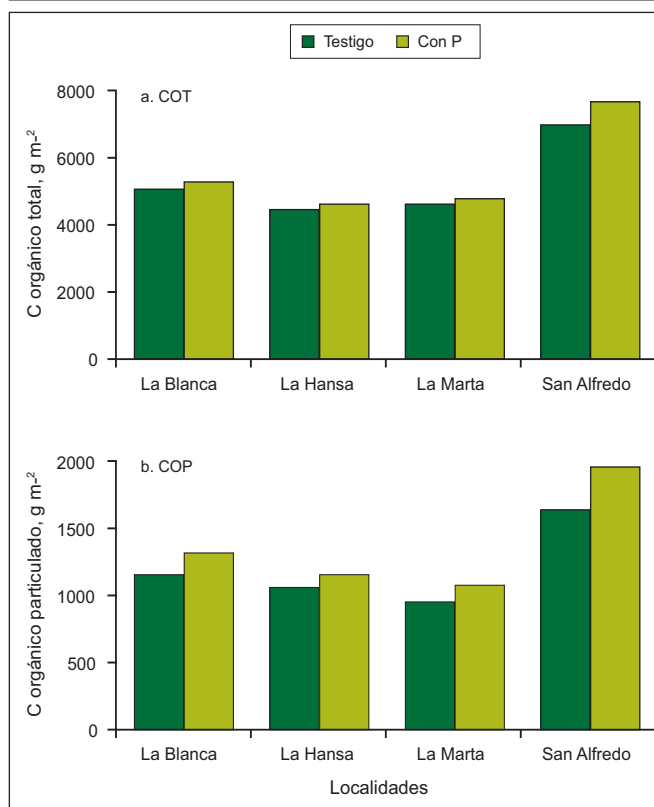


Figura 6. Reservas de C orgánico total (a) y particulado (b) en la capa de 0-20 cm superficiales de suelo sin (testigo) o con aplicación de P anual. Ensayos establecidos en el año 2000 y determinación realizada en agosto 2006. Fuente: Ciampitti et al. (2010).

MO, 12 000 - 13 000 kg ha⁻¹ de C, 1 000 - 1 200 kg ha⁻¹ de N, 90 - 120 kg ha⁻¹ de P y 90 - 120 kg ha⁻¹ de S. Estos contenidos indican que la MO actúa como sumidero y fuente de estos nutrientes en el sistema. En situaciones de balance negativo, cuando la exportación de nutrientes en los productos cosechados (granos y forrajes) es

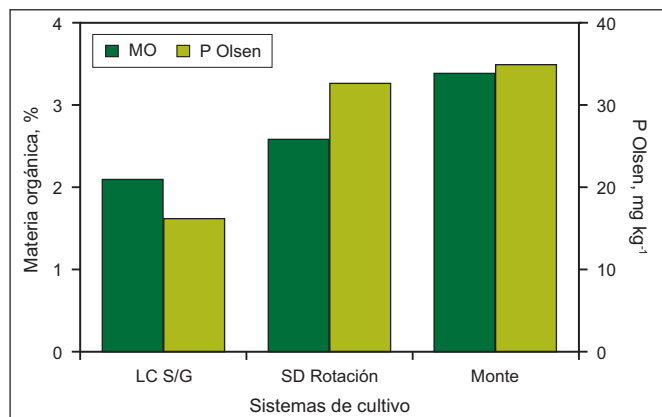


Figura 7. Materia orgánica (MO) y P Olsen en sucesión soja/girasol, rotación de cultivos anuales y situación prístina (Monte) en el ensayo del CEA-2 de ANAPO en la zona Este de Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. Fuente: Presentación del Ing. Agr. Edward Peña en el evento Vidas 2007 de Fundacruz.

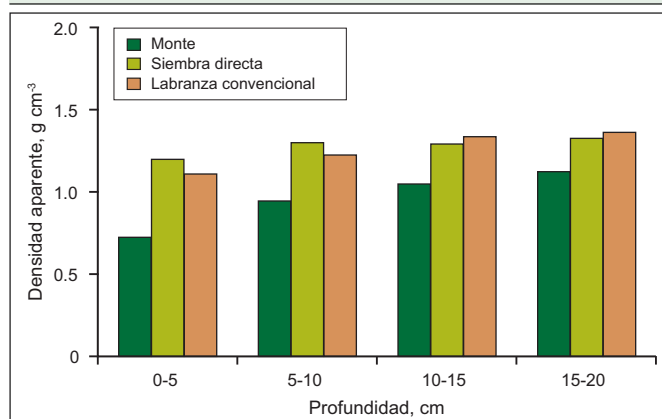


Figura 8. Densidad aparente bajo SD, LC y situación prístina (Monte) en el ensayo del CEA-2 de ANAPO en la zona Este de Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. Fuente: Presentación del Ing. Agr. Edward Peña en el evento Vidas 2007 de Fundacruz.

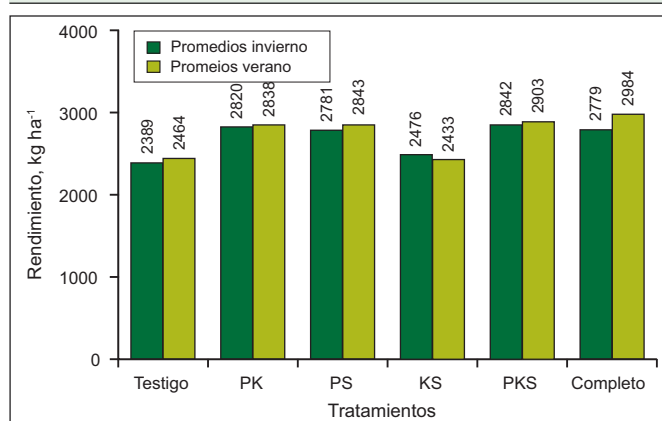


Figura 9. Rendimientos de soja de invierno y de verano, promedios de tres campañas, en los ensayos del Proyecto de Fertilización de Suelos y Cultivos de Fundacruz-IPNI. Zona Norte, 8 ensayos en invierno y 11 en verano, 2005/06 a 2007/08.

superior al aporte de nutrientes vía abonos orgánicos y fertilizantes, la MO constituye una fuente importante de los nutrientes necesarios para los cultivos, pero al mismo tiempo este proceso reduce los niveles de MO en

el suelo. Esta situación se observa frecuentemente cuando se incorporan áreas nuevas a la agricultura. En estas situaciones se ven disminuciones importantes de MO en los primeros años de cultivo que liberan cantidades importantes de nutrientes.

La aplicación de nutrientes vía fertilizantes minerales y/o abonos orgánicos permite mantener y/o mejorar los niveles de MO en el suelo (Tabla 3). La adecuada nutrición de los cultivos permite incrementar los rendimientos y acumular una mayor cantidad de residuos, logrando un mayor aporte de C para el suelo (Ciampitti et al., 2010) (Figura 6). Los efectos de la fertilización nitrogenada en la acumulación de MO han sido discutidos por varios autores. Se han observado resultados positivos en algunos sitios, mientras que en otros no se observó efecto, esta variabilidad se atribuye a diferencias en las condiciones climáticas, edáficas y de manejo (cultivos, eficiencia de la fertilización nitrogenada, etc.) (Alvarez, 2005; Andriulo et al., 2008; Galantini et al., 2008; Vieira et al., 2009).

Algunas consideraciones sobre el manejo de suelos y cultivos para una agricultura sustentable en la región de Santa Cruz de la Sierra, Bolivia

La producción de granos en la región de Santa Cruz de la Sierra se ubica en dos áreas contrastantes que son la zona Norte o Integrada y la zona Este o de Expansión. Estas dos zonas tienen características edáficas y climáticas diferentes que han sido evaluadas detalladamente en relevamientos recientes en el marco del Proyecto de Agricultura Sustentable (PAS) liderado por ANAPO y CIAT a través de estudios de caso. Algunas de las características relevantes se discuten a continuación (Tabla 4):

- ◆ La elevada proporción de limo en ambas zonas impone una limitación física característica de los suelos de la región. El 54 y 77 % de los suelos en la zona Norte y la zona Este, respectivamente, presentan contenidos de limo superiores al 60 %.
- ◆ Los niveles de pH se ubican en general en rangos de levemente ácidos a levemente alcalinos (6.0-7.5), aunque en la zona Norte se presentan suelos con niveles de pH medianamente ácido (pH 5.3-5.9) y medianamente alcalino (7.6-8.0).
- ◆ La conductividad eléctrica superior a 4 mmhos cm⁻¹ indica la presencia de suelos salinos, los cuales son más frecuentes en la zona Norte.
- ◆ Los niveles de MO son en general bajos en el Norte (< 2 %) y medios en el Este (< 4 %), aunque tienden a disminuir a medida que se intensifica el manejo, en tiempo y espacio en las situaciones donde se siembran dos cultivos de soja por año.
- ◆ Los niveles de P Olsen (indicador de disponibilidad de P) son bajos en el Norte (34 % de los suelos

tienen contenidos menores de 6 ppm) y altos en el Este.

- ◆ Los niveles de K intercambiable (indicador de disponibilidad de K) son medios a bajos en el Norte y altos en el Este.
- ◆ Los niveles de Ca y Mg intercambiable son adecuados en ambas zonas, pero las relaciones entre ambos cationes, y de éstos con el K, indican que podrían presentarse problemas de equilibrio entre bases en ambas zonas.
- ◆ Los niveles de Na intercambiable indicaran que también se podrían presentar problemas de sodicidad en un 19-20 % de los suelos de ambas zonas.

A partir de esta información y la relevada en numerosos ensayos, experimentos y evaluaciones conducidas por distintos institutos de investigación y organizaciones científicas y de productores, la implementación de prácticas de manejo como las discutidas en las secciones precedentes, contribuirá a una agricultura sostenible en términos ambientales, sociales y económicos.

a. Siembra directa y rotaciones

La implementación de rotaciones en sistemas de SD permite mejorar los rendimientos de los cultivos y las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo. La **Tabla 5** muestra los rendimientos de cultivos de soja, trigo, girasol y sorgo, en rotación o sucesión, bajo sistemas de LC y SD en la zona Este de Santa Cruz, Bolivia. La **Figura 7** muestra los efectos de la SD y de las rotaciones sobre el contenido de MO y el P extractable, comparados con la situación prístina (cobertura de Monte) y la **Figura 8** presenta la densidad aparente bajo los sistemas de LC, SD y la condición prístina.

Estos resultados demuestran claramente las ventajas de manejar rotaciones de cultivos bajo sistemas de SD. La inclusión de leguminosas y gramíneas de cobertura como crotolaria, lablab, brachiaria, mieto u otros, sin duda es una opción prometedora que debe seguirse evaluando. Este sería un aporte significativo a la

sostenibilidad del sistema como se ha demostrado en otros países y se ha observado en evaluaciones preliminares en Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.

b. Fertilidad

El mantenimiento y/o la generación de adecuados niveles de fertilidad del suelo a través de la rotación de cultivos, la inclusión de leguminosas que aportan N vía fijación simbiótica y la fertilización, contribuyen a la sostenibilidad de los sistemas de cultivo de Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.

Tabla 4. Distribución de frecuencia de algunos parámetros de suelo evaluados en los estudios de caso del relevamiento del PAS (ANAPO-CIAT) para las zonas Norte y Este de Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. Fuente: Presentación de la Ing. Agr. Mary Selva Viera en el evento Vidas 2007 de Fundacruz.

Parámetro	Zona Norte	Zona Este
Textura	43 % Franco-limoso 17 % Franco-arenoso	44 % Franco-limoso 33 % Franco-arcillo-limoso
pH	19 % 7.6-8.0 18 % 6.6-7.0 18 % 6.0-6.5 14 % 5.3-5.9 13 % 7.1-7.5	30 % 6.6-7.0 29 % 7.1-7.5 24 % 6.0-6.5
Conductividad eléctrica (mmho cm ⁻¹)	20 % > 4	8 % > 4
Materia orgánica (%)	51 % < 2.0 46 % 2.0-4.0	86 % 2.0-4.0 8 % < 2.0
P Olsen (ppm)	40 % 6-15 34 % < 6	95 % > 15 4 % 6-15
K intercambiable (cmol kg ⁻¹)	60 % 0.21-0.65 27 % > 0.65	79 % > 0.65 13 % 0.21-0.65
Ca intercambiable (cmol kg ⁻¹)	83 % > 2.5	97 % > 2.5
Mg intercambiable (cmol kg ⁻¹)	86 % > 1.0	100 % > 1.0
Na intercambiable (cmol kg ⁻¹)	59 % 0.1-0.7 19 % > 0.7	80 % 0.1-0.7 20 % > 0.7

Tabla 5. Rendimientos de soja, trigo, girasol, y sorgo bajo LC y SD en distintos sistemas de rotación en el ensayo del CEA-2 de ANAPO en la zona Este de Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. Ensayo iniciado en el verano 2000/01. Fuente: Presentación del Ing. Agr. Edward Peña en el evento Vidas 2007 de Fundacruz.

Cultivo	Sistema de rotación*	t ha ⁻¹	
		LC	SD
Soja (Verano 2006/07)	S/G	3.2	3.8
	S/T	3.4	3.7
	Rotación	2.9	3.8
Trigo (Invierno 2006)	S/T	1.02	1.62
	Rotación	1.09	1.85
Girasol (Invierno 2006)	S/T	1.05	1.21
	Rotación	1.19	1.51
Sorgo (Invierno 2006)	Rotación	5.2	6.5

* S/G = sucesión Soja (Verano)/Girasol (Invierno); S/T = Soja (Verano)/Trigo (Invierno); Rotación = Soja (V)/Sorgo (I)-Soja (V)/Trigo (I)-Maiz (V)/Girasol (I).

En el Proyecto de Fertilización de Suelos y Cultivos llevado a cabo por Fundacruz, en colaboración con IPNI entre los periodos del 2005/06 y 2007/08, se evaluaron tratamientos de fertilización incluyendo N, P, potasio (K), azufre (S) y micronutrientes en cuatro sitios de la zona Norte y uno en Paraíso, CAICO y en la zona Este. En un total de 19 ensayos/año en soja en zona Norte (8 en invierno y 11 en verano), se observó respuesta significativa a P en 17 sitios, a la interacción PxS en 2 sitios y a micronutrientes en 1 sitio (**Figura 9**). Asimismo, se observaron tendencias de respuesta, no significativas, a S y K en dos sitios. Las respuestas promedio a P fueron de 418 kg ha⁻¹ con dosis de P de 20 kg ha⁻¹, resultando en una eficiencia de 21 kg de soja por kg de P. La respuesta a P se asoció con los bajos niveles de P en el suelo. El 80 % de los sitios con menos de 10 ppm de P Olsen presentó respuestas agronómicas y económicas significativas a la fertilización fosfatada.

En los 4 ensayos de maíz del invierno del 2006 en la zona Norte se observó respuesta significativa al N en 3 sitios y al P en los 4 sitios. En el Paraíso y CAICO se observaron respuestas significativas a N, P y S en sorgo y maíz y a P en soja. En el sitio de la zona Este, no se observaron respuestas a la fertilización. Finalmente, ensayos paralelos realizados con soja en el invierno del 2007 en 2 sitios de la zona Norte mostraron respuestas a la aplicación de zinc (Zn).

c. Otros aspectos de manejo de suelos

Dos problemas frecuentes en el manejo de suelos de la región son la presencia de capas compactadas y de manchones de salinidad y/o sodicidad. En ambos casos, el mantener puentes verdes, con la inclusión de cultivos de alta producción de residuos y de cultivos de cobertura siempre será una práctica positiva que disminuye los impactos negativos de ambos problemas.

En los suelos con capas compactadas es recomendable el uso de cultivos descompactadores. Entre los cultivos de cobertura, los más adecuados son aquellos que desarrollen mayor cantidad de raíces.

En suelos salinos y/o sódicos, el análisis de suelos permite identificar el principal problema (**Tabla 6**). Se recomienda drenar para eliminar las sales en los suelos

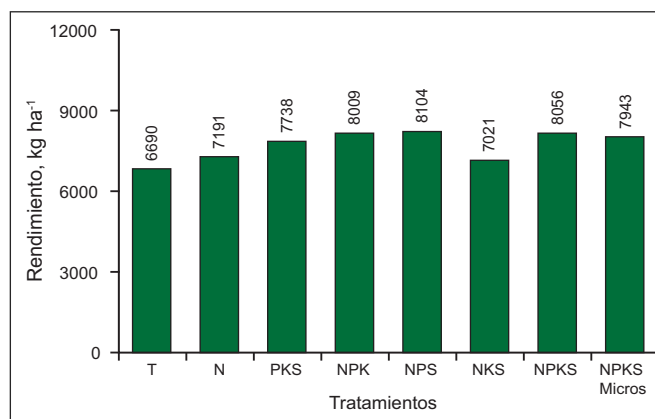


Figura 10. Rendimientos de maíz de invierno 2006, promedios de cuatro sitios, en los ensayos del Proyecto de Fertilización de Suelos y Cultivos de Fundacruz-IPNI, zona Norte.

salinos, mientras que en los suelos sódicos se recomienda la aplicación de sulfato de calcio (yeso) para reemplazar el exceso de Na con Ca y luego drenar el suelo para eliminar las sales junto con el Na. En estos casos, los puentes verdes con presencia permanente de cultivos o coberturas permiten mantener bajas las napas evitando el afloramiento de sales y Na.

Consideraciones finales

La producción de alimentos, biocombustibles, forrajes y fibras afecta la sostenibilidad ambiental, social y económica de los ecosistemas. Uno de los principales objetivos del manejo adecuado del suelo es limitar los procesos de degradación y balancearlos con los procesos de producción. La agricultura sostenible preserva la calidad de los recursos naturales como agua, aire, biodiversidad, suelo, etc. La MO es el indicador más importante de la calidad del suelo. El manejo adecuado, específico para cada sitio, de rotaciones, siembra directa y fertilidad, permite alcanzar y/o mantener contenidos adecuados de MO en el suelo.

Bibliografía

Alvarez, R. 2005. A review of nitrogen fertilizer and conservation tillage effects on soil organic carbon storage. *Soil Use & Management* 21:38-52.
 Amado, T.J.C., C. Bayer, P.C. Conceicao, E. Spagnollo, B.C. Campos, and M. Veiga. 2006. Potential of carbon

Tabla 6. Caracterización analítica, condición física y necesidades de enmiendas de suelos salinos, alcalinos, alcalino/salinos y calcáreos.

	----- Análisis de suelo -----			Condición física	Necesidad de enmienda
	CE*	PSI, %	pH		
Salino	>4.0	<15	<8.4	Buena	No
Alcalino	<4.0	>15	<8.4	Pobre	Si
Salino/alcalino	>4.0	>15	<8.4	Buena-Pobre	Si
Calcario	<4.0	<15	7.3 - 8.4	Buena	No

* CE = Conductividad eléctrica (mmho cm⁻¹); PSI = Porcentaje de Na intercambiable

- accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in Southern Brazil. *J. Environ. Qual.* 35:1599–1607.
- Andriulo, A., B. Mary, and J. Guérif. 1999. Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie* 19:365-377.
- Andriulo, A., M.C. Sasal, A. Irizar, S. restovich y F. Rimatori. 2008. Efecto de diferentes sistemas de labranza, secuencias de cultivo y de la fertilización nitrogenada sobre los stocks de C y N edáficos. En J. Galantini (ed.). *Estudios de las fracciones organicas en suelos de la Argentina.* pp. 117-129. EdiUNS. Bahia Blanca, Argentina.
- Baker, J.M., T. E. Ochsner, R. T. Venterea, and T. J. Griffis. 2006. Tillage and soil carbon sequestration—What do we really know? *Agriculture, Ecosystems and Environment* 118:1-5.
- Bayer, C., L. Martin-Neto, J. Mielniczuk, C. Pillon, and L. Sangoi. 2001. Changes in soil organic matter fractions under subtropical no-till cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:1473-1478.
- Bayer, C., J. Dieckow, e P.C. F. Carvalho. 2010. Uma síntese da pesquisa em sequestro de carbono e mitigação de Gases de efeito estufa em sistemas de produção agropecuária no sul do Brasil. *Actas CD Taller SUCS-ISTRO. Colonia (Uruguay).* 12-14 de Julio de 2010.
- Blanco-Canqui, H., and R. Lal. 2008. No-Tillage and Soil-Profile Carbon Sequestration: An On-Farm Assessment. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72:693-701.
- Ciampitti, I., G. Rubio, L. Picone, and F. García. 2010. Soil carbon and phosphorus pools in field crops rotations in Pampean soils of Argentina. *Enviado a SSSAI.*
- Díaz Zorita, M., G. Duarte, and J. Grove. 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 65:1-18.
- Fabrizzi, K. P., A. Morón, and F. O. García. Soil carbon and nitrogen organic fractions in degraded vs. non-degraded mollisols in Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1831-1841.
- Ferrari, A. E., L. A. Gabbarini, D. L. Reyna, M. González Baro, and L. G. Wall. 2010. Indicadores de calidad de suelos agrícolas con distintos manejos. *Actas CD Taller SUCS-ISTRO. Colonia (Uruguay).*
- Fiorin, J.E. 1999. Plantas recuperadoras da fertilidade do solo. En III Curso sobre Aspectos Básicos de Fertilidade e Microbiologia do Solo sob Plantio Direto. Aldeia Norte Editora. Passo Fundo, RS, Brasil.
- Galantini, J., J. Iglesias, M.R. Landriscini, L. Suñer, y G. Minoldo. 2008. Calidad y dinamica de las fracciones organicas en sistemas naturales y cultivados. En J. Galantini (ed.). *Estudios de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina.* pp. 71-95. EdiUNS. Bahia Blanca, Argentina.
- García, F.O. 2003. Agricultura Sustentable y Materia Orgánica del Suelo: Siembra Directa, Rotaciones y Fertilidad. III Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Sociedad Boliviana de la Ciencia del Suelo. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.
- Gómez, E., L. Ferreras, S. Toresani, A. Ausilio, and V. Bisaro. 2001. Changes in some soil properties in a Vertic Argiudoll under short-term conservation tillage. *Soil Till. Res.* 61:179-186.
- Gregory, E. and C. Drury. 1996. Fertilizer increases corn yield and soil organic matter. *Better Crops* 80(4): 3-5. Potash and Phosphate Institute. Norcross, Georgia, EE.UU.
- Havlin, J.L., D. Kissel, L. Maddux, M. Claassen, y J. Long. 1990. Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54:448-452.
- Moraes, Sá J. C. 1996. Manejo de nitrogenio na cultura do milho no sistema plantio direto. Aldeia Norte Editora. Passo Fundo, RS, Brasil.
- Peterson, G., D. Westfall, L. Sherrod, D. Poss, K. Larson, D. Thompson, and L. Ahuja. 1998. Sustainable dryland agroecosystem management. *Technical Bulletin 98-1.* Colorado Agricultural Experimental Station. Fort Collins, CO, EE.UU.
- Prior, S.A., G.B. Runion, H.A. Torbert, and H.H. Rogers. 2010. Effects of atmospheric CO2 and tillage practice on carbon dynamics. *Actas CD Taller SUCS-ISTRO. Colonia (Uruguay).* 12-14 de Julio de 2010.
- Quincke, A., J. Sawchik, and A. Morón. 2010. Siembra directa y rotación con pasturas: Efectos sobre carbono orgánico, nitrógeno total y potencial de mineralización de nitrógeno en un suelo agrícola del sudoeste de Uruguay. *Actas CD Taller SUCS-ISTRO. Colonia (Uruguay).* 12-14 de Julio de 2010.
- Robinson, C., R. Cruse, and R. Kohler. 1994. Soil management pp. 109-134. En J. Hatfield y D. Karlen (ed.). *Sustainable agricultura systems.* Lewis Pub.. Boca Raton, Florida, EE.UU.
- Ruffo, M. 2003. Factibilidad de inclusión de cultivos de cobertura en Argentina. *Actas XI Congreso Nacional de AAPRESID. Tomo 1: 171-176.* Rosario, Argentina.
- Sá, J.C.M., C. Cerri, W. Dick, R. Lal, S. Venske Filho, M. Piccolo y B. Feigl. 2001. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a brazilian oxisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:1486-1499.
- Studdert, G., and H. Echeverría. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1496-1503.
- Studdert, G. and H. Echeverría. 2002a. Rotaciones mixtas, labranzas y carbono orgánico en la capa arable en el sudeste bonaerense. En *Jornada de Actualización Técnica para Profesionales “Fertilidad 2002”.* INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires. 52 pág.
- Studdert, G. and H. Echeverría. 2002b. Agricultura continua, labranzas y carbono orgánico en la capa arable en el sudeste bonaerense. En *Jornada de Actualización Técnica para Profesionales “Fertilidad 2002”.* INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires. 52 pág.
- Studdert, G. and H. Echeverría. 2002c. Rotaciones agrícolas y dinámica del carbono orgánico del suelo en Balcarce. En *Jornada de Actualización Técnica para Profesionales “Fertilidad 2002”.* INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires. 52 pág.
- Vieira, F. C. B., C. Bayer, J. A. Zanatta, J. Mielniczuk, and J. Six. 2009. Building Up Organic Matter in a Subtropical Paleudult under Legume Cover-Crop-Based Rotations. *Soil Sci Soc Am J.* 73: 1699-1706.
- Walters, D.T., S. Verma, A. Dobermann, K. G. Cassman, D. Ginting, A.E. Suyker, H. Yang, and M.A.A. Adviento-Borbe. 2007. Carbon Sequestration and Global Warming Potential of Continuous Corn and Corn/soybean Rotations Reconsidered. 2007 ASA-CSSA-SSSA International Annual Meetings. Madison, Wisconsin, EE.UU. ❖