

ANALES DE LA ACADEMIA NACIONAL DE AGRONOMIA Y VETERINARIA. 2012. TOMO LXVI.
BUENOS AIRES. ARGENTINA. ISSN 0327-8093
PAG. 381-426

Premios 2012

PREMIO Pérez Compañc, versión 2012

Trabajo premiado

Productividad, fertilidad y secuestro de carbono en suelos pampeanos: efecto del uso agrícola

Roberto Alvarez¹, Gonzalo Berhongaray², Josefina De Paepe¹, María Rosa Mendoza¹, Haydee S. Steinbach¹, Constanza Caride¹ y Rodolfo Cantet¹

1. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires-CONICET.
Av. San Martín 4453 (1417) Buenos Aires, Argentina.

2. Department of Biology, University of Antwerp, Research group of Plant and Vegetation Ecology (PLECO), Campus Drie Eiken, Universiteitsplein 1, B-2610 Wilrijk (Antw.), Belgium. Gonzalo.berhongaray@student.ua.ac.be

Autor de contacto: R. Alvarez, ralvarez@agro.uba.ar

Tel.: 5411-4524-8080

Fax: 5411-4524-8076

Mails de los demás autores

G. Berhongaray: Gonzalo.berhongaray@student.ua.ac.be

J. De Paepe: depaepe@agro.uba.ar

M.R. Mendoza: mmendoza@agro.uba.ar

H.S. Steinbach: steinbac@agro.uba.ar

C. Caride: ccaride@agro.uba.ar

Resumen

Nuestro objetivo fue determinar qué efectos ha tenido el uso agrícola sobre la productividad de los suelos pampeanos, su capacidad de suministrar nutrientes a los cultivos, las cantidades de carbono orgánico e inorgánico secuestradas, y hacer estimaciones de futuros cambios en el stock de carbono orgánico en función del manejo del suelo. Se eligieron 82 establecimientos productivos distribuidos en la región en los que se muestrearon entre 2007-08 diferentes tipos de uso del suelo apareados, entre ellos controles nunca cultivados, lotes agrícolas en la fase pastura de una rotación mixta y lotes agrícolas en la fase agrícola de la rotación. Se determinó en los suelos la densidad aparente, el carbono secuestrado en la materia orgánica y en forma de carbonatos, el nitrógeno total, la textura, el pH, la conductividad eléctrica y el nivel de fósforo extractable hasta 1 m de profundidad. La precipitación y temperatura de los sitios se obtuvo de registros climáticos. Utilizando modelos generados localmente se estimó la productividad de los suelos cultivados y no cultivados para trigo y su capacidad de mineralizar nitrógeno durante el ciclo de este cultivo. Los suelos cultivados sufrieron una leve densificación superficial que no llegó en casi ningún caso a valores críticos para el desarrollo de las raíces. La textura fue escasamente afectada por el cultivo en la capa superficial del suelo pero no en profundidad, indicando bajas pérdidas de suelo por erosión a nivel regional. No se detectaron efectos significativos del cultivo sobre el pH ni problemas de acidificación. En los sitios cultivados fue menor la conductividad eléctrica respecto de los controles, posiblemente debido a lavado de sales. Los contenidos de carbono orgánico

fueron muy diferentes entre tratamientos. El cultivo determinó una reducción significativa del 16 % del carbono orgánico hasta 50 cm de profundidad en la región. En el estrato 50-100 cm se observó una reducción del 9 %, pero que no fue significativa. El nitrógeno total mostró tendencias semejantes al carbono orgánico, no siendo la relación C/N afectada por el uso del suelo. El carbono en carbonatos representó un tercio del total de carbono de los suelos y no fue afectado por el uso. Los niveles de fósforo extractable fueron muy afectados por el cultivo decreciendo significativamente al 30-40 % del contenido de los controles hasta 75 cm de profundidad. La productividad para trigo, estimada sobre la base de características estables de los suelos, no mostró diferencias significativas entre sitios cultivados y no cultivados. Por el contrario, la capacidad de mineralizar nitrógeno cayó en los sitios cultivados al 20-30 % de los valores de suelos no cultivados. El uso agrícola determinó una pérdida de fertilidad de los suelos afectando muy poco las características estables asociadas a la productividad. Se generaron modelos de redes neuronales artificiales capaces de estimar con buen ajuste los contenidos de carbono orgánico ($R^2= 0.64$) y nitrógeno total ($R^2= 0.73$) de los suelos sobre la base del clima, las propiedades edáficas y el tipo de uso. Estos modelos, asociados a información generada por clasificación de imágenes satelitales sobre la superficie asignada a cada tipo de uso de suelo, permitieron estimar los stocks de carbono orgánico y nitrógeno de los suelos pampeanos. El stock de carbono orgánico hasta 1 m de profundidad se estimó en 4.22 ± 0.14 Gt para un área relevada de 48.2 Mha. Usando los datos de los mapas de suelo, generados con resultados de relevamientos realizados principalmente entre 1960-1980, se estimó un stock de

3.96 ± 0.22 Gt. Consecuentemente, no se produjeron cambios a nivel de toda la región en el stock de carbono orgánico durante las últimas décadas. A una escala menor, los partidos con niveles de carbono orgánico mayores a 95 t ha⁻¹ hasta 1 m de profundidad perdieron carbono, detectándose incrementos por debajo de ese umbral. El umbral equivalente para nitrógeno fue de 12 t ha⁻¹. El cultivo determinó un flujo de C-CO₂ hacia la atmósfera de 326 Mt que se produjo, principalmente, antes de la expansión agrícola registrada durante los últimos 40 años en la región. Utilizando un modelo generado para suelos pampeanos se estimó futuros cambios en los niveles de carbono orgánico para algunos suelos bajo posibles escenarios productivos. Suelos de áreas originalmente ricas en materia orgánica, que perdieron carbono hasta el presente, seguirán perdiendo carbono pero a una velocidad decreciente, debido al incremento de los aportes de residuos de los cultivos, para empezar a recuperar sus niveles de materia orgánica dentro de un par de décadas. Nuestros resultados indican que la productividad de los suelos pampeanos ha sido poco afectada por la agricultura. Los efectos más importantes se han producido sobre la capacidad de aportar nutrientes a los cultivos. Las pérdidas de carbono orgánico por uso agrícola han sido bajas y tenderán a revertirse en el largo plazo si se mantiene la tendencia de incremento de los rendimientos de los cultivos. Para lograr sistemas productivos sustentables deberá reponerse la fertilidad perdida con aporte externo de nutrientes.

Palabras clave: Región Pampeana, productividad de los suelos, fertilidad del suelo, secuestro de carbono.

Introducción

El uso agrícola de los suelos lleva comúnmente a procesos de degradación como la erosión (Follet, Stewart 1985), la compactación (Hamza, Anderson 2005), la acidificación (Bünemann et al. 2006), la salinización (Huffman et al. 2000), la pérdida de materia orgánica (Davidson, Ackerman 1993; Houghton et al. 1983) y la de nutrientes (McLauchlan 2006). Estos procesos de degradación pueden afectar la productividad de los suelos (Follet, Stewart 1985, Pan et al. 2009) y la sustentabilidad de los sistemas productivos (Doran et al. 1994). A su vez, en un contexto de cambio climático, el foco de los estudios recientes sobre la materia orgánica de los suelos apunta a determinar no solo su impacto sobre la productividad sino su función como posible destino del carbono de la atmósfera y mitigar el cambio climático (Mishra et al., 2009, Meersmans et al., 2009). Actualmente el secuestro de carbono es uno de los servicios ecosistémicos de mayor interés en suelos cultivados y no cultivados. Muchos estudios en el Mundo tratan de estimar la capacidad de secuestro de carbono de los suelos según las condiciones climáticas, edáficas y de manejo (Schulp et al., 2008, Liang et al., 2005). También los contenidos de carbono inorgánico pueden ser afectados por el cultivo del suelo, especialmente en zonas áridas y semiáridas. Incrementos del contenido de carbono inorgánico se pueden producir por riego con aguas carbonatadas (Wu et al., 2009), y pérdidas luego de la labranza pueden ocurrir por exposición de suelo previamente enterrado a la atmósfera (Moreno et al., 2006) o acidificación por fertilización (Wu et al., 2009).

La Región Pampeana es considerada una de las principales áreas agrícolas del Mundo debido a su extensión y productividad

(Satorre, Slafer, 1999). La agricultura se ha expandido exponencialmente en las últimas cuatro décadas, principalmente con el cultivo de soja (MinAgri 2012). Esto ha generado preocupación debido a la posible degradación causada en los suelos por la combinación de mayor uso agrícola con un cultivo de baja producción de residuos (Viglizzo et al. 2001, 2010). Sin embargo, el rendimiento medio de los cultivos de grano se ha duplicado-triplicado en los últimos 40 años (Alvarez 2011, MinAgri 2012), sin que esos posibles efectos se hagan evidentes en la producción. Esto podría deberse a que la degradación de los suelos fue compensada por las mejoras tecnológicas introducidas. Por ejemplo, durante el mismo período se adoptó y extendió marcadamente en la Región Pampeana la práctica de la fertilización con nitrógeno y fósforo (Alvarez et al. 2012).

Gran cantidad de trabajos puntuales han estudiado aisladamente los efectos del uso agrícola sobre variables asociadas a la degradación edáfica pero no se ha realizado una evaluación regional de las mismas y de su posible efecto sobre la productividad de los suelos pampeanos. Los pocos trabajos regionales realizados han mostrado que algunas áreas de la Región Pampeana han sufrido pérdidas de suelo por erosión (Prego 1996) y, utilizando modelos de simulación, se ha estimado que algunas áreas habrían perdido carbono orgánico en los primeros 20 cm del suelo (Alvarez 2001, Caride et al. 2012). Los efectos de la agricultura sobre otras variables que podrían impactar la productividad edáfica no se han cuantificado regionalmente ni se han determinado sus efectos sobre las capas subsuperficiales y profundas de los suelos.

Una manera de estimar qué efectos tiene el uso agrícola de los suelos sobre su productividad es evaluar su impacto sobre características asociadas al rendimiento a través de índices de productividad. Esto permitiría determinar el impacto de la agricultura sobre los suelos, que podría estar enmascarado por los avances tecnológicos y no ser detectado analizando solamente la evolución del rendimiento de los cultivos. Si bien la productividad es consecuencia de todas las características de los suelos que afectan a los cultivos, para la elaboración de los índices de productividad suelen incluirse normalmente características estables, dejando de lado variables de fertilidad que pueden modificarse rápidamente por el manejo (Kiniry et al. 1983, Pierce et al., 1983). Entre las variables comúnmente incluidas se encuentran aquellas relacionadas al suelo como medio de enraizamiento y reservorio de agua, el pH y el nivel de material orgánica (Riquier et al. 1970, Wilson et al. 1991). La utilización de estos índices lleva aparejada la necesidad de una evaluación paralela de la disponibilidad de nutrientes para lograr una representación global de la capacidad productiva edáfica. En la Región Pampeana se ha determinado que la productividad de los suelos para el cultivo de trigo, que es el que está geográficamente más difundido, depende de la interacción entre la profundidad, la textura y el contenido de materia orgánica del suelo (Alvarez, De Paepe 2011).

Nuestros objetivos fueron: (1) determinar en la Región Pampeana los efectos del uso del suelo sobre sus propiedades, la productividad para trigo y sobre las reservas de nutrientes, (2) cuantificar los stocks de carbono de los suelos bajo diferentes usos y compararlos con los obtenidos de relevamientos realiza-

dos hace 30-50 años y (3) hacer estimaciones de futuros cambios de los stocks de carbono en función del manejo del suelo.

Materiales y Métodos

Descripción de la región

La Región Pampeana es una vasta planicie de unas 60 Mha ubicada entre 28 y 40 °S en Argentina. Su relieve es plano o levemente ondulado con Molisoles, formados sobre materiales loésicos, como suelos predominantes (Alvarez, Lavado 1998). La vegetación natural son pastizales de gramíneas con formaciones boscosas en algunas áreas. La precipitación varía de 200 mm en el oeste a 1200 mm en el este, siendo la temperatura media 14 °C en el sur y 20 °C en el norte. Debido al origen eólico de los sedimentos provenientes del sudoeste y al gradiente climático, los suelos varían de arenosos con poco desarrollo en el oeste a finos y profundos en el este, siendo illita la arcilla más común (Alvarez, Lavado 1998). Horizontes petrocálcicos aparecen dentro del primer metro del perfil en muchos sitios en los bordes oeste y sur de la región (Teruggi 1957). Un 60 % del área, con precipitaciones superiores a 500 mm, se utiliza para la agricultura, principalmente en suelos bien drenados, dejando los suelos hidromórficos para pastoreo (Hall et al., 1992). Soja (*Glicine max* (L.) Merr.), trigo (*Triticum aestivum* L.), y maíz (*Zea mays* L.) son los cultivos principales (MinAgri 2012). Los bosques representan un 7 % de la superficie. En la porción húmeda de la región especies introducidas hace 150 años son usadas como barreras contra el viento ocupando menos del 0.2 % del área (INDEC 2002). Estas áreas forestadas han sufrido cambios menores durante las

últimas décadas (Soriano 1991). Desde 1970 se intensificó el uso agrícola de los suelos y se adoptó en forma generalizada la soja como componente, primero minoritario y luego principal, de las rotaciones (Viglizzo et al. 2001). Este cultivo representa un 60 % del área bajo agricultura actualmente (MinAgri 2012).

Muestreo de suelos y métodos analíticos

Entre agosto de 2007 y febrero de 2008 se muestrearon 82 establecimientos productivos distribuidos en la zona cultivada de la región (Figura 1). Se eligieron los establecimientos por considerarlos representativos de cada subregión y porque permitían generar una grilla de muestreo con sitios relativamente equidistantes. En cada uno se muestrearon cinco usos comunes del suelo: arboledas, controles nunca cultivados bajo vegetación predominante graminoide, sitios cultivados que al momento de muestreo se encontraban en la fase pastoril de una rotación mixta, sitios cultivados en la fase agrícola de la rotación y áreas inundables con suelos hidromórficos. Los suelos con horizonte petrocálcico se muestrearon hasta el límite superior del mismo y se tomaron muestras de carbonato. El barreno usado permitía una determinación precisa del volumen de suelo extraído y el cálculo de la densidad aparente. Las características de cada tratamiento y la metodología de muestreo y las técnicas analíticas usadas para determinar carbono orgánico, carbono en carbonatos, textura, pH y conductividad eléctrica se han descrito en detalle en Berhongaray et al. (2013). La determinación de nitrógeno total está descrita en Mendoza et al. (2012 a y b). El fósforo extractable por se determinó por Bray 1 (Kuo 1996). El carbono de carbonatos en los horizontes petrocálcicos se estimó asumiendo un

espesor de esos horizontes de 25 cm (Pazos, Mestelan 2002). Los resultados de stock de carbono orgánico se transformaron a masa equivalente en la forma descrita en Berhongaray et al. (2013). Todos los sitios fueron georeferenciados.

Datos climáticos y de mapas de suelo

La temperatura y precipitación media anual de los sitios muestreados se estimó con LocClim y la clasificación del suelo en los sitios muestreados se obtuvo de la base digital de suelos georeferenciados de Argentina en la forma descrita en Berhongaray et al (2013). Se agrupó a los suelos con fines de comparaciones estadísticas en: 1) suelos de textura gruesa de zonas semiáridas, Haplustol, Argiustol, Calciustol, Torripsament y Ustipsament (23 %); 2) suelos de textura gruesa de zonas húmedas, Hapludol (21 %); 3) suelos de textura fina de zonas húmedas, Argiudol, Peludert and Argialbol (36 %); y 4) suelos hidromórficos, Natracualf, Natracuol y Natralbol (20 %).

Para la estimación de los stocks de carbono en el pasado se usaron datos de los relevamientos de suelos de INTA de las provincias de Buenos Aires, La Pampa, Córdoba, Santa Fe y Entre Ríos integrados a nivel de departamento en la forma descrita en De Paepe y Alvarez (2010). Estos relevamientos fueron realizados entre 1960 y 1980 para un área de ca. 74 Mha. Los resultados de textura, modelizados a nivel de departamento se usaron posteriormente como inputs para los modelos de redes neuronales artificiales en la estimación de los niveles presentes de carbono orgánico de los suelos (ver subsección Análisis estadístico). El área efectiva de cada departamento usada para la estimación fue

el resultado de la diferencia entre los límites políticos del partido y el área ocupada por ciudades, lagos, lagunas y salinas (ver subsección sobre Estimación de las superficies por tipo de uso del suelo). Para estimar los stocks de carbono en carbonato se tomó una densidad aparente del horizonte petrocálcico de 2.1 g cm^{-3} , 6.4 % de contenido de carbono y un espesor de 25 cm (ver sección de Resultados).

Estimación de las superficies por tipo de uso del suelo

Para la estimación de las áreas por tipo de uso del suelo se utilizó una combinación de clasificación de imágenes satelitales, datos del Censo Nacional Agropecuario 2002 e información del tipo de suelo obtenida de mapas de suelo de INTA en la forma descrita por Berhongaray et al. (2013). El área de cada tipo de uso se calculó por departamento y la superficie efectiva del departamento se determinó como la suma de los 5 tipos de uso definidos (arboledas, no cultivados, agrícolas, pasturas y bajos).

Estimación de la productividad de los suelos y de la mineralización de N

Para la estimación de la productividad de los suelos se utilizó un modelo desarrollado localmente para trigo (Alvarez 2002). Este modelo, basado en una regresión polinómica, caracteriza la productividad en función de la capacidad de almacenamiento de agua útil del suelo y su contenido de carbono orgánico. Se estimó la productividad para suelos nunca cultivados y cultivados en fase pastura o agrícola a nivel departamento teniendo en cuenta su profundidad y textura, que determinan la capacidad

de almacenamiento de agua útil, y el contenido medido de carbono orgánico estimado por la red neuronal ajustada (ver sección Resultados). También se hicieron estimaciones a nivel departamental para los suelos cultivados en función de las proporciones de suelos bajo pasturas y agricultura en cada departamento, surgidas de la clasificación de imágenes satelitales. La capacidad de almacenamiento de agua se tomó de la integración de los datos de los mapas de INTA, debido al escaso efecto del cultivo sobre las texturas de los suelos (ver sección Resultados) y los stocks de carbono orgánico se estimaron como se indica más abajo (ver subsección Análisis estadístico).

La capacidad de mineralización de nitrógeno de la materia orgánica durante el ciclo de trigo se estimó usando un modelo de red neuronal artificial desarrollado para los suelos pampeanos (Alvarez, Steinbach 2011). El modelo estima mineralización a campo en función de la textura, el nivel de nitrógeno del suelo y el nivel de residuos vegetales. Se corrió el modelo para las condiciones de suelos nunca cultivados y cultivados fase pastura y agrícola a nivel departamental, estimado los stock de nitrógeno con el modelo desarrollado (ver sección Resultados) con un nivel medio de residuos en todos los casos. La red necesita también resultados de test de mineralización *in vitro*. Para ello se hicieron incubaciones siguiendo la metodología descrita en Alvarez y Steinbach (2011) de muestras superficiales de los tratamientos control y cultivados. También se hicieron estimaciones a nivel departamental siguiendo los mismos criterios que para la estimación de la productividad.

Análisis estadístico

Se testeó la normalidad de todas las variables pero como en casi todos los casos hubo cierta evidencia de ausencia de normalidad, no lográndose la normalización con diferentes transformaciones, se apeló a argumentos asintóticos para el análisis de las variables que convergían a una distribución normal (Amemiya 1985): carbono orgánico, nitrógeno total, fósforo extractable, densidad aparente, arcilla, limo y arena, usando modelos lineales mixtos con un criterio fuertemente restrictivo sobre el tamaño del test de hipótesis ($P < 0.01$). Se testeó el efecto de variables de clima y suelo como covariables y los efectos lineales y cuadráticos de la profundidad se anidaron dentro de los tratamientos como efectos fijos, ajustándose además una estructura espacial por profundidad mediante Proc Mixed de SAS. Se testeó también un término para considerar el tipo de suelo como efecto fijo y su interacción con los tratamientos. En este último caso, como el tratamiento bajos inundables se asociaba a un tipo de suelo (suelos hidromórficos), para no generar un diseño excesivamente desbalanceado, se excluyó ese tratamiento del análisis. Variables con distribución bimodal como carbono de carbonato y conductividad eléctrica (que incluían muchos ceros en las distribuciones) se analizaron por Kruskal-Wallis usando tratamiento como variable clasificatoria y profundidad como partición. Los modelos empleados y su implementación han sido descriptos en Berhongaray et al. (2013).

Se utilizó análisis de regresión y correlación para buscar asociaciones entre variables y redes neuronales artificiales para modelar el impacto de las variables ambientales sobre los stocks de carbono orgánico, nitrógeno total y otras variables

respuesta. Los datos se partitionaron aleatoriamente en 70 % para training y 30 % para validación, ajustando los modelos con el set training y testeándolos con el de validación para determinar su capacidad de generalización. La metodología de construcción de redes neuronales está descrita en Berhongaray et al. (2013). Las redes generadas para estimar los stocks de carbono orgánico y nitrógeno total de los suelos, combinadas con los resultados de la clasificación de imágenes satelitales, permitieron estimar los contenidos de carbono y nitrógeno a escala de departamento y su integración el stock total de los suelos pampeanos (ver sección Resultados). Se realizó un análisis de incertidumbre de los stocks de carbono orgánico estimados ($0.5 \times$ intervalo de confianza 95 %/media) por una combinación de conocimiento experto y los métodos usuales de propagación de errores que se describió en Berhongaray et al. (2013).

Modelización de los cambios futuros del stock de carbono de los suelos

Se simularon cambios futuros de los stocks de carbono orgánico de suelos de la Pampa Ondulada (departamentos de Arrecifes, Carmen de Areco, Chacabuco, Rojas y Salto) bajo diferentes rotaciones posibles utilizando una metodología de balance de carbono del suelo basada en modelos de redes neuronales artificiales desarrollada para los suelos de la subregión (Alvarez et al. 2011). Los suelos para los que se realizaron las simulaciones corresponden a la categoría de los que perdieron marcadamente carbono por efecto del cultivo (ver sección Resultados). La metodología usa una red neuronal artificial que estima aportes

de carbono al suelo por los cultivos y otra que estima pérdidas de carbono como $C-CO_2$, generado por la respiración heterotrófica del suelo. Ambas se aplicaron de la manera descrita en Alvarez (2011 y 2012a). Se ajustaron modelos de regresión simples a los datos de rendimiento de los cultivos de trigo, soja y maíz (MinAgri 2012) en función del tiempo y con esas regresiones se estimó la evolución de los rendimientos futuros, asumiendo una ganancia anual equivalente al promedio observado en los últimos 40 años ($35 \text{ kg grano ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para trigo, $41 \text{ kg grano ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para soja y $112 \text{ kg grano ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para maíz). Los rendimientos estimados fueron uno de los inputs de la red neuronal que estimó aportes de carbono al suelo. Se estimó un nivel medio de carbono orgánico del suelo en la actualidad con el modelo desarrollado con ese fin (ver sección Resultados) para el mismo grupo de departamentos y para ese nivel inicial de carbono se calculó la evolución del balance de carbono. Ese nivel sirvió para la inicialización de la red estimativa de la respiración edáfica. También se hicieron estimaciones para suelos con bajo nivel actual de carbono orgánico. Se asumió que para fines del Siglo XXI la temperatura de la subregión será $4 \text{ }^\circ\text{C}$ mayor a la actual (IPCC 2007) y los coeficientes de mineralización de la red neuronal se ajustaron por ese incremento de temperatura (ca. $0.04 \text{ }^\circ\text{C año}^{-1}$). La composición de la rotación media usada en la actualidad fue tomada de Alvarez et al. (2011). El balance de carbono se calculó como la diferencia entre los aportes de carbono en los residuos de los cultivos y la vegetación espontánea y la respiración heterotrófica.

Resultados

Efecto de los tratamientos sobre las variables edáficas

Las variables climáticas y de suelo presentaron una muy amplia variación entre los sitios muestreados (Tabla 1), siendo Molisoles los suelos presentes en 80 % de los sitios. En 11 % de los sitios no se pudo muestrear hasta 1 m de profundidad por la presencia del horizonte petrocálcico que aparecía generalmente entre 50 y 100 cm, pero en 3 % de los sitios apareció entre 25-50 cm de profundidad. Este horizonte tenía una densidad aparente de entre 1.9 y 2.3 g cm⁻³, con una media de 2.1 g cm⁻³. No contenía carbono orgánico y más del 50 % era carbonato, con un contenido promedio de carbono del 6.35 %. Analizando las variables a nivel de estrato de suelo (n= 1493) a medida que la temperatura y la precipitación del sitio aumentaban también se incrementaba el contenido de arcilla de las muestras ($R^2 > 0.22$). La densidad aparente decreció a mayor contenido de carbono orgánico en las muestras ($R^2 = 0.20$) y la conductividad eléctrica estuvo asociada a pH ($R^2 = 0.13$).

El cultivo de los suelos determinó un aumento de su densidad aparente del 9-10 % hasta 50 cm de profundidad sin diferencias entre fases de la rotación (Figura 2). La densidad media del estrato 0-25 cm de suelos cultivados fue 1.21 g cm⁻³, con solo 1 % de los casos con densidad mayor a 1.5 g cm⁻³. El uso agrícola tuvo muy poco efecto sobre la textura de los suelos, solamente en el estrato 0-25 cm se detectaron diferencias entre sitios cultivados y no cultivados (Figura 2) siendo la concentración de arcilla 2-3 % mayor bajo cultivo (sobre el total de la masa de la capa de

suelo). Limo y arena no difirieron significativamente entre tratamientos. No hubo efecto del cultivo sobre el pH de los suelos en ninguna de las profundidades analizadas ni efectos significativos sobre los stocks de carbono de carbonatos, que promediaron 50 t C ha⁻¹ hasta 1 m de profundidad (Figura 2). Alrededor del 35 % del carbono total de los suelos estaba en forma de carbonato, ascendiendo este porcentaje a 80 % en suelos de zonas semiáridas. El carbonato estaba estratificando en los suelos con las mayores acumulaciones en el estrato 75-100 cm (50 % del total hasta 1 m). Contrariamente, la conductividad eléctrica fue menor de 25 a 100 cm en los suelos cultivados respecto de los controles no cultivados (Figura 2). El carbono orgánico fue marcadamente afectado por el uso del suelo. Los controles no cultivados tuvieron un contenido promedio hasta 1 m de 101 t ha⁻¹, mientras que los sitios cultivados promediaron 87 t ha⁻¹, sin diferencias significativas entre pasturas y sitios agrícolas. En todos los casos 50 % del stock total de carbono se encontraba en el estrato 0-25 cm. Las diferencias entre suelos cultivados y no cultivados fueron significativas hasta 50 cm de profundidad, siendo el stock en los suelos bajo cultivo 16 % menor que en los controles. El rango de diferencias entre sitios no cultivados y cultivados varió de -22 a +64 %. Debajo de 50 cm los suelos cultivados tenían en promedio 9 % menos de carbono orgánico que los controles pero la diferencia no fue significativa. La transformación de los stocks de carbono orgánico por profundidad a masa equivalente no produjo cambios en los resultados de los análisis estadísticos. El nitrógeno total presentó similares tendencias al carbono orgánico, siendo menor en los suelos cultivados que en los controles hasta 50 cm de profundidad sin diferencias entre suelos en fase

pastura o agrícola (Figura 2). La relación C orgánico/N total no fue afectada por el uso del suelo o la profundidad, promediando 8.9. Respecto del fósforo extractable, esta fue la variable más impactada por el cultivo de los suelos. Decreció al 30-40 % del valor de los controles en los sitios cultivados en todos los estratos de suelo, siendo las diferencias significativas hasta 75 cm de profundidad (Figura 2). El valor medio de fósforo en los controles de 0 a 25 cm fue de 59 ppm y en los suelos cultivados 19 ppm, independiente del uso pastura o agrícola.

Impacto del cultivo sobre la productividad y capacidad de mineralización de nitrógeno

La productividad de los suelos para trigo no fue afectada por el cultivo (Figura 3). No hubo diferencias significativas entre los índices de productividad estimados para los suelos control y los cultivados, que en promedio difirieron solo 2 %. A nivel de la Región Pampeana los partidos correspondientes a la subregión húmeda tienen suelos cultivados de mayor productividad que los de la subregión semiárida, consecuencia de sus mayores profundidades medias y texturas más finas, que determinan mayor capacidad de almacenamiento de agua útil y también de niveles más altos de carbono orgánico. Contrariamente, sí fue muy afectada por el cultivo la capacidad de mineralizar nitrógeno de los suelos durante el ciclo de trigo (Figura 4). En los suelos cultivados en fase pastura esta capacidad fue del 29 % de la de los controles y en los suelos en fase agrícola del 16 %. Hubo a su vez diferencias significativas entre suelos con pasturas o agricultura, los primeros duplicaron a los segundos en su capacidad de mineralización. Estas diferencias se debieron a los efectos del uso del suelo sobre el

stock total de nitrógeno de los suelos y, principalmente, sobre su labilidad. Mientras el stock de nitrógeno decreció un 20 % por el cultivo en el estrato 0-25 cm del suelo en relación a los controles, su labilidad fue muy afectada por el uso siendo la mineralización in vitro unas cinco veces menor en los suelos cultivados que en los controles. La mineralización estimada en el Este Pampeano es mucho mayor a la del Oeste debido a las grandes diferencias del contenido de nitrógeno entre esas áreas.

Modelización de los stocks de carbono orgánico y nitrógeno de los suelos

Fue posible modelizar con buena performance la distribución espacial del carbono orgánico y el nitrógeno total en función del uso del suelo y la profundidad. Las redes neuronales ajustadas explicaron la mayor parte de la variabilidad con buena capacidad de generalización (Figura 5). No hubo diferencias en los R^2 entre los sets training y validación siendo las ordenadas y pendientes de la rectas de datos observados vs. estimados no diferentes de 0 y 1 respectivamente. Los inputs con efecto significativo fueron: tipo de uso del suelo, temperatura, precipitación, profundidad, arcilla y arena. Los modelos indicaron que el carbono y el nitrógeno eran mayores en áreas más lluviosas y suelos con más arcilla y que decrecían en áreas más cálidas, con la profundidad o a medida que el contenido de arena del estrato de suelo aumentaba. En cuanto al impacto del uso, el modelo indicó que a igualdad de otras condiciones el nivel de carbono o nitrógeno variaba en el siguiente orden: arboledas>controles no cultivados>cultivado fase pastura=cultivado fase agrícola> bajos. Otras variables como carbono en carbonato, pH y fósforo extractable no pudieron modelizarse con ajustes aceptables ($R^2 < 0.30$).

Cambios en los stocks de carbono y nitrógeno

Utilizando los datos de los relevamientos de suelos realizados por INTA, mayormente en el período 1960-1980, se estimó un stock de carbono orgánico para un área de 74 Mha (prov. de Buenos Aires, Santa Fé, La Pampa, Córdoba y Entre Ríos) de 5.50 Gt y de carbono en carbonatos de 3.58 Gt hasta 1 m de profundidad. Alrededor del 40 % del total de carbono del suelo estaba presente como carbonato. La red neuronal ajustada a resultados del relevamiento 2007-2008, acoplada a los datos de uso del suelo generados por la clasificación de imágenes satelitales, se usó para hacer una estimación para un área de 48.2 Mha, correspondiente a las porciones húmeda y semiárida de la Región Pampeana. Para esta área, que incluye la mayoría de los suelos cultivados de la región, el stock de carbono orgánico estimado fue 4.22 Gt. La información de los relevamientos del período 1960-1980 indica un stock de 3.96 Gt para esa misma área (Figura 6). Los stocks en el estrato 0-25 cm fueron de 2.04 Gt en 1960-1980 y 1.93 Gt en 2007-2008.

El análisis de incertidumbre indicó que las incertidumbres de las estimaciones eran bajas. La incertidumbre de la estimación del stock del período 1960-1980 en el estrato 0-25 cm fue de 9.8 %, y 5.9 % para la del período 2007-2008, disminuyendo a 5.7 y 3.3 % respectivamente para los stocks acumulados a 1 m de profundidad. En el relevamiento 1960-1980 la fuente principal de incertidumbre fue la del área correspondiente a cada tipo de suelo estimada en los mapas de INTA. Las incertidumbres asociadas a la técnica de Walkley-Black, la modelización de los perfiles de carbono y la estimación de densidad aparente promediaron 8 %

al nivel de capa de suelo. Para el relevamiento 2007-2008, las incertidumbres del modelo de red neuronal y de los inputs combinadas variaron entre 35 y 49 %, dependiendo del tipo de uso del suelo y estrato de profundidad, mientras que el cambio de escala generó una incertidumbre del 68 %. Estos resultados sugieren que a nivel regional las pérdidas de carbono orgánico por efecto del cultivo se produjeron en la Región Pampeana antes del período 1960-1980, pues no hay diferencias detectables durante los últimos 30-50 años, debido a que los intervalos de confianza del 95 % de las estimaciones de stock pasadas y presentes se superponen. Contrariamente, si se contrastan los resultados a escala departamental, los departamentos con stocks de carbono mayores a 95 t ha^{-1} tendieron a perder carbono y por debajo de ese umbral los incrementos fueron más frecuentes (Figura 7). Tendencias similares se estimaron para el nitrógeno total con un umbral cercano a 12 t ha^{-1} . Para variables no afectadas por el cultivo de los suelos y que no se pudieron modelizar, como carbono inorgánico y pH, solo se pudieron elaborar mapas a nivel de la Región Pampeana, utilizando la información de los mapas de suelo de INTA (Figura 8).

Cambios futuros del carbono orgánico

Se calculó que si se mantiene la velocidad de incremento de rendimiento de los cultivos de trigo, soja y maíz y la composición media de la rotación usada actualmente (trigo-soja de segunda-maíz-soja de primera-soja de primera-soja de primera) durante las próximas dos décadas se va a producir una disminución de los niveles de carbono en la materia orgánica la Pampa Ondulada en promedio (Figura 9). Esta caída sería menor de aplicarse

rotaciones con menor proporción de soja que la actual. El nivel de carbono comenzaría a recuperarse en unos 20 años debido al incremento de los aportes de residuos de cultivos de mayor rendimiento y a la disminución de la emisión de C-CO₂ por respiración heterótrofa de suelos con menor nivel de materia orgánica. Sin embargo, no se llegará a nivel regional a la recuperación del carbono orgánico de los suelos al nivel anterior al de la introducción del cultivo durante el Siglo XXI. Debería disminuirse la proporción de soja en la rotación para evitar que los suelos ricos en carbono orgánico de la subregión lo pierdan por efecto del uso agrícola. En cambio, en el caso particular de los suelos de la Pampa Ondulada que actualmente tienen niveles de materia orgánica bastante más bajos que la media se producirá secuestro de carbono, aún con rotaciones con alta proporción de soja en su composición (Figura 9).

Discusión

El tratamiento control debe representar las condiciones de los suelos previas al cultivo. Se utilizaron aquí como controles, en la mayor parte de los casos, los parques de los establecimientos, que han demostrado ser referencias adecuadas en la presente comparación (Berhongaray et al. 2013). Debido a su cercanía, en cada establecimiento no hubo diferencias en el escenario climático entre usos del suelo. Los usos arboleda, control, cultivado fase pastura y cultivado fase agrícola correspondieron al mismo Gran Grupo de suelos en todos los establecimientos. En 50 % de los establecimientos se dispuso de información a nivel de la serie de suelo (INTA 2010). En 95 % de esos establecimientos la serie de

suelos era la misma entre los tratamientos indicados. Consecuentemente, el clima y las condiciones de suelo fueron muy similares entre los diferentes usos del suelo, excepto en el caso de los suelos hidromórficos, y la comparación entre sitios cultivados y no cultivados no parece estar afectada por efectos confundidos.

La densificación observada en los suelos pampeanos sometidos a cultivo ha sido causada, como en muchos otros lugares del Mundo, por una combinación de los efectos de la labranza, que destruye los agregados (Carter 1990), el tránsito de maquinaria (Richard et al. 1999), y el descenso del contenido de materia orgánica (Rawls 1983). Esta densificación ha sido moderada, no excediendo en casi ningún caso el umbral a partir del que puede restringirse el crecimiento de las raíces de los cultivos, aceptado generalmente como 1.5 g ml^{-1} (Hassan et al. 2007).

Los escasos cambios texturales detectados entre sitios no cultivados y cultivados pueden deberse a la erosión de los suelos bajo cultivo. En los sitios cultivados el contenido de arcilla era 2-3 % mayor que en los controles en el estrato 0-25 cm. La pérdida de suelo superficial por erosión y el mezclado de los horizontes por las labranzas pueden generar estos resultados. Los horizontes B suelen encontrarse entre 25 y 80 cm de profundidad (INTA 1981, 1983, 1989) y en áreas donde el uso agrícola ha sido muy intenso por más de un siglo, como la Pampa Ondulada, los 3-5 cm superiores del perfil se han perdido por erosión (Alvarez et al. 1995), con afloración de material del horizonte B, mas arcilloso, mezclado con el horizonte A. Estos cambios no han tenido impacto sobre la capacidad de almacenamiento de agua de los suelos, que estimados

por la función de pedotransferencia de Rawls et al. (1982), casi no cambia entre sitios con y sin cultivo (resultados no presentados).

No se detectó efectos del cultivo sobre el pH del suelo ni los stocks de carbono secuestrado como carbonato. La agricultura generalmente acidifica los suelos debido a la extracción de cationes y, especialmente, la liberación de protones por la nitrificación del amonio de los fertilizantes (Tisdale et al. 1993). En la Región Pampeana la historia agrícola es corta, dependiendo de la subregión considerada, varía entre 60-130 años (Alvarez 2001) y el uso de fertilizantes solo se ha difundido en los últimos años y con dosis bajas (FAO 2004). Los menores niveles de sales en los suelos cultivados respecto del control son la resultante de las diferencias en la absorción y cosecha de nutrientes y en el reciclado de residuos y agua (Jobbágy, Jackson 2001, 2007).

La disminución de los contenidos de carbono orgánico del suelo detectada en la Región Pampeana es baja en comparación a la reportada en muchas otras áreas cultivadas del Mundo, en las que se ha reportado disminuciones del 30-50 % en los primeros 20-30 cm del suelo (Guo, Gifford 2002). Este efecto se produce por la reducción de los aportes de carbono al suelo bajo cultivo (Lauenroth et al. 2000), como consecuencia del barbecho y la cosecha, y las mayores temperaturas de los suelos labrados (Grant et al. 1995), que llevan a un aumento de la mineralización. En la Región Pampeana los aportes de carbono de los cultivos promedian 30-70 % del de los pastizales (Alvarez, Steinbach 2010a). Esta reducción de los aportes de carbono produjo la disminución del contenido de carbono orgánico del suelo hasta 1 m de profundidad, aunque solo se detectó diferencias significativas hasta

50 cm. La erosión del suelo es otra causa de la disminución del carbono orgánico. En la Pampa Ondulada se ha estimado que por erosión se ha perdido un 8 % del carbono orgánico secuestrado a 1 m de profundidad (Alvarez et al. 1995). La fase de la rotación no impactó significativamente sobre el stock de carbono orgánico del suelo siendo las diferencias entre fase pastura y agrícola del 5 % (no sig.). Los experimentos de larga duración realizados en la región han mostrado que, tanto bajo escenarios húmedos (Casanovas et al. 1995) como semiáridos (Galantini 2005), fases pastoriles de pocos años de duración solo tienen un efecto menor sobre el total de carbono orgánico del suelo, pero que sí afectan marcadamente la fracción fácilmente mineralizable de la materia orgánica. La selección de sitios apareados para el muestreo de stocks de carbono en el suelo, como se hizo en este estudio, es una metodología potente para evaluar cambios de los stock de carbono que no pueden detectarse por otros métodos (Heim et al. 2009). Sin embargo, solo se detectaron efectos significativos hasta 50 cm. A pesar de ello, los resultados obtenidos sugieren que, si bien no se alcanzó significancia debido a la variabilidad, el cultivo afectó los stocks de carbono orgánico de los suelos pampeanos hasta 1 m de profundidad. Como la relación C/N no fue afectada por el uso, las mismas tendencias observadas para carbono orgánico se observaron para el nitrógeno total.

El efecto del cultivo sobre el fósforo extractable fue mucho más marcado que sobre la materia orgánica, disminuyendo a un tercio de los niveles de los controles no cultivados hasta 1 m, con efectos significativos detectados hasta 75 cm. En el estrato 0-25 cm los sitios muestreados, a pesar de ser sitios que normalmente

recibían fertilización fosforada, en un 77 % tenían niveles menores a 20 ppm. Por debajo de este umbral el rendimiento está restringido y es generalizada la respuesta de trigo y maíz a la fertilización (Alvarez 2012b). Además, el 67 % tenía niveles menores a 15 ppm, que hacen altamente probable la respuesta a la fertilización fosforada de soja (Alvarez 2012b). En consecuencia, el cultivo deprimió marcadamente la fertilidad fosforada del suelo llevándola en muchos casos a ser limitante de la producción.

La estimación de la productividad de los suelos para trigo, considerando solamente características edáficas de lenta variación, indicó que la misma ha sido poco afectada por la agricultura en la Región Pampeana. Los cambios determinados por el uso agrícola sobre los stocks de carbono orgánico no han sido de una magnitud tal que produzcan caídas de productividad para este cultivo, según el modelo usado. En cambio, la capacidad de mineralizar nitrógeno de los suelos fue muy afectada por el uso. La fertilidad de los suelos cultivados ha decrecido, considerando la capacidad de aporte de nitrógeno y también la de fósforo, a alrededor de un tercio de los valores de los suelos no cultivados. Esto puede atribuirse en parte al muy bajo uso de fertilizantes y los balances negativos de éstos nutrientes en la agricultura pampeana, aún en la actualidad en que un flujo importante de nitrógeno ingresa a los mismos por fijación biológica de nitrógeno en soja (Alvarez 2011, Alvarez et al. 2012b). Además, aunque el contenido total de materia orgánica de los suelos no sea fuertemente afectado, las fracciones lábiles se reducen bajo agricultura, llevando a la pérdida de fertilidad nitrogenada (Heumann et al. 2003). Los niveles de capacidad de mineralización de nitró-

geno estimados para los suelos cultivados a nivel departamental fueron bajos en comparación con suelos pampeanos de media y alta fertilidad (Alvarez, Steinbach, 2010b), indicando limitaciones para el rendimiento de trigo. Por ejemplo, para un rendimiento de 4000 kg ha⁻¹, fácilmente alcanzable en establecimiento de buen nivel tecnológico, se requiere una absorción de unos 120 kg N ha⁻¹ que, asumiendo una eficiencia de uso del 85 %, representan una oferta requerida desde el suelo de aproximadamente 140 kg N ha⁻¹ (Alvarez et al. 2004). La disponibilidad media de nitrógeno de nitratos a la siembra de trigo en la Región Pampeana es alrededor de 50 kg N ha⁻¹ (Steinbach, Alvarez 2012). Por ende el suelo debería liberar desde los componentes orgánicos unos 70 kg N ha⁻¹ para sostener el rendimiento indicado. Considerando que unos 15 kg N ha⁻¹ son liberados por residuos en descomposición (Alvarez et al. 2004) la mineralización desde la materia orgánica debería aportar otros 55 kg N ha⁻¹. Solo el 3 % de los departamentos de la Región Pampeana tiene en promedio suelos bajo uso agrícola con esa capacidad. Este porcentaje sube a 65 % si se considera los suelos en fase pastura, pero esa capacidad se perdería rápidamente durante la fase agrícola de la rotación, como muestran experimentos locales (Alvarez, Steinbach 2012). Los agrosistemas pampeanos requieren, por lo tanto, del aporte de nutrientes externos para frenar la disminución de su fertilidad y mantener su sustentabilidad.

La distribución tridimensional del carbono orgánico y del nitrógeno total a nivel sitio y capa de suelo se pudieron describir adecuadamente por modelización empírica con redes neuronales artificiales. La representatividad del modelo de carbono ajustado

y las estimaciones basadas en el mismo han sido discutidas anteriormente (Berhongaray et al. 2013). Se estimó los efectos del cultivo sobre los stocks totales de carbono orgánico asumiendo que la superficie ocupada por tierras inundables y forestadas no cambió durante los últimos 150 años, período durante el cual la agricultura fue introducida en la Región Pampeana y se produjo su expansión, reemplazando principalmente pastizales naturales. Si el área cultivada actualmente era originalmente cubierta por pastizales naturales, puede estimarse una pérdida de carbono orgánico de los suelos-flujo de C-CO₂ a la atmósfera de 326 Mt para el área relevada (Berhongaray et al. 2013). Este flujo equivale al consumo de combustibles fósiles de 9 años de dicha área (CIA World Factbook 2008). El cambio regional del contenido de carbono orgánico de los suelos parece haberse producido antes del período 1960-1980, ya que el stock de carbono en ese período es similar al actual. La intensificación del uso agrícola de los suelos y la introducción de soja en las rotaciones no han tenido aparentemente efectos negativos en el stock de carbono secuestrado a nivel regional detectable.

Las estimaciones de los efectos del uso del suelo sobre los stocks de carbono orgánico secuestrado contrastan con las realizadas en un trabajo previo que utilizó la metodología del IPCC. En ese trabajo se estimó que se produjeron pérdidas de carbono en la Región Pampeanos durante los últimos 50 años (Viglizzo et al. 2010). Se testeó la posibilidad de usar la metodología del IPCC en la Región Pampeana utilizando los datos de los sitios muestreados en el relevamiento 2007-2008. Se confrontó los niveles de carbono orgánico de sitios control y cultivados con los estimados por la me-

metodología IPCC (n= 230) obteniéndose pobres resultados (regresión de datos observados vs. estimados: $R^2= 0.26$, $a \gg 0$, $b \ll 1$), lo que indicó que esa metodología es inadecuada para la región.

Estudios recientes realizados en diferentes partes del Mundo indican tendencias diferentes en la evaluación del carbono orgánico de los suelos en las últimas décadas. Mientras muchos suelos europeos están perdiendo carbono (Jones et al. 2009), en USA grandes áreas llegaron al equilibrio hace ca. 50 años (David et al. 2009), y ganancias netas se han reportado en el este de China (Sun et al. 2009). Incrementos de la productividad primaria neta en ecosistemas naturales y manejados por el hombre se han descrito como consecuencia de cambios en el clima y la tecnología (Twine, Kucharik 2009). Estos incrementos llevan a mayores aportes de carbono al suelo en forma de residuos y las ganancias de carbono orgánico. En la Región Pampeana se han estimado aumentos de los aportes de carbono en suelos cultivados durante los últimos 30 años a pesar de la inclusión de soja en las rotaciones (Alvarez et al. 2011). Este proceso fue la consecuencia de los mayores aportes de residuos al suelo asociados a incrementos de rendimiento de trigo, maíz y también soja. Esos mayores aportes de residuos parecen haber equilibrado las pérdidas, permitiendo incrementos del carbono orgánico en suelos originalmente pobres en carbono, pero no en los ricos en carbono orgánico. Los balances de carbono realizados en experimentos de campo en la Región Pampeana han mostrado que suelos ricos en carbono orgánico lo pierden bajo cultivo (Alvarez et al. 1998). En cambio, suelos con bajos niveles de carbono tienen menores pérdidas o se mantienen cerca del equilibrio (Bono et al. 2008).

Adicionalmente, la precipitación ha registrado incrementos, principalmente en la porción semiárida de la región durante los últimos 40 años (Magrin et al. 2005), lo que puede haber generado un incremento de la productividad en suelos arenosos de bajo nivel de carbono orgánico.

Tendencias similares del carbono en carbonatos se observaron en los datos del relevamiento 2007-2008 y el del período 1960-1980. En promedio 35-40 % del total de carbono del suelo estaba presente en carbonatos, con un rango de 0 a 30 % en la porción húmeda pampeana y del 0 al 85 % en la porción semiárida. En otras regiones del Mundo se han reportado resultados similares (Li et al. 2007). Los horizontes petrocálcicos raramente se observaron en la porción húmeda de la región pero fueron muy comunes en los sitios de la porción semiárida. En algunos sitios del este seco de la Región Pampeana hasta 99 % del carbono en carbonatos llegó a estar incluido en el horizonte petrocálcico. En los casos que los suelos tenían este tipo de horizontes las estimaciones de carbonato presentadas son menos confiables porque no se determinó el espesor de los mismos. A pesar de esta limitación, resultados similares se obtuvieron en la comparación de stock de carbono de carbonato considerando solo el carbonato en la masa del suelo. No hubo efectos significativos del uso sobre este carbonato tampoco. El cultivo no afectó el stock de carbono inorgánico secuestrado en los suelos de la región, lo que puede atribuirse a la corta historia agrícola y las bajas cantidades de fertilizantes recibidas.

La validez de las estimaciones referidas a futuros cambios del contenido de carbono orgánico de los suelos de la Pampa Ondulada se basa en asumir que la estructura de los cultivos no cambiará respecto del período 1997-2006. En ese período se realizaron los experimentos que permitieron ajustar la red neuronal artificial usada para estimar ingreso de carbono al suelo en el cálculo del balance de carbono. A la vez, debería mantenerse la ganancia anual de rendimiento. Los índices de cosecha de los cultivos han aumentado en las últimas décadas, tendiendo a estabilizarse (Hay 1995). Respecto a la ganancia del rendimiento, al fijar un valor constante de incremento anual se consideró implícitamente que la ganancia porcentual anual decrecerá. Por ejemplo, en la actualidad una ganancia anual de 112 kg grano ha⁻¹ en maíz representa un 1.6 % de aumento (rendimiento medio año 2010= 7000 kg grano ha⁻¹) pero representaría un 0.6 % de ganancia a fines del Siglo XXI. Los rendimientos estimados a que se llegaría, dentro del período de la estimación, son trigo: 6500 kg ha⁻¹, maíz: 18200 kg ha⁻¹, soja: 7300 kg ha⁻¹. Estos rendimientos ya se logran hoy en día en planteos y sitios de muy alto rendimiento y no parece exagerado que se logren como rendimientos medios zonales dentro de un siglo.

La disminución de los niveles de carbono orgánico de los suelos ricos en carbono, estimada si se mantiene la proporción actual de soja en las rotaciones, tendrá poco efecto sobre la productividad de los suelos para trigo. El modelo de productividad indica una reducción del 5 % para cuando se arriben a los más bajos contenidos de carbono orgánico en los suelos. Parece lógico pensar que esta disminución será fácilmente compensada por la mejora tecnológica. Para otros cultivos no pueden hacerse

predicciones similares por falta de modelos adecuados. Bajo el escenario estimado de menor nivel medio de materia orgánica en la Pampa Ondulada, y muy posiblemente con menor capacidad de mineralizar nitrógeno, será la fertilización la herramienta indispensable para mantener la sustentabilidad de esos agrosistemas. Esto podría extrapolarse a toda la Región Pampeana, debido a la generalizada disminución de su fertilidad, que limita ya actualmente los rendimientos de los principales cultivos.

CONCLUSIONES

Este trabajo determinó los efectos del cultivo sobre los suelos pampeanos. Sus principales conclusiones son: 1) ha habido escaso efecto del cultivo sobre la textura y no se detectó acidificación ni se han salinizado los suelos, 2) se ha producido una compactación superficial en suelos cultivados que no llega en general a umbrales críticos para el desarrollo de las raíces, 3) los stock de carbono como carbonato no fueron afectados por el cultivo, 4) el carbono orgánico en suelos cultivados sufrió en promedio una reducción del 16 % en el estrato 0-50 cm y del 9 % en el estrato 50-100 cm del perfil, 5) propiedades estables que impactan la productividad de los suelos han sufrido poco impacto por el uso agrícola a nivel regional, 6) entre relevamientos realizados entre 1960-1980 y 2007-2008 no se encontraron diferencias en el stock de carbono orgánico de toda la región, 7) en los últimos 30-50 años áreas ricas en carbono orgánico perdieron carbono y áreas pobres aumentaron su nivel, 8) la relación C orgánico/N total no fue afectada por el uso del suelo, presentando el nitrógeno total una variación similar al carbono, 9) la fertilidad nitrogenada y

fosforada de los suelos decreció al 30 % en los suelos cultivados respecto de la situación sin uso agrícola, limitando el rendimiento de los cultivos, 10) es esperable que en suelos ricos en carbono orgánico se produzcan más pérdidas si la soja es el componente principal de las rotaciones. Para revertir esta situación, y mantener o secuestrar carbono en esos suelos, deberán pasar varias décadas de mejoras tecnológicas que produzcan aumentos de rendimientos y se deberá disminuir la proporción de la misma en las rotaciones. En suelos con bajos niveles de carbono es esperable secuestro de carbono durante las próximas décadas.

Agradecimiento

Este trabajo fue subsidiado por la Universidad de Buenos Aires (G004 and G033), el CONICET (PIP 02050 and PIP 02608) y el FONCYT (PID-BID 37164 - 49). Agradecemos a J. P. Gerschman por aportar los datos de la clasificación de MODIS.

Referencias

- Alvarez, C.R., Steinbach, H.S., Alvarez R. 2012. Capítulo 3. El rol de los fertilizantes en la agricultura. En: Alvarez, R., Prystupa, P., Rodríguez, M., Alvarez C.R. 2012. (Eds.). Fertilización de cultivos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la Región Pampeana. Editorial Facultad de Agronomía-UBA, pág. 51-64.
- Alvarez, R. 2001. Estimation of carbon losses by cultivation from soils of the Argentine Pampa using the Century model. *Soil Use Management* 17, 62-66.
- Alvarez, R. 2002. La disponibilidad de agua como reguladora del rendimiento de trigo en la Región Pampeana. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, 2002. Actas 4 pág.

- Alvarez, R. 2011. Cambios en los flujos de carbono y nitrógeno de los agrosistemas de la Pampa Ondulada producidos por la incorporación de soja en la rotación. En: Soja, pág. 11-16. O. Correa et al. (eds.). Editorial Facultad de Agronomía-UBA, Buenos Aires.
- Alvarez R. 2012a. Soil organic carbon stock in pampean soils: changes associated to rotation and tillage. Roberto Alvarez. Actas 19th ISTRO Conference, 19 pág., Uruguay.
- Alvarez, R. 2012b. Estimación del umbral económico para la aplicación de la metodología de reposición y enriquecimiento en fósforo. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Actas 4 pág.
- Alvarez, R., De Paepe, J. 2011. Establishing productivity indices for wheat in the Argentine Pampas by an artificial neural network approach. Focus on Artificial Neural Networks. Pág. 75-95. Ed. John A. Flores, de Nova Science Publishers, Inc.
- Alvarez, R., Lavado, R.S. 1998. Climatic control of the organic matter of the Pampas and Chaco soils. *Geoderma* 83, 127-141.
- Alvarez, R., Russo, M., Prystupa, P., Sheiner, J., Blotta, L. 1998. Soil carbon pools under conventional and no-tillage systems in the Argentine Rolling Pampa. *Agron. J.* 90, 138-143.
- Alvarez, R., Santanatoglia, O.J., Garcia R. 1995. Soil respiration and carbon inputs from crops in a wheat-soybean rotation under different tillage systems. *Soil Use Manag.* 11, 45-50.
- Alvarez, R., Steinbach, H.S. 2010a. Efecto del uso agrícola sobre el nivel de materia orgánica. In: Fertilidad de suelos. Caracterización y manejo en la Región Pampeana. Editorial Facultad de Agronomía-Universidad de Buenos Aires, Argentina. Pp. 181-202.
- Alvarez, R., Steinbach, H.S. 2010b. Ciclado de nitrógeno en agrosistemas. En: Fertilidad de suelos. Caracterización y manejo en la Región Pampeana. Editorial Facultad de Agronomía-Universidad de Buenos Aires, Argentina. Pag. 231-269.
- Alvarez, R., Steinbach, H.S. 2011. Modeling apparent nitrogen mineralization under field conditions using regressions an artificial neural networks. *Agron. J.* 103:1159-1168.
- Alvarez, R., Steinbach, H.S. 2012. Capítulo 7. Disponibilidad de nitrógeno en función del manejo. En: Fertilidad de suelos. Caracterización y manejo en la Región Pampeana. Editorial Facultad de Agronomía-UBA, pág. 301-331.
- Alvarez, R., Steinbach, H.S., Bono, A., 2011. An artificial neural network approach for predicting soil carbon budget in agroecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75: 965-975.

- Alvarez, R., Steinbach, H.S., Grigera, S., Cartier, S., Obregón, G., García, R. 2004. The balance sheet methods as a conceptual framework for nitrogen fertilization of wheat in pampean agroecosystems. *Agron. J.* 96: 1050-1057 2004.
- Amemiya, T. 1985. *Advanced econometrics*. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Berhongaray G, Alvarez R, De Paepe J, Caride C, Cantet R. 2013. Land use effects on soil carbon in the Argentine Pampas. *Geoderma* 192: 97-110.
- Bono, A., Alvarez, R., Buschiazzo, D.E., Cantet, R. 2008. Tillage effects on soil carbon balance in a semiarid agroecosystem. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72, 1140-1149.
- Bünemann, E.K., Schwenke, G.D., Van Zwieten, L. 2006. Impact of agricultural inputs on soil organisms-a review. *Austr. J. Soil Res.* 44: 379-406.
- No se detectó efectos del cultivo sobre el pH del suelo ni los stocks de carbono secuestrado como carb*
- Caride, C., Piñeiro, G., Paruelo, J.M. 2012. How does agricultural management modify ecosystem services in the Argentine Pampas? The effects on soil C dynamics. *Agric. Ecosys. and Environm.* 154, 23-33.
- Carter, M.R. 1990. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. *Can. J. Soil. Res.* 70, 425-433.
- Casanovas, E.M., Echeverría, H.E., Studdert, G.A. 1995. Materia orgánica del suelo bajo rotaciones de cultivos. I Contenido total y de distintas fracciones. *Ciencia del Suelo* 13,16-20.
- CIA World Factbook. 2008. (available in: www.cia.gov).
- David, M.B., Mclsaar, G.F., Darmody, R.G., Omonde, R.A. 2009. Long-term changes in Mollisol organic carbon and nitrogen. *J. Environm. Qual.* 38: 200-211.
- Davidson, E.A., Ackerman, I.L. 1993. Changes on soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils. *Biogeochemistry* 20, 161-193.
- De Paepe, J., Alvarez, R. 2010. Uso de datos de mapas de suelos para determinar el stock de carbono orgánico y otras variables edáficas a nivel regional. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Actas en CD, 4 pág.
- Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicsek, D.F., Stewart, B.A. 1994. (Eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment*. Soil Sci. Soc. Am. Inc. Madison, USA, 244 pág.

- FAO. 2004. Fertilizer use by crop in Argentina. Rome, Italy, Pp. 88.
- Follett R.F., Stewart, B.A. 1985. (Eds.). Soil erosion and crop productivity. Amer. Soc. Agron. INC. Madison, USA, 533 pág.
- Galantini, J. 2005. Calidad y dinámica de las fracciones orgánicas en sistemas naturales y cultivados. Proceedings Jornadas Materia Orgánica y Sustancias Húmicas. Argentina. Pp. 6.
- Grant, R.F., Izaurralde, R.C., Chanasyk, D.S. 1995. Soil temperature under different surface managements: testing a simulation model. *Agric. Forest Meteorol.* 73,89-113.
- Guo, L.B. and Gifford, M. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Glob. Change Biol.* 8, 345-360.
- Hall, A.J., Rebella, C.M., Ghersa, C.M., Culot, J.P. 1992. Field crop systems of the Pampas. Pp. 413-450 en: C.J. Pearson (ed.). *Field crop ecosystems of the World* 18. Elsevier, Amsterdam.
- Hamza, M.A., Anderson, W.K. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Till. Res.* 82: 121-145.
- Hassan, F.U., Ahmad, M., Ahmad, N., Kaleen Abbasi, M., 2007. Effects of subsoil compaction on yield and yield attributes of wheat in the sub-humid region of Pakistan. *Soil Till. Res.* 96: 361-366.
- Hay, R.K. 1995. Harvest index: a review of its use in plant breeding and crop physiology. *Ann. Appl. Biol.* 126: 197-216.
- Heim, A., Wehrli, L., Eugster, W., Schmidt, M.W.J. 2009. Effects of sampling design on the probability to detect soil carbon stock changes at the Swiss CarboEurope site Lägeren. *Geoderma* 149, 347-354.
- Heumann, S., Böttcher, J., Springob, G. 2003. Pedotransfer functions for the pool size of slowly mineralizable N in sandy arable soils. *J. Plant. Nutr. Soil Sci.* 166: 308-318.
- Houghton, R.A., Hobbie, J.E., Melillo, J.M., Moore, B., Peterson, B.J., Shaver, G.R., Woodwell, G.M.. 1983. Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: a net flux release of CO₂ to the atmosphere. *Ecol. Monograph.* 53, 235-262.
- Huffman, E., Eilers, R.G., Padbury, G., Wall, G., MacDonald, K.B. 2000. Canadian agri-environmental indicators related to land quality: integrating census and biophysical data to estimate soil cover, wind erosion and soil salinity. *Agric. Ecosys. Environm.* 81: 113-123.
- INDEC 2002. Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas. (available at <http://www.indec.gov.ar/agropecuaria/cna.asp> (10/12/1910)).

- INTA. 1981. Mapa de suelos de la Provincia de Santa Fe, Parte I. Buenos Aires, Argentina, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Pp. 245.
- INTA. 1983. Mapa de suelos de la Provincia de Santa Fe, Parte II. Buenos Aires, Argentina, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Pp. 216.
- INTA. 1989. Mapa de suelos de la Provincia de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Pp. 525.
- INTA. 2010. (available at: <http://geointa.inta.gov.ar>).
- IPCC. 2007. Fourth Assessment Report: Climate Change, (AR4), Ginebra, Suiza, 104 pág.
- Jobbágy, E.G., Jackson, R.B. 2001. The distribution of soil nutrients with depth: global patterns and the imprint of plants. *Biogeochem.* 53, 51-77.
- Jobbágy, E.G., Jackson, R.B. 2007. Groundwater and soil chemicals changes under phreatophytic tree plantation. *J. Geophys. Res.* 112, 1-15.
- Jones, R.J.A., Stolbovoy, V., Rusco, E., Gentile, A.R., Gardi, C., Marechal, B., Montanarella, L. 2009. Climate change in Europe. 2. Impact on soil. A review. *Agronomy* 29, 423-432.
- Kiniry, K.N., Scriver, C.L., Keener, M.E. 1983. A soil productivity index based upon predicted water depletion and root growth. *Research Bulletin* 1051: 1-25.
- Kuo, S. 1996. Chapter 32. Phosphorus. In: *Methods of Soil Analysis. Soil Sci. Soc. Am. Book Series 5; Part. 3-Chemical Methods.* Madison; Wisconsin; USA. Pp. 869-919.
- Lauenroth, W.K., Burke, I.C., Paruelo, J.M. 2000. Patterns of production and precipitation-use efficiency of winter wheat and native grasslands in the central great plains of the united states. *Ecosystems* 3,334-351.
- Liang, B.C., Campbell, C.A., McConkey, B.G., Padbury, G., Collas, P., 2005. An empirical model for estimating carbon sequestration on the Canadian prairies. *Can. J. Soil Sci.* 85, 549-556.
- Li, Z.P., Han, F.X., Su, Y., Zhang, T.L., Sun, B., Monts, D.L., Plodinec, M.J. 2007. Assessment of soil organic and carbonate carbon storage in China. *Geoderma*, 138, 119-126.
- Magrin, G.O.; Travasso, M.I., Rodríguez, G.R. 2005. Changes in climate and crop production during the 20TH Century in Argentina. *Climatic Change* 72: 229-249.
- McLauchlan, K. 2006. The nature and longevity of agricultural impacts on soil carbon and nutrients: a review. *Ecosystems* 9: 1364-1382.
- Meersmans, J., Van Wesemael, B., De Ridder, F., Van Molle, M. 2009. Modelling the three-dimensional spatial distribution of soil

- organic carbon (SOC) at regional scale (Flanders, Belgium). *Geoderma* 152, 43-52.
- Mendoza, M.R., Berhongaray, G., Alvarez, R. 2012a. Organic nitrogen stock in pampean soil profiles. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Actas 4 pág.
- Mendoza MR, Berhongaray G, Álvarez R. 2012b. Stratification of the organic nitrogen stock in pampean soil profiles as a function of vegetation type and land use. Actas 19th ISTRO Conference, 1 pág., Uruguay.
- MinAgri. 2012. Series y estadísticas agrícolas. (disponible en: www.minagri.gob.ar)
- Mishra, U., Lal, R., Slater, B., Calhoun, F., Liu, D., Van Meirvenne, M, 2009. Predicting soil organic carbon stock using profile depth distribution functions and ordinary kriging. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73, 614-621.
- Moreno, F., Murillo, J.M., Pelegrín, F., Girón, I.F. 2006. Long-term impact of conservation tillage on stratification ratio of soil organic carbon and loss of total and active CaCO₃. *Soil Till. Res.* 85, 86-93.
- Pan, G., Smith, P., Pan, W. 2009. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China. *Agric. Ecosys. Environm.* 129: 344-348.
- Pazos, M.S., Mestelan, S.A.. 2002. Variability of depth to tosca in Udolls and soil classification, Buenos Aires Province, Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:1256-1264.
- Pierce, F.J., Larson, W.E, Dowdy, R.H., Graham, W.A.P. 1983. Productivity of soils: assenssing long-term changes due to erosion. *J. Soil and Water Conser., Research reports:* 39-44.
- Prego, A.J. 1996. (Ed.). *El deterioro del ambiente en la Argentina.* FECIC, Buenos Aires, 519 pág.
- Rawls, W.J. 1983. Estimating soil bulk density from particle size analysis and organic matter content. *Soil Science* 135, 123-125.
- Rawls, W.D., Brakensiek, D., Saxton, K.E. 1982. Estimation of soil water properties. *Trans. ASAE* 25: 1316-1332.
- Richard, G., Boizard, H., Roger-Estrade, J., Boiffin, J., Guérif, J. 1999. Field study of soil compaction due to traffic in Northern France: pore space and morphological analysis of the compacted zones. *Soil Till. Res* 51,151-160.
- Rogers, L.L., Dowla, F.U. 1994. Optimization of groundwater remediation using artificial neural networks with parallel solute transport modeling. *Water. Res.* 30, 457-481.
- Satorre, E.H., Slafer, G.A. 1999. Wheat Production systems of the Pampas. In *Wheat. Ecology and physiology of yield determination.* E.M. Satorre and G.A. Slafer Eds. The Haworth Press, Inc. New York. Pp.333-348.

- Schulp, C.J.E., Nabuurs, G.J., Verburg, P.H., 2008. Future carbon sequestration in Europe - Effects of land use change. *Agric. Ecosys. Environ.* 127, 251-264.
- Soriano, A. 1991. Río de la Plata Grasslands. In: RT Coupland (ed.). *Ecosystems of the world. 8A. Natural Grassland.* Elsevier, Amsterdam. Pp. 367-407.
- Steinbach, H.S., Alvarez, R. 2012. Capítulo 2. Análisis de la variabilidad de la fertilidad del suelo. En: *Caracterización y manejo en la Región Pampeana.* Editorial Facultad de Agronomía-UBA, Segunda edición, Pág. 513-538.
- Sun, W., Huang, Y., Zhang, W., Yu, Y. 2009. Estimating topsoil SOC sequestration in croplands of eastern china from 1980-2000. *Austr. J. Soil. Res.* 47: 261-272.
- Teruggi, M.E. 1957. The nature and origin of argentine loess. *J Sed. Petrol.* 27, 322-332.
- Tisdale, S., Nelson, W.L., Beaton, J.D., Haulin, J.L. 1993. *Soil Fertility and Fertilizers.* Mcmillan Publishing Compan, New York, USA. 631pp.
- Twine, T.E., Kucharik, C.J. 2009. Climate impacts on net primary productivity trends in natural and managed ecosystems of the central and eastern United States. *Agric. Forest Meteorol.* 149, 2143-2161.
- Viglizzo, E.F., Frank, F.C., Carreño, L.V., Jobbágy, E.G., Pereyra, H., Clatt, J., Pincén, D., Ricard, F. 2010. Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Global Change Biol.* 17: 959-973.
- Viglizzo, E.F., Létora, F., Pordomingo, A.J., Bernardos, J.N., Roberto, Z.E., Del Valle, H. 2001. Ecological lessons and applications from one Century of low external-input farming in the pampas of Argentina. *Agric. Ecosys. Environ.* 83, 64-81.
- Wilson, J.P., Sandor, S.P., Nielsen, G.A. 1991. Productivity index model modified to estimate variability of Montana Small grain yields. *Soil Science Society of America* 55: 228-234.
- Wu, H., Guo, Z., Gao, Q., Peng, C. 2009. Distribution of soil inorganic carbon storage and its changes due to agricultural land use activity in China. *Agric. Ecosyst. Environ.* 129, 413-421.

Tabla 1. Caracterización de las principales variables determinadas. Tabla elaborada con datos de Berhongaray et al. (2013), Mendoza y Alvarez (2012 a y b) y datos generados para este trabajo.

Variable	Mínimo	Media	Máximo
Temperatura media anual (°C)	12.8	15.8	19.1
Precipitación media anual (mm)	564	860	1156
Profundidad de muestreo (cm)	25	96	100
Densidad aparente (g cm ⁻³)	0.82	1.15	1.60
Carbono orgánico (t ha ⁻¹)	15.3	96.4	321.2
Carbono en carbonatos (t ha ⁻¹)	0.0	47.0	376.6
Nitrógeno orgánico	2.9	11.6	28.9
Relación C/N	2.6	8.9	29.1
pH	4.90	6.40	9.47
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	0.20	1.90	27.0
Arcilla (g kg ⁻¹)	16	162	427
Limo (g kg ⁻¹)	8	336	590
Arena (g kg ⁻¹)	118	468	972
Fósforo extractable (mg kg ⁻¹)	0.8	23.6	192

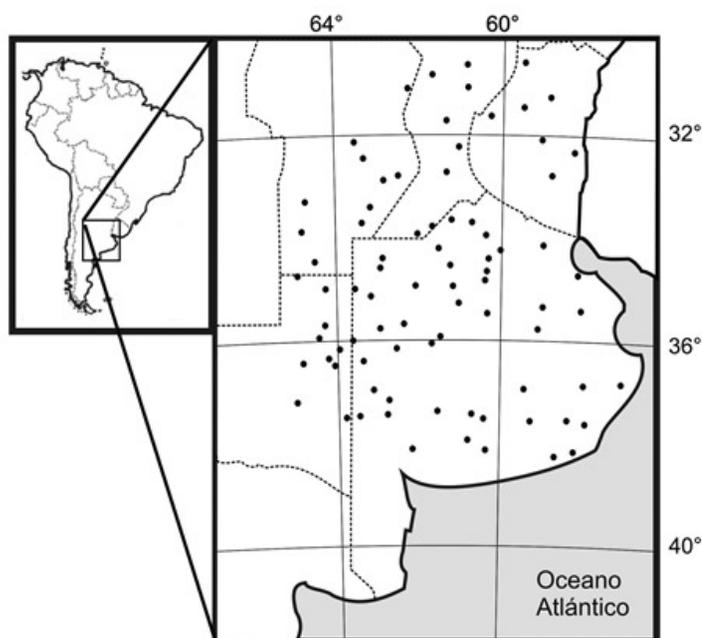


Figura 1. Ubicación de los establecimientos agropecuarios muestreados. Tomado de Berhongaray et al (2013).

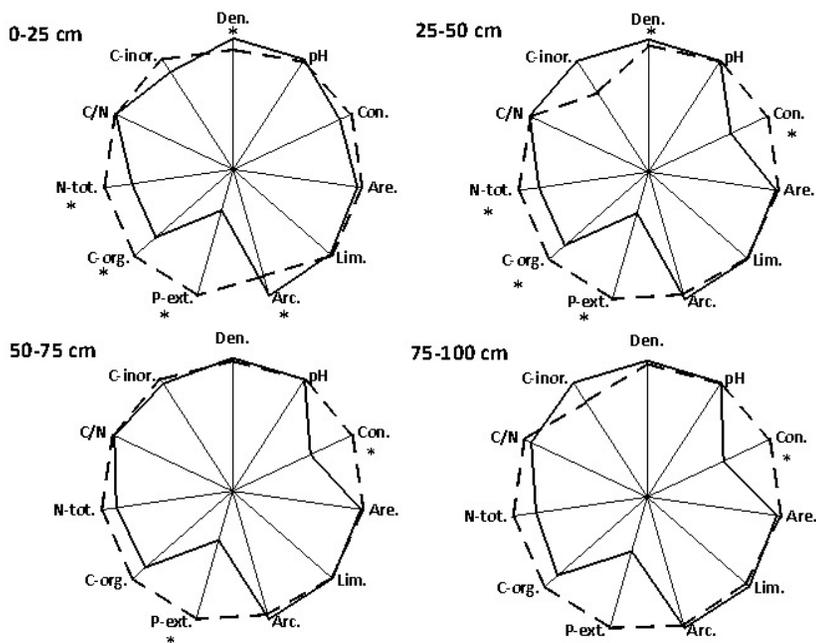


Figura 2. Comparación de los valores de las variables edáficas determinadas a diferentes profundidades en sitios no cultivados y cultivados (promedios de cultivados en fase agrícola y fase pastura). Línea de barras: no cultivado, línea continua: cultivado. Los asteriscos indican diferencias significativas para la variable. Den.= densidad aparente, pH= pH, Con.= conductividad eléctrica, Are.= concentración de arena, Lim.= concentración de limo, Arc.= concentración de arcilla, P-extr.= fósforo extractable, C-org.= concentración de carbono orgánico, N-tot.= concentración de nitrógeno total, C/N= relación carbono orgánico/N total, C-inor.= carbono inorgánico en carbonatos. Elaborado con datos de Berhongaray et al. (2013), Mendoza y Alvarez (2012 a y b) y datos generados para este trabajo.

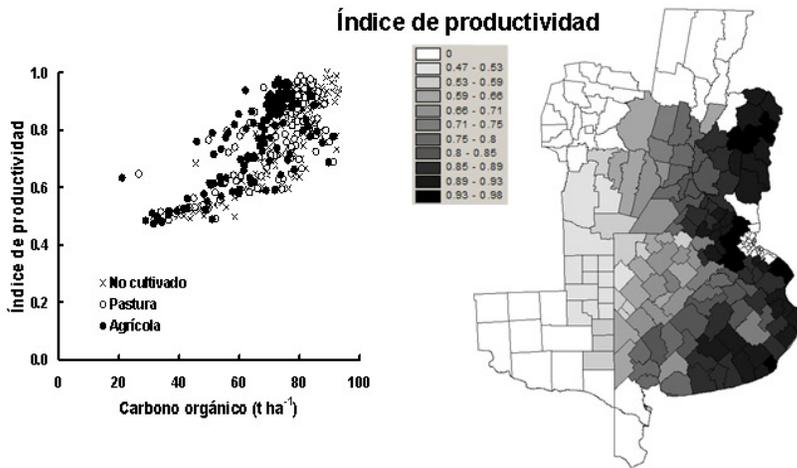


Figura 3. Izquierda: relación entre un índice local de productividad de los suelos para trigo y el uso del suelo en función del contenido de carbono orgánico. **Derecha:** mapa de productividad media a nivel de partido para los suelos cultivados con trigo (promedio ponderado de las superficies cultivadas en fase pastura y agrícola).

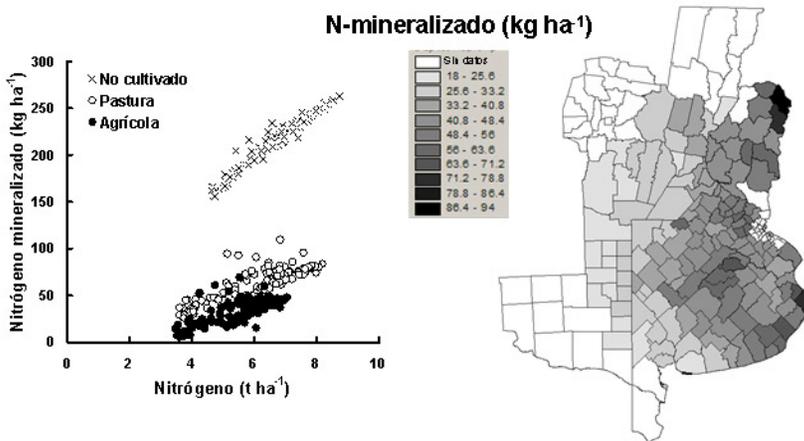


Figura 4. Izquierda: relación entre la capacidad de mineralización de nitrógeno durante el ciclo de trigo estimada por un modelo desarrollado localmente y el uso del suelo (datos muestreo 2007-08). **Derecha:** mapa de capacidad de mineralización durante el ciclo de trigo (promedio ponderado de las superficies cultivadas en fase pastura y agrícola).

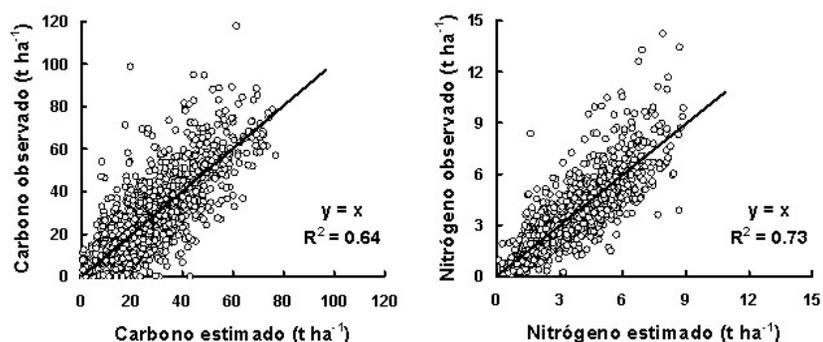


Figura 5. Relación entre el contenido de carbono y nitrógeno orgánicos observados y estimados por redes neuronales artificiales para todos los sitios y estratos de profundidad. Al no haber diferencias significativas en los ajustes entre los datos usados para training y validación se graficó la relación para todos los datos en conjunto. Performance de la red para carbono reelaborada con datos de Berhongaray et al. (2013).

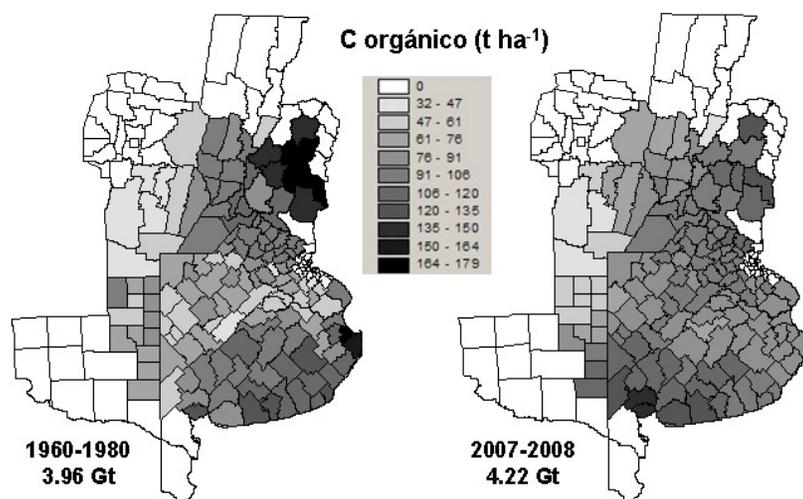


Figura 6. Contenidos de carbono orgánico hasta 1 m de profundidad de los suelos pampeanos a nivel partido estimados usando los mapas de suelo de INTA, basados en relevamientos realizados principalmente entre 1960 y 1980, y un relevamiento realizado en 2007-2008. Reelaborado sobre datos de Berhongaray et al. (2013).

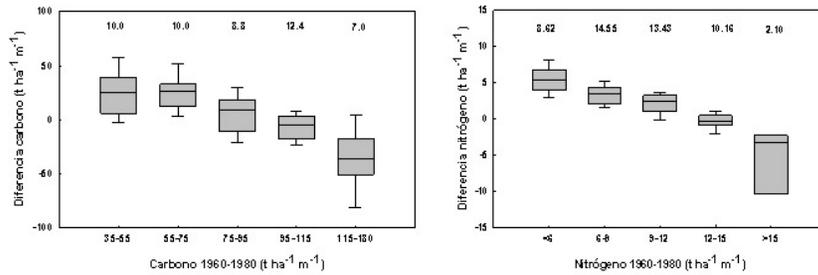


Figura 7. Box plot (percentiles 5, 25, 50, 75 y 95 %) de los cambios en los contenidos de carbono y nitrógeno orgánicos de los suelos pampeano (muestreo 2007-08 – muestreo 1960-1980) en función de los niveles calculados usando los mapas de INTA del período 1960-1980. Los números sobre las cajas indican la superficie correspondiente a cada categoría (Mha). Los resultados para carbono se tomaron de Berhongaray et al. (2013).

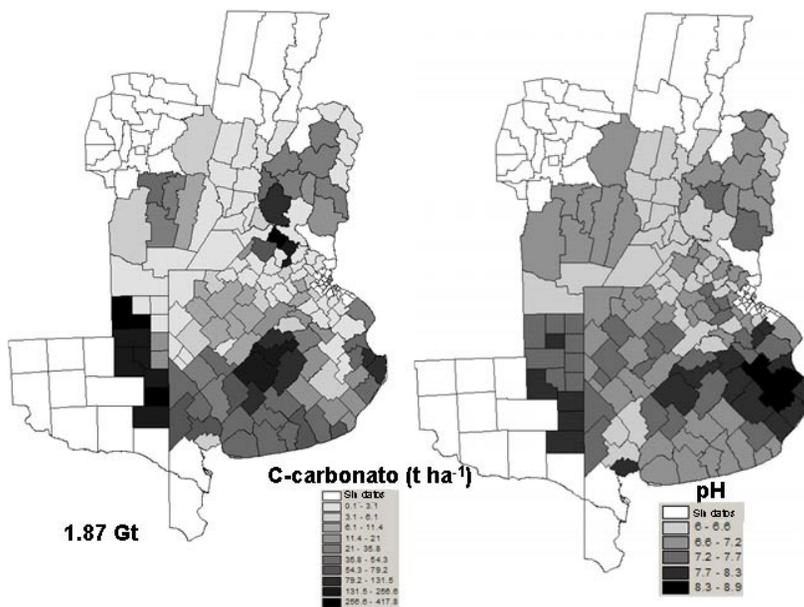


Figura 8. Contenidos de carbono inorgánico y pH hasta 1 m de profundidad de los suelos pampeanos a nivel partido estimados usando los mapas de suelo de INTA, basados en relevamientos realizados principalmente entre 1960 y 1980. Los resultados de carbonato se tomaron de Berhongaray et al. (2013) y los de pH de De Paepe y Alvarez (2010).

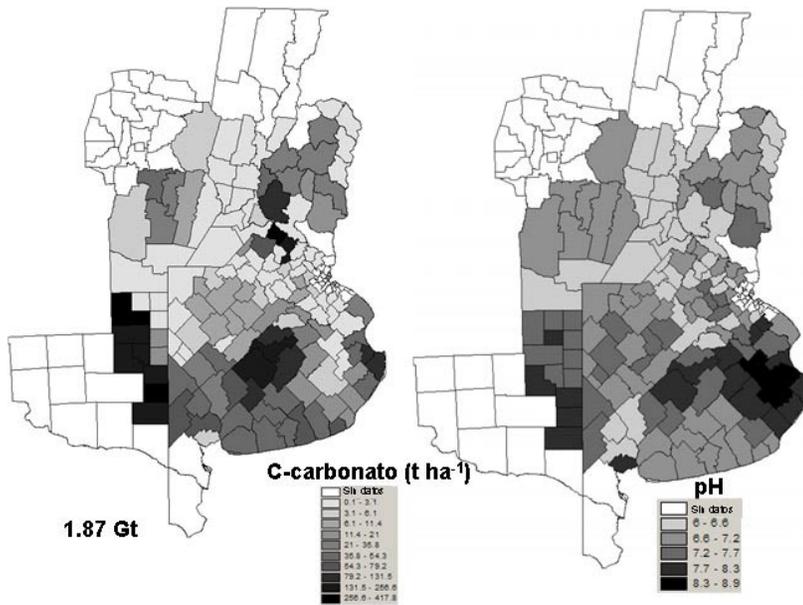


Figura 9. Evolución estimada del nivel de carbono orgánico en el futuro de dos suelos de la Pampa Ondulada con diferente nivel inicial de carbono, calculada usando un modelo de balance de carbono basado en redes neuronales artificiales, para dos posibles rotaciones con diferente composición de soja (33 % de soja: trigo/soja de segunda-maíz y 66 % de soja: trigo/soja de segunda-maíz-soja de primera-soja de primera-soja de primera). La rotación actual en la subregión corresponde a 66 % de soja. El nivel de carbono del suelo no cultivado (precultivo) se calculó usando la red neuronal desarrollada en este trabajo para estimar carbono orgánico. La subfigura de la izquierda corresponde a suelos con un nivel promedio de carbono para la zona que en la actualidad es de 75 t C ha⁻¹ (0-50 cm); la subfigura de la derecha corresponde a suelos que actualmente tienen un nivel bajo de carbono de 50 t C ha⁻¹ (0-50 cm). Se asumió un incremento de la temperatura de 4 °C para fines del siglo XXI.

