

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA**

“Trabajo Final presentado
para optar al Grado de Ingeniero Agrónomo”

**ESTIMACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE HUMIFICACIÓN Y
MINERALIZACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA
EN UN HAPLUDOL TÍPICO DE RÍO CUARTO.**

**Alumna: Andrea Verónica Lardone
DNI: 31.970.256**

**Director: Ing. Agr. MSc. Estela M. Bricchi
Co-Director: Ing. Agr. Dr. Américo Degioanni**

**Río Cuarto – Córdoba
Marzo 2010**

Universidad Nacional de Río Cuarto
Facultad de Agronomía y Veterinaria

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Estimación de los coeficientes de humificación y mineralización
de la materia orgánica en un Hapludol típico de Río Cuarto

Autor: Andrea Verónica Lardone

DNI: 31.970.256

Director: Ing. Agr. MSc. Estela M. Bricchi

Co-Director: Ing. Agr. Dr. Américo Degioanni

Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias del Jurado
Evaluador.

Lic. MSc. Inés Moreno

Ing. Agr. MSc. Carmen Cholaky

Ing. Agr. MSc. Estela Bricchi

Fecha de presentación: ____ / ____ / ____

Aprobado por Secretaría Académica: ____ / ____ / ____

Secretario Académico

Dedicatoria

A mis abuelos.

Agradecimientos

Especialmente a mis directores, Estela Bricchi, y Américo Degioanni, quienes me condujeron durante toda la investigación, y me brindaron su apoyo.

A Horacio Videla, Carmen Cholaky, Mercedes Ibañez y Natalia Bonamico por su colaboración y buena predisposición.

A mi familia, por su cariño y contención.

A mis amigos y compañeros quienes fueron un fuerte apoyo durante toda mi carrera universitaria.

A la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Nacional de Río Cuarto, por brindar la posibilidad de mi formación profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

I.	RESUMEN	1
II.	SUMMARY	2
III.	INTRODUCCIÓN	3
IV.	ANTECEDENTES	5
	IV.1. Sobre la materia orgánica del suelo	5
	IV.2. Sobre los modelos de simulación	8
	IV.3. Hipótesis	11
	IV.4. Objetivo general	12
	IV.5. Objetivos específicos	12
V.	MATERIALES Y MÉTODOS	13
	V.1. Caracterización del área en estudio	13
	V.2. Descripción del ensayo experimental	13
	V.3. Variable medidas	13
	V.4. Procesamiento y análisis de la información	14
	V.4.1. Modelo C de un compartimiento	14
	V.4.2. Estimación de los coeficientes de humificación y mineralización	15
	V.5. Análisis estadístico	16
VI.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	17
VII.	CONCLUSIONES	25
VIII.	COMENTARIOS FINALES	26
IX.	BIBLIOGRAFÍA	27

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Evolución del contenido de Carbono Orgánico del suelo (g/kg), en los diferentes tratamientos de labranza, fertilización y posición topográfica.	17
Tabla 2.	Evolución del contenido de Carbono Orgánico del suelo (tn/ha), en los diferentes tratamientos de labranza, fertilización y posición topográfica.	18
Tabla 3.	Comparaciones en el contenido de CO (gr/kg) del suelo en la interacción labranza x año. Test: DGC.	18
Tabla 4.	Aporte anual de C de los residuos de cultivos, según labranza, fertilización y posición topográfica, expresado en tn/ha.	19
Tabla 5.	Aporte de C promedio y CO del suelo (2007), en siembra directa, con y sin fertilización y posiciones topográficas.	20
Tabla 6.	Aporte de C promedio y CO del suelo (2007), en labranza reducida, con y sin fertilización y posiciones topográficas.	21
Tabla 7.	Aporte de C promedio y CO del suelo (2007), en labranza convencional, con y sin fertilización, y posiciones topográficas.	22

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Esquema conceptual de la dinámica de la materia orgánica.	4
Figura 2.	Diagrama representativo del ciclo de Carbono en un agrosistema.	7
Figura 3.	Representación esquemática de la relación entre el stock de SOC total en el tiempo y adiciones anuales de C, en un determinado sistema de labranza.	15
Figura 4.	Relación entre el aporte de C promedio y el contenido de CO del suelo (año 2007), en siembra directa, con y sin fertilización y ambas posiciones topográficas.	20
Figura 5.	Relación entre el aporte de C promedio y el contenido de CO del suelo (año 2007), en labranza reducida, con y sin fertilización y ambas posiciones topográficas.	21
Figura 6.	Relación entre el aporte de C promedio y el contenido de CO del suelo (año 2007), en labranza convencional, con y sin fertilización y ambas posiciones topográficas.	23

I. RESUMEN

La materia orgánica es un componente fundamental del sistema suelo. Dentro de la dinámica de la misma, los procesos de humificación y mineralización, son primordiales para explicar su balance. En la llanura bien drenada del centro-oeste de la provincia de Córdoba se planteó calcular los coeficientes de humificación y mineralización de la materia orgánica, para poder evaluar el stock de C a largo plazo bajo distintas condiciones de uso y manejo del suelo. Para ello, se utilizó un modelo de simulación de C de un compartimiento, que incluye un método para estimar los coeficientes de humificación y mineralización de la materia orgánica. El trabajo se realizó sobre un Hapludol típico bajo uso agrícola, no pastoreado, con tres sistemas de labranzas: convencional, reducida y siembra directa, y dos condiciones de fertilización. En cada tratamiento se evaluó el contenido de CO del suelo y los aportes de C de los residuos de cultivos durante 15 años. No se encontró una correlación positiva por lo que no se pudieron estimar los coeficientes de humificación y mineralización. No obstante, se determinaron las tendencias del CO en el suelo bajo los distintos sistemas de labranzas. En los tratamientos bajo labranza convencional se observa que hay una disminución progresiva del CO, mientras que bajo labranzas de menor remoción del suelo o conservacionistas (labranza reducida y siembra directa) los contenidos de CO se mantienen constantes a lo largo del tiempo.

Palabras clave: materia orgánica, residuos de cultivos, modelos de simulación, humificación, mineralización.

II. SUMMARY

Soil organic matter is an important component of the soil system. In its dynamics, the mineralization and humification processes are very important to explain the organic matter balances. In order to estimate the long-term stock of Carbon (C) in a variety of soil use and management scenarios, the rate of mineralization and humification of the organic matter was calculated. A one-compartment C model, which includes a method to simulate the coefficients of mineralization and humification, was selected to perform the analysis. This analysis took place in the well drained plain of the Midwest of Cordoba Province in a long term experiment. This was done in a Hapludol tipico with farm use, not grazed, with three tillage systems (conventional tillage, reduced tillage and no till), and two conditions of fertilization. In each treatment, the stock of soil organic carbon (OC) and the annual C additions by crops during 15 years was evaluated. There was no positive correlation between the annual C additions by crops and the stock of soil OC. Additionally, a trend was calculated for soil OC in different tillage systems, and it was observed a progressive decrease in conventional tillage and a constant trend in conservationist tillage (reduced tillage and no till).

Keywords: organic matter, crop residues, simulations models, humification, mineralization.

III. INTRODUCCIÓN

La fracción orgánica es uno de los componentes fundamentales del sistema suelo, debido a sus importantes e irremplazables funciones. Por tal motivo, la cantidad y calidad de la fracción orgánica es considerada un adecuado indicador de la calidad de los suelos, y de la sostenibilidad ecológica de los sistemas productivos (Quiroga *et al.*, 2001). El contenido de materia orgánica depende de la génesis de los suelos y del uso y manejo a los que han estado sometidos a través del tiempo. En tal sentido, los factores de génesis definieron el tipo y cantidad de material orgánico que, con la irrupción del uso del suelo, se ha modificado. Estas modificaciones se establecieron, entre los factores más relevantes, por el reemplazo de la vegetación nativa por cultivada, la incorporación de sistemas de labranzas y cambios en los ciclos de nutrientes. El uso y manejo del suelo ha cambiado la dinámica de la materia orgánica, por lo tanto, evaluar el impacto a futuro de estos factores, requiere contar con conocimiento experimental y el uso de modelos de simulación.

La dinámica de la materia orgánica en el suelo es un proceso complejo, fundamentalmente por las transformaciones físico – químicas a la que están sometidos los compuestos carbonados. No obstante, dicha dinámica puede interpretarse como un balance de masa, cuyo depósito (stock) lo constituye el pool de C del suelo y sus variaciones temporales están sujetos a flujos de ingresos (ganancias) y egresos (pérdidas) (Lal, 2008). El principal flujo de ganancia de C al suelo es a través de la fotosíntesis, mientras que el principal flujo de pérdida es la mineralización del C orgánico vía la respiración del bioma del suelo. A su vez, tanto las ganancias como las pérdidas están reguladas por actividades que el hombre ejerce sobre el suelo y los procesos intrínsecos que regulan el stock de C. Dentro de estos procesos se encuentran los que incrementan el stock de C: aporte de material orgánico fresco, humificación, fijación de C a estructuras minerales, entre los más importantes, mientras que los procesos que producen pérdida de C son la mineralización por respiración, erosión, lixiviación. En la Figura 1 se presenta un esquema conceptual de la dinámica de la materia orgánica en el suelo (Adaptado de Lal, 2008) como síntesis del marco teórico de este trabajo.

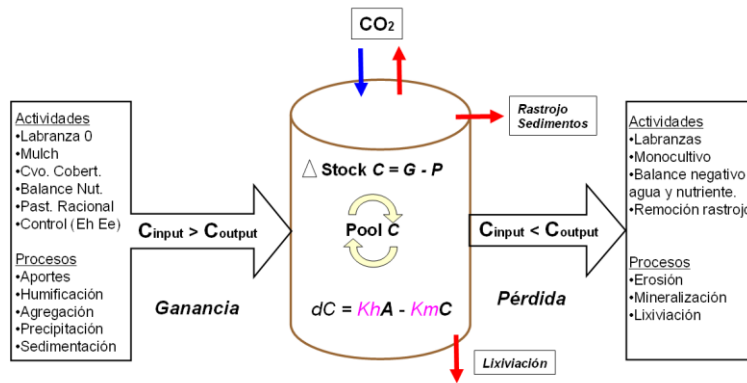


Figura 1: Esquema conceptual de la dinámica de la MO (adaptado de Lal, 2008)

Cuando las entradas de C superan las pérdidas es de esperar que el stock de C edáfico se incremente. Esta premisa será válida en la medida que las actividades sobre el suelo aumenten el aporte de material orgánico fresco, uso de labranzas de bajo impacto, control del pastoreo, control de la erosión, etc. Caso contrario, cuando las actividades promueven las pérdidas es de esperar que los niveles de stock descendan en el tiempo.

El conjunto de procesos que regulan los cambios temporales en el stock de C pueden sintetizarse mediante la siguiente expresión matemática:

$$\Delta C = KhA - KmC$$

Donde: ΔC = variación en el stock de Carbono edáfico, A = aportes de material orgánico fresco, Kh = coeficiente de humificación y Km = coeficiente de mineralización.

Los coeficientes de humificación y mineralización representan la eficiencia de transformación entre la naturaleza química del carbono: orgánica e inorgánica. Por consiguiente, la determinación de estos coeficientes es una información clave para comprender y modelizar cuantitativamente la dinámica de la materia orgánica del suelo.

Los coeficientes antes mencionados pueden determinarse mediante técnicas isotópicas a través de averiguadores de C^{14} o C^{13} natural, incubación en estufas, experimentos de largo plazo, modelos estadísticos que empleen regresiones o modelos mecánicos de simulación, entre otros.

IV. ANTECEDENTES

IV.1. Sobre la materia orgánica del suelo

La materia orgánica ha sido definida como la fracción orgánica del suelo, incluyendo residuos vegetales, animales y de los microorganismos, frescos y en todos sus estados de descomposición, y sustancias sintetizadas por las poblaciones vivientes, las sustancias húmicas, que son la fracción de mayor resistencia a la descomposición y a la degradación microbiana (Schnitzer y Khan, 1978 citados por Apezteguia, 2005).

Un componente clave del sistema suelo es la materia orgánica; ya que es considerada como el indicador más sensible de calidad y productividad del mismo, debido a la multiplicidad de funciones que desarrolla, y efecto sobre sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Nakama y Sobral, 1987, Doran y Parkin 1994, Urricariet y Lavado, 1999, Arshad y Martin, 2002, citados por Apezteguia, 2005; Quiroga *et al.*, 2001). Es un factor determinante de la estructura (Hynes y Swift, 1990; Vázquez *et al.*, 1990, citado por Apezteguia, 2005), porosidad, capacidad de infiltración, dinámica y retención de humedad, resistencia a la compactación (Soane, 1990; Quiroga *et al.*, 1999, citados por Apezteguia, 2005), y resistencia a la erosión hídrica y eólica (Cannell y Hawes, 1994, citados por Apezteguia, 2005). Además es una fuente básica de la fertilidad química (principal reserva de nutrientes disponibles para las plantas) y física del suelo (Nannipieri, 1993; Stevenson, 1994, citados por Apezteguia, 2005), reguladora de las propiedades químicas, acomplejante de sustancias tóxicas, e influye en el color del suelo cambiando su comportamiento térmico (Choudhry, 1984; Nannipieri, 1993, citados por Apezteguia, 2005). Por lo arriba expuesto, participa activamente en la producción sostenible de los ecosistemas y en la disminución de la degradación de los sistemas adyacentes (Irizar *et al.*, 2006, Verri, 2004). Es decir, la materia orgánica es el principal factor en el control de la capacidad del recurso suelo para mantener la productividad agrícola, la calidad ambiental y la sustentabilidad social (Manlay *et al.*, 2007, citados por Galantini, 2008a).

El incremento del contenido de materia orgánica, además de contribuir a la calidad y productividad del suelo, es una estrategia para disminuir el efecto invernadero y de esta forma el cambio climático, ya que permite la mitigación del C atmosférico mediante su acumulación en el suelo (Lal *et al.*, 1998 y Lal, 2004b, citados por Zanatta *et al.*, 2007).

Como resultado de los procesos que ocurren en el suelo, la materia orgánica incluye un continuo de materiales de diferente complejidad, desde fracciones con alta facilidad de descomposición a muy resistentes a la misma (Stevenson, 1982), sometidos a un estado de constante transformación, de variable velocidad, según la combinación de métodos de fraccionamiento y la consideración de los diferentes mecanismos de protección de la materia

orgánica en el suelo (Balesdent *et al.*, 2000 y Galantini *et al.*, 2002, citados por Galantini y Suñer, 2008).

A partir de esto, es posible realizar un fraccionamiento de la materia orgánica, según el tamaño, edad, estado de transformación de sus componentes, y velocidad de descomposición (Galantini, 2008a), donde se pueden diferenciar las siguientes fracciones: a) residuos orgánicos provenientes de la muerte de organismos, formados por biomasa, productos bioquímicos de síntesis y xenobióticos, que poseen diversos grados de resistencia a la descomposición. b) materia orgánica activa, liviana o lábil, la cual está compuesta por restos de organismos vegetales y animales, poco descompuestos. Estos poseen una rápida capacidad de reciclaje. c) materia orgánica humificada, estabilizada, pesada, o humus, que es el producto de los procesos de transformación, descomposición y resíntesis formada por compuestos orgánicos coloidales íntimamente asociados a la fracción mineral del suelo, dando origen a compuestos arcillo-húmicos y d) materia orgánica inerte, constituida por materiales carbonosos que prácticamente no realizan ningún tipo de interacción con el suelo por su elevado grado de estabilización (Verberne *et al.* 1990 y Jenkinson, 2001, citados por Cisneros *et al.*, 2006).

El principal constituyente de la materia orgánica es el C, que llega a representar entre el 40 y 60% dependiendo del estado de transformación (Galantini *et al.*, 2008). El ciclo del C (figura 2), que tiene lugar en el sistema suelo-planta-atmósfera, es el resultado de la interacción entre procesos biológicos y las fracciones de la materia orgánica. Los vegetales a través del proceso de fotosíntesis generan compuestos orgánicos, lo que constituye la entrada de C al ecosistema (Bono, 2008). Cuando la biomasa vegetal muere se convierte en residuos orgánicos vegetales, los que junto con los residuos animales se encuentran expuestos a procesos de descomposición y biodegradación, producidos por la acción de la biomasa microbiana. De esta forma, se originan compuestos orgánicos más sencillos. En determinadas condiciones del medio, dichos compuestos orgánicos sencillos, pueden formar parte de la biomasa microbiana, transformarse en sustancias inorgánicas solubles (proceso de mineralización), de las que pueden disponer los vegetales, perderse como gases a la atmósfera (como CO₂ y óxidos de N₂) o lixivarse en el suelo. Caso contrario, los compuestos orgánicos sencillos, pueden reorganizarse para formar compuestos órgano-minerales coloidales estabilizados (proceso de humificación). Producto del proceso de mineralización los vegetales pueden obtener nutrientes esenciales que permiten su desarrollo. Cuando se completa el ciclo de vida de los vegetales y estos mueren, como así también, los consecutivos eslabones de la cadena alimentaria, se incorporan al suelo como residuos orgánicos que continúan el ciclo del C en el suelo (Hampp, 2006).

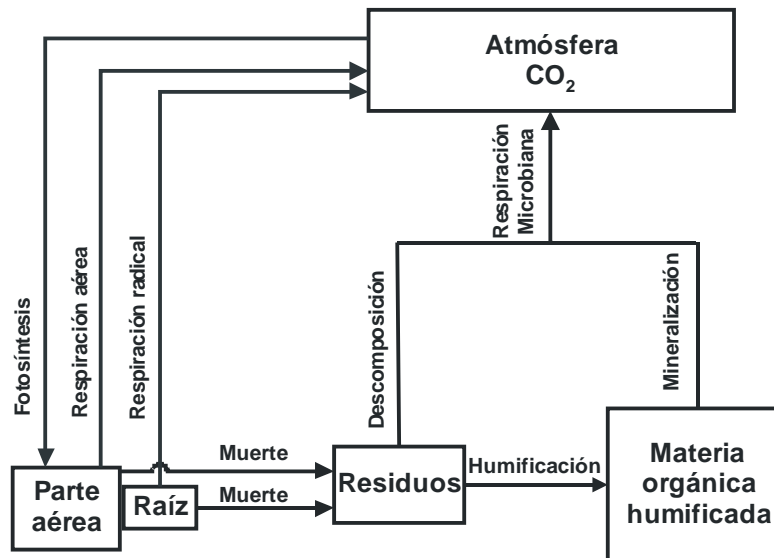


Figura 2. Diagrama representativo del ciclo de Carbono en un agrosistema (Adaptado de Álvarez 2006, citado por Bono, 2008).

Todos los suelos minerales poseen materia orgánica, pero su diferente contenido y grado de integración, dependen de los factores de formación del suelo: clima, vegetación, relieve, material originario, y tiempo. Cuando dichos factores permanecen inalterados, a excepción del tiempo, la materia orgánica, tanto en cantidad como en calidad, entra en un estado de equilibrio (Bricchi *et al.*, 2004). Por lo que cada suelo tiene su propia capacidad de almacenar C orgánico y susceptibilidad a perderlo (Galantini, 2008b). Pero el hombre tiene la capacidad de modificar dicho equilibrio natural, con una determinada dirección y grado, mediante el uso y prácticas de manejo particulares que se realicen en el sitio. Por lo tanto, actividades como labranzas agresivas, monocultivos, balance negativo de agua y nutrientes, remoción de rastrojo, sobrepastoreo, erosión, entre otras, producen pérdidas en el contenido de C orgánico del suelo. Mientras que actividades tales como, labranzas reducidas o labranza cero, secuencias de cultivos, presencia de mulch, cultivos de cobertura, balance de nutrientes positivo, pastoreo racional, entre otros, causan el efecto contrario, produciéndose ganancias en el contenido de C orgánico del suelo (Lal, 2008).

Dentro de la dinámica de la materia orgánica del suelo existen dos procesos fundamentales: la humificación y la mineralización. La primera es el conjunto de procesos de naturaleza biológica, bioquímica y química que transforman los residuos orgánicos vegetales y animales en un conjunto de sustancias orgánicas de variable complejidad, donde no se identifica el material de origen y que son particulares del suelo. La mineralización es un proceso biológico en el que las sustancias orgánicas del suelo son oxidadas por los microorganismos para la obtención de energía. Los productos obtenidos son aniones que reaccionan con las bases del medio para formar sales minerales inorgánicas (Hampp, 2006).

Los responsables de dichos procesos de humificación y de mineralización son el conjunto de microorganismos del suelo, integrado por bacterias, hongos y actinomicetos, que en su totalidad se denominan biomasa microbiana. La disponibilidad de los materiales orgánicos para los microorganismos depende de su composición química, relación C:N, estado de humificación y ubicación dentro de la matriz del suelo (Solins *et al.*, 1999 y Balesdent *et al.*, 2000, citados por Galantini, 2008a). Además, la velocidad con la que ocurren las transformaciones de los materiales orgánicos, depende de factores naturales, como el clima y las características del suelo, y factores antrópicos, como el tipo e intensidad de manejo agrícola (Galantini *et al.*, 2008).

El coeficiente de humificación es del orden del 0,1 al 0,4 anual (Cisneros *et al.*, 2006), dependiendo del tipo de residuo, sistema de labranza, tipo de suelo y condiciones climáticas. El coeficiente de mineralización, se ubica entre 0,01 a 0,02 anual (Molina y Smith, 1998, citados por Galantini, 2008b) o entre el 0,01 al 0,04 anual (Cisneros *et al.*, 2006). En este sentido, Lucas y Vitosh (1978, citados por Cisneros *et al.*, 2006) estiman el coeficiente de mineralización para suelos de diferentes texturas: franco-arcilloso: 0,025; franco-arenoso: 0,035; y arenoso-franco: 0,045 anual. Para la Región Pampeana, Álvarez (2006, citado por Cisneros *et al.*, 2006) ha reportado valores de 0,057 para Argiudoles típicos de la Pampa Ondulada.

Como se expresó anteriormente, los factores naturales de formación del suelo influyen directamente sobre los equilibrios de la materia orgánica, condicionando la cantidad, calidad, y distribución de las fracciones orgánicas. En tanto, las prácticas de manejo pueden alterar dichos equilibrios.

Las prácticas de manejo que poseen mayor efecto sobre la dinámica de la materia orgánica son las labranzas, las secuencias de cultivos y la fertilización (Galantini, 2008b). En los sistemas de labranzas, intervienen su frecuencia e intensidad, alterando las propiedades físicas del suelo, la distribución de la materia orgánica y de los nutrientes de la profundidad laboreada. Las secuencias o rotaciones de cultivos que amplíen la biodiversidad, permiten hacer un mejor uso de las diferentes capacidades que poseen las especies para explorar el suelo, y a su vez las rotaciones que posean un mayor número de cultivos por año o aumenten el porcentaje de maíz (Álvarez, 2005) permiten alcanzar rendimientos elevados y estables, favoreciendo el ciclado de nutrientes y exportación de nutrientes, lo que debe complementarse con una fertilización balanceada (Galantini *et al.*, 2000, citados por Galantini 2008b).

IV.2. Sobre los modelos de simulación.

Los modelos son representaciones simplificadas de la realidad, sobre la base de hipótesis. En tal sentido, los modelos de simulación constituyen una herramienta adecuada

para el estudio de la dinámica de la materia orgánica bajo diferentes situaciones de uso y manejo del suelo, tanto actual como futuro. Para ello requieren ser calibrados y validados. La calibración de un modelo consiste en el ajuste (bibliográfico o experimental) de los diferentes parámetros que lo componen, mientras que la validación es la evaluación de la predecibilidad del modelo, es decir, cuan confiable resulta el modelo a la hora de predecir cambios en la variable que simula a futuro. Por otra parte, los modelos también permiten sistematizar información histórica disponible.

Dentro de este marco los procesos involucrados en la dinámica de la materia orgánica, mediante la descripción de las interacciones entre factores climáticos, geoquímicos, biológicos y antrópicos, pueden ser modelados para la estimación del stock de C del suelo (Apezteguía *et al.*, 2004). Esta herramienta permite ayudar a entender la dinámica de la materia orgánica e identificar los factores que conducen a cambios (Lugato *et al.*, 2007), de esta forma se pueden realizar proyecciones, que permiten estimar los impactos del uso de la tierra para diseñar estrategias de manejo para elevar el contenido de C del suelo (Kamoni *et al.*, 2007).

Paustian *et al.* (1997) clasifican a los modelos de simulación en dos grupos: a nivel de ecosistema y a nivel de macro escala. Los primeros se construyen a partir de experiencias locales, con mucho estudio de detalle y una posterior ampliación a escala mayor, donde se incluyen modelos tales como: Century, Rothamsted y Linkages; mientras que los segundos son diseñados primariamente para una modelización global, con una estructura simple, factores de control generales o globalizados, y las tasas de los procesos tienden a ser formuladas de forma empírica, y la escala espacial se encuentra establecida como una gran cuadrícula definida por la latitud y longitud.

En cuanto a la descripción de la dinámica de la materia orgánica, en los modelos de simulación, la misma es dividida en un número arbitrario de fracciones conceptuales que se distinguen en base a su resistencia a la biodegradación microbiana y sus características químicas (Shibu *et al.*, 2006), pero que no corresponden a fracciones determinadas experimentalmente, lo que puede considerarse como una limitación de los modelos compartimentales de la materia orgánica (Christensen, 1996).

En cuanto a los modelos de simulación propuestos para analizar la evolución de la materia orgánica del suelo a largo plazo se encuentran, entre otros: el Modelo de Hénin-Dupuis (H-D) (1945), Modelo de Guerif (1945), Modelo de Lucas y Vitosh (1978), ROTHC-26.3 (Coleman y Jenkinson, 1999), Century Agriecosystems (Parton *et al.*, 1987), AMG (Andriulo *et al.*, 1996), citados por Cisneros *et al.* (2006), Modelo C de un compartimento (Bayer *et al.*, 2005).

El modelo H-D es sencillo, ya que considera una sola fracción de C, pero tiene la desventaja que subestima el contenido de C durante los primeros años de una secuencia de

cultivos y los sobreestima más tarde (Plénet *et al.*, 1993; Boiffin *et al.*, 1996, citados por Andriulo, 2002). El modelo AMG, que es una modificación del modelo H-D, considera dos fracciones de la materia orgánica: una fracción activa que se descompone rápidamente y que posee un tiempo de reciclado de hasta 30 años; y otra fracción que se descompone más lentamente y contribuye muy escasamente a la mineralización, y es considerada como totalmente estable. Este modelo fue validado en diferentes regiones del país y en el extranjero, permitiendo afirmar que resulta operacional en condiciones muy variadas, ya que se puede apreciar la evolución de la calidad de un suelo, luego de un período agrícola determinado (Andriulo *et al.*, 1996 y Andriulo, 2002).

El modelo RothC-26.3 simula la dinámica del C orgánico para suelos bien drenados, permitiendo observar el efecto del tipo de suelo, temperatura, contenido de humedad y cobertura vegetal. Los datos requeridos para correr el modelo son en general de fácil obtención. La estructura del modelo divide al C orgánico del suelo en cuatro compartimentos activos que son: a) material vegetal fácilmente descomponible, b) material vegetal resistente, c) biomasa microbiana, d) materia orgánica humificada, cada uno de los cuales posee una tasa de descomposición particular; y un compartimento inactivo que corresponde a una pequeña cantidad de materia orgánica inerte, resistente a la descomposición (Cantero *et al.*, 2006).

El modelo Century Agriecosystems representa la dinámica del C y nutrientes a largo plazo, a través de los residuos vegetales y la materia orgánica del suelo, en diferentes tipos de ecosistemas. Está integrado por: submodelo materia orgánica, submodelos nitrógeno, fósforo y azufre, y submodelos de producción primaria o de biomasa (Tittonell, 2004). En este sentido, este mismo autor, indica que es posible utilizar este modelo para estudios en la región central de Argentina, que involucren: 1) el análisis de escenarios futuros en el patrón de uso de la tierra y su impacto sobre variables ambientales y económicas, 2) la simulación de la dinámica de fijación/liberación de CO₂ a partir de balances de C de largo plazo para diferentes agroecosistemas de la región, 3) estudios exploratorios que permitan establecer valores potenciales de C edáfico que puedan ser utilizados en la construcción de indicadores de la calidad del suelo.

En la región central de Argentina el análisis de sensibilidad del modelo Century frente a los gradientes biofísicos y socioeconómicos de variación regional, indicó que su utilización como herramienta para evaluación y monitoreo de sustentabilidad debe limitarse al estudio de factores zonales de control (escala espacial), y su interacción con variables definidas por el patrón de uso de la tierra en el largo plazo (escala temporal) (Tittonell, 2004).

El modelo de C de un compartimento (Bayer *et al.*, 2005) es un modelo simple del Carbono orgánico del suelo, basado en la primera ordenación de la dinámica de la materia

orgánica elaborado por Hénin y Dupuis (1945), que probó ser útil para realizar evaluaciones menos detalladas, en lugares donde no siempre se encuentran a disposición las variables de entrada para modelos más complejos (Bayer *et al.*, 2005).

Este modelo presenta un método simple de estimación de los coeficientes de humificación (k_1) y mineralización (k_2) de la materia orgánica del suelo, que luego pueden ser extrapolados a modelos más complejos que presenten dichos coeficientes como datos de entrada. Por lo que mediante el uso de este modelo, es posible realizar comparaciones entre dichos coeficientes k_1 y k_2 , de diferentes regiones ecológicas, determinadas por sus particulares condiciones climáticas, edáficas y florísticas, y a su vez diversas situaciones experimentales, analizando prácticas de manejo, tales como el sistema de labranza, los sistemas de cultivos, y diferentes tipos y niveles de fertilización. A su vez, se establece que para lograr una mejor estimación de los valores simulados, respecto de los valores reales mensurados, los coeficientes deben ser constantes durante el período experimental y a través de un amplio rango de adiciones de C de los cultivos (Paustian *et al.*, 1992 y Larson *et al.*, 1972, citados por Bayer *et al.*, 2005).

Experimentos realizados indican que el coeficiente de mineralización (k_2) se encuentra afectado por condiciones climáticas, características del suelo y prácticas de manejo, especialmente el sistema de labranza; mientras que el coeficiente de humificación (k_1) está determinado por la cantidad y calidad de C de los residuos vegetales aportados al suelo.

Además, el modelo C de un bloque, permite estimar el turnover o vida media del stock total de SOC, el stock de C en estado estacionario, el stock de SOC remanente del inicial y el stock de SOC derivado de C del cultivo.

A partir de un ensayo de larga duración situado en el CAMDOCEX de la FAV que contempla aspectos de uso y manejo del suelo, en este trabajo se propone estimar los coeficientes de mineralización y de humificación, a partir de la información generada a través del tiempo en el mencionado ensayo. Por otra parte, se intentará calibrar y validar un modelo de simulación del contenido de materia orgánica, para un suelo representativo de la llanura pampeana bien drenada, en el Departamento de Río Cuarto, bajo diferentes condiciones de uso y manejo.

IV.3. Hipótesis

El problema que motiva esta investigación es el no conocimiento experimental de los coeficientes de mineralización y humificación para condiciones regionales de clima, uso y manejo del suelo, lo que dificulta la utilización de modelos de simulación. Dado que estos coeficientes pueden ser estimados experimentalmente a partir de ensayos de larga duración, se plantea la siguiente hipótesis de trabajo:

“Es posible estimar los coeficientes de humificación y de mineralización de la materia orgánica mediante un método estadístico (regresión) con datos de ensayos de larga duración, siempre que exista una correlación positiva entre el aporte de materia orgánica fresca y el incremento de materia orgánica humificada”.

IV.4. Objetivo general

Evaluar el stock de C de un suelo Hapludol típico de textura franco arenoso muy fino de la región centro-oeste de Córdoba a través de un modelo de simulación, calibrado y validado para las situaciones de estudio, y cuantificar los coeficientes de humificación y mineralización de la materia orgánica.

IV.5. Objetivos específicos

- Recopilar y procesar estadísticamente datos secundarios del contenido de CO.
- Evaluar el contenido actual de CO.
- Estimar los coeficientes de humificación y de mineralización de la materia orgánica.
- Calibrar y validar un modelo de simulación del stock de C.
- Evaluar el stock de C a largo plazo bajo distintas condiciones de uso y manejo.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

V.1. Caracterización del área de estudio

El área de estudio comprende el sector centro-oeste de la provincia de Córdoba, específicamente se trabajó en el paraje La Aguada (32° 57' de latitud sur, 64° 50' de longitud oeste y 680 msnm) en el Campo de Docencia y Experimentación (CAMDOCEX) "Pozo del Carril" de la Facultad de Agronomía y Veterinaria, de la Universidad Nacional de Río Cuarto, ubicado a 45 km. al oeste de la ciudad de Río Cuarto, provincia de Córdoba.

La condición climática es subhúmeda con estación seca. El relieve es ondulado, los suelos son Hapludoles típicos de textura franco arenosa muy fina (Bricchi *et al.*, 2004).

V.2. Descripción del ensayo experimental

El trabajo final se realizó en el marco del Proyecto "Efecto de distintos sistemas de labranzas y rotación de cultivos en la calidad del suelo", que integra el Programa "Desarrollo de alternativas tecnológicas para la producción agropecuaria sustentable en el oeste de Río Cuarto".

El programa de investigación, donde se incluye éste trabajo, comenzó en agosto de 1994, y en el año 2009 se realizó el presente estudio. El programa de referencia incluye tres usos, tres sistemas de labranzas, dos dosis de fertilización con nitrógeno y fósforo, y dos posiciones topográficas.

En este marco se trabajó específicamente en la siguiente situación: sistema agrícola puro, que consistió en una rotación anual de maíz-girasol, incorporándose soja en el ciclo 2003-2004. Los cultivos se implantaron bajo tres sistemas de labranza: convencional (arado de rejas y rastra de discos), reducida (arado de cincel y rastra de discos), y siembra directa. Cada sistema de labranza se realizó con fertilización de nitrógeno y fósforo y sin fertilización.

El ensayo original se desarrolló utilizando un diseño experimental en parcelas subdivididas en bloques completamente aleatorizados, con dos repeticiones espaciales por tratamiento, donde el nivel de rastrojos aportados por el cultivo antecesor fue el factor principal, las labranzas el secundario, y la fertilización el terciario.

V.3. Variables medidas

Se recopilaron datos secundarios del contenido de CO, mediante un análisis de publicaciones y tesis de grado realizadas sobre el ensayo experimental antes descrito (Bricchi *et al.*, 2004; Parra, 2004; Verri, 2004; Etcheverry, 2007, datos no publicados).

A su vez, se evaluó el contenido actual de CO (datos primarios), mediante el muestreo de los primeros 7 cm del suelo (dos muestras compuestas por cuatro submuestras),

del tratamiento agrícola sin pastoreo de rastrojos, bajo tres sistemas de labranza (labranza convencional (LC), labranza reducida (LR) y Siembra Directa (SD)), dos niveles de fertilización (con (F) y sin fertilización (NF)) y dos posiciones topográficas (loma y media loma baja). Luego se realizó la determinación de materia orgánica mediante la oxidación del C orgánico con ácido crómico, utilizando el calor de dilución del ácido sulfúrico, y valorando el exceso de ácido crómico con sal de Mohr (Nelson y Sommers, 1982).

El procesamiento estadístico de los datos secundarios y datos primarios, recopilados y obtenidos, respectivamente, del contenido de CO del suelo (unidad utilizada: g/kg), se realizó mediante el programa Infostat (2002), donde se llevó a cabo el análisis de la varianza (ANOVA), y se realizaron comparaciones de medias mediante el test DGC (Prueba de Di Rienzo, Guzmán y Casanoves) al 5% de probabilidad, a fin de construir las tendencias históricas de la evolución de CO total para las diferentes alternativas.

Para conversión de unidades de g/kg a tn/ha de los datos de CO del suelo, en todos los tratamientos y años del ensayo experimental, se utilizaron los valores de densidad aparente (DAP) establecidos por Parra (2004).

Además se analizó el aporte de C de los residuos de cultivos, lo que se estimó a partir de la biomasa aérea y radical producida. La primera se obtuvo del rendimiento en grano, asumiendo índices de cosecha de 0,45; 0,35 y 0,40 para maíz, girasol y soja, respectivamente (Studdert y Echeverría, 2000, citados por Dominguez y Studdert, 2006). El aporte de biomasa radical se calculó asumiendo coeficientes de relación raíz: parte aérea de 0,35 y 0,38 y una proporción de raíces en la capa arable del 91% y 84% del total de raíces para maíz y soja, respectivamente. Para girasol se utilizaron los mismos valores que para soja (Buyanovsky y Wagner, 1997, citados por Dominguez y Studdert, 2006). La biomasa estimada mediante el procedimiento mencionado se expresó en su contenido de C, ya que la misma posee una concentración aproximada de 40% de C en su constitución (Galantini, 2008b).

V.4. Procesamiento y análisis de la información

V.4.1. Modelo de C de un compartimento

Para evaluar el stock de C a largo plazo bajo diferentes situaciones de uso y manejo del suelo, se propuso el Modelo de C de un bloque o compartimento (Bayer *et al.*, 2005). Este modelo es utilizado en experimentos de largo plazo para realizar simulaciones del stock de Carbono Orgánico del Suelo (SOC). Su formulación matemática es la siguiente:

$$C_t = C_0 \cdot e^{-k_2 t} + k_1 \cdot A / k_2 \cdot (1 - e^{-k_2 t}) \quad (1)$$

C_t = Stock de SOC en el tiempo t (actual)

C_0 = Stock de SOC inicial (t=0)

k_2 = Proporción anual de pérdida de SOC (principalmente mineralización y erosión)

k_1 = Proporción anual de C que se incorpora a la materia orgánica del suelo.

A = Adición de C anual

V.4.2. Estimación de los coeficientes de humificación y mineralización.

A fin de estimar los coeficientes de la dinámica de la materia orgánica: tasa anual de pérdida en los niveles de SOC y de la tasa anual de C que se incorpora a la materia orgánica del suelo, denominados coeficiente de mineralización o k_2 y coeficiente de humificación o k_1 , respectivamente, se utilizó el método propuesto por este modelo, considerando datos que comúnmente se obtienen de experimentos de largo plazo, como C_t , C_0 y A.

Es de importancia destacar que el cálculo de los coeficientes de mineralización y humificación es posible si existe una relación lineal positiva entre el stock de SOC en el tiempo t (C_t) y la respectiva adición de C anual (A), la que puede expresarse como:

$$C_t = a + b.A \quad (2)$$

Siendo a la ordenada al origen, A la variable independiente, y b la pendiente de la recta.

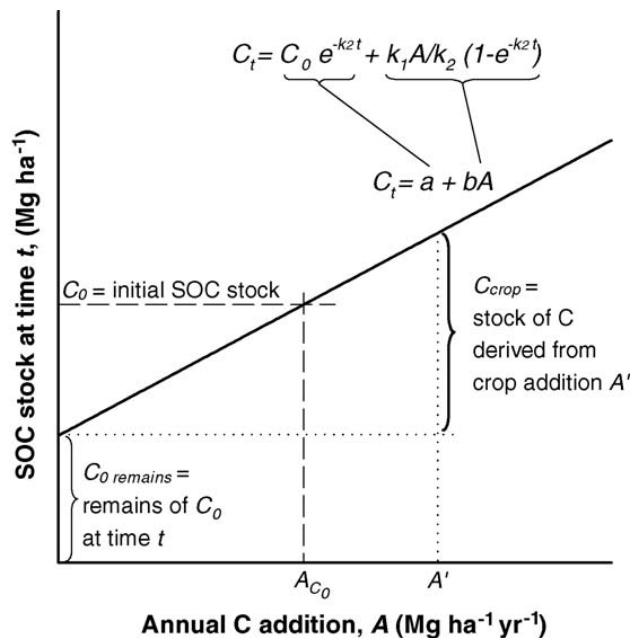


Figura 3. Representación esquemática de la relación entre el stock de SOC total en el tiempo t y adiciones anuales de C (A), en un determinado sistema de labranza. La ecuación lineal $C_t = a + b.A$ es equivalente al modelo $C_t = C_0.e^{-k_2 t} + k_1.A / k_2.(1 - e^{-k_2 t})$. A_{C_0} : adición anual de C requerida para mantener C_0 . A' : adición de C de cultivo ilustrativa con su respectiva contribución ($C_{cultivo}$) al stock total de SOC (Bayer *et al.*, 2005).

El primer componente de la ecuación (1): $C_0.e^{-k_2 t}$ expresa el decaimiento del stock de SOC inicial, y para un tiempo t, corresponde a lo que queda del stock de SOC inicial

(C_0 remanente). El segundo componente: $k_1.A / k_2.(1-e^{-k_2t})$ expresa el stock de SOC derivado del C aportado por el cultivo (C_{cultivo}) para un tiempo t.

La ecuación (1) describe una recta representada por la ecuación (2). Por lo tanto, ambas ecuaciones son comparables, donde el primer componente de la ecuación (1), la ordenada al origen, es equivalente al primer componente de la ecuación (2):

$$a = C_0.e^{-k_2t} \quad (3)$$

En consecuencia, a representa, en el tiempo t, el stock total de SOC remanente, si teóricamente no ocurren adiciones de C ($A=0$).

De igual manera, el segundo componente de la ecuación (1) es equivalente al segundo componente de la ecuación (2):

$$b.A = k_1.A / k_2.(1-e^{-k_2t}) \quad (4)$$

Por lo tanto, b.A representa, en el tiempo t, el stock de SOC derivado de las adiciones del cultivo.

Los k_1 y k_2 , pueden obtenerse despejando las ecuaciones (3) y (4):

$$k_2 = (\ln C_0 - \ln a) / t \quad (5)$$

$$k_1 = (k_2.b) / (1 - e^{-k_2t}) \quad (6)$$

V.5. Análisis estadístico

Para la calibración y validación del modelo de simulación del stock de C, se propone realizar la bondad de ajuste de los valores estimados por el modelo y los observados a campo a través del coeficiente de correlación lineal y el error estándar de ajuste (Willmontt, 1982 citado por Videla Mensegue, 2006).

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se presentan los datos de CO expresados en g/kg. La unidad de expresión (g/kg) permite mitigar el error que generan los cambios que ocurren en la masa de los suelos por variaciones en la densidad aparente (Carter *et al*, 1998, citados por Quiroga y Funaro, 2004).

Tabla 1. Evolución del contenido de Carbono Orgánico del suelo (g/kg), en los diferentes tratamientos de labranza (SD: siembra directa, LR: labranza reducida, LC: labranza convencional), fertilización (F: fertilizado, NF: no fertilizado) y posición topográfica (Bloq, 1: loma, 2: media loma baja).

Labr	Fert	Bloq	g / kg CO				
			1994	1999	2002	2007	2009
SD	F	1	9,40	9,92	-	9,19	9,62
SD	NF	1	9,40	9,69	-	8,14	8,56
SD	F	2	9,40	11,83	14,05	11,66	11,53
SD	NF	2	9,40	10,90	-	10,18	10,68
LR	F	1	9,40	9,92	-	9,41	9,48
LR	NF	1	9,40	10,44	-	9,45	8,37
LR	F	2	9,40	11,43	9,25	8,06	9,20
LR	NF	2	9,40	11,48	-	11,54	9,17
LC	F	1	9,40	8,87	-	7,16	7,84
LC	NF	1	9,40	8,87	-	7,03	7,32
LC	F	2	9,40	8,35	8,06	7,22	7,05
LC	NF	2	9,40	8,70	-	7,40	6,76

En la Tabla 2 se presentan los datos precedentes convertidos a valores de tn/ha a partir de datos de DAP secundarios, para cada sistema de labranza en particular. La unidad de expresión (tn/ha) se requiere para el análisis de la correlación con el aporte de C de los residuos de los cultivos, condición necesaria para la estimación de los coeficientes de humificación y mineralización de la materia orgánica con el método propuesto.

Tabla 2. Evolución del contenido de Carbono Orgánico del suelo (tn/ha), en los diferentes tratamientos de labranza, fertilización y posición topográfica.

			tn CO / ha				
Labr	Fert	Bloq	1994	1999	2002	2007	2009
SD	F	1	12,69	13,39	-	12,40	12,98
SD	NF	1	12,69	13,08	-	10,99	11,56
SD	F	2	12,69	15,97	18,97	15,74	15,56
SD	NF	2	12,69	14,72	-	13,74	14,42
LR	F	1	11,75	12,4	-	11,76	11,85
LR	NF	1	11,75	13,05	-	11,82	10,46
LR	F	2	11,75	14,28	11,56	10,08	11,50
LR	NF	2	11,75	14,36	-	14,43	11,46
LC	F	1	11,94	11,27	-	9,09	9,96
LC	NF	1	11,94	11,27	-	8,93	9,30
LC	F	2	11,94	10,61	10,24	9,17	8,95
LC	NF	2	11,94	11,05	-	9,40	8,59

El resultado del procesamiento estadístico de los datos de la Tabla 1, los que presentan un $R^2=0,91$ y un $CV=6,67$, cuyos factores de análisis son: sistema de labranza, nivel de fertilización y año de la determinación indican que no existen diferencias estadísticamente significativas ($p>0,05$) para la interacción labranzas x fertilización x año ($p=0,3240$), para el contenido de CO del suelo. Tampoco se encontraron diferencias en las interacciones dobles, labranza x fertilización ($p=0,1871$), y fertilización x año ($p=0,4180$). En cambio, en la interacción labranza x año se encontró interacción entre dichos factores ($p=0,0022$). En la Tabla 3, por ende, se procedió a realizar las comparaciones correspondientes mediante el test estadístico DGC.

Tabla 3. Comparaciones en el contenido de CO (gr/kg) del suelo en la interacción labranza x año. Test: DGC. Alfa=0,05. PCALT=0,9774. Error: 0,3827. gl: 18.

Labranza	Año	Contenido medio de CO (gr/kg)
SD	1994	9,40 b
	1999	10,59 a
	2007	9,79 b
	2009	10,10 b
LR	1994	9,40 b
	1999	10,82 a
	2007	9,62 b
	2009	9,06 b
LC	1994	9,40 b
	1999	8,70 b
	2007	7,20 c
	2009	7,24 c

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

En la tabla 3 se observa que en el año 1994, por ser inicio del ensayo experimental, todos los tratamientos poseen los mismos valores de CO. En labranza convencional, en el año 1999, luego de 5 años, se observa que el contenido de CO no presenta diferencias significativas; posteriormente transcurridos 8 y 10 años, en 2007 y 2009 respectivamente, el contenido disminuye respecto a la medición anterior, pero es muy similar para los dos últimos momentos, llegando al menor valor, respecto a los restantes tratamientos.

Por otra parte, tanto en labranza reducida como en siembra directa, en la determinación del año 1999, se observa que el contenido de CO aumentó respecto a la situación inicial. Luego, en el año 2007 y 2009 el contenido disminuyó respecto a la medición anterior, manteniéndose similar a la situación inicial. Esto es coincidente con lo encontrado por Zanatta *et al.*, (2007) quienes establecen que bajo siembra directa en comparación con labranzas conservacionistas, las tasas máximas de acumulación de CO del suelo se producen durante los primeros 5 a 9 años, y luego decrecen exponencialmente en el tiempo.

En la Tabla 4 se presentan los resultados del cálculo de aporte de C por parte de los residuos de cultivos (tn/ha), realizado mediante la estimación de la biomasa aérea y radical, a partir del rendimiento en grano.

Tabla 4. Aporte anual de C de los residuos de cultivos, según labranza, fertilización y posición topográfica, expresado en tn/ha.

Aporte de C tn/ha				Mz	Mz	Gr	Mz	Gr	Mz	Gr	Mz	Mz	Sj	Mz	Sj	Mz	Pro	
La	Us	Fe	Bl	94-	95-	96-	97-	98-	99-	00-	01-	02-	03-	04-	05-	06-	07	m
br	o	rt	oq	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07		
SD	N	F	1	4,7	5,3	2,4	4,9	1,8	5,5	2,4	5,3	5,5	2,4	6,4	3,1	4,0	4,1	
	P			9	6	7	3	1	6	5	5	1	8	2	1	5	8	
SD	N	F	2	4,4	5,2	3,1	5,7	1,7	6,2	2,1	5,6	5,1	2,5	7,0	3,0	4,7	4,3	
	P			9	0	3	7	5	7	4	3	9	7	3	8	8	9	
SD	N	N	1	3,7	2,4	2,7	1,9	1,0	1,5	1,4	0,3	0,6	1,9	2,4	2,0	1,6	1,8	
	P	F		2	0	0	1	4	9	3	6	9	3	8	0	3	4	
SD	N	N	2	3,1	2,5	2,1	2,0	1,2	2,4	1,4	0,1	0,5	2,4	2,1	2,6	1,8	1,9	
	P	F		2	8	3	1	8	7	3	4	5	6	9	5	5	1	
LR	N	F	1	3,7	4,3	2,4	4,4	1,8	6,3	2,2	5,2	5,2	2,4	6,0	3,0	4,0	3,9	
	P			1	8	5	2	2	2	5	7	4	9	5	0	5	6	
LR	N	F	2	3,4	3,5	2,4	4,3	1,9	5,8	2,2	5,0	5,1	2,2	6,4	2,7	3,8	3,7	
	P			3	6	0	7	2	7	5	6	0	6	4	3	4	9	
LR	N	N	1	2,8	2,3	2,4	4,1	1,4	2,2	1,7	1,9	2,2	1,9	3,2	2,0	1,9	2,3	
	P	F		4	8	7	2	1	5	4	2	7	7	1	7	6	5	
LR	N	N	2	2,7	1,5	2,7	3,5	1,6	3,7	1,7	2,1	1,9	3,0	3,3	2,5	1,8	2,5	
	P	F		0	5	1	5	3	2	4	4	3	0	6	8	6	0	
LC	N	F	1	3,9	3,1	1,9	3,9	1,7	5,8	2,1	3,8	4,6	2,0	7,1	3,0	3,8	3,6	
	P			3	1	6	5	7	3	4	8	9	4	0	1	5	4	
LC	N	F	2	2,9	3,1	1,7	3,7	1,4	6,0	2,1	4,3	4,4	1,9	7,2	3,3	4,8	3,6	
	P			6	0	2	9	8	8	4	5	8	0	5	2	3	5	
LC	N	N	1	2,6	1,6	1,5	3,3	1,2	2,6	1,4	2,5	1,8	1,9	4,3	2,6	1,9	2,2	
	P	F		4	8	9	0	9	3	3	7	7	7	0	2	0	9	
LC	N	N	2	2,2	1,3	1,9	3,1	1,2	3,3	1,4	2,6	1,7	2,7	5,0	2,5	2,8	2,4	

P	F	6	2	3	8	9	3	3	7	1	3	1	9	5	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

En la tabla 4 se muestra el aporte de C que realizan los cultivos, en su secuencia desde el inicio hasta la campaña 2006-2007, ya que las campañas posteriores no pudieron ser calculadas, por falta de datos de rendimiento en grano. Se observa que en los tratamientos fertilizados, el aporte de C es mayor para todas las situaciones.

A continuación se presenta la relación entre el CO del suelo correspondiente al 13° año del ensayo (2007), y el aporte promedio de C de los residuos de cultivos de los 13 años, para cada sistema de labranza, manejo de nutrientes y posición topográfica.

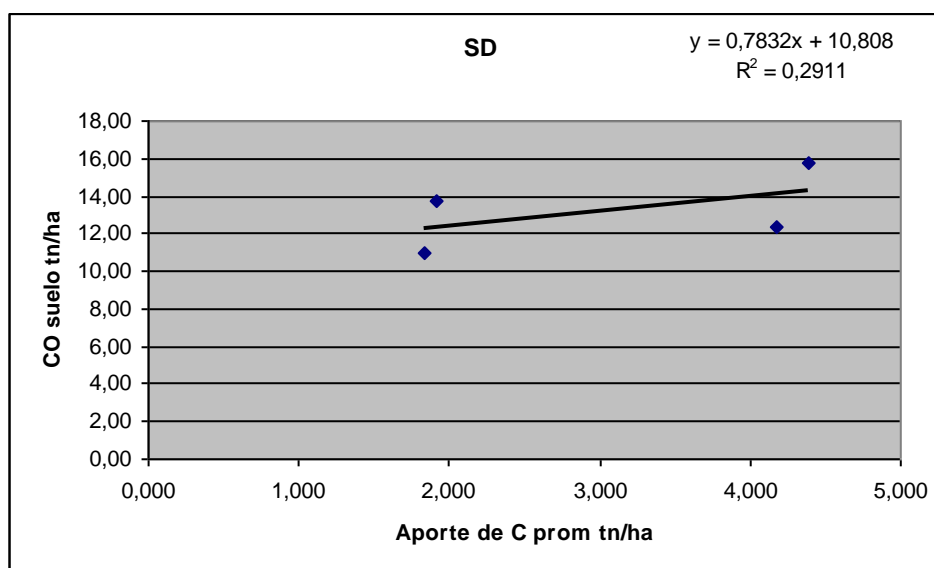
Sistema de labranza: Siembra directa

Tabla 5. Aporte de C promedio y CO del suelo (2007), en siembra directa (SD), con y sin fertilización (F y NF) y posiciones topográficas (1. loma, 2. media loma baja).

Tratamiento	Aporte de C tn/ha	CO suelo tn/ha
SD F 1	4,176	12,40
SD NF 1	1,839	10,99
SD F 2	4,386	15,74
SD NF 2	1,912	13,74

En la tabla 5 se observa un salto cuantitativo de aporte de C de los residuos del cultivo en las situaciones con fertilización, en contraposición con los tratamientos no fertilizados, magnitud que no se traslada al contenido de CO del suelo. El modelo estadístico de los datos de la tabla precedente se presenta a continuación.

Figura 4. Relación entre el aporte de C promedio y el contenido de CO del suelo (año 2007), en siembra directa, con y sin fertilización y ambas posiciones topográficas.



En la figura 4 se observa una tendencia lineal y positiva a lo largo del año 2007, entre el stock de CO del suelo y el aporte promedio de C de los residuos. A pesar de los pocos datos disponibles y el bajo valor de R^2 obtenido, es posible suponer que el aporte de C de los residuos no fue un factor decisivo para explicar la variación en el stock de CO del suelo, para el año 2007 en las condiciones estudiadas. Por lo que sería necesario analizar el efecto acumulado en el tiempo, ya que el modelo propuesto no se ajusta a las condiciones del ensayo. El análisis a través del tiempo (tabla 3) muestra que, el contenido de CO del suelo actual no presenta cambios significativos respecto al inicio del ensayo.

En igual sentido para las labranzas cuyo análisis sigue a continuación, debería tenerse en cuenta el comentario precedente.

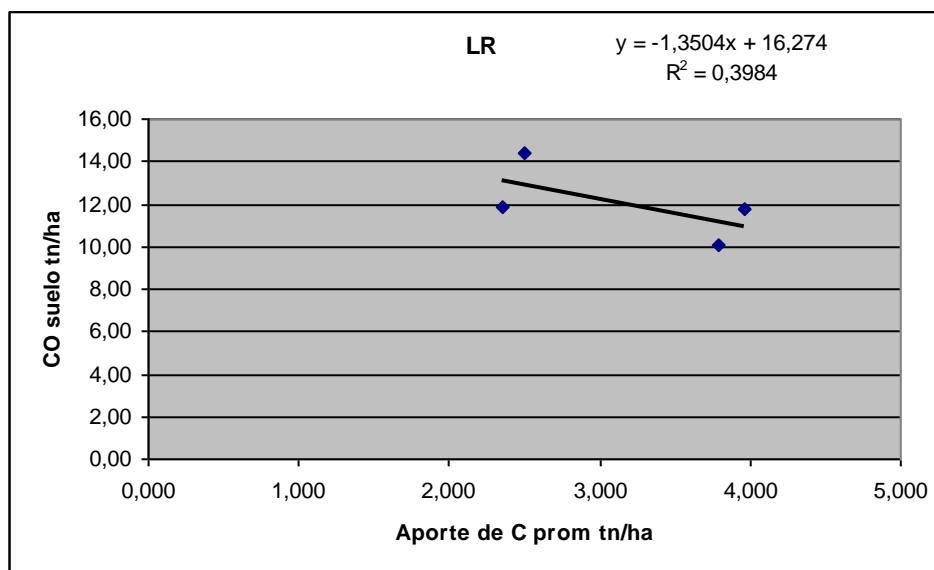
Sistema de labranza: Labranza reducida

Tabla 6. Aporte de C promedio y CO del suelo (2007), en labranza reducida (LR), con y sin fertilización (F y NF) y posiciones topográficas:(1. loma, 2. media loma baja).

Tratamiento	Aporte de C tn/ha	CO suelo tn/ha
LR F 1	3,957	11,76
LR NF 1	2,354	11,82
LR F 2	3,786	10,08
LR NF 2	2,497	14,43

Bajo el tratamiento de labranza reducida, se observa el mismo patrón de comportamiento de los datos que los observados en siembra directa (tabla 6), con escasa cantidad de datos disponibles y bajo valor de R_2 .

Figura 5. Relación entre el aporte de C promedio y el contenido de CO del suelo (año 2007), en labranza reducida, con y sin fertilización y ambas posiciones topográficas.



En esta situación experimental, la regresión muestra una correlación lineal negativa, resultado no esperado conceptualmente, lo que indicaría que el aporte de C de los residuos no es el principal factor que explica la variación en el stock de CO del suelo, para el año 2007 en las condiciones estudiadas. No obstante esto, difiere sustancialmente con el sistema de siembra directa ya que cambia la pendiente de la regresión, lo que indica que no hay incremento del stock de CO en relación al aporte de C, donde podrían predominar los procesos de mineralización sobre los de humificación, o los volúmenes de C aportados por los residuos de cultivos no alcanzarían a compensar las pérdidas de CO por mineralización (figura 5). En cuanto al análisis temporal (tabla 3), al igual que en sistema de siembra directa, el contenido actual de CO del suelo no presenta diferencias significativas con respecto al inicio del ensayo.

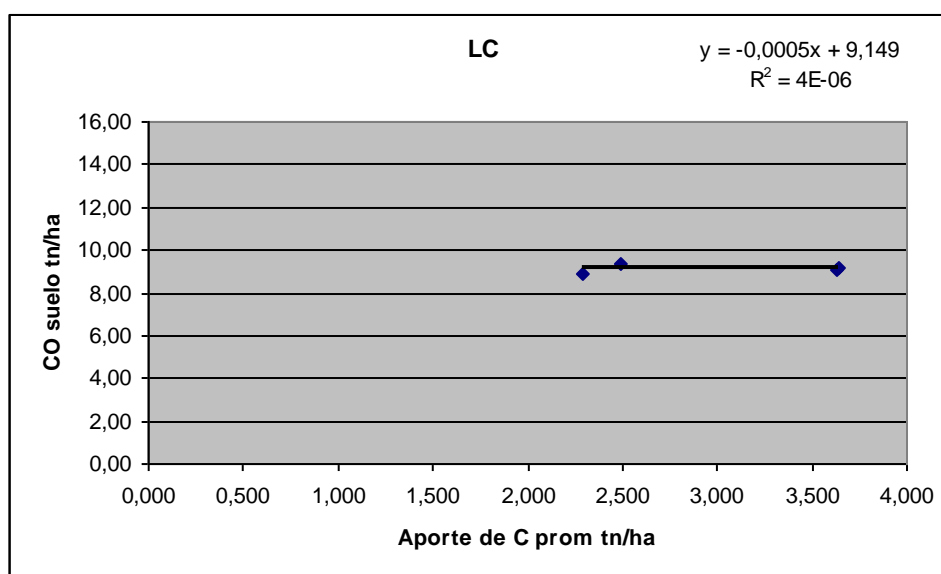
Sistema de labranza: Labranza convencional

Tabla 7. Aporte de C promedio y CO del suelo (2007), en labranza convencional (LC), con y sin fertilización (F y NF), posiciones topográficas (1. loma, 2. media loma baja).

Tratamiento	Aporte de C tn/ha	CO suelo tn/ha
LC F 1	3,635	9,09
LC NF 1	2,292	8,93
LC F 2	3,645	9,17
LC NF 2	2,486	9,40

Bajo el tratamiento de labranza convencional, se observa una situación similar a las restantes labranzas en cuanto a las diferencias cuantitativas entre los tratamientos fertilizados y no fertilizados para el aporte de C de los residuos de los cultivos (tabla 7). Además, deben considerarse las consideraciones de los resultados de los sistemas analizados precedentemente.

Figura 6. Relación entre el aporte de C promedio y el contenido de CO del suelo (año 2007), en labranza convencional, con y sin fertilización y ambas posiciones topográficas.



En esta situación experimental (figura 6), la regresión no muestra ninguna correlación, donde el aporte de C de los residuos no es el principal factor que explica la variación en el stock de CO del suelo, para el año 2007 en las condiciones estudiadas, y el modelo no se ajusta a las condiciones del ensayo. Muchas investigaciones establecen que en las labranzas que incluyen arado de rejas la mineralización es mucho más activa que la humificación, lo que se evidencia en el análisis temporal (tabla 3), donde la situación actual presenta menor contenido del contenido de CO del suelo que la situación inicial del ensayo experimental, lo que además puede deberse a que los aportes de C de los residuos de cultivos

no alcanzarían a compensar las pérdidas de CO por mineralización. Posiblemente estos resultados tengan alguna influencia espacial que distorsionen los valores finales. Además, como en los restantes sistemas de labranzas analizados, el escaso número de datos disponibles, dificulta el análisis de la regresión.

En las correlaciones obtenidas, puede observarse que no se encontró una relación lineal positiva entre el contenido de CO del suelo y el aporte de C de los residuos de cultivos estadísticamente aceptable. En este sentido, y con la información procesada, para las condiciones del ensayo durante el año 2007, el aporte de C de los residuos de cultivos no es el factor que exclusivamente explicaría las variaciones en el stock de CO del suelo.

No obstante, se observa como tendencia el aumento del CO en labranzas de bajo impacto en la remoción del suelo, y viceversa (tabla 3). Por otra parte, se observa que en todos los años que se poseen datos, la fertilización condujo a mayores rendimientos (y por lo tanto mayores aportes de C), respecto a los no tratamientos no fertilizados, lo que no se reflejó en el contenido de CO del suelo. De similar manera, la posición topográfica media loma baja, para el período de tiempo estudiado, generalmente presenta mayor aporte de C de los cultivos, respecto a la posición de loma.

Estos resultados son coincidentes con Apezteguía *et al.*, (2000), Apezteguía y Sereno, (2002) (citados por Azpetegua *et al.*, 2004) que establecen que para acumular C en un suelo Haplustol éntico de textura franco-limosa (Serie Oncativo) de la EEA INTA Manfredi (centro-este de Córdoba), es más importante proporcionalmente, controlar la mineralización no removiendo el suelo, que aportar mayor cantidad de residuos.

El efecto de la siembra directa sobre la acumulación de C fue estudiado por Andriulo *et al.*, (2008), mediante un ensayo de 25 años en la Pampa Húmeda. Estos autores encontraron que solo con un número reducido de secuencias de Maíz-Trigo/Soja y Trigo/Soja bajo siembra directa pueden lograr un balance neto de C y Nitrógeno menos negativo pero no positivo. En contraposición, en la región de Balcarce, provincia de Buenos Aires, bajo suelos Molisoles de textura franca no expuestos a erosión, que poseen elevados contenidos de materia orgánica (complejo de Argiudol típico Serie Mar del Plata y Paleudol petrocálcico Serie Balcarce) (Studdert *et al.*, 1997 citados por Domínguez *et al.*, 2004) se observa una correlación altamente significativa entre el aporte anual de residuos y el CO en la capa arable del suelo, independientemente del sistema de labranza (mecanismo de control de la mineralización) (Studdert y Echeverría, 1998; Dominguez y Studdert, 2006; Robinson *et al.*, 1996 y Studdert y Echeverría, 2000 citados por Studdert *et al.*, 2006), lo que coincide también para la región de General Villegas en Hapudoles típicos y Hapludoles énticos (Alvarez *et al.*, 2005-2006), donde se destaca la importancia del aporte de muy altos volúmenes de rastrojos y la conservación de los mismos sobre la superficie del suelo, que

mejora los contenidos de materia orgánica, fundamentalmente en los primeros 5 cm del perfil y en sus fracciones menos humificadas.

En Anguil, provincia de La Pampa, en Haplustoles énticos, el balance de C se encuentra críticamente influenciado por el contenido de humedad disponible en el suelo para los cultivos, lo que determina el aporte de C de los mismos (Bono *et al.*, 2004, Bono, 2008). Por lo que la acumulación de materia orgánica bajo labranzas conservacionistas es dependiente de la condición hídrica.

Paustian *et al.*, (1992) y Larson *et al.*, (1972), (citados por Bayer *et al.*, 2005) establecen que la mejor estimación se obtiene cuando los coeficientes k_1 y k_2 son dados por el sistema de labranza, y constantes durante el período experimental a través de un amplio rango de adiciones de C, los cuales están relacionados con una amplia variación en los cultivos que intervienen en las rotaciones.

VII. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo conducen a rechazar la hipótesis planteada dado que no fue posible estimar los coeficientes de humificación y de mineralización de la materia orgánica, ya que no se encontró una correlación positiva entre el aporte de materia orgánica fresca y el incremento de materia orgánica humificada, para el ensayo analizado. En consecuencia, no se pudo calibrar ni validar un modelo de simulación del stock de C, como tampoco evaluar el stock de C a largo plazo bajo distintas condiciones de uso y manejo.

La recopilación de la información disponible sobre la evolución del CO en el ensayo y su análisis estadístico establecen que en un Hapludol típico franco arenoso muy fino, del centro-oeste de Córdoba, el aporte de C de residuos de los cultivos como único factor de análisis no explicaría el contenido de CO del suelo.

Por último, el procesamiento estadístico de los datos refleja que el contenido de CO del suelo, disminuye en labranzas de mayor impacto y remoción del suelo, mientras que tiende a mantenerse o incrementar levemente en las labranzas de menor intensidad de remoción del sistema suelo.

VIII. COMENTARIOS FINALES

De acuerdo a los resultados obtenidos en trabajos realizados en diferentes regiones de Argentina, oportunamente citados, no es de esperar que iguales situaciones o secuencia de cultivos y manejos, posean resultados similares en el balance de materia orgánica, ni establecer criterios unificados para situaciones sensiblemente diferentes, a pesar que se encuentran interrelacionados. Por lo que, al momento de extrapolar un modelo de simulación o método de análisis deben tenerse en cuenta las condiciones ambientales (clima y suelos) donde se originó el mismo, lo que recalca la importancia de los modelos de simulación como herramientas flexibles para el estudio de los sistemas y evaluación de escenarios futuros.

Por otra parte, de los resultados obtenidos en este trabajo, se considera conveniente avanzar sobre esta variable de fundamental importancia en el sistema suelo, lo que puede realizarse:

- Mediante la prueba de otros modelos que se adapten mejor a la zona centro-oeste de la provincia de Córdoba, o modificar el modelo de un compartimiento para obtener los parámetros de la dinámica de la materia orgánica.
- A su vez, en la medida de lo posible utilizar datos experimentales de otras situaciones, donde se incluya una mayor variedad de aportes de C de cultivos, suelos y condiciones climáticas.
- Considerar el análisis de las fracciones de la materia orgánica y el estudio en conjunto del ciclo del Nitrógeno, lo que permitiría una mayor sensibilidad en el corto plazo.
- Investigar para definir los factores que presenten relación directa con el contenido de CO del suelo en esta zona.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- ALVAREZ, R. 2005. A review of nitrogen fertilizer and conservation tillage effects on soil organic carbon storage. *Soil Use and Management*. 21, 38-52.
- ALVAREZ, SCIANCA, BARRACO, DIAZ ZORITA, BRAMBILLA. 2005-2006 Aporte de diferentes volúmenes de rastrojo en rotaciones agrícolas: impacto sobre las propiedades edáficas. Memoria técnica. EEA INTA General Villegas. Argentina.
- ANDRIULO, A. 2002. Evolución de la reserva de carbono orgánico edáfico bajo agricultura continua. Análisis y modelización. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn. Chubut. Argentina.
- ANDRIULO, A., BRUNO, M., BALESSENT, J., GUERIF, J. 1996. Modelización de la evolución de la materia orgánica de los suelos de la Pampa. Relación con los sistemas de cultivo. XIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Aguas de Lindota. San Pablo. Brasil.
- ANDRIULO, A., SASAL M., IRIZAR, A, RESTOVICH S., RIMATORI, F. 2008. Efecto de diferentes sistemas de labranza, secuencia de cultivos y de la fertilización nitrogenada sobre los stocks de C y N edáficos. En Estudio de las Fracciones Orgánicas en Suelos de la República Argentina. J.A. Galantini. Editor. Ed. Universidad Nacional del Sur. 308 p.
- APEZTEGUIA H. P., 2005 Dinámica de la materia orgánica de los suelos de la región semiárida central de Córdoba (Argentina). Tesis. Fac. de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- APEZTEGUIA H.P., ANDRIULO, A., SALAS, P.H., LOVERA, E., SERENO, R. 2004. Simulación de la dinámica de la materia orgánica en suelos del centro de la provincia de Córdoba con el Modelo AMG. En CD: Actas de XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná. Argentina.
- BAYER C., LOVATO T., DIECKOW J., ZANATTA J.A., MIELNICZUK J., 2005. A method for estimating coefficients of soil organic matter dynamics based on long-term experiments. *Soil Till Res* 91, 217-226.
- BONO A., 2008. Balance de carbono y nitrógeno en sistemas agrícolas de la región semiárida pampeana. Resumen Tesis Doctoral. FAUBA. Argentina.
- BONO, A., ALVAREZ, R., BUSCHIAZZO, D. 2004. Dinámica del Carbono bajo dos sistemas de labranza en la Región Semiárida Pampeana central de Argentina. AACS XIX Paraná.
- BRICCHI E., FORMIA F., ESPOSITO G., RIBERI L., AQUINO H., 2004. The effect of topography, tillage and stubble grazing on soil structure and organic carbon levels. *Span J Agric Res* 2 (3) 409-418.

- CANTERO A., CHOLAKY C., CISNEROS J., GONZÁLEZ J., REYNERO M., RESTOVICH S., UBERTO M., VERRI L., 2006. Guía de trabajos prácticos. Uso y Manejo de Suelos (Código 2028). Fac. de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina.
- CISNEROS J.M., CHOLAKY C., ANGELI A.R., REYNERO, M. 2006. Manejo de la condición biológica de los suelos: la materia orgánica y su dinámica. Documento didáctico para el curso Uso y Manejo de Suelos (Código 2028). Fac. de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina.
- CHRISTENSEN, B. T. 1996. Plenary Papers: Matching Measurable Soil Organic Matter with Conceptual Pools in Simulations Models of Carbon Turnover: Revision of Model Structure. En: Evaluation of Soil Organic Matter Models. Using Existing Long-Term Datasets. POWLSON, D. S., SMITH, P. SMITH, J.U. (Comp.) NATO ASI Series. Vol. 38. IACR-Rothamsted. Harpenden, Hertfordshire. UK.
- DOMINGUEZ, G.F., STUDDERT, G.A. 2006. Balance de Carbono en un Molisol bajo labranza convencional. En CD: Actas de XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta y Jujuy. 19-22 de septiembre de 2006. Argentina.
- DOMINGUEZ, STUDDERT, ECHEVERÍA, LORENZ. 2004. Efecto de los sistemas de labranza sobre materia orgánica total y particulada en un molisol de Balcarce. AACS XIX Paraná. Argentina.
- GALANTINI, J.A. y SUNER, L. 2008. Las fracciones orgánicas del suelo: análisis en los suelos de la Argentina. Revisión. AgriScientia, Vol.25, no.1, p.41-55. ISSN 1668-298X. Córdoba. Argentina.
- GALANTINI, J.A., 2008a. Fraccionamiento de la materia orgánica del suelo. En: Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina. GALANTINI, J.A. (Editor). SUÑER, L., LANDRISCINI, M.R., IGLESIAS, J.O. (Comp.) Ed. UNS. Bahía Blanca. Argentina.
- GALANTINI, J.A., 2008b. Dinámica y balance de materia orgánica del suelo: Fertilidad actual o captura de carbono. Jornada de actualización de profesionales. Asociación Argentina de las Ciencias del Suelo AACS. Comisión de Fertilidad de Suelos y Nutrición Vegetal. Lincoln. Argentina.
- GALANTINI, J.A., IGLESIAS J.O., LANDRISCINI, M.R., SUÑER, L., MINOLDO, G. 2008. Calidad y dinámica de las fracciones orgánicas en sistemas naturales y cultivados. En: Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina. GALANTINI, J.A. (Editor). SUÑER, L., LANDRISCINI, M.R., IGLESIAS, J.O. (Comp.) Ed. UNS. Bahía Blanca. Argentina.

- HAMPP E., 2006. Capítulo 8: Fracción orgánica de los suelos, en Sistema Suelo. Su origen y propiedades fundamentales. BRICCHI [E.](#), [DEGIOANNI A.](#), (Comp.) Ed. UNRC. [Río Cuarto. Argentina.](#)
- HENIN S., DUPUIS M. 1945. Essais du bilan de la matière organique du sol. Annales Agronomiques 15:17-29, Paris.
- INFOSTAT VERSION 1.1. 2002. Grupo Infostat. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba. Primera Ed.; Ed. Brujas. Argentina.
- IRIZAR A., ANDRIULO A., SASAL C., RESTOVICH S., DARDER L., RIMATORI F., HANUCH L. 2006. Efecto de diferentes sistemas de labranzas y de la fertilización nitrogenada sobre el carbono orgánico particulado en la rotación maíz-trigo/soja. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Argentina.
- KAMONI P.T., GICHERU P.T., WOKABI S.M., EASTER M., MILNE E., COLEMAN K., FALLOON P., PAUSTIAN K., FILLIAN K., KIHANDA F.M., 2007. Evaluation of two soil carbon models using two Kenyan long term experimental datasets. Soil Till Res 122, 95-104.
- LAL, R. 2008. Carbon sequestration in soil. CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources. 3:30.
- LUGATO, E., PAUSTIAN, K., GIARDINI, L. 2007. Modelling soil organic carbon dynamics in two long-term experiments of north-eastern Italy. Agriculture, Ecosystems and Environment 120:423-432.
- NELSON, D. y SOMMERS, L. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. En: Page, A. L., Miller R. H. y Keeney D. R. (Eds.). Methods of soils analysis. Part. 2. Chemical and microbiological properties. Agronomy monograph N. 9. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Inc. Segunda edición. Madison, Wisconsin, EEUU.
- PARRA, B. 2004. Efecto de distintas intervenciones tecnológicas sobre indicadores de la calidad física de un Hapludol típico. Tesis de Grado. Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina.
- PAUSTIAN, K., LEVINE, E., POST W.M., RYZHOVA, I.M., 1997. The use of models to integrate information and understanding of soil C at the regional scale. Geoderma 79 (1997) 227-260.
- QUIROGA, A. FUNARO, D. 2004. Materia orgánica. Factores que condicionan su utilización como indicador de calidad en Molisoles de las Regiones Semiárida y Subhúmeda Pampeana. AACS XIX Paraná. Argentina.
- QUIROGA, A., ORMEÑO, O., PEINEMANN, N. 2001. Materia orgánica. Un indicador de calidad de suelos relacionado con la productividad de los cultivos. INTA EEA Anguil. La Pampa. Argentina. Bol. Div. Técnica 70:28pp.

- SHIBU, M.E., LEFFELAAR, P.A., VAN KEULEN, H., AGGARWAL, P.K. 2006. Quantitative description of soil organic matter dynamics – A review of approaches with reference to rice-based cropping Systems. *ScienceDirect. Geoderma* 137, 1-18.
- STEVENSON, F. J. 1982. *Humus Chemistry*. John Wiley & Sons. New York, EEUU.
- STUDDERT, G.A., DOMÍNGUEZ, G.F., DIOVISALVI, N.V. 2006. Variación de la materia orgánica en un Molisol de Balcarce bajo agricultura continua. En CD: Actas de XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta y Jujuy, 19-22 de septiembre de 2006. Argentina.
- STUDDERT, G.A., ECHEVERRÍA, H.E. 1998. Rotaciones agrícolas y dinámica del carbono orgánico del suelo en Balcarce. XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Carlos Paz, Córdoba, Argentina. 4-7 Mayo 1998.
- TITTONELL P., 2004. El carbono orgánico en los suelos de la región central de Argentina. Combinando el uso de modelos empíricos y mecanísticos para la definición y evaluación de indicadores edáficos de sustentabilidad. Tesis de Maestría. Fac. de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina.
- VERRI L.J., 2004. Efecto del uso y manejo sobre la materia orgánica total y sus fracciones en un Hapludol Típico. Tesis de Grado. Fac. de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina.
- VIDELA MENEGUE H.R., 2006. Producción de soja en suelos con capa freática somera en el depto. Roque Sáenz Peña (Córdoba). Tesis de Grado. Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina.
- ZANATTA, J.A., BAYER, C., DIECKOW, J., VIEIRA, F.C.B., MIELNICZUK, J. 2007. Soil organic carbon accumulation and carbon costs related to tillage, cropping systems and nitrogen fertilization in a subtropical Acrisol. *Soil & Tillage Research* 94, (2007) 510-519.