



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

Tesis Magíster en Ciencias Agrarias

GABRIELA V. MINOLDO

**IMPACTO DE LARGO PLAZO DE DIFERENTES SECUENCIAS DE
CULTIVOS DEL SUDOESTE BONAERENSE SOBRE ALGUNAS
PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO Y LA PRODUCTIVIDAD DEL
TRIGO**

BAHÍA BLANCA

ARGENTINA

2010



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

Tesis Magíster en Ciencias Agrarias

GABRIELA V. MINOLDO

**IMPACTO DE LARGO PLAZO DE DIFERENTES SECUENCIAS DE
CULTIVOS DEL SUDOESTE BONAERENSE SOBRE ALGUNAS
PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO Y LA PRODUCTIVIDAD DEL
TRIGO**

BAHÍA BLANCA

ARGENTINA

2010

Prefacio

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Magister en Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el Laboratorio de Humus y Biodinámica (LAHBIS), dependiente del Departamento de Agronomía y en el Centro de Recursos Naturales Renovables de la Zona Semiárida (CERZOS) durante el período comprendido entre el 4 de septiembre de 2004 y el 25 de febrero de 2010, bajo la dirección del Dr. Juan Alberto Galantini, Investigador Independiente de la Comisión de Investigaciones Científicas de Buenos Aires (CIC) y el Ph.D. Hugo Krüger Investigador del INTA Bordenave, como Director Asistente.

Gabriela V. Minoldo

D.N.I. 24136424

Departamento de Agronomía

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

Agradecimientos

- ✓ Al Dr. Juan Alberto Galantini, por ser un ejemplo de dedicación. Por sus enseñanzas, estímulo y atención, por brindarme la libertad de expresar mis ideas y por su amistad.
- ✓ Al Ph.D. Hugo Krüger por su invaluable ayuda y predisposición.
- ✓ Al Dr. Ramón Rosell, por sus consejos y enseñanzas.
- ✓ A mis asesores, Dra. Graciela Zanini y Dr. Hugo Laborde.
- ✓ A mis compañeros y amigos del Laboratorio de Humus y Biodinámica del Suelo: Bqca Mg Sc. Ana María Miglierina, Dra. Graciela Zanini, Ing. Julio Iglesias, Lic. Mg Sc. Liliana Suñer, Ing. Mg Sc. María Rosa Landriscini, Ing. Josefina Cacchiarelli, Ing. Rodrigo Fernández e Ing. Roberto Kiessling.
- ✓ A mis compañeros y amigos del LANAIS N15 Lic. Juan Carlos Gasparoni, Lic. Alejandra Barrios, Cecilia Costantino y Luciano Baraldi.
- ✓ A Juan Manuel Martínez, Matías Duval y Corina Cerda, por los momentos compartidos.
- ✓ Al personal de la Estación Experimental Bordenave de INTA, en particular al Ing. Santiago Venanzi.
- ✓ A la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC).
- ✓ Al Departamento de Agronomía de la Universidad Nacional del Sur y al Centro de Recursos Naturales Renovables de la Zona Semiárida (CERZOS).

Dedico esta tesis a mi familia.

Resumen

La inclusión de leguminosas en las rotaciones, modifica las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo y mejora la productividad de los cultivos posteriores. El objetivo general de este estudio fue, en un Haplustol Éntico de la Región Semiárida Pampeana evaluar el estado orgánico del suelo mediante parámetros sensibles, útiles como indicadores del estado del sistema y como herramienta de decisión para la adopción de diferentes prácticas agronómicas. El estudio se realizó sobre un ensayo de Sistemas de Producción en la Estación Experimental Agropecuaria Bordenave del INTA, comenzado en 1975 y mantenido hasta el presente. El diseño experimental consiste en parcelas divididas aleatorizadas en 4 bloques completos, con el factor principal “Secuencia de cultivos”, con cuatro niveles; TT: agricultura permanente con trigo, TV1: rotación de un año de trigo y un año de verdeo de invierno consociado (VIC; avena o triticale con vicia), TV2: rotación de dos años de trigo y dos años de VIC, alternados, TPa: rotación de cinco años trigo y cinco años de pastura consociada de festuca, falaris y alfalfa, alternados, todos bajo labranza convencional de tipo conservacionista, y un factor secundario “Fertilización”. Durante los años 2002, 2004 y 2006, se realizaron muestreos de los primeros 20 cm de suelo a partir de los cuales se estudiaron los efectos de largo y corto plazo de las secuencias de cultivos y la fertilización sobre la cantidad, calidad y distribución de la MO del suelo y sus fracciones, las formas de fósforo y el pH. Se analizaron el carbono orgánico total (COT), particulado (COP) y asociado a la fracción mineral (COM), nitrógeno total (Nt), particulado (N-MOP) y asociado a la fracción mineral (N-MOM) y las formas de fósforo (P) orgánicas (Po) e inorgánicas (Pi). En 2002, 2004 y 2006, se fertilizó el trigo de TT, TV1 y TPa con 0, 30, 60, 90, y 120 kg N ha⁻¹ en macollaje y se evaluaron la productividad y la dinámica y el balance de nutrientes (N, P, K, S). El tratamiento TT mostró los menores niveles de COT. En la rotación TV1 se incrementó el COM, indicando una mayor humificación de los residuos y ciclado más rápido de nutrientes.

VIII

En TV2 se incrementó el COP, lo que condujo a mayores desbalances respecto de TV1. La rotación TPa presentó los valores más elevados de COP y COM. Sin embargo, en algunos casos estos no fueron estadísticamente diferentes a los de las rotaciones cortas con leguminosas. La secuencia de cultivos y la fertilización se reflejaron en la relación COP:COT, poniendo en evidencia las diferencias entre la dinámica de ambas fracciones y la importancia de la cantidad y velocidad de humificación de los residuos incorporados al suelo. La secuencia de cultivos produjo efectos significativos sobre la concentración de N total y N-MOM del suelo con valores en $TT < TV1 = TV2 < TPa$. Las diferencias se localizaron en los 0-5 cm del suelo y coincidieron con los incrementos observados en el N-MOP en TT, TV2 y TPa. En las restantes profundidades, las tendencias fueron variables. Los cambios en el N-MOP siguieron la tendencia del COP entre tratamientos; el fertilizante produjo efectos significativos y opuestos en los tratamientos con VIC, lo disminuyéndolo en TV1 y aumentándolo en TV2. En el mediano y corto plazo, los cambios en el contenido de CO edáfico debidos a las diferentes secuencias de cultivos rotación fueron variables en el tiempo, los que dependieron del cultivo y las condiciones climáticas particulares (precipitaciones), mientras que aquellos debidos a la fertilización no fueron significativos. Los cambios en el contenido de COT del suelo demostraron que existe una dinámica propia de la secuencia de cultivo y otra dependiente de las variables climáticas, y que su interacción genera cambios específicos para cada momento. Se observaron efectos significativos debidos a la secuencia de cultivos sobre los niveles de $Po+Pi$ de 0-20 cm del suelo entre los tratamientos sin fertilización, siendo $TT > TPa = TV1 = TV2$. En los tratamientos no fertilizados los valores más altos de Po correspondieron a TPa, con un periodo de 5 años previo al muestreo de acumulación de formas orgánicas en las parcelas con pastura consociada, los intermedios a TV2 y TT y los inferiores a TV1. La fertilización produjo efectos significativos sólo en TV1 tanto a nivel orgánico como inorgánico. El trigo en TV1 y TPa alcanzó rendimientos más

altos que en TT, absorbió más N del suelo a partir de su aporte por la descomposición de la MO, y fue más eficiente en el uso del N disponible. En años normales el Valor de Reemplazo de Fertilizante por efecto del VIC en TV1 superó los 120 kg N ha⁻¹ y produjo un “efecto de rotación” adicional al aporte de N atmosférico, mejorando las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo. Esto se reflejó además, a través de mayores rendimientos y un mejor balance nutricional del cultivo. Al aumentar la fertilidad del suelo, el rendimiento del trigo fue más dependiente de la aleatoriedad de las precipitaciones, produciéndose un importante estrés hídrico y disminución de los rendimientos potenciales cuando existieron condiciones de humedad limitantes.

Summary

The introduction of legumes in the rotations improves soil chemical, physical and biological properties and enhances crop productivity levels. The aim of this research was, in an Entic Haplustoll of the semiarid Pampean region, to detect more sensitive parameters for the assessment of the soil organic state, useful as indicators of the system status as well as a tool for the adoption of alternative farming practices decisions. The experience was carried out in a long term experiment of rotations in the Agricultural Experimental Station Bordenave of INTA, Buenos Aires, Argentina, started in 1975 and maintained until now. The design was of 4 randomized complete blocks in a Split Plot experiment. Factors were cropping systems: continuous wheat (TT), wheat-vetch plus oat, in one and one (TV1) or two and two (TV2) alternated years, and 5 years wheat–5 years pasture with Lucerne (TPa) and wheat fertilization (f) vs. check (nf). Analytical determinations included total organic carbon (TOC); total nitrogen (Nt); particulate organic carbon and nitrogen (POC, N-POM), organic carbon and nitrogen associated to the mineral fraction (MOC, N-MOM), organic (Po), inorganic (Pi) and extractable (Pe) phosphorus, and pH. During 2002, 2004 and 2006, 0, 30, 60, 90 and 120 kg N ha⁻¹, were applied to wheat in TT, TV1 and TPa. Wheat productivity, and nutrient balance and dynamics at different growth stages were analyzed. Soil organic carbon decreased with depth in nf and f plots of TT, TV1, TV2 and TPa. TT showed the lowest levels of TOC. In the TV1 rotation MOC increased, indicating higher humification of residues and faster nutrient cycling. In TV2 POC was increased, leading to greater imbalances. The TPa rotation presented the highest values of POC and MOC. However, in some cases values were not statistically different from the short rotations with legumes. The rotation and fertilization practices were reflected in POC:TOC ratios, highlighting the differences between these fractions dynamics and the importance of humification rate and quantity of residues added to soil. The crops sequence affected significantly Nt and N-MOM soil concentration with values

following the order: TT < TV1 = TV2 < TPa. Differences were found at the 0-5 cm depth and were coincident with the increases observed in the N-POM in TT, TV2 and TPa plots. At the other depths, the trends were variable. The N-POM changes followed the POC trends among treatments. The fertilization produced statistically significant effects in VIC sequences, decreasing N-POM in TV1 and increasing it in TV2 plots. In the short and medium term, the changes detected in the soil organic C content because of rotation effects were variable depending on crop and climatic conditions (rainfall), while those due to fertilization were not significant. The soil TOC changes reflected that there are two forms of dynamics, one dependent on the rotation by itself, and another on climatic variables. The interaction between them generates time-specific changes. Significant effects because of crops sequences at 0-20 cm depth on soil Po + Pi were found among treatments without fertilizer, being TT > TPa = TV1 = TV2. The highest Po values in these treatments were found in TPa, with a 5 year prior period of organic forms accumulation in the plots with mixed pasture, the intermediated resulted in TT and TV2 and the lowest ones in TV1. Fertilization produced significant effects only in TV1 in both, organic and inorganic P. Wheat dry matter, nutrient uptake and grain yield increased in the following order TT < TV1 < TPa. In TV1 and TPa rotations, wheat absorbed more soil N through decomposition of organic matter, and was more efficient in the use of available N. In climatic normal years the "fertilizer replacement value" due to vetch use in TV1 exceeded 120 kg N ha⁻¹ and besides produced a "rotation effect", in addition to atmospheric N supply, improving the chemical, physical and biological soils properties. This was reflected also through higher yields and better nutritional balance of the crop. With increasing soil fertility, wheat yield was more dependent on the randomness of rainfall, resulting in a significant water stress and lower yields, when there were limiting moisture conditions. The wheat-legume rotations resulted in the highest yield, protein content, and better yield components. Fertilizer application did not increase dry matter

production but improved nutrient uptake and grain quality. Yield component differences could be attributed to water availability due to different fallow length.

Organización de la Tesis

La presente tesis fue organizada en capítulos que analizan los diferentes aspectos de la inclusión de leguminosas sobre el ambiente edáfico y sus efectos sobre la productividad del trigo en la región semiárida. Cuenta con una introducción general, hipótesis y objetivos del estudio y desarrolla: los efectos en el tiempo de diferentes manejos sobre el estado orgánico del suelo (Capítulo I), los efectos en el tiempo de los distintos manejos sobre el equilibrio de diferentes formas de fósforo edáfico (Capítulo II), los cambios en el rendimiento y la nutrición del cultivo de trigo (Capítulo III). En último lugar se presentan las conclusiones y consideraciones finales (Capítulo IV). Los capítulos I, II y III se redactaron según el siguiente esquema: introducción, objetivos específicos, materiales y métodos, resultados y discusión, y conclusiones. Al final, se presenta en forma conjunta la bibliografía consultada y el material complementario en los Anexos correspondientes.

Indice

INTRODUCCIÓN GENERAL	1
Calidad y Salud de los suelos.....	1
Materia orgánica como indicador de Calidad y Salud.....	2
Efecto de las labranzas.....	8
Incorporación de leguminosas a los sistemas de producción.....	9
Fraccionamiento de la materia orgánica	14
Relación entre los métodos de fraccionamiento físico	16
Efectos de corto y largo plazo de las prácticas agronómicas.....	18
HIPÓTESIS GENERAL.....	19
OBJETIVO GENERAL.....	20
MATERIALES Y MÉTODOS GENERALES.....	20
Sitio experimental: ubicación e historia del lote.....	20
Diseño experimental	22
Esquema de trabajo	24
Análisis estadístico de los resultados	24
CAPÍTULO I	27
<i>EFFECTO DE DIFERENTES SECUENCIAS DE CULTIVOS SOBRE EL ESTADO</i>	
<i>ORGÁNICO DEL SUELO</i>	27
INTRODUCCIÓN	28
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	31
MATERIALES Y MÉTODOS	32
Muestreo y acondicionamiento del suelo.....	32
Determinaciones analíticas	33
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
A. EFECTOS DE LARGO PLAZO	34
Carbono orgánico total.....	34
Cambios en el COM.....	38
Cambios en el COP.....	39
Efectos sobre la relación COP:COT	42
Efectos sobre el N total	44
Efectos sobre el N- MOM	45
Efectos sobre el N-MOP	46
Cambios en la cantidad de CO y N y sus fracciones	48
B. EFECTOS DE CORTO PLAZO	52
Contenido de CO total y sus fracciones.....	53
CAPÍTULO II.....	58
<i>EFFECTOS DEL MANEJO SOBRE EL EQUILIBRIO DE DIFERENTES FORMAS DE</i>	
<i>FÓSFORO EDÁFICO</i>	58
INTRODUCCIÓN	59
OBJETIVO ESPECÍFICO	63
MATERIALES Y MÉTODOS	63
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	64
A. EFECTOS DE LARGO PLAZO SOBRE DISTINTAS FORMAS DE P.....	64
Fósforo en el suelo entero	64
Fósforo en las fracciones fina y gruesa.....	70
B. CAMBIOS EN EL TIEMPO (Pe y pH).....	74
CAPÍTULO III.....	77
<i>CAMBIOS EN EL RENDIMIENTO Y LA NUTRICIÓN DEL CULTIVO DE TRIGO</i>	77

INTRODUCCION	78
Respuesta del trigo a la aplicación de N	79
Evaluación de la nutrición del cultivo	81
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	83
MATERIALES Y MÉTODOS	83
Muestreo y procesamiento del material vegetal.....	83
Determinaciones analíticas	84
Cálculo de los índices DRIS y de Balance Nutricional	84
Cálculo de la eficiencia de utilización del N	85
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	86
A. PRODUCTIVIDAD Y NUTRICION DEL TRIGO (2002)	86
Acumulación de materia seca total aérea.....	86
Acumulación de N, P, K y S	88
B. RENDIMIENTO DEL TRIGO DURANTE EL CICLO DE CADA SECUENCIA DE CULTIVOS	107
CAPÍTULO IV.....	117
<i>CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES</i>	117
CAMBIOS EN EL SUELO DE LARGO Y CORTO PLAZO.....	118
EFECTOS SOBRE LA PRODUCTIVIDAD EL TRIGO	121
BIBLIOGRAFÍA	124
ANEXO I.....	146
ANEXO II.....	151

INTRODUCCIÓN GENERAL

Calidad y Salud de los suelos

A nivel mundial, existe desde hace más de medio siglo una preocupación creciente por el mantenimiento y mejora de la Calidad y Salud de los suelos, tanto entre agricultores como entre científicos (Lowdermilk, 1953; Doran *et al.*, 1996; Carter *et al.*, 1997; Singer y Ewing, 2000; Nortcliff, 2002). Se denomina Calidad del suelo al conjunto de características físicas, químicas y biológicas que posee una Serie de suelos en su condición modal, pudiendo ésta ser alta, intermedia o baja. En cierta forma puede asociársela a la Capacidad de Uso de esa Serie de acuerdo al sistema norteamericano “Land Capability” (Klingebiel y Montgomery, 1961). El concepto ha sido percibido de muchas, diversas y controversiales formas desde que se popularizó en la década pasada. El Comité para la Salud del Suelo de la Soil Science Society of America definió más específicamente la Calidad de un suelo como “la capacidad de cada tipo de suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o intervenido, a fin de sostener la productividad vegetal y animal, mantener o aumentar la calidad del agua y el aire, preservando la salud humana” (Karlen *et al.*, 1997). En los suelos agrícolas la Calidad estará dada por su potencial para permitir el desarrollo de los cultivos sin degradarse ni deteriorar el ambiente. Por su parte, Salud del suelo constituye un principio para el manejo sustentable del mismo y se define como el estado de las propiedades dinámicas que determinan su actividad en forma continua como sistema viviente (Doran *et al.*, 1996). Este concepto compara la condición o estado de un suelo determinado en relación a su propio potencial a través de un periodo de tiempo. Es decir, la Salud es el grado de mantenimiento de la Calidad bajo distintos sistemas de uso. Medimos Salud para determinar cómo se ha modificado la Calidad original del suelo como consecuencia de su uso (Moscatelli e Irurtia, 2005). De aquí surge la necesidad de contar con indicadores de Calidad y Salud del suelo como paso fundamental para la definición de sistemas de producción sustentables. Para el

área de la Región Pampeana, Moscatelli (2005) indicó, como los indicadores más confiables y sensibles, pH, contenidos de materia orgánica (MO), fósforo disponible, densidad aparente, tasa de infiltración, resistencia a la penetración, estabilidad de agregados, población de lombrices y tasa de respiración microbiana.

La habilidad de un suelo para mantener el crecimiento de las plantas y la actividad biológica radica en sus propiedades físicas (porosidad, capacidad de retención de agua, estado de agregación) y químicas (capacidad de suministrar nutrientes, pH, contenido de sales), muchas de las cuales están en función del contenido de MO. En particular, incrementos en los niveles de MO se relacionan directamente con una mejor nutrición vegetal, facilidad para las labores, mayor estabilidad de los agregados, reducción de la densidad aparente y mejoras en la capacidad de retención hídrica y la porosidad del suelo (Carter y Stewart, 1996; Lal, 2002).

Materia orgánica como indicador de Calidad y Salud

Reeves (1997) señaló a la MO como el atributo del suelo más reportado en ensayos de largo plazo y como el indicador más importante de la calidad y sustentabilidad agronómica debido al impacto que ejerce sobre los demás indicadores físicos, químicos y biológicos.

Debido a su estrecha relación con las características edáficas y climáticas de cada sitio y a sus efectos directos e indirectos sobre la estabilidad de los sistemas, la MO del suelo constituye un elemento clave para los ecosistemas naturales del mundo. La escasa atención brindada a la disminución del contenido de MO en las grandes superficies arables producto de la agricultura ha ocasionado pérdidas de la estructura y fertilidad de los suelos, lo que condujo a una caída notable de los rendimientos potenciales. Es posible que estos problemas puedan verse enmascarados por las variaciones climáticas y por el gran desarrollo a nivel tecnológico y del material genético vegetal; con variedades adaptadas a cada ambiente en particular,

resistencia a enfermedades y aumento de los potenciales productivos de las especies, entre otros.

Mullen *et al.* (1999) estimaron que entre el 6 y 25% del aumento del CO₂ atmosférico de los últimos 150 años puede atribuirse a la pérdida de MO del suelo. Por esto, y por la capacidad que poseen los suelos de capturar carbono, en las últimas décadas se han impulsado los estudios tendientes a evaluar las variaciones en el contenido de carbono orgánico (CO) edáfico y el potencial de las prácticas agronómicas para capturarlo en el suelo, para mitigar el efecto invernadero.

La conservación de la MO es esencial para lograr la sustentabilidad de los sistemas agropecuarios, especialmente en aquellas regiones con déficit hídricos, ya que constituye uno de los principales elementos para el funcionamiento adecuado de los sistemas productivos. Históricamente, las labores agronómicas para regular la disponibilidad de nutrientes para los cultivos han incluido la labranza del suelo, que favorece la descomposición de la MO, acumulación de agua y control de malezas, el aporte de residuos de cosecha y su quema y el uso de abonos verdes, cultivos de cobertura o diferentes enmiendas orgánicas. El factor común entre estas prácticas es el manejo de la MO, con el objetivo ya sea de incrementar las reservas para mejorar la estabilidad física y fertilidad potencial del suelo ó, la liberación de sus nutrientes a través de su oxidación biológica, con el consecuente incremento del N y otros elementos disponibles para las plantas. Considerando estos dos diferentes aspectos, es importante subrayar el rol dual que cumple la MO, ya que una intensa descomposición puede promover una alta productividad a expensas de la disminución de la reserva de nutrientes y del deterioro de las condiciones físicas del suelo, y viceversa (Doran y Smith, 1987).

La MO ha sido definida por la Soil Science Society of America (1996) como la fracción orgánica del suelo, excluidos los residuos animales y vegetales aún no descompuestos. Es así como algunos autores la asocian aún como sinónimo de humus. Esta definición, sin embargo

no tiene en cuenta un importante componente como lo es la fracción activa de la MO. En realidad, la MO está constituida por una variedad importante de compuestos de distinta complejidad, en un continuo de estados de transformación. Este material varía desde residuos de cultivos y animales recientemente incorporados y microorganismos (vivos y muertos) hasta la compleja estructura del humus alcanzada luego de siglos de transformación (Schnitzer y Khan, 1978; Schnitzer, 2000). Cada uno de estos compuestos posee diferentes propiedades y cumple distintos roles en cuanto a la dinámica de los nutrientes en el suelo. Existen diferencias tanto en estructura, como en velocidad de transformación o descomposición. Las condiciones climáticas, las propiedades del suelo, el uso de la tierra y las prácticas de manejo, determinan la composición de la MO a través del control de sus aportes, los procesos de descomposición y de transformación.

El principal constituyente de la MO es el carbono (C), el que representa entre el 40 y 60% de su contenido total. La mayoría de los métodos analíticos cuantifican el CO a partir del cual, es posible estimar la MO total del suelo utilizando un factor de conversión según diferentes tipos de suelos.

La MO cumple un papel muy importante en la formación de la estructura del suelo ya que actúa como agente cementante (Oades, 1984; Tidsall y Oades, 1982) y quelante (acomplejando iones metálicos) y también, secuestrando macro y micro-nutrientes necesarios para las plantas, o sustancias orgánicas como herbicidas (Sparks, 2003). Estas propiedades dependen de su composición química y ubicación e interacción en la matriz del suelo, que condicionan su accesibilidad para los microorganismos o enzimas (Sollins *et al.*, 1996).

La importancia funcional de la MO varía sistemáticamente con su edad. Los materiales más jóvenes, compuestos principalmente por residuos poco transformados, son biológicamente más activos, aquellos de edad intermedia contribuyen notablemente al estado físico edáfico y los más antiguos presentan una marcada influencia sobre la reactividad físico-química del

suelo. Los primeros inciden predominantemente sobre la macro estructura, mientras que la MO más evolucionada, mejora la micro estructura (Buyanosky *et al.*, 1994).

Si bien no existen valores definidos, conceptualmente pueden diferenciarse fracciones con características y propiedades marcadamente diferentes. Por un lado, los residuos orgánicos, material vegetal y animal en diferentes fases de su transformación y de característica lábil, que pueden representar entre 5 y 35% del CO del suelo. Por el otro, el material humificado, con peso molecular relativamente elevado, amorfo, coloidal y coloración amarilla a oscura. Ésta es la fracción más estable y puede representar de 50 a 85% del material orgánico del suelo. Los mecanismos principales de estabilización de la MO son de naturaleza química, física y bioquímica (Six *et al.*, 2002).

- La **estabilización química** es la producida por la unión o interacción de la MO con la fracción mineral inferior a 53 μm (arcillas y limos), a través de enlaces químicos y físico-químicos que la protegen del ataque biológico (Johnston, 1991; Kleber *et al.* 2007). No sólo es importante la cantidad de arcillas, sino también su naturaleza mineralógica siguiendo el orden; alófana > arcillas 2:1 > arcillas 1:1 (Feller y Beare, 1997; Baldock y Skjemstad, 2000; Bayer *et al.*, 2001).
- La **protección física** está constituida por los agregados (53-250 μm) y constituye una barrera física entre los microorganismos y sus enzimas respecto de la materia orgánica contenida en el interior de dichos agregados (Elliott y Coleman, 1988).
- La **estabilización bioquímica** es la derivada a partir de la composición de la MO de naturaleza recalcitrante. Sustancias como la lignina y los polifenoles, resisten el ataque microbiano y la degradación a través de procesos químicos, como la condensación y formación de complejos.

En un sentido amplio, la dinámica, cantidad, calidad y distribución de la MO están estrechamente relacionadas con el clima, en especial precipitación y evapotranspiración (Álvarez y Lavado, 1998) y con las características del suelo (textura, profundidad), así como también con el manejo. Estos factores interactúan determinando el control físico, químico y biológico sobre ella y juntos regulan la cantidad y calidad de los aportes de materia seca de la vegetación, la composición y actividad de las comunidades de organismos descomponedores y la velocidad de pérdida de MO por mineralización, lixiviación y/o erosión.

La textura del suelo influencia considerablemente la variación de la MO, por ejemplo favoreciendo su estabilidad a medida que se incrementa el contenido de arcilla (Johnston, 1991). Plante *et al.* (2006) afirmaron que la textura no puede considerarse un indicador universal de la concentración total de MO de los suelos, ya que dicha asociación varía entre los diferentes tipos de suelos y sistemas productivos. Sin embargo, en la Región Semiárida Pampeana varios autores determinaron regresiones lineales significativas entre la MO de diferentes suelos y su textura, observando aumento de la MO a medida que aumentaba el porcentaje de material fino del suelo (Buschiazzo *et al.*, 1991; Galantini *et al.*, 1994; Quiroga *et al.*, 1996).

El uso de la tierra y las prácticas agrícolas afectan notablemente el mantenimiento de la reserva de CO de los suelos, el cual deriva fundamentalmente de los residuos de plantas que se incorporan en la superficie y la importante contribución de raíces y micorrizas (Campbell *et al.*, 1991a; Lal, 2004; Rees *et al.*, 2005).

Numerosos trabajos coinciden en que la agricultura ha ocasionado la degradación o decaimiento de los niveles orgánicos de los suelos (Tiessen *et al.*, 1982; Whitbread *et al.*, 2000b; Bayer *et al.*, 2002). La magnitud y la velocidad de cambio dependen, entre otros factores, del contenido original y de las características del ambiente edáfico (Campbell *et al.*,

1976; McGill *et al.*, 1981; Glendining y Powlson, 1991). Esos cambios al principio son rápidos (10-20 años), para posteriormente hacerse más lentos hasta alcanzar un nuevo equilibrio estable trascurridos 50 a 60 años, y se reflejan tanto en el contenido y como en la calidad de la MO (Jenkinson, 1990).

Suelos con niveles iniciales altos de MO tienen mayor dificultad para mantener o incrementar su contenido de carbono y a la vez son más propensos a sufrir decaimientos en dichos niveles (Campbell *et al.*, 1991a). El contenido de MO suele ser mayor en suelos bajo pastizales naturales si bien declina cuando estos son cultivados. Se ha verificado, que el descenso de los niveles de CO y N en suelos de bosques y praderas nativas cultivados, se correspondió con incrementos del nitrógeno (N) disponible para los cultivos, los cuales fueron más importantes durante los diez primeros años y disminuyeron con el tiempo (Giddens, 1957; Campbell *et al.*, 1976). En suelos forestales de las Grandes Planicies semiáridas de América del Norte, el nivel original de C y N disminuyó dramáticamente luego de 50 a 100 años de cultivo, con pérdidas estimadas entre el 30 y 50% (Campbell y Souster, 1982; Mann, 1985; Davidson y Ackerman, 1993; Peterson *et al.*, 1998). El sistema agrícola tradicional en esta región ha sido, históricamente, el cultivo de trigo en secano bajo labranza convencional, alternado con barbechos estivales, lo que resultó en aceleración de la tasa de descomposición de la MO y aumento de los procesos erosivos (Haas *et al.*, 1957; Peterson *et al.*, 1998).

Respecto a nuestro país, en la región Pampeana, considerada una de las áreas de mejor aptitud en el mundo para la producción agrícola, muchos de los suelos fueron objeto de graves procesos de degradación y disminuciones importantes en su nivel original de CO, debido a la labranza convencional continua durante más de un siglo de agricultura. Miglierina (1991) reportó pérdidas de CO, N total y P inorgánico de aproximadamente 20, 50 y 30%, respectivamente, en suelos de praderas vírgenes de la provincia de Buenos Aires después de

60 años de cultivo. Según un informe de FAO (2007) el modelado de datos agrícolas de tres provincias de la Región Semiárida Pampeana (Córdoba, Buenos Aires y La Pampa) mostró que el contenido total de C disminuyó de manera sustancial desde que las praderas comenzaron a utilizarse para el cultivo. Los autores verificaron los parámetros utilizando el modelo de agro ecosistemas CENTURY haciendo simulaciones desde el año 1850. Posteriormente asumieron un régimen de cultivo comenzado en 1950 y finalmente, plantearon diferentes alternativas de manejo para simular las tendencias hasta el año 2050. Las predicciones basadas en el modelo sugirieron que en todos los sitios, en general, ocurrieron caídas bruscas en el contenido de C de los suelos con pérdidas alrededor de 15 Mg ha⁻¹ (desde niveles originales de 50-70 Mg ha⁻¹ antes de las labranzas). Sin embargo, luego de la adopción, de sistemas de labranza cero y el uso de abonos verdes u orgánicos, en reemplazo de fertilizantes inorgánicos, en los últimos 50 años se lograría detener este proceso con incrementos anuales del C del suelo de 0,02 y 0,06-0,13 Mg ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente (FAO, 2007).

Efecto de las labranzas

El laboreo del suelo afecta a la mayoría de los mecanismos que limitan o regulan a la actividad biológica (agua, O₂, temperatura, accesibilidad al C y N de los sustratos) y el hábitat para la actividad de las plantas, microflora y microfauna. Esto tiene influencia sobre el ciclo de C y N. Al acelerar la descomposición reduce los niveles de MO y nutrientes del suelo (Rasmussen y Collins 1991, Bayer y Mielniczuk, 1999), así como la estabilidad de los agregados, aumentando la susceptibilidad de las fracciones inorgánicas a la erosión (Urioste *et al.*, 2006). El laboreo frecuente y los barbechos estivales estimulan la velocidad de descomposición de residuos, lo que también promueve la erosión del suelo (Bauer y Black, 1981; McGill *et al.*, 1981; Havlin *et al.*, 1990). En sí, las labranzas incrementan la oxidación

del CO del suelo y los barbechos intensifican estas pérdidas al reducir la cantidad de residuos vegetales que retornan al sistema, aumentando tanto las pérdidas por emisión de CO₂ como por erosión del suelo (Galantini *et al.*, 2006).

En ambientes naturales no disturbados el contenido de MO del suelo permanece generalmente constante y la mayor parte del N liberado durante su descomposición puede ser tomada por los microorganismos, absorbida por las plantas o mantenida en la capa superficial del suelo. Las labranzas alteran este estado estable a través de cambios físicos en la estructura, aireación, humedad, y disponibilidad de C y N como fuente de energía y nutrimento de microorganismos y plantas. La naturaleza y magnitud de sus efectos dependen de los manejos anteriores y del contenido inicial de MO. Además, el clima es un modificador importante de los cambios en la MO del suelo producidos por las labranzas y el cultivo.

Como se mencionó anteriormente, después de una alteración en el uso o manejo del suelo, se alcanzará un cierto estado de equilibrio en la concentración de CO, pasado un periodo de tiempo que puede llevar desde décadas hasta siglos (Leifeld y Kögel-Knabner, 2005). Esto significa que, en etapas tempranas luego de una perturbación provocada por el hombre, la evaluación de los cambios en las porciones más sensibles de la MO puede ser de gran utilidad en la predicción de la trayectoria del CO edáfico. Por otra parte, la determinación del CO total provee poca información si se considera la estabilidad bioquímica y la duración de la provisión de C en el suelo (Puget *et al.*, 2005). Por esto, las reservas funcionales de CO deben ser cuantificadas y caracterizadas para predecir cambios en el almacenamiento de CO de los suelos (von Lützow *et al.*, 2007).

Incorporación de leguminosas a los sistemas de producción

Numerosos trabajos desarrollados sobre el sistema de rotación trigo – leguminosa han puesto en evidencia la influencia positiva de las pasturas con leguminosas sobre las propiedades

químicas y físicas del suelo (Wortmann *et al.*, 2000), así como sobre la producción del trigo cultivado posteriormente.

Desde el punto de vista de la fertilidad, se han observado importantes efectos de las leguminosas consociadas sobre las propiedades químicas del suelo (Miglierina *et al.*, 2000), sobre la nutrición y el balance nutricional (Galantini *et al.*, 2000) y la productividad del cultivo de trigo implantado posteriormente (Galantini *et al.*, 1992). Esto, como resultado del aporte de N atmosférico que realizan las leguminosas mediante simbiosis y de las características de su rizosfera, que acidifica el suelo liberando protones (Tang y Yu, 1999) e incrementando la disponibilidad de P inorgánico, el que será absorbido y transformado a formas orgánicas. La asociación con gramíneas se traduce en un incremento de la producción de biomasa total y una mejor utilización de los recursos disponibles, lo que favorece el reciclado posterior de la mayor cantidad de nutrientes absorbidos.

El beneficio sobre la fertilidad potencial del suelo y sobre el rendimiento en las rotaciones de corta duración con leguminosas depende de la especie utilizada, de su duración en la rotación, su capacidad de fijación del nitrógeno atmosférico y de la biomasa retornada al suelo (Whitbread *et al.*, 2000a). Fischer *et al.* (2002) encontraron promisorio la inclusión de un año de antecesor leguminosa (*Vicia sativa*, L.) al menos para mantener el rendimiento del trigo en un nivel donde no detectaron respuesta al agregado de N. Sidiras *et al.* (1999) encontraron que el cultivo de *Vicia sativa* acumuló entre 54 y 109 kg de N ha⁻¹ en la parte aérea y entre 73 y 173 kg N ha⁻¹ en las raíces. Papastylionou (1999) determinó valores de nitrógeno fijado de alrededor de 184 kg ha⁻¹, considerando la parte aérea y la radical. Otros estudios han determinado que la *Vicia faba* fijó entre 165 y 240 kg N ha⁻¹ con una ganancia neta de entre 12 y 84 kg de N ha⁻¹ cuando se cosechó solamente el grano (Amanuel *et al.*, 2000). En pasturas de alfalfa, estimaciones del aporte de N al cultivo siguiente alcanzaron valores de hasta 180 kg ha⁻¹ (Baldock y Musgrave, 1980; Voss y Shrader, 1984). Jones *et al.* (1977), en

tres años consecutivos de estudio, estimaron mediante el método de la diferencia con N¹⁵, que el cultivo de trébol subterráneo (*Trifolium subterraneum* L.) fijó 261, 398, y 207 kg N ha⁻¹, respectivamente. Ebelhar *et al.* (1984) calcularon aportes por parte de este cultivo al maíz siguiente equivalentes a la aplicación de 95 kg ha⁻¹ de N en forma química. Bolger *et al.* (1995) en cultivos de la misma especie encontraron que la cantidad total de N acumulado en su biomasa osciló entre 50 a 125 kg ha⁻¹. En otro estudio, Stute y Posner (1995) obtuvieron datos de N liberado a partir de *Vicia villosa* y trébol rojo (*Trifolium pratense*) que resultaron en niveles de N mineral en el suelo similares a aquellos obtenidos luego de la aplicación de 179 kg ha⁻¹ de fertilizante nitrogenado. Por otra parte, sus residuos se descompusieron rápidamente liberando la mitad de ese N, luego de cuatro semanas de haber sido enterrados. En todos los casos los valores pusieron de manifiesto un importante aporte de N aprovechable para el cultivo siguiente, dependiendo de la extracción a través de la cosecha de grano y/o pastoreo de la leguminosa.

La mejora en la provisión de nutrientes no es el único efecto benéfico de las leguminosas. Su utilización en rotación con otros cultivos afecta también a la estructura del suelo, su aireación, humedad y minimiza las pérdidas por erosión (Voss y Shrader, 1984). Los macro polisacáridos extracelulares producidos por los microorganismos serían la causa principal de los cambios en la estructura, siendo la vicia un buen estimulante de su producción (Blevins *et al.*, 1990).

Los cambios en el nivel de CO del suelo en las rotaciones cortas con leguminosas son menores que en rotaciones prolongadas, como consecuencia del bajo aporte de residuos, de su cosecha o pastoreo, y de la calidad de los aportes que favorecen su rápida transformación (Whitbread *et al.*, 2000b). Si bien este efecto es limitado, por la corta duración de la fase con leguminosas, pueden existir cambios significativos del balance de nutrientes y las propiedades físicas del suelo. Millhouon y Moreau (1994) en ensayos de 35 años de

antigüedad, reportaron incrementos significativos en el contenido de MO del suelo en parcelas cultivadas con *Vicia villosa* comparadas con suelos con barbechos invernales.

También se ha observado una mayor disponibilidad de N, P y S del suelo a la siembra del cultivo posterior a la leguminosa (Whitbread *et al.*, 2000b), con mayor formación de compuestos orgánicos lábiles. La incorporación de N a través de las leguminosas está sujeta a pérdidas al igual que la aplicación de fertilizantes. Sin embargo, existe una ganancia en el N residual, como consecuencia de la mayor fijación del N atmosférico y de su conservación más eficiente (Azam *et al.*, 1986). La disponibilidad de este N para el cultivo dependerá entonces en gran medida, de la descomposición de la MO proveniente de los residuos de la leguminosa, cuyo ritmo está ligado a factores como la temperatura y el contenido de humedad del suelo. La magnitud y velocidad en los procesos de mineralización y nitrificación del N del material orgánico son ampliamente dependientes de estos factores (Grudmann *et al.*, 1995; Sierra, 1997; Knoepp y Swank, 2002). Evidentemente, las condiciones para la mayor descomposición y liberación de este N serán coincidentes con las mejores condiciones para el desarrollo de los cultivos, por lo que los ciclos de liberación y demanda de N deberían ser prácticamente coincidentes. En ensayos de fertilización en trigo candeal (*Triticum durum*) con diferentes antecesores, Minoldo *et al.* (2007) encontraron contenidos similares de MO lábil al momento de la siembra. Cuando los antecesores fueron leguminosas de invierno la longitud de los barbechos fue suficiente para la descomposición de gran parte de los residuos, liberando grandes cantidades de N. Los niveles que determinaron de N-NO_3^- en los 0-60 cm de profundidad fueron 161, 132, 80 y 30 kg N ha⁻¹ luego de los cultivos de vicia, arveja, soja y girasol, respectivamente. El sincronismo entre la oferta y demanda de nutrientes por parte del trigo se ve afectado por la longitud del periodo entre el fin de un cultivo y la siembra del otro. En el caso de la secuencia verdeos de invierno o arveja - trigo, el tiempo de barbecho

transcurrido, con humedad y temperaturas adecuadas, produjo una alta acumulación de N disponible cuando aún no es requerido por el cultivo siguiente.

Los efectos benéficos de las leguminosas pueden visualizarse (mejor aspecto del cultivo), cuantificarse (mayor rendimiento y mejor calidad) y parcialmente detectarse en el suelo (mayor contenido de CO y N). No obstante, existe escasa información sobre los cambios que ocurren en las diferentes fracciones orgánicas. Continúan sin resolver interrogantes acerca del efecto combinado de la rotación de cultivos y la fertilización sobre las propiedades físicas y químicas del suelo y en qué medida puede utilizarse esta información como herramienta para el manejo de los sistemas de producción. Galantini *et al.* (2002) observaron variaciones en la relación entre las fracciones lábil y resistente de la MO, así como cambios en la calidad de las sustancias húmicas durante la rotación con leguminosas. En este estudio, se encontraron diferencias en las relaciones C:N, C:S y N:S del ácido húmico, aspecto que sugiere cambios en el mismo sentido en las fracciones lábiles (ácido fúlvico y MO particulada). La importancia de estas últimas y su relación con la disponibilidad de nutrientes para los cultivos (Zalba y Quiroga, 1999; Galantini, 2001) hacen que sea necesario profundizar en la evaluación de sus cambios cualitativos. En este sentido, aún se desconoce la variación de la fertilidad a lo largo de las diferentes fases de la rotación (especialmente la disponibilidad de N, P y S), cómo varían las formas orgánicas lábiles (tanto los contenidos como su calidad), cuáles son los cambios que se producen en los contenidos del N y del S en las diferentes fracciones, así como también cuál es el manejo más eficiente de la fertilización en cada una de ellas.

Fraccionamiento de la materia orgánica

Si bien el contenido de MO total es el indicador más comúnmente utilizado para la evaluación de la calidad de los suelos y de los sistemas de manejo (Doran y Parkin, 1994), su determinación de rutina, no refleja adecuadamente las variaciones en calidad y el nivel de nutrientes del suelo, ya que constituye un reservorio de gran tamaño con una amplia variabilidad espacial inherente (Franzluebbers *et al.*, 1995; Upendra *et al.*, 2007).

Varios autores subrayan que el beneficio del incremento de la MO edáfica radica en el mejoramiento de la estructura del suelo y la interrelación entre la disponibilidad de agua, y nutrientes y la productividad de los cultivos. Bauer y Black (1994), estudiando Argiudoles Típicos de las Grandes Planicies de América del Norte, encontraron que las mayores producciones de materia seca (MS) de trigo se asociaron a los más altos contenidos de MO. Dentro de un rango entre 64 y 142 Mg MO ha⁻¹, determinaron que la contribución de cada Mg de MO fue equivalente a 35,2 kg ha⁻¹ de MS total aérea y 15,6 kg ha⁻¹ de grano. En la Región Semiárida Pampeana, Díaz-Zorita *et al.* (1999) encontraron rendimientos en trigo relacionados en forma lineal con la MO total ($r = 0,68$; $p < 0,01$), mientras ésta se mantuvo por debajo de los 17,5 g kg⁻¹. Determinaron que una disminución equivalente a 1 Mg ha⁻¹ de MO se asoció con caídas en el rendimiento de 40 kg grano ha⁻¹. Sin embargo, en la mayoría de los casos la asociación entre MO y productividad depende de otros factores que inciden sobre el rendimiento. En el sudeste bonaerense, Domínguez *et al.* (2006) hallaron que el rendimiento de maíz se relacionó positivamente con el contenido de MO particularmente bajo condiciones favorables (sin restricciones de humedad, sin fertilización y con antecesor girasol) tanto en siembra directa ($r^2 = 0,47$) como en labranza convencional ($r^2 = 0,55$). Alvarez *et al.* (2002) analizaron la relación entre la MO y rendimientos de trigo y maíz a partir de series de datos de la Pampa Ondulada publicados en la década del 80 y recopilaciones realizadas en establecimientos entre 1995 y 2000. Si bien las condiciones de producción en los últimos

años cambiaron sustancialmente y las reservas orgánicas en los suelos fueron menores como consecuencia de la intensificación agrícola, los autores concluyeron en la no existencia de relaciones directas entre el contenido de MO de los suelos de la Pampa Ondulada y los rendimientos de los cereales mencionados. La explicación de estos resultados contrastantes puede encontrarse, al menos parcialmente, en algunos de los siguientes puntos:

- Existen valores umbrales a partir de los cuales los efectos adversos de la pérdida de MO son detectables.
- El efecto de la MO es generalmente indirecto.
- Existen factores que ejercen efectos más importantes que los de manejo sobre el contenido de MO.
- No todos los componentes de la MO cumplen las mismas funciones.

El último ítem ha sido objeto particular de estudio por lo que surgió la necesidad de definir varios límites ó compartimentos discretos (Andriulo *et al.*, 1990) y funcionalmente homogéneos de la MO, los que a su vez, guardan una relación negativa entre su tamaño y velocidad de transformación (Smith *et al.*, 1997). Para cuantificar estos compartimentos, se han desarrollado diferentes técnicas de fraccionamiento de la MO. En base a ellos es posible plantear modelos teóricos que expliquen la dinámica de las fracciones orgánicas en el suelo y la forma e intensidad en que son influenciadas por diversos factores; climáticos, biológicos, de manejo o sus efectos conjuntos. Para esto, el fraccionamiento debe tener en cuenta las características químicas de la MO, como la composición elemental y su reactividad, además de aspectos físicos asociados a su ubicación en el ambiente edáfico, tamaño o densidad (Galantini, 2005). El fraccionamiento implica la separación de la MO total en diferentes partes consideradas funcionalmente homogéneas en relación a sus características físico-químicas y velocidad de reciclado. Las técnicas de fraccionamiento pueden estar basadas en

procedimientos químicos, bioquímicos, físicos (por densidad o tamaño de partículas o agregados), isotópicos o conceptuales (Andriulo *et al.*, 1990).

Los métodos de fraccionamiento físico se basan en el rol de las partículas minerales dentro de la estabilización y ciclado de la MO en función del grado en que ésta se encuentra asociada a ellas. Se los puede considerar químicamente menos destructivos y sus resultados ser directamente relacionados con la estructura y función de la MO *in situ*.

La nomenclatura utilizada para designar fracciones orgánicas separadas por métodos físicos generalmente esta asociada con características del material aislado, aspectos operacionales o conceptuales (Andriulo *et al.*, 1990; Elliott y Cambardella, 1991; Gregorich y Ellert, 1993; Sollins *et al.*, 1999; Wander, 2004). De esta forma, en la bibliografía pueden hallarse fracciones de la materia orgánica denominadas “joven”, “particulada”, “liviana”, “libre”, “activa” o “macro-materia orgánica”, entre otras, a partir de las cuales se desprende la definición que las engloba: “material orgánico más joven y activo del suelo, compuesto por partículas de mayor tamaño que el humus, que se encuentra en forma libre en la matriz mineral, por lo cual es más liviana que los complejos órgano-minerales” (Galantini y Suñer, 2008).

Relación entre los métodos de fraccionamiento físico

La Figura 1 resume la relación entre las partículas orgánicas e inorgánicas, y de los agregados, desde el punto de vista de su tamaño y densidad. Estas analogías son útiles para comprender qué fracciones se están separando según cada metodología y cuál es su importancia a nivel funcional en el suelo. Los límites entre las partículas minerales y los tamaños de agregados son ampliamente aceptados. En cuanto a las fracciones orgánicas, a medida que aumenta su tamaño y su complejidad disminuye el tiempo de residencia medio en el suelo. En este caso, el límite puede ser establecido arbitrariamente en 50, 100, 200 μm , según los objetivos de la evaluación que se realice (Galantini, 2005). En base a la separación

por densidad, el límite puede ser fijado entre 1,8 y 2,2 g cm⁻³, obteniéndose material con características diferentes. A menores densidades, existirá una mayor cantidad de materiales orgánicos. Esta fracción, normalmente llamada “libre” o “no acomplejada”, tendrá valores alrededor de 1,5 g cm⁻³, una relación C:N relativamente alta y será de ciclado rápido. En cambio, a mayores densidades se obtendrá una mayor cantidad de materiales asociados formando complejos órgano-minerales; con densidad superior 2,2 g cm⁻³ (dependiendo de la proporción de las fracciones mineral y orgánica), de estrecha relación C:N y más lento ciclado (Christensen, 1992).

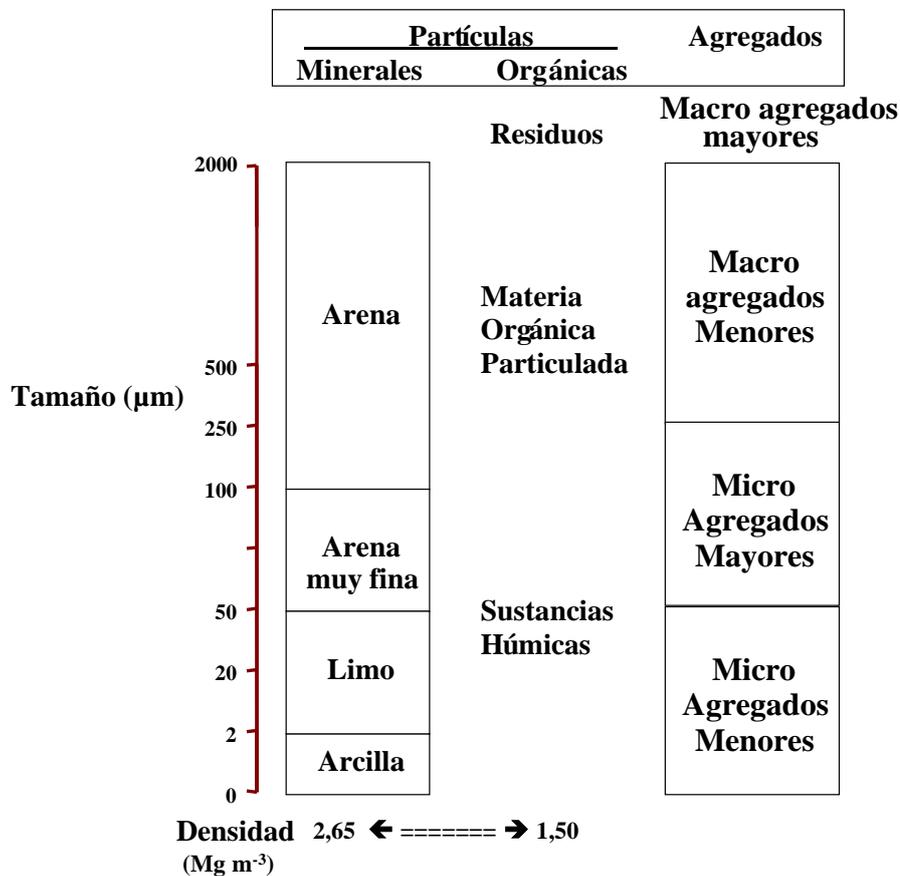


Figura 1: Distribución relativa de los diferentes tamaños de partículas minerales y orgánicas, y agregados (Fuente Galantini y Suñer, 2008).

En las últimas décadas se ha planteado un enfoque particular diferenciando fracciones de la MO separadas físicamente, con especial énfasis en la MO particulada (MOP), que

corresponde al material orgánico más joven y menos transformado del suelo, y la MO asociada a la fracción mineral (MOM), más resistente o humificada (Andriulo *et al.*, 1990; Galantini *et al.*, 1996).

La MOP es el material orgánico recientemente incorporado al suelo y está formada principalmente por restos vegetales y animales en distinto estado de descomposición. Como el 80-90% de los residuos se descompone en el lapso de un año, la MOP está constituida principalmente por los residuos del último cultivo, y en menor medida por aquellos que lo precedieron. Así, los residuos de cultivos son la fuente principal de la MOP y también de los nutrientes contenidos en ella. Es decir, la MOP representa una fuente importante de nutrientes disponibles en el corto y mediano plazo, de allí deriva la importancia de conocer su calidad.

En la región semiárida pampeana, Galantini y Landriscini (2007), estudiando 85 sitios bajo siembra directa determinaron, en muestreos de 0-20 cm del suelo, que cada tonelada de MOP aportaría en promedio de 40, 1, 6 y 3 kg ha⁻¹ de N, P, K y S, respectivamente, a la reserva de nutrientes potencialmente disponibles. Como factores determinantes establecieron el cultivo antecesor y la calidad del material aportado, particularmente si fueron leguminosas, o gramíneas con alta relación C:N.

Efectos de corto y largo plazo de las prácticas agronómicas

Los cambios de corto y largo plazo en el ciclado de los nutrientes en respuesta a diferentes manejos están asociados a las variaciones en la cantidad y actividad relativa de las fracciones lábil y estable de la MO. La dinámica y tamaño de dichos compartimentos o “pools” dependerá de las características climáticas, el tipo de suelo y manejo.

Como anteriormente se mencionó, desde el punto de vista productivo y de la calidad del suelo, la dinámica de la MO total aporta muy poco al estudio de los efectos de corto plazo, ya

que las fracciones orgánicas más abundantes son aquellas más transformadas y estables (Tan *et al.*, 2007; Gregorich *et al.*, 1994). Por su ciclado más lento y/o características relativamente estables se necesita una gran cantidad de años para observar diferencias producto de las prácticas de manejo (Reeves, 1997; Upendra *et al.*, 2007). Sin embargo, aquellas fracciones de naturaleza más dinámica son más sensibles a los efectos del manejo y pueden reflejar rápidamente los cambios en la provisión de C y/o condiciones que afectan la mineralización. Estas fracciones, tales como el C de la biomasa microbiana y el carbono orgánico lábil o particulado (COP), han sido propuestas como indicadores sensibles y precoces del efecto de los sistemas de producción sobre la MO del suelo (Gregorich *et al.*, 1994; Haynes y Beare, 1996; Dalal *et al.*, 2005; Leifeld *et al.*, 2005). También, son consideradas importantes indicadores de la calidad del suelo (Doran y Parkin, 1994; Bolinder *et al.*, 1999; Haynes, 2000; Six *et al.*, 2002). Elliott (1997) señaló a la MO como indicador fundamental de la salud del suelo y en especial sugirió que la MOP podría ser utilizada como medida indirecta del estado orgánico debido a su corto tiempo de ciclado. Swift y Woormer (1993) la asociaron con la propiedad de la MO de actuar como “fertilizante orgánico”.

Considerando al estado orgánico del suelo como el balance entre cantidad, calidad y distribución de las fracciones orgánicas se planteó la siguiente hipótesis general:

HIPÓTESIS GENERAL

La inclusión de las leguminosas altera el estado orgánico del suelo y acelera la dinámica de los materiales orgánicos, modificando en forma variable la respuesta a la fertilización los cultivos posteriores según las características de cada rotación.

OBJETIVO GENERAL

El objetivo general fue evaluar estado orgánico del suelo mediante parámetros sensibles, útiles como indicadores del estado del sistema y como herramienta de decisión para la adopción de diferentes prácticas agronómicas.

Para la validación de la hipótesis se evaluaron la distribución y calidad de diferentes fracciones orgánicas edáficas, junto con la productividad del cultivo de trigo en un suelo con diferentes secuencias de cultivos (con y sin leguminosas) bajo labranza conservacionista, con y sin fertilización. Se aplicó una combinación de técnicas de fraccionamiento físico de la MO por tamaño de partícula y la caracterización química de la misma (contenidos de C, N y relación C:N).

MATERIALES Y MÉTODOS GENERALES

Sitio experimental: ubicación e historia del lote

El estudio se realizó sobre el ensayo denominado “Rotación I” de sistemas de producción en la Estación Experimental Agropecuaria Bordenave del INTA (63° 01’ 20” de longitud W y 37° 51’ 55” de latitud S), provincia de Buenos Aires. El mismo comenzó en 1975 y se ha mantenido en forma casi inalterable hasta el presente. El clima es continental templado, con temperatura media anual de 15°C (Glave, 1988). La precipitación media anual alcanza los 668 mm (1928-2006); concentrados en otoño y primavera, con una estación seca a fines del invierno y otra semiseca a mediados del verano.

La Rotación I está situada sobre una asociación de suelos de las series “Bordenave” “Darregueira” y “Azopardo” correspondiente a la Unidad Cartográfica No. 3 de la Carta detallada de suelos de la Estación Experimental Agropecuaria Bordenave (Gómez *et al.*,

1981). El paisaje se caracteriza por planos relativamente altos, de relieve normal-subnormal y pendientes de 0 a 1% (clase 1), siendo áreas muy suavemente a suavemente onduladas con escurrimiento muy lento (grado 1). El suelo es un Haplustol Éntico (FAO: Haplic Kastanozem), térmico, de textura franco fina, típico de la región, de mediana a baja fertilidad y susceptible a la erosión eólica, con manto calcáreo aproximadamente a los 0,8 - 1,0 m. La permeabilidad es moderada (grado 4) y está caracterizado como un suelo bien drenado (clase 4); la saturación con agua se limita a pocos días. La composición porcentual de Series de la asociación de suelos es Bordenave 40%, Darregueira 40%, Azopardo 20%. Esta unidad cubre un área de 17,55 ha (2,96% de la superficie total del predio). La Figura 2 presenta diagramas de los perfiles edáficos y su descripción detallada se adjunta al final (ANEXO I).

PERFIL MODAL SERIE:

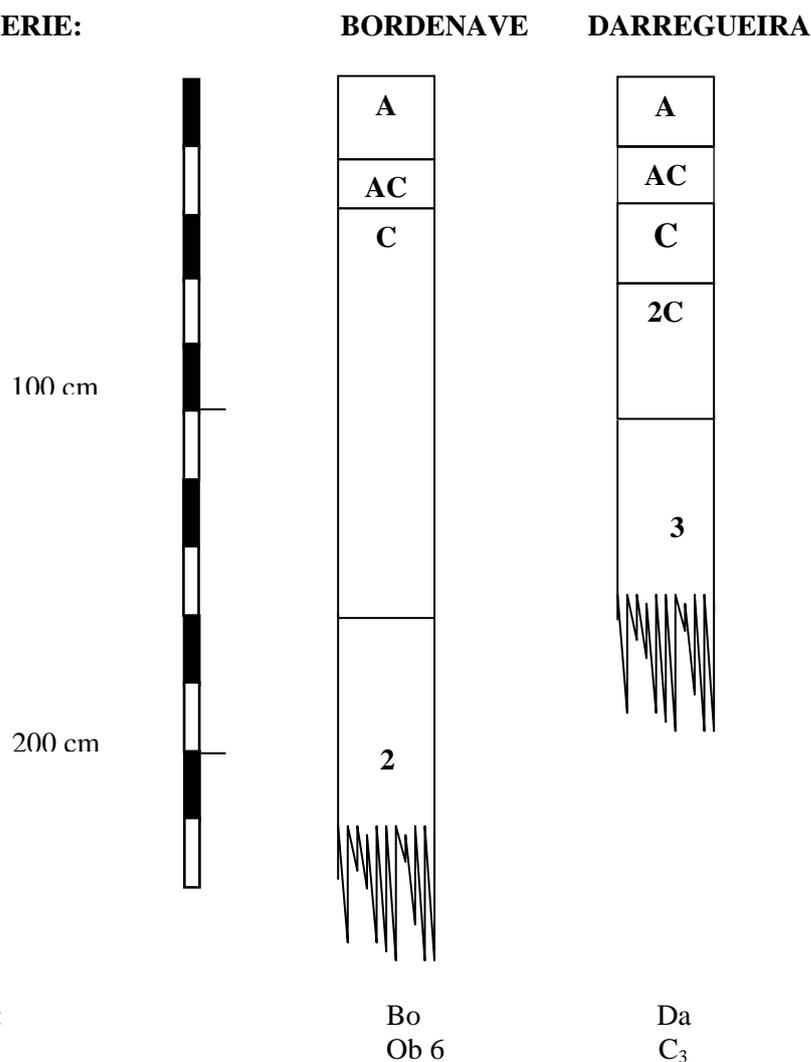


Figura 2: Esquema de los perfiles modales de suelo Asociación Bordenave-Darregueira.

Diseño experimental

El diseño experimental consistió de parcelas divididas aleatorizadas en 4 bloques completos, con un factor principal, **Secuencia de Cultivos**, que consta de cuatro niveles (TT, TV1, TV2 y TPa) y un factor secundario, **Fertilización**, con dos niveles (f y nf) en cada nivel del factor principal. La dimensión de las parcelas es de 100 m² (Figura 3).

Se estudiaron las siguientes secuencias:

- TT: agricultura permanente con trigo (*Triticum aestivum L.*).
- TV1: un año de trigo y un año de verdeo de invierno consociado (VIC), consistente en avena (*Avena sativa L.*) o triticale (*Triticum aestivum L. x Secale cereale L.*) con vicia (*Vicia sativa L.*), alternados.
- TV2: dos años de trigo y dos años de VIC, alternados.
- TPa: cinco años trigo alternados con cinco años de pastura consociada de festuca (*Festuca arundinacea L.*), falaris (*Phalaris canariensis L.*) y alfalfa (*Medicago sativa L.*).

La Tabla 1 muestra la secuencia de cultivos entre 1975 y 2006 en los cuatro tratamientos estudiados.

Desde el año 1982 la mitad de cada parcela con trigo recibió a la siembra 64 kg N y 16 kg P ha⁻¹; como urea al voleo y fosfato diamónico junto con la semilla (tratamiento f), mientras que la otra mitad se mantuvo sin fertilizar (nf). A partir de 1996 en las parcelas fertilizadas se suspendió la aplicación de P y sólo se aplicaron 30 kg N ha⁻¹ año⁻¹ como urea, al voleo, en macollaje. Esto último, debido a los altos niveles de fósforo extraíble (Pe) del suelo, entre 20 y 30 µg g⁻¹, superiores a los propuestos como referencia por Ron y Loewy (1996) en recomendaciones de fertilización fosforada para trigo en suelos del sudoeste bonaerense.

Se utilizó labranza convencional de tipo conservacionista (rastra de discos, cincel, barra escardadora y siembra en surco profundo) manteniendo en todo momento la mayor cobertura

de rastrojo posible. Desde 1995, las labores durante el barbecho para trigo siguieron una secuencia general; rastra de discos (enero y marzo), cincel superficial con cuchillas “pie de pato”, o bien profundo sin cuchillas (abril) dependiendo de la presencia de malezas o la necesidad de eliminar capas compactadas, rastra de discos (principios junio) hasta la siembra a mediados de junio. Las labores durante el barbecho para los verdeos de invierno se limitaron a dos operaciones con rastra de discos (enero y febrero), y siembra (entre febrero y marzo). El barbecho para pasturas se realizó en base a dos operaciones de rastra de discos en enero y marzo a una profundidad que osciló entre 12 y 15 cm. En las ocasiones en que se aplicó cincel profundo para eliminar problemas de compactación se operó a una profundidad media de 25 cm. La siembra se realizó entre mediados y fines de marzo.

Se realizó pastoreo intensivo con cambio diario en las pasturas y verdeos, generalmente con vacas de cría de 400-450 kg de peso vivo, con una carga media de 200 cabezas ha^{-1} . Generalmente se realizaron dos y excepcionalmente tres pastoreos por ciclo. El control de malezas en trigo se realizó en post-emergencia, principalmente con herbicidas para malezas latifoliadas (Metsulfurón, 2,4D, Tordon, Banvel, etc.) y en algunas oportunidades, con graminicidas (Puma, Iloxán, etc.) en dosis habituales para la región.

En los años 2002 (inicio de la fase agrícola en TPa), 2004 y 2006, los tratamientos TT, TV1 y TPa coincidieron con trigo. En macollaje, se realizaron ensayos con dosis crecientes de N en las parcelas del tratamiento f utilizando urea como fuente de N. El diseño, nuevamente en Parcelas Divididas, constó entonces de tres niveles en el factor principal (TT, TV1 y TPa) y cinco niveles en el secundario (0, 30, 60, 90, y 120 kg N ha^{-1}). La superficie de cada subparcela fue de 20 m^2 .

Esquema de trabajo

- Durante los años 2002, 2004 y 2006, se realizaron:
 - a) muestreos de suelo a distintas profundidades dentro del estrato de 0-20 cm a partir de los cuales se estudiaron los efectos de largo y corto plazo del uso de diferentes secuencias de cultivos y la fertilización sobre la cantidad, calidad y distribución de la MO del suelo y sus fracciones, las formas de fósforo y el pH.
 - b) muestreos de las plantas de trigo con el objetivo de evaluar el efecto del cultivo de leguminosas como antecesor.

Detalles sobre los muestreos y las metodologías empleadas en las diferentes determinaciones analíticas se detallan en cada capítulo en particular.

Análisis estadístico de los resultados

Para el análisis estadístico se utilizó el software estadístico Info Stat y planillas de cálculo suministradas por el Departamento de Matemática de la Universidad Nacional del Sur. En cada caso se realizó el análisis de varianza (ANOVA), el test de Diferencias Mínimas Significativas de Fisher (DMS) y Contrastes *a priori* para la comparación de valores medios.

En el análisis de los datos correspondientes a los muestreos de suelo se evaluaron los tratamientos para cada profundidad muestreada en forma individual, suponiendo la existencia de interacción significativa entre los factores Secuencia de cultivos x Fertilización x Profundidad. Además, se analizó el efecto de la Secuencia de cultivos y la Fertilización sobre las variables edáficas de 0-20 cm del suelo, teniendo en cuenta los valores promedio entre profundidades muestreadas, en 2002 y los promedios ponderados en 2004 y 2006.

En aquellos casos en que el ANOVA determinó la interacción significativa entre los factores Secuencia de cultivos y Fertilización se realizó la comparación de valores medios entre secuencias de cultivos en los tratamientos fertilizados y no fertilizados en forma individual.

También se plantearon Contrastes de Interacción (Scheffé, *a posteriori*) para evaluar efectos diferenciales de la fertilización en el suelo con distinta secuencia de cultivos.

El análisis estadístico de los datos de material vegetal se realizó para cada año en forma individual. Previa verificación de supuestos de independencia y homocedasticidad, se realizó el ANOVA de los resultados y la comparación de valores medios mediante el test de DMS de Fisher. Cuando la interacción entre fuentes de variación fue significativa, se realizó el ANOVA y la comparación de medias para cada secuencia de cultivo en forma individual. Mediante análisis de regresión se estudió la relación entre el rendimiento en grano y las precipitaciones y entre rendimiento en grano y materia seca total aérea y las dosis de N.

Diseño del ensayo ROTACIÓN I

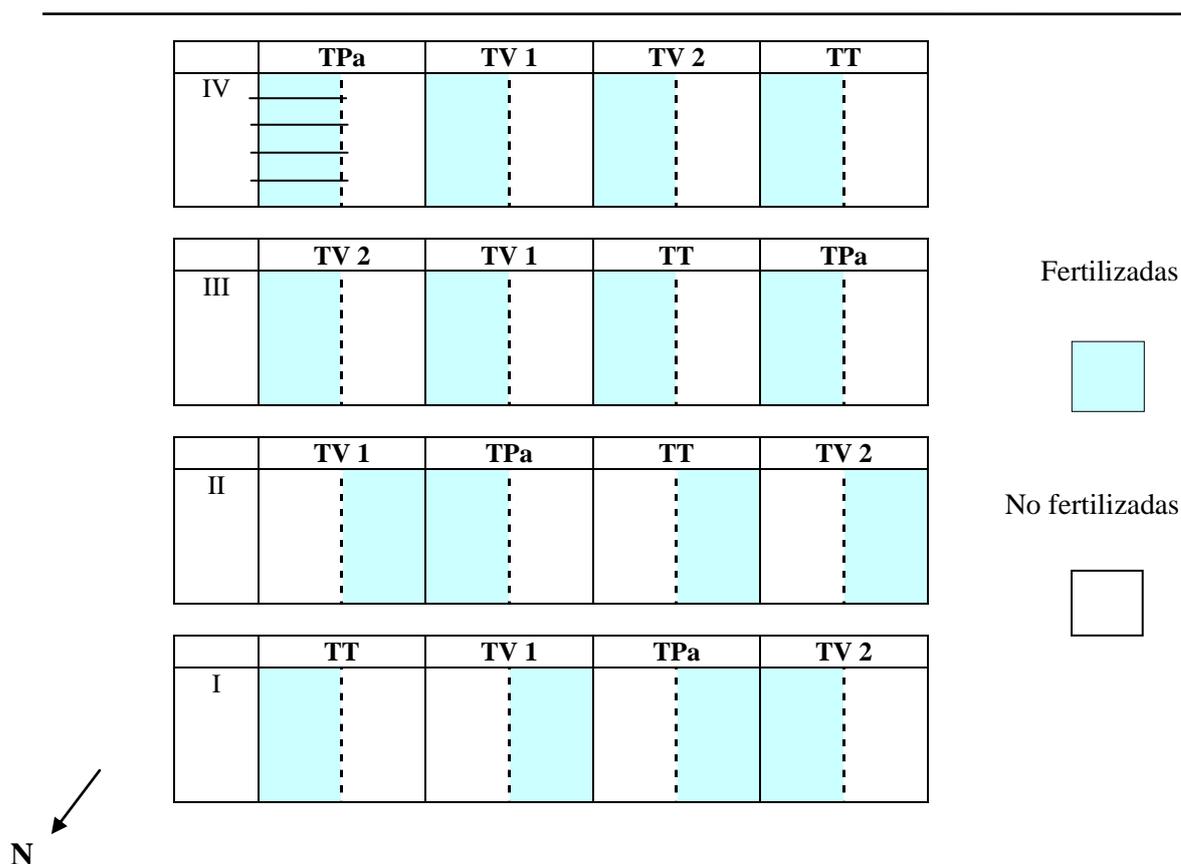


Figura 3: Diseño experimental de la Rotación I, EEA INTA Bordenave. Las divisiones horizontales en cada subparcela representan el esquema de fertilización en los años 2002, 2004 y 2006.

Tabla 1: Sucesión de cultivos en las cuatro secuencias estudiadas desde 1975 hasta 2006.

Año	TT	TV1	TV2	TPa
1975	Trigo	Vicia + Cebada / Maíz pastoreo	Melilotus + Cebada	Pastura
1976	Trigo	Vicia + Cebada / Maíz pastoreo	Maíz pastoreo	Pastura
1977	Trigo	Trigo	Trigo	Pastura
1978	Trigo	Trigo	Trigo	Pastura
1979	Trigo	Vicia + Avena/ Maíz pastoreo	Vicia + Avena	Pastura
1980	Trigo	Vicia + Avena/ Maíz pastoreo	Vicia + Avena	Trigo
1981	Trigo	Trigo	Trigo	Trigo
1982	Trigo	Trigo	Trigo	Trigo
1983	Trigo	Trigo	Vicia + Triticale	Trigo
1984	Trigo	Vicia + Triticale	Vicia + Triticale	Trigo
1985	Trigo	Trigo	Trigo	Trigo
1986	Trigo	Vicia + Triticale	Trigo	Vicia (abono verde)
1987	Trigo	Trigo	Vicia + Triticale	Pastura
1988	Trigo	Vicia + Triticale	Vicia + Triticale	Pastura
1989	Trigo	Trigo	Trigo	Pastura
1990	Trigo	Vicia + Triticale	Vicia + Triticale	Pastura
1991	Trigo	Trigo	Vicia + Triticale	Pastura
1992	Trigo	Vicia + Triticale	Trigo	Trigo
1993	Trigo	Trigo	Trigo	Trigo
1994	Trigo	Vicia + Triticale	Vicia + Triticale	Vicia + Triticale
1995	Trigo	Trigo	Trigo	Trigo
1996	Trigo	Trigo	Vicia + Avena	Pastura
1997	Trigo	Vicia + Avena	Vicia + Avena	Pastura
1998	Trigo	Trigo	Trigo	Pastura
1999	Trigo	Vicia + Avena	Trigo (helado)	Pastura
2000	Trigo	Trigo	Vicia + Avena	Pastura
2001	Trigo	Vicia + Avena	Vicia + Avena	Pastura
2002	Trigo	Trigo	Trigo	Trigo
2003	Trigo	Vicia + Avena	Trigo	Trigo
2004	Trigo	Trigo	Vicia + Avena	Trigo
2005	Trigo	Vicia + Avena	Vicia + Avena	Trigo
2006	Trigo	Trigo	Trigo	Trigo

La letra en negrita indica el cultivo presente en cada parcela durante los años de muestreo utilizados para este estudio.

CAPÍTULO I

EFECTO DE DIFERENTES SECUENCIAS DE CULTIVOS SOBRE EL ESTADO ORGÁNICO DEL SUELO

INTRODUCCIÓN

El informe del año 1985 de la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca (SAGyP) de Argentina anunció que el panorama de degradación de los suelos presentaba ya connotaciones graves. Más del 40% de las tierras de la Pampa Ondulada, la Mesopotamia, y las provincias de Chaco y Salta estaban afectadas por erosión hídrica y el mismo porcentaje en las regiones áridas y semiáridas estaba siendo afectado en forma creciente por erosión eólica. Buenos Aires, con el 27,7% de su territorio afectado por erosión hídrica y/o eólica representó la provincia con mayor superficie degradada del país. Para mediados de los noventa estos problemas ya se habían generalizado (Buschiazzo *et al.*, 1999). Los datos de la Tabla 2 muestran la expansión y severidad de los procesos erosivos en los suelos de Argentina desde principios de 1950.

Tabla 2: Tipo y severidad de la erosión del suelo en Argentina (en 10⁶ ha).

Año	Tipo de erosión			Severidad	
	Eólica	Hídrica	Total	Moderada	Severa
1956	16,0	18,2	34,2	27,1	7,1
1986	21,4	25,0	46,4	22,4	24,0
1990	28,0	30,0	58,0	27,9	30,1

Fuente: Rosell y Galantini (2006), adaptado de Casas (2001).

En la región semiárida pampeana, en las últimas décadas, los sistemas de producción agrícola evolucionaron hacia ciclos cada vez más prolongados e incluso en algunos casos hacia la agricultura continua, en reemplazo de la alternancia entre cultivos de cosecha y pasturas (Darwich, 1991). Esto agudizó en forma importante los diversos procesos que degradaron los suelos, disminuyendo notablemente su capacidad productiva (Glave, 1988). La agricultura de

tipo convencional (práctica que tradicionalmente prevaleció hasta hace unos años) provocó la disminución del contenido de MO edáfica, afectando notablemente las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Esto, se tradujo en la disminución de la estabilidad de los agregados lo que favoreció la pérdida de fracciones orgánicas vía erosión, densificación o formación de capas endurecidas, y fundamentalmente de elementos importantes como C, N y P, con un ligero aumento de la acidez (Miglierina, 1991).

Las condiciones climáticas (humedad y temperatura), las propiedades del suelo y las prácticas de manejo son los factores que determinan la calidad y cantidad de la MO del suelo a través del control de los procesos de su transformación (Alvarez y Lavado, 1998; Hevia *et al.*, 2003). Los cambios de corto y largo plazo en el ciclo de nutrientes en respuesta a diferentes prácticas agronómicas están asociados a las variaciones en la cantidad y actividad relativa de las fracciones lábil y estable de la MO (Doran y Smith, 1987). La dinámica y el tamaño de dichos compartimentos o “pools” dependerán de los factores mencionados. Para el mejor entendimiento de las tendencias en el corto y largo plazo es necesario el análisis sistemático de cada uno de estos procesos y sus interacciones.

Los diferentes sistemas de producción y manejo tales como, el tipo de labranza, la rotación de cultivos y la fertilización, modifican la cantidad y calidad de la MO del suelo y, a través de ello el pH, la disponibilidad de nutrientes importantes como el N y P, así como diversas propiedades físicas y biológicas del mismo (Miglierina *et al.*, 2000).

La rotación de cultivos, produce cambios positivos en el estado orgánico del suelo (Campbell *et al.*, 1996; Omay *et al.*, 1997). El tipo de cultivos involucrados tiene un rol importante sobre las fracciones de la MO presente, debido a su efecto sobre la relación C:N (Potter *et al.*, 1998). La inclusión de pasturas y/o verdes en consociación con leguminosas favorece la acumulación del CO aportando además, residuos de mejor calidad (Campbell *et al.*, 1991a). Janzen *et al.* (1998) reportaron incrementos principalmente de la fracción lábil de la MO del

suelo, en estudios realizados en zonas semiáridas frías. En zonas tropicales, en un Ultisol ácido bajo siembra directa, Espinoza (2004) determinó que el uso de residuos de leguminosa sólo contribuyó a incrementar la fracción lábil de C y N.

En el sudeste de la provincia de Buenos Aires, si bien la tendencia se volcó hacia la adopción de los sistemas conservacionistas, aún existe un área considerable bajo sistemas de labranza convencional. Studdert y Echeverría (2002a y b) sugirieron que la disminución de la MO de estos suelos bajo agricultura continuada y labranza convencional puede ser minimizada a través del manejo de la cantidad de residuos retornados al mismo mediante la selección de cultivos de la rotación y la fertilización. En un ensayo de 11 años de duración, demostraron que una alta frecuencia de cultivo de especies de baja producción de biomasa aérea (soja, girasol) y relación C:N baja, produjo mayores caídas del CO. Por el contrario, la cantidad de residuos reincorporados al suelo aumentó por la inclusión de cultivos con alta producción de biomasa aérea (maíz, trigo) en la rotación y la fertilización, lo que atenuó la disminución del CO.

El suministro regular de fertilizantes minerales, en la mayoría de los casos tiende a incrementar la MO de los suelos debido al aumento de los rendimientos de cultivo y en consecuencia, la mayor cantidad de residuos que ingresan al sistema (Rasmussen *et al.*, 1980; Janzen, 1987; Campbell *et al.*, 1991b; Glendining y Powlson, 1991). En suelos de la Región Pampeana, sin embargo, Andriulo *et al.* (2008) determinaron que no fue posible aumentar las reservas de C y N del horizonte A luego de 25 años de fertilización nitrogenada a pesar que la misma aumentó los aportes de C y N al incrementarse la producción de biomasa de los cultivos.

En la Región Semiárida Pampeana, aún cuando la MO es uno de los atributos edáficos más tenido en cuenta por investigadores, técnicos y productores, todavía no se ha llegado al consenso acerca de cuáles son los valores críticos que señalan el estado o grado de deterioro

de un suelo. Resulta evidente que la evaluación de los efectos de los sistemas de producción sobre la evolución de la MO del suelo debería basarse en ensayos de largo plazo y teniendo en cuenta sus diferentes fracciones. Las limitantes más importantes son: la determinación de cuáles serán las fracciones que resulten más sensibles para ser utilizadas como indicadores de estado del suelo y la continuidad de los sistemas de producción durante períodos prolongados. Gonzalez Pérez *et al.* (2004) realizaron estudios basados en técnicas espectroscópicas para determinar posibles cambios estructurales en las sustancias húmicas del suelo debido a diferentes sistemas de producción. Ellos concluyeron que luego de 5 años no observaron variaciones estructurales significativas en los ácidos húmicos de los suelos tratados con los distintos manejos. En Argentina son escasos los antecedentes de experiencias en ensayos de campo de larga data. Entre ellos se destaca un grupo de parcelas experimentales de la Estación Experimental Agropecuaria Bordenave del INTA. Las mismas llevan acumulado hasta la fecha un periodo de experimentación de 35 años continuos, con sistemas de producción en los que cultivos y manejos han permanecido sustancialmente invariables desde su inicio, en 1975. Es por eso que estos ensayos constituyen una fuente invaluable de aportes al conocimiento al ser generadoras de material vasto y único de estudio. En nuestro caso, han posibilitado el estudio de los efectos de diferentes manejos en el corto, mediano y largo plazo sobre la dinámica de la MO edáfica.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I.** Evaluar el efecto de largo plazo de diferentes secuencias de cultivos trigo - leguminosa bajo labranza conservacionista sobre la composición, distribución y calidad de las fracciones orgánicas del suelo.
- II.** Analizar los cambios que en el corto plazo producen la rotación de cultivos y la fertilización sobre la dinámica y distribución de las fracciones orgánicas del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestreo y acondicionamiento del suelo

Para el desarrollo de este capítulo se utilizó la información de datos obtenidos durante tres años. El primer muestreo de suelo fue en el año 2002, 27 años luego de comenzada la experiencia y cuando todos los tratamientos coincidieron con trigo. En el periodo de macollaje, de cada parcela (TT, TV1, TV2 y TPa) no fertilizada (nf) y fertilizada (f), se tomaron al azar 2 muestras compuestas por tratamiento y por bloque, de los 0-5, 5-10, 10-15 y 15-20 cm de profundidad. En 2004 y 2006, de la misma forma, se muestreó suelo de los 0-5, 5-10 y 10-20 cm de profundidad.

En todos los casos el suelo seco al aire, se homogeneizó y tamizó por 2 mm. Luego se sometió a un fraccionamiento físico por tamaño de partícula, mediante tamizado en húmedo (Galantini, 2005). Previa dispersión mecánica durante 60 minutos con agua destilada y bolitas de vidrio para favorecer la desagregación, el suelo se pasó por un tamiz de 0,1 mm de abertura de malla (140 mesh), con agua destilada hasta que el agua de lavado quedó límpida. Así se obtuvieron dos fracciones con características diferentes. Por un lado, la fracción fina (FF), de 0 a 100 μm , donde se encuentran la arcilla, el limo y la arena muy fina junto con la MO asociada a la fracción mineral (MOM) y por el otro, la fracción gruesa (FG), de 100 a 2000 μm , donde se encuentran la arena y la MO menos transformada, joven o particulada (MOP). Ambas fracciones, se secaron en estufa a 105°C y se homogeneizaron con mortero para su posterior análisis. La Figura 4 presenta un esquema básico de la técnica de fraccionamiento físico utilizado.

Además, de cada profundidad se tomaron muestras sin disturbar con cilindros de acero de volumen conocido, en las que se determinó la densidad aparente (DA) por el método de Blake y Hartge (1986).

Diagrama de la técnica de fraccionamiento físico por tamaño de partícula

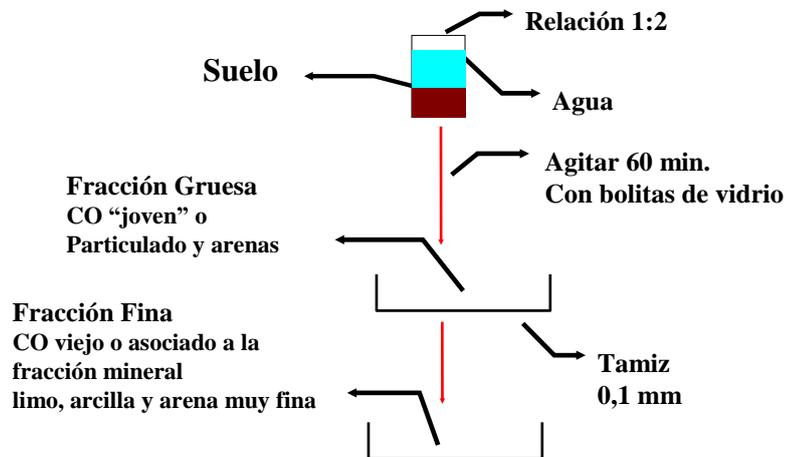


Figura 4: Esquema de la técnica de fraccionamiento físico granulométrico (Galantini, 2005).

Determinaciones analíticas

En el suelo tamizado por 2 mm:

- Carbono orgánico total (COT) por combustión seca (1500°C) con analizador automático LECO,
- Nitrógeno total (Nt), por el método de Bremner (1996).

En las fracciones fina y gruesa:

- Carbono orgánico joven o particulado (COP) en la fracción gruesa (FG). Por diferencia entre el COT y el COP se calculó el contenido de CO asociado a la fracción mineral (COM). Ambos valores (COP y COM) fueron ponderados y expresados como porcentaje del suelo sin fraccionar,
- Nitrógeno de la materia orgánica asociada a la fracción mineral (N-MOM) en la fracción fina (FF). Por diferencia entre el Nt y el N-MOM se calculó el nitrógeno de

la materia orgánica particulada (N-MOP). Ambos valores (N-MOP y N-MOM) fueron ponderados y expresados como porcentaje del suelo sin fraccionar,

- Se calcularon las relaciones entre las fracciones orgánicas, COP:COT, y la relación C:N de las diferentes fracciones.

A partir de los valores de DA, CO y N, de cada profundidad se obtuvieron sus contenidos (Mg ha^{-1}) en el suelo y se calcularon los valores medios en los 0-20 cm de profundidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. EFECTOS DE LARGO PLAZO

Carbono orgánico total

La concentración de CO total (COT) en los 0-20 cm de profundidad (Tabla 3) mostró cambios muy significativos producto de la secuencia de cultivos, con valores más bajos en TT, intermedios en TV2 y mayores en TV1 y TPa, y no significativos en respuesta a la fertilización (Tabla 6).

Al analizar las diferentes profundidades el efecto de la secuencia de cultivos fue semejante en la mayoría de ellas. Si bien como tendencia general se vio que en las parcelas fertilizadas los valores de COT fueron más altos en las capas superficiales y menores en profundidad respecto de los tratamientos no fertilizados, la fertilización no produjo cambios significativos, salvo en una profundidad en TT.

En los 0-5 cm de suelo se observaron efectos significativos por la secuencia de cultivos y no significativos por la fertilización. TPa mostró una acumulación superficial mayor de COT, posiblemente como resultado de ser el primer año con trigo luego de 5 años de pastura. Los tratamientos TT, nf y f, presentaron las concentraciones de COT más bajas, estadísticamente diferentes a TV1 y TPa. Esto podría deberse al menor aporte de residuos orgánicos y diferencias en su calidad, o diferencias en la intensidad de laboreo en este sistema.

Tabla 3: Concentración de carbono orgánico total (COT) de suelo bajo diferentes secuencias de cultivos con (f) y sin (nf) fertilización.

Prof (cm)	COT (g kg ⁻¹)								DMSsc
	TT		TV1		TV2		TPa		
	nf	F	nf	f	nf	f	nf	f	
0-5	16,0	16,9	20,6	20,6	18,2	19,0	20,8	22,6	3,7
5-10	14,5	15,8	19,8	19,7	17,4	17,9	20,0	20,6	2,2
10-15	13,5	15,5**	17,8	17,5	15,4	15,0	16,9	16,8	⁽¹⁾
15-20	13,3	12,8	15,8	15,2	13,9	13,2	15,4	15,2	1,4
0-20	14,3	15,2	18,5	18,3	16,2	16,2	18,3	18,8	1,4

TT, trigo continuo; TV1, 1 año trigo - 1 año verdeos de invierno consociados; TV2, 2 años trigo - 2 años verdeos de invierno consociados; TPa, 5 años trigo - 5 años pastura consociada. En cada profundidad: DMSsc, Diferencias Mínimas Significativas ($p \leq 0,05$) entre secuencias de cultivos (promedio entre f y nf). ⁽¹⁾ Interacción significativa; en cada profundidad y secuencia: efecto significativo de la fertilización, * ($p \leq 0,05$) y ** ($p \leq 0,01$).

Por otra parte, en las rotaciones con verdeos de invierno se detectó una tendencia a valores mayores en TV1, sin llegar a ser estadísticamente significativa respecto de TV2.

Un comportamiento semejante se observó en la profundidad 5-10 cm, con efectos significativos de la secuencia de cultivos y no significativos por la fertilización, manteniendo el mismo orden entre los tratamientos.

En los 10-15 cm se detectó interacción significativa entre los efectos de la secuencia de cultivos y la fertilización. La misma se atribuyó principalmente (98%) al comportamiento diferencial y positivo que la aplicación de fertilizantes tuvo sobre el COT únicamente en TT ($p_{\text{Scheffé}} = 0,0075$). Entre los tratamientos no fertilizados el efecto de la secuencia de cultivos sobre el COT fue muy significativo ($p < 0,0001$) y similar al ocurrido de 5-10 cm siendo $TT < TV2 < TV1 = TPa$ (DMS= 0,123), mientras que entre los fertilizados las diferencias también fueron significativas ($p = 0,0124$) si bien los valores mínimos y máximos se observaron en TV2 y TV1, respectivamente (DMS= 0,162).

En los 15-20 cm de profundidad se detectaron únicamente efectos de la secuencia de cultivos, con valores más bajos en TT y TV2 y significativamente más altos en TV1 y TPa, sin diferencias entre ellos.

La cantidad de MO acumulada durante el período con pastura fue alta, sin embargo, durante el ciclo con trigo, en condiciones de adecuada humedad, labranza y alta disponibilidad de N, existiría una rápida mineralización de los residuos (Echeverría y Bergonzi, 1995; Galantini y Rosell, 2006). La semejanza entre los valores de CO en TV1 y TPa sería consecuencia de la mayor velocidad de descomposición de las fracciones lábiles lo cual coincidiría con los elevados rendimientos del trigo observados luego de la pastura. Además, el mayor aporte de CO en profundidad indicaría una mejor exploración por parte de las raíces en estas dos rotaciones. El cultivo de trigo implantado sobre pasturas consociadas con alfalfa se ve estimulado a producir gran cantidad de materia seca durante la etapa inicial de crecimiento y el agregado de fertilizante contribuye en el mismo sentido. Loewy (1987) encontró que dadas las características climáticas de la región, al estimular el crecimiento del cultivo se genera un requerimiento hídrico difícil de satisfacer y puede producir la disminución del rendimiento en grano.

En este estudio, en términos generales podemos señalar que el resultado del efecto acumulado de 27 años de monocultivo de trigo produjo los valores más bajos de COT, con efecto positivo de la fertilización solamente en el espesor 10-15 cm. Valores intermedios de COT debidos a la rotación se detectaron en TV2, donde la fertilización no produjo cambios, mientras que los mayores valores se encontraron en TV1 y TPa, sin diferencias significativas entre ellos o por el uso de fertilizantes. Estos resultados coincidieron con los obtenidos por Eiza *et al.* (2005) y Domínguez *et al.* (2009) en ensayos de largo plazo en el sudeste bonaerense, en los cuales no hallaron diferencias estadísticas en el COT por la aplicación de N a ninguna profundidad dentro de los primeros 20 cm del suelo. En cambio, en la EEA

Bordenave, sobre las mismas parcelas, Miglierina *et al.* (2000) encontraron un efecto positivo de la fertilización en todas las profundidades de TT y TV2. La variabilidad en los resultados se debe a que el efecto de la fertilización depende de varios factores como la dosis aplicada, el balance de nutrientes, el momento de aplicación y las condiciones climáticas en ese momento (Galantini y Rosell, 2006). Los efectos positivos se observan cuando la fertilización se utiliza en el marco de un sistema de producción (García *et al.*, 2006) y en combinación con otras buenas prácticas agronómicas (Miglierina *et al.*, 2000).

La diferencia entre la inclusión de VIC en secuencias de uno o dos años radica principalmente en su efecto de corto plazo. Como consecuencia del cultivo antecesor se favorece un incremento importante en el rendimiento del primer trigo posterior al VIC, sin respuesta al agregado de N. Durante el segundo año con trigo el efecto es mucho menor y la respuesta a la fertilización aumenta (Galantini *et al.*, 1992). Bajo las condiciones de la rotación TV2, el N del antecesor y del fertilizante se estarían utilizando con menor eficiencia que en TV1. Un manejo más conveniente y balanceado de la disponibilidad de N en la rotación TV2 se lograría variando el esquema de fertilización. Debería reducirse la dosis de fertilizante durante el primer trigo y aumentarla durante el segundo trigo de la secuencia. Estas diferencias en la disponibilidad de N entre las rotaciones TV1 y TV2 modifican tanto la producción del cultivo como los procesos biológicos en el suelo. El desbalance en TV2 puede alterar los procesos de descomposición de las fracciones orgánicas y limitar el aporte de residuos. En TV1 la dinámica del N estaría más balanceada entre acumulación (por parte de la vicia) y uso (por el cultivo de trigo), acelerando las transformaciones del material orgánico en el suelo.

Cambios en el COM

El CO asociado a la fracción mineral representa la fracción más resistente de la MO del suelo, sin embargo, el efecto acumulado de las rotaciones y las labranzas puede producir cambios significativos, especialmente de largo plazo, tanto en la cantidad como en la calidad de esta fracción (Galantini y Rosell, 1997; Galantini *et al.*, 2002).

En este estudio se observaron efectos altamente significativos de la secuencia de cultivos y no significativos de la fertilización sobre la concentración media de COM de 0-20 cm (Tabla 6) siguiendo la tendencia observada en el COT, con $TT=TV2 < TV1=TPa$ (Tabla 4).

Los valores más bajos de COM correspondieron a TT y TV2 en la mayoría de las profundidades. Los mayores valores en todas las profundidades analizadas se encontraron en las rotaciones TV1 y TPa, sin diferencias entre ellas. La rotación TV1 nuevamente mejoró significativamente el COM del suelo en todas las profundidades respecto de TV2, tratamiento donde además la fertilización provocó la disminución de la concentración de COM en las capas inferiores. Posiblemente, las diferencias entre estas dos rotaciones se debieron al desbalance en la disponibilidad de N ya comentada. Además, es importante destacar que no se encontraron diferencias entre TV1 y TPa, indicando que en planteos agrícola-ganaderos, ambas alternativas producirían efectos semejantes sobre la MO del suelo, si bien sería necesario evaluar estos cambios dentro de las dos fases de ambas rotaciones.

El tratamiento TT fertilizado de 10-15 cm, fue el único donde la fertilización produjo un aumento estadísticamente significativo en la concentración de COM, y al cual se le atribuyó el 88% ($p_{Scheffé} = 0,0038$) de la interacción encontrada entre los factores secuencia de cultivos y fertilización a esa profundidad. Este efecto podría deberse a la baja productividad del monocultivo no fertilizado y en suma, a que éste es el tratamiento que recibió N inorgánico todos los años, en comparación con el resto, que fue fertilizado sólo el 50% de los años.

Tabla 4: Concentración de carbono orgánico asociado a la fracción mineral (COM) de suelo bajo diferentes secuencias de cultivos con (f) y sin (nf) fertilización.

Prof (cm)	COM (g kg ⁻¹)								DMSsc
	TT		TV1		TV2		TPa		
	nf	f	nf	f	nf	f	nf	f	
0-5	14,6	15,0	18,5	18,6	16,0	16,1	18,0	18,8	2,6
5-10	13,3	14,4	18,1	18,0	15,4	15,5	17,9	17,8	1,7
10-15	12,4	14,7**	16,5	16,5	14,3	13,2*	15,1	15,2	(1)
15-20	12,1	12,4	15,1	14,7	13,2	11,6*	14,2	13,9	(1)
0-20	13,1	14,1	17,1	17,0	14,7	14,1	16,3	16,4	1,3

TT, trigo continuo; TV1, 1 año trigo - 1 año verdes de invierno consociados; TV2, 2 años trigo - 2 años verdes de invierno consociados; TPa, 5 años trigo - 5 años pastura consociada. En cada profundidad: DMSsc, Diferencias Mínimas Significativas ($p \leq 0,05$) entre secuencias de cultivos (promedio entre f y nf). ⁽¹⁾ Interacción significativa; en cada profundidad y secuencia: efecto significativo de la fertilización, * ($p \leq 0,05$) y ** ($p \leq 0,01$).

Cambios en el COP

El efecto combinado de las diferentes secuencias de cultivos y la fertilización sobre la concentración media de COP en los 0-20 cm del suelo fue variable (Tabla 6). El 95% de la interacción encontrada se explicó por el efecto diferencial que mostró la fertilización únicamente en los tratamientos TV2 y TPa, respecto de TT y TV1 ($p_{\text{Scheffé}} = 0,0001$). Esto se debería a que el contenido de esta fracción orgánica resulta del balance entre el aporte de residuos de los cultivos previos y aquellos factores que regulan los procesos de humificación, como disponibilidad de N, agua y temperatura (Venanzi *et al.*, 2001; Galantini y Rosell, 2006). Se observó una clara estratificación de la MOP, más marcada en los tratamientos con aplicación de fertilizantes (Tabla 5). Esta podría resultar de un efecto aditivo de la secuencia de cultivos con el fertilizante, para dar mayor COP en las capas superficiales. No obstante, el incremento en el N, elemento generalmente limitante, puede estimular la descomposición de los materiales orgánicos lábiles.

En términos generales, el efecto de las secuencias sobre esta fracción de la MO fue semejante al observado para COM entre los tratamientos más contrastantes, TT y TPa. Sin embargo,

TV1 y TV2 mostraron un comportamiento diferente, presentando TV1 menor contenido de COP y mayor contenido de COM respecto de TV2. Es decir, dos años continuos bajo leguminosas favorecieron la acumulación de material menos transformado, considerando que los niveles de aporte en TV1 fueron superiores o iguales. Esto evidenciaría una velocidad de humificación de los residuos mayor en TV1, efecto también observado en suelos con alta disponibilidad de N (Venanzi *et al.*, 2001). La alternancia anual de trigo con VIC produciría un ciclado más rápido de los nutrientes, hecho que tendría un impacto significativo sobre la productividad del cultivo. La tendencia a lo largo de los años mostró mayores rendimientos en TV1 respecto del primer trigo de TV2, lo que apoyaría esta hipótesis (Krüger, comunicación personal).

En estudios previos en suelos de la EEA Bordenave, se observó que la fertilización, produjo aumentos significativos en el contenido de MO (Miglierina *et al.*, 2000; Galantini y Rosell, 2006). Los resultados obtenidos mostraron que el efecto ocurrió principalmente en la fracción más lábil y que ésta es altamente dependiente del manejo (Quiroga *et al.*, 1996) y las características climáticas previas a su determinación (Galantini y Rosell, 2006).

En concordancia con Eiza *et al.* (2005), la magnitud de las diferencias en el COP varió en cada profundidad. En la capa superficial se observaron tendencias diferentes al fertilizar las distintas secuencias de cultivos, aunque la interacción entre secuencia de cultivos y fertilización no alcanzó a ser significativa ($p= 0,2244$ y $p= 0,3437$). Studdert *et al.* (1997) y Studdert y Echeverría (2000) obtuvieron resultados semejantes, mencionando que el efecto de las secuencias de cultivos, a través de diferentes patrones de acumulación de los residuos, podría enmascarar la detección de diferencias. En este caso, aunque estadísticamente no significativo, se observó un claro efecto del fertilizante en TPa y TV2, llegando a profundidades mayores en este último. La mayor significación de la interacción encontrada se dio a partir de los 10-15 cm, coincidiendo con el límite de las labores de preparación del

suelo, donde el uso de rastra de discos homogeniza la capa superficial a una profundidad variable según el estado de humedad edáfico.

Si bien el COP ha sido propuesto como un indicador temprano de la calidad del suelo (Koutika *et al*, 2005; Marriott y Wander, 2006), su dinámica y sensibilidad en relación a los factores de manejo y meteorológicos, hacen que su sola determinación aporte poco al conocimiento real del sistema. Como se observó en los resultados obtenidos, valores similares de COP inducirían a afirmar que no existieron cambios en la calidad del suelo en el largo plazo, salvo en TV2 f y los tratamientos TPa.

A partir de esto podría concluirse que el COP podría ser considerado más como un indicador de fertilidad que de calidad del suelo. Debería tenerse en cuenta, además, la relación del COP con factores de manejo y clima, así como también con otras propiedades químicas del suelo como las relaciones COP:COT, su relación C:N, etc.

Tabla 5: Concentración de carbono orgánico particulado (COP) de suelo bajo diferentes secuencias de cultivos con (f) y sin (nf) fertilización.

Prof (cm)	COP (g kg ⁻¹)								DMSsc
	TT		TV1		TV2		TPa		
	nf	f	nf	f	nf	f	nf	f	
0-5	1,4	1,8	2,0	2,0	2,2	2,9	2,8	3,8	1,2
5-10	1,1	1,4	1,7	1,7	1,9	2,4	2,1	2,8	0,6
10-15	1,1	0,8	1,3	1,0	1,1	1,7**	1,7	1,6	(¹)
15-20	1,1	0,4**	0,8	0,4*	0,7	1,6**	1,2	1,2	(¹)
0-20	1,2	1,1	1,5	1,3	1,5	2,1**	1,9	2,4**	(¹)

TT, trigo continuo; TV1, 1 año trigo - 1 año verdes de invierno consociados; TV2, 2 años trigo - 2 años verdes de invierno consociados; TPa, 5 años trigo - 5 años pastura consociada. En cada profundidad: DMSsc, Diferencias Mínimas Significativas ($p \leq 0,05$) entre secuencias de cultivos (promedio entre f y nf). (¹) Interacción significativa; en cada profundidad y secuencia: efecto significativo de la fertilización, * ($p \leq 0,05$) y ** ($p \leq 0,01$).

Tabla 6: Valores de significancia de los ANOVA del C del suelo y sus fracciones a distintas profundidades de 0-20 cm; efecto de la secuencia de cultivos (SC), fertilización (F) y su interacción (SC x F).

Prof. (cm)	COT			COM			COP		
	SC	F	SC x F	SC	F	SC x F	SC	F	SC x F
0-5	0,0420	0,0943	0,7260	0,0295	0,4305	0,9514	0,0477	0,0030	0,2244
5-10	0,0016	0,1578	0,7019	0,0010	0,5215	0,6820	0,066	0,0133	0,3437
10-15	0,0076	0,3089	0,0165	0,0026	0,2905	0,0023	0,1382	0,7103	0,0005
15-20	0,0079	0,0916	0,9328	0,0022	0,1154	0,1958	0,0043	0,5608	<0,0001
0-20	0,0022	0,4478	0,3310	0,0010	0,5843	0,4237	0,0123	0,0003	<0,0001

Carbono orgánico total del suelo (COT); carbono de la MO asociada a la fracción mineral (COM); carbono orgánico particulado (COP).

Efectos sobre la relación COP:COT

La relación COP:COT es un índice del grado de transformación de las fracciones orgánicas dentro del suelo que puede ser utilizado para evaluar los efectos de las distintas prácticas de manejo (Galantini *et al.*, 2002). Este índice está influenciado por un lado, por los aportes de materia seca asociados directamente al aumento de COP, y por otro, por la velocidad de su transformación, la cual se relaciona positivamente con la fracción humificada y negativamente con el COP.

En términos generales, los valores indicaron que en promedio el COP fue el 10% del COT en los 0-20 cm del suelo. La proporción tendió a ser mayor en superficie (0-5 cm, de 9-16%) que en profundidad (15-20 cm, de 3-12%). Las relaciones reflejaron que se trata de sistemas con labranza y secuencias con barbechos largos, lo que implica menor acumulación de COP debido al mayor tiempo para su descomposición. Además, hay aportes de N vía leguminosa y fertilizante, lo que elimina un factor limitante de la descomposición. Por otra parte, en el periodo de barbecho las lluvias superan los requerimientos hídricos.

La rotación de cultivos frecuentemente genera aumentos en los niveles de COP. La fertilización, por su parte, actúa en función de la eficiencia en el uso del N. Cuando el N es utilizado eficientemente por el cultivo, aumenta la producción de biomasa y con ello el aporte de COP al suelo. Contrariamente, cuando no es utilizado por el cultivo será utilizado por los organismos del suelo acelerando el proceso de descomposición de los materiales orgánicos.

Al analizar los valores de COP:COT se detectó interacción muy significativa entre los efectos de la secuencia de cultivos y la fertilización sobre este índice, posiblemente por ser el resultado de dos procesos opuestos (Tabla 7). En términos generales, las relaciones siguieron la tendencia del COP, con una mayor relación COP:COT en superficie como respuesta a la rotación y la fertilización en TV2 y TPa. Nuevamente, se observó que las rotaciones con mayor tiempo continuo bajo leguminosa tuvieron mayor relación COP:COT, la que además se incrementó con la fertilización (mayor aporte de residuos), a diferencia de lo observado en TT y TV1. La mayor productividad de la rotación TV1 favorecería el aumento del COP y a la vez que la fertilización aceleraría su velocidad descomposición (Galantini *et al.*, 2004). Como la relación responde a diferencias comentadas entre ambas fracciones, en este caso se indicaría que las mismas se debieron a la variación en la velocidad de humificación de los residuos incorporados al suelo.

Tabla 7: Relación entre el carbono orgánico particulado y total (COP:COT) de suelo bajo diferentes secuencias de cultivos con (f) y sin (nf) fertilización.

Prof (cm)	COP:COT								DMSsc
	TT		TV1		TV2		TPa		
	nf	f	nf	f	nf	f	nf	f	
0-5	0,09	0,11	0,10	0,10	0,12	0,15	0,13	0,16	0,03
5-10	0,08	0,09	0,09	0,09	0,11	0,13	0,10	0,13	0,02
10-15	0,08	0,05*	0,08	0,06	0,07	0,11**	0,10	0,10	(1)
15-20	0,08	0,03**	0,05	0,03	0,05	0,12**	0,08	0,08	(1)
0-20	0,08	0,07	0,08	0,07	0,09	0,13**	0,10	0,12*	(1)

TT, trigo continuo; TV1, 1 año trigo - 1 año verdes de invierno consociados; TV2, 2 años trigo - 2 años verdes de invierno consociados; TPa, 5 años trigo - 5 años pastura consociada. En cada profundidad: DMSsc, Diferencias Mínimas Significativas ($p \leq 0,05$) entre secuencias de cultivos (promedio entre f y nf). (1) Interacción significativa; en cada profundidad y secuencia: efecto significativo de la fertilización, * ($p \leq 0,05$) y ** ($p \leq 0,01$).

Efectos sobre el N total

Respecto al N total, de 0-20 cm de profundidad, no se encontró interacción entre factores ni diferencias significativas entre las secuencias de cultivos por efecto de la fertilización (Tabla 11). Los valores de N total del suelo aumentaron en el sentido TT, TV1, TV2 y TPa, hallándose diferencias significativas sólo entre los extremos (Tabla 8).

Posiblemente, el efecto de la fertilización sobre el aumento en la exportación de nutrientes y las características de la aplicación (dosis y momento) hayan sido responsables de la ausencia de respuesta en el aumento de las reservas de N (García, 2003, Galantini *et al.*, 2000).

La fertilización promovió aumentos significativos en la concentración de N total en los 0-5 cm del suelo. Estos aumentos se correspondieron con los incrementos observados en el N-MOP a esa profundidad en TT, TV2 y TPa. Este efecto no se mantuvo en las restantes profundidades, donde las tendencias fueron bastante variables.

Tabla 8: Concentración de N total (Nt) en suelo bajo diferentes secuencias de cultivos con (f) y sin (nf) fertilización.

Prof (cm)	Nt (g kg ⁻¹)								DMSsc
	TT		TV1		TV2		TPa		
	nf	f	nf	f	nf	f	nf	f	
0-5	1,40	1,56	1,46	1,58	1,69	1,74	1,74	1,81	0,29
5-10	1,44	1,30	1,55	1,51	1,62	1,57	1,77	1,66	0,22
10-15	1,36	1,35	1,38	1,32	1,32	1,38	1,54	1,48	Ns
15-20	1,28	1,16*	1,23	1,17	1,19	1,24	1,22	1,29	⁽¹⁾
0-20	1,37	1,34	1,40	1,39	1,46	1,48	1,57	1,56	0,16

TT, trigo continuo; TV1, 1 año trigo - 1 año verdes de invierno consociados; TV2, 2 años trigo - 2 años verdes de invierno consociados; TPa, 5 años trigo - 5 años pastura consociada. En cada profundidad: DMSsc, Diferencias Mínimas Significativas ($p \leq 0,05$) entre secuencias de cultivos (promedio entre f y nf). ⁽¹⁾ Interacción significativa; en cada profundidad y secuencia: efecto significativo de la fertilización, * ($p \leq 0,05$) y ** ($p \leq 0,01$).

Efectos sobre el N–MOM

El N asociado a la fracción mineral siguió una tendencia muy semejante al del N total, ya que representa la mayor parte del N edáfico. Los valores de N–MOM en los 0-20 cm de profundidad mostraron un claro efecto de la secuencia de cultivos y efectos opuestos de la fertilización en los tratamientos TT y TPa ($p_{\text{Scheffé}} = 0,0305$). Al comparar tratamientos sin fertilización se observó que la secuencia de cultivos produjo un efecto significativo en el orden $TT < TV1 = TV2 < TPa$ (Tabla 9). Si bien las diferencias entre tratamientos fueron variables, los contrastes *a priori* indicaron que los VIC aumentaron significativamente el N–MOM respecto de TT ($p < 0,05$) y en mayor medida lo hizo la pastura ($p < 0,01$).

El N incorporado a través de leguminosas en ciclos de dos o más años continuos fue el más eficiente para aumentar su concentración en el suelo. Este comportamiento se reflejó en las diferentes profundidades, con una clara tendencia decreciente.

Si bien en la mayoría de los tratamientos los valores de N–MOM de 0-5 cm mejoraron con la fertilización, las diferencias no fueron significativas y nuevamente esta tendencia cambió en profundidad. Esto indicaría que el aporte de N de las leguminosas fue mucho más importante

que el del fertilizante incorporado y que en ninguno de los casos la fertilización mejoró la reserva de N del suelo. A pesar de las diferencias observadas en la concentración de N en los 10-15 cm de profundidad, éstas no llegaron a ser significativas. Posiblemente esto sea consecuencia de la mayor variabilidad al ser esta profundidad la zona límite de las labranzas, originándose una capa de transición que varía con el uso de la maquinaria.

Tabla 9: Concentración de N asociado a la fracción mineral (N-MOM) en suelo bajo diferentes secuencias de cultivos con (f) y sin (nf) fertilización.

Prof (cm)	N-MOM (g kg ⁻¹)								DMSsc
	TT		TV1		TV2		TPa		
	nf	f	nf	f	nf	f	nf	f	
0-5	1,25	1,31	1,38	1,44	1,43	1,49	1,72	1,62	0,26
5-10	1,20	1,36	1,34	1,41	1,44	1,66	1,60	1,57	0,19
10-15	1,16	1,28	1,35	1,31	1,19	1,20	1,33	1,41	Ns
15-20	1,13	1,16	1,25	1,15	1,25	1,12	1,27	1,03**	⁽¹⁾
0-20	1,19	1,28*	1,33	1,33	1,33	1,37	1,48	1,41	⁽¹⁾

TT, trigo continuo; TV1, 1 año trigo - 1 año verdeos de invierno consociados; TV2, 2 años trigo - 2 años verdeos de invierno consociados; TPa, 5 años trigo - 5 años pastura consociada. En cada profundidad: DMSsc, Diferencias Mínimas Significativas ($p \leq 0,05$) entre secuencias de cultivos (promedio entre f y nf). ⁽¹⁾ Interacción significativa; en cada profundidad y secuencia: efecto significativo de la fertilización, * ($p \leq 0,05$) y ** ($p \leq 0,01$).

Efectos sobre el N-MOP

El análisis de varianzas del nitrógeno de la MOP en los 0-20 cm indicó la existencia de interacción significativa (Tabla 11), por lo cual cada factor se analizó aisladamente. Entre los tratamientos no fertilizados, el efecto positivo de las leguminosas sobre el N en la MOP se observó sólo en TPa (DMS= 0,004) (Tabla 10). Si bien la diferencia detectada en TPa podría resultar tanto del aumento de la MOP, como de una mayor concentración de N en esa fracción lábil (derivada del aporte de residuos ricos en N durante 5 años de pastura), en este caso, no se observaron diferencias en la calidad de la MOP en las relaciones COP: N-MOP,

con valores bastante bajos (10-11) en los sistemas más contrastantes TT y TPa no fertilizados. Por otro lado, el gráfico de valores medios y los contrastes de interacción ($p_{\text{Scheffé}} < 0,0001$) demostraron que ésta última se debió en gran parte al comportamiento diferencial que tuvo la fertilización en TV1 y TV2 respecto del resto de los tratamientos. Las variaciones observadas en esta fracción del N siguieron las mismas tendencias que los valores de COP y así, el uso de fertilizantes produjo efectos significativos y opuestos en los tratamientos con VIC, negativo en TV1 y positivo en TV2, ($p_{\text{Scheffé}} < 0,0001$). Estos efectos opuestos apoyarían la afirmación de que el uso del N de la leguminosa es más eficiente en TV1 que en TV2.

En las distintas profundidades las diferencias fueron variables aunque se observó una marcada estratificación, siendo el valor de N-MOP en superficie, en la mayoría de los casos, el doble que en profundidad.

Tabla 10: Concentración de N asociado a la materia orgánica particulada (MOP) de suelo bajo diferentes secuencia de cultivos con (f) y sin (nf) fertilización.

Prof (cm)	N-MOP (g kg^{-1})								SC x F
	TT		TV1		TV2		TPa		
	nf	f	nf	f	nf	f	nf	f	
0-5	0,13	0,18**	0,17	0,13*	0,18	0,29**	0,23	0,27*	(1)
5-10	0,12	0,14	0,18	0,10**	0,17	0,21**	0,22	0,21	(1)
10-15	0,10	0,08	0,12	0,07	0,09	0,17*	0,16	0,14	(1)
15-20	0,10	0,03*	0,06	0,06	0,07	0,15*	0,12	0,10	(1)
0-20	0,11	0,11	0,13	0,09*	0,13	0,21*	0,18	0,18	(1)

TT, trigo continuo; TV1, 1 año trigo - 1 año verdes de invierno consociados; TV2, 2 años trigo - 2 años verdes de invierno consociados; TPa, 5 años trigo - 5 años pastura consociada. ⁽¹⁾ Interacción significativa; en cada profundidad y para cada secuencia: efecto significativo de la fertilización * ($p \leq 0,05$) y ** ($p \leq 0,01$).

Tabla 11: Valores “p” de significación de los ANOVA de la concentración de N del suelo y sus fracciones a distintas profundidades de 0-20 cm para los efectos de la secuencia de cultivos (R), fertilización (F) y su interacción (SC x F).

Prof. (cm)	Nt			N-MOM			N-MOP		
	Fuente de Variación								
	SC	F	SC x F	SC	F	SC x F	SC	F	SC x F
0-5	0,0639	0,0128	0,7433	0,0490	0,5727	0,3044	0,1043	<0,0001	<0,0001
5-10	0,0340	0,0053	0,5580	0,0143	0,0079	0,4210	0,0814	0,2447	<0,0001
10-15	0,2269	0,5001	0,3697	0,4612	0,2645	0,5310	0,0210	0,6785	<0,0001
15-20	0,7012	0,5985	0,0541	0,8594	0,0019	0,0594	0,0010	0,5353	<0,0001
0-20	0,0601	0,8456	0,7345	0,1605	0,5453	0,0641	0,0175	0,0147	<0,0001

Nitrógeno total (Nt); N de la MO asociada a la fracción mineral (N-MOM); N de la MO particulada (N-MOP).

Cambios en la cantidad de CO y N y sus fracciones

Los cambios de corto plazo en la DA producto de las labranzas junto al régimen de precipitaciones, pueden enmascarar resultados y llevar a conclusiones erróneas acerca del efecto de largo plazo que los manejos producen sobre el estado orgánico del suelo. Por este motivo se analizaron los posibles cambios ocurridos en el estado orgánico a partir de los contenidos de CO y N en las diferentes fracciones en términos de su cantidad acumulada (Mg ha⁻¹). En el Anexo II se detallan los valores de DA del suelo determinados en cada uno de los años de este estudio (Tabla 41) y los contenidos de COT, COM, COP, Nt, N-MOM y N-MOP en cada profundidad analizada en 2002 (Tablas 42 al 46, respectivamente).

Al igual que en los valores de concentración, la cantidad de COT en las diferentes secuencias de cultivos siguió el orden TT=TV2<TV1=TPa. En este caso, sin embargo, los cambios producto de la fertilización fueron significativos, si bien la existencia de cierta interacción evidenció un efecto variable entre las diferentes secuencias (Tabla 12).

El suelo bajo monocultivo de trigo sin fertilización alcanzó la menor cantidad de COT, con 35,6 Mg ha⁻¹. En el suelo en rotación con pastura se registraron valores de 47 y 44,8 Mg ha⁻¹ para las parcelas con y sin fertilización, respectivamente.

Tabla 12: Contenidos de carbono orgánico total, asociado a la fracción mineral y particulado y nitrógeno asociado a la MO total y sus fracciones, en los primeros 0-20 cm de suelo bajo diferentes secuencias de cultivos con (f) y sin (nf) fertilización.

Tratamiento		COT	COM	COP	Nt	N-MOM	N-MOP
		Mg ha ⁻¹					
TT	nf	35,6**	32,6**	3,0	3,4	3,0**	279
	f	39,7	36,8	2,9	3,5	3,3	280
TV1	nf	44,9	41,4	3,5	3,4	3,2	318**
	f	45,1	42,0	3,2	3,5	3,3	220
TV2	nf	39,5	35,9	3,5**	3,5	3,2	307**
	f	40,0	34,8	5,3	3,7	3,4	501
TPa	nf	44,8*	40,0	4,7**	3,9	3,6	445
	f	47,0	41,2	5,9	3,9	3,5	443
SC		0,0046	0,0017	0,0131	0,0812	0,1615	0,0169
F		0,0038	0,0435	<0,0001	0,0804	0,0014	0,0011
SC x F		0,0787	0,0163	<0,0001	0,9246	0,0035	<0,0001
DMS _{sc}		4,3	-	-	0,4	-	-

TT, trigo continuo; TV1, 1 año trigo - 1 año verdes de invierno consociados; TV2, 2 años trigo - 2 años verdes de invierno consociados; TPa, 5 años trigo - 5 años pastura consociada. C orgánico total, C asociado a la fracción mineral y C particulado (COT, COM y COP); N total, N de la MO asociada a la fracción mineral y N de la MO particulada (N_t, N-MOM y N-MOP). DMS_{sc}, Diferencias Mínimas Significativas ($p \leq 0,05$) entre secuencias de cultivos (valores promedio entre f y nf). * y **, para cada secuencia en forma individual, diferencias significativas entre tratamientos f y nf, al 5% y 1%, respectivamente.

Entre los tratamientos no fertilizados pudieron observarse los efectos de la secuencia de cultivos, en donde se detectaron diferencias máximas del 26% en el contenido de COT a favor de las rotaciones con leguminosas TV1 y TPa respecto de TT. En el caso de TPa, estos cambios en el COT estuvieron representados por un aumento del COP = 1,7 Mg ha⁻¹ y del COM = 7,4 Mg ha⁻¹. Si bien en términos absolutos las diferencias en la cantidad de COP fueron pequeñas, representan un incremento porcentual mayor, 57%, respecto del aumento del COM equivalente al 22%. Esta mayor parte lábil o fácilmente disponible para los microorganismos, puede relacionarse con mejoras en la fertilidad y con los mayores

rendimientos de trigo de TPa y TV2 respecto de TT. Por otra parte, entre los tratamientos fertilizados TT y TPa el aumento del nivel de COP fue cercano al 100%.

TT fue la secuencia donde la fertilización produjo el cambio más importante ($4,1 \text{ Mg ha}^{-1}$) asociado a un 13% de aumento de la cantidad de COM. Aún así, el incremento producido apenas alcanzó para compensar al producido por la rotación con leguminosas en el tratamiento con menor COT (TV2). Además, la fertilización produjo incrementos significativos en el contenido COP de los tratamientos TPa y TV2 (22 y 50%, respectivamente). El aumento de la fracción más dinámica obligaría a considerar también la dinámica del sistema, es decir, que las diferencias encontradas se mantendrán en la medida en que las condiciones sean semejantes.

El análisis de los efectos de la secuencia de cultivos y la fertilización sobre los contenidos de CO (Mg ha^{-1}) demostró que existieron algunas diferencias respecto a los resultados descriptos en base a los valores de concentración. Al considerar la cantidad de COT se incluyen los efectos de estos sistemas sobre la DA. Miglierina *et al.* (2000), luego de 15 años de comenzado este mismo ensayo, encontraron importantes diferencias en la DA en el tratamiento TV2, consecuencia de la incorporación de un gran volumen de residuos que no alcanzó a descomponerse durante el ciclo del cultivo. En este mismo estudio, se encontraron pequeñas diferencias en las propiedades químicas del suelo estudiadas entre las secuencias de cultivos. En cambio, el COT y el Nt mostraron respuestas positivas a la fertilización en todos los casos.

Ellert y Bettany (1995) plantearon que los métodos convencionales para el cálculo de diferencias en el almacenamiento de MO entre sistemas basados en su concentración o su cantidad en un determinado espesor de suelo, no tienen totalmente en cuenta la variación de la masa del mismo. Por ello, propusieron el uso de la “masa equivalente de suelo” como método de comparación más exacto para evaluar diferencias en el contenido de C y N. De

esta forma se eliminaría la influencia de dichas diferencias causadas por el manejo, mejorando las comparaciones (Steinbach y Alvarez, 2006). Uno de los supuestos básicos es que las masas de suelo no cambian entre los tratamientos, lo que no siempre ocurre, como por ejemplo, cuando existen diferencias en la cantidad o tipo de labranzas (Galantini e Iglesias, 2007). En base a esto, se analizaron las diferencias en el COT entre dos tratamientos contrastantes, con y sin fertilización, aplicando los criterios citados: concentración (g kg^{-1}), cantidad de COT (Mg ha^{-1}) en la profundidad 0-20 cm y cantidad de COT (Mg ha^{-1}) en una misma masa de suelo (2400 Mg ha^{-1}) (Tabla 13). En general, las diferencias porcentuales para COT y COM entre todos los manejos respecto de TT resultaron, similares a las calculadas a partir de los valores de concentración y cantidad en una masa equivalente de suelo.

Tabla 13: Diferencia porcentual en el COT del suelo en sistemas con y sin fertilización según distintas formas de evaluación.

	COT					
	TT nf	TPa nf	Difer. %	TT f	TPa f	Difer. %
Cantidad en 0-20 cm	35,6	44,8	26	39,7	47,0	18
Cantidad Masa Equiv.	34,3	43,7	27	36,8	44,9	22
Concentración en 0-20 cm	1,4	1,8	28	1,5	1,9	23

TT, trigo continuo TPa, 5 años trigo - 5 años pastura consociada. nf (sin fertilización), f (fertilizado).

Los cambios en N total del suelo se debieron principalmente al N asociado a la materia orgánica particulada (N-MOP) que reflejó las principales diferencias entre las secuencias de cultivos. Como se ha documentado en otros trabajos, la MOP es una fracción muy dinámica, por lo que las diferencias entre sistemas podrían ser de carácter relativo y variables en el tiempo. Por ejemplo, las cantidades determinadas correspondieron a aquellas presentes durante el cultivo de trigo luego de un prolongado barbecho, el cual suministró cantidades

muy diferentes de N disponible a la siembra de este cultivo. Las diferencias entre TV1 y TV2 podrían estar asociadas a la velocidad de transformación.

Considerando al trigo como una fuente importante de materia seca pero de menor calidad para la descomposición, y que los verdeos de invierno consociados aportan residuos de muy alta calidad, en la secuencia TV1 se aceleraría la transformación de todo el material. Si bien los valores de MOP fueron menores el ciclado de nutrientes sería mucho mayor y esto se reflejaría en mayor productividad del trigo.

B. EFECTOS DE CORTO PLAZO

Teniendo en cuenta que se trata de sistemas productivos de 30 años de efectos acumulados, tiempo suficiente para que algunas fracciones orgánicas alcancen su equilibrio, las diferencias observadas debieron analizarse en función del cultivo y las condiciones climáticas presentes. La Figura 5 presenta la distribución mensual de las lluvias durante los años 2002, 2004 y 2006 y la necesidad teórica de agua de los cereales de invierno para el área de Bordenave (Paoloni y Vázquez, 1985). El conocimiento de las características meteorológicas de los años estudiados es importante para entender su efecto sobre la dinámica del carbono en el sistema.

- ▶ 2002 fue un año con un alto nivel de precipitaciones durante el primer semestre; condición propicia para la descomposición de MO lábil y durante los meses de mayor requerimiento del trigo, por lo que este último produjo una alta cantidad de materia seca.
- ▶ En 2004 se dieron altas precipitaciones otoño invernales por lo que se vio favorecido el desarrollo del verdeo de invierno (avena+vicia) en TV2 y la descomposición de la MO durante el barbecho anterior al trigo en TV1. Esto explicó los mayores valores de COT en el primero respecto del segundo.

- El 2006 fue un año con precipitaciones por debajo de lo normal (584 mm), concentradas principalmente en dos meses de alta evapotranspiración (284 mm en septiembre y octubre). Por otra parte, si bien durante el periodo de barbecho la figura de precipitaciones mensuales mostró buenos niveles de lluvia para el desarrollo del trigo, estas se concentraron en lapsos cortos (en febrero, 100 mm durante un mismo día). Fue precedido por otro año seco con 487,5 mm. Este marcado déficit de humedad determinaría condiciones para una baja descomposición de la MO.

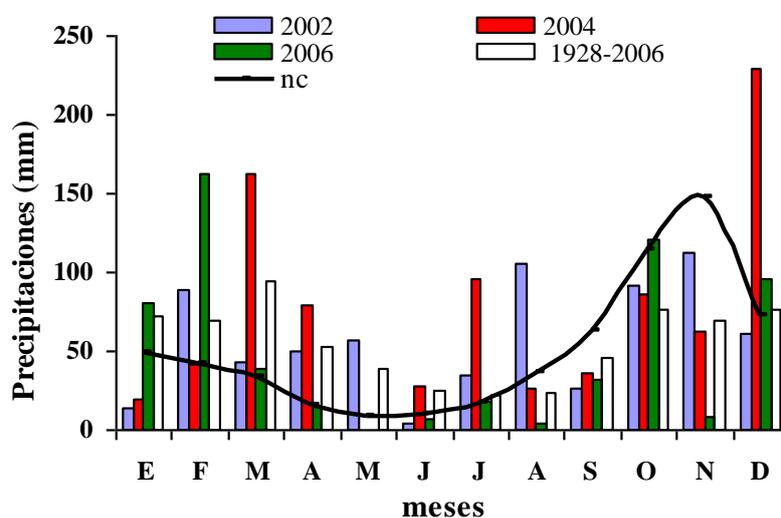


Figura 5: Precipitaciones mensuales (mm) ocurridas durante los años 2002, 2004, 2006, valores medios históricos; período 1928-2006 y necesidad hídrica de los cereales de invierno (nc) para el área de Bordenave (Paoloni y Vazquez, 1985).

Contenido de CO total y sus fracciones

En general, durante los tres años estudiados se observó interacción significativa entre los efectos de la secuencia de cultivos y la fertilización, tanto para la cantidad COT como de COM y COP (Tabla 14). Los tratamientos mostraron contenidos variables de COT en el tiempo, con tendencias diferentes según el periodo considerado (Tabla 15). Estas tendencias estarían asociadas no solamente al efecto de la secuencia de cultivos, por el cultivo presente

al momento del muestreo y su antecesor, sino también a las características meteorológicas, en especial la disponibilidad hídrica. El efecto de la fertilización fue también variable, aunque en la mayoría de los casos no significativo. Estos resultados coincidieron con los de otros autores, donde no siempre el efecto del uso de fertilizantes fue positivo sobre el balance de C en el suelo (González Montaner *et al.*, 2004; Galantini y Rosell, 2006; Andriulo, 2008). La eficiencia en la utilización del nutriente aplicado sería un factor clave y determinante de los resultados (Galantini y Suñer, 2008). En general las tendencias en la cantidad de COT indicaron valores crecientes en TT y TV2 nf, estables en TT y TV2 f y una disminución con posterior incremento en TV1, mientras que, en TPa, se observó una caída del COT durante el periodo agrícola en concordancia con lo observado por otros autores (Casanovas *et al.*, 1995). En TT el cambio en el COT mostró como el sistema se comportó de manera diferente según años climáticos distintos. El año 2006 fue bastante seco y si bien en el monocultivo no fertilizado existió una menor cantidad de MS producida, también ocurrió una menor descomposición de los residuos. En cambio en TT f la cantidad de C se mantuvo estable en el tiempo. La mayor disponibilidad de N podría haber promovido la descomposición de los residuos durante el 2006.

Comparando los tratamientos con VIC, en 2004 se observó una importante caída en el COT vía descomposición en TV1 respecto del sistema TV2 el cual coincidió con vicia. Esto podría explicarse a partir de que al mismo tiempo que TV1 tuvo un barbecho largo (aproximadamente 7 meses) con condiciones de buena humedad y N, el suelo en TV2 al estar cultivado tuvo un tiempo de barbecho menor, con menos N y humedad disponibles para la descomposición de residuos.

Los cambios observados en las diferentes profundidades de los distintos tratamientos fueron pequeños y la dinámica en cada capa analizada fue similar. En el año 2006, en TV2 se observó una pequeña acumulación de COT en superficie, esto podría deberse a que

correspondió al primer trigo luego de dos VIC y además, a la escasa humedad para la descomposición. Los factores que regulan la descomposición del material orgánico en estos suelos, disponibilidad de agua y N, produjeron cambios mucho más importantes que la rotación (Galantini y Rosell, 2006).

Tabla 14: Valores “p” de significación de los ANOVA para los efectos de la secuencia de cultivos (SC), la fertilización (F) y su interacción (SCxF), sobre carbono orgánico total y sus fracciones, en los 0-20 cm del suelo; años 2002, 2004 y 2006.

Año	COT			COM			COP		
	Fuente de Variación								
	SC	F	SC x F	SC	F	SC x F	SC	F	SC x F
2002	0,0046	0,0038	0,0787	0,0017	0,0435	0,0163	0,0131	<0,0001	<0,0001
2004	0,0066	0,2271	0,0083	0,0049	0,1614	0,0086	0,0003	0,9205	0,0055
2006	0,1463	0,4057	0,0097	0,2047	0,3421	0,1198	0,1892	0,8664	<0,0001

Carbono orgánico total (COT); asociado a la fracción mineral (COM) y particulado (COP).

Tabla 15: Contenido (Mg ha^{-1}) de carbono orgánico total (COT) de suelo bajo diferentes secuencias de cultivos con (f) y sin (nf) fertilización.

COT (Mg ha^{-1})		TT		TV1		TV2		TPa	
Año	Prof	nf	f	nf	f	nf	f	nf	f
2002	0-5	9,1	10,8	11,3	11,8	10,1	10,6	11,6	12,3
	5-10	9,1	10,4	12,1	12,2	10,7	10,9	12,1	13,0
	10-20	17,4	18,5	21,5	21,1	18,8	18,5	21,1	21,7
	0-20	35,6	39,7**	44,9	45,1	39,5	40,0	44,8	47,0*
2004	0-5	8,9	11,2	10,1	10,5	10,9	10,7	11,9	11,7
	5-10	9,5	10,8	10,6	10,0	10,8	10,8	12,2	12,6
	10-20	17,5	18,6	17,6	16,1	17,9	17,7	20,0	20,4
⁽¹⁾	0-20	36,0	40,5**	38,3	36,6	39,6	39,2	44,0	44,7
2006	0-5	9,9	10,5	10,3	11,1	12,2	11,0	10,7	10,7
	5-10	9,9	10,6	9,9	10,9	11,3	11,4	11,3	11,7
	10-20	19,0	18,6	18,9	20,4	21,7	19,1	20,0	21,5
⁽¹⁾	0-20	38,8	39,6	39,1	42,4*	45,1	41,5*	42,0	43,8

TT, trigo continuo; TV1, 1 año trigo - 1 año verdeos de invierno consociados; TV2, 2 años trigo - 2 años verdeos de invierno consociados; TPa, 5 años trigo - 5 años pastura consociada. En cada año, ⁽¹⁾ Interacción significativa; efecto significativo de la fertilización en cada secuencia de cultivo *, $p \leq 0,05$ y **, $p \leq 0,01$.

La cantidad de COM reflejó los cambios debidos a la secuencia de cultivos y a los factores que regulan la transformación de los residuos así como los que modifican la humificación y descomposición de la MO asociada a la fracción fina del suelo (Tabla 16). Dentro del material asociado a la fracción fina existen compuestos solubles y sustancias húmicas más sensibles a los cambios de corto plazo (ácidos fúlvicos). Deberían hacerse estudios específicos para el aislamiento de esta parte más dinámica del COM.

El COP es muy dinámico debido a su sensibilidad respecto a las características del suelo (Galantini *et al.*, 2004), el manejo (Galantini *et al.*, 2002) y los factores climáticos (Galantini y Rosell, 2006). Esto se observó con claridad en el tratamiento TPa donde durante el año 2002 se dio un elevado aporte de materia seca del trigo (cerca de 7500 kg residuos ha⁻¹) que no se detectó en el suelo en el año 2004 (Tabla 17). Los valores de COP confirmaron que la fertilización no aumentó la cantidad de esta fracción, al menos en las condiciones particulares de este ensayo donde la eficiencia de utilización del fertilizante fue diferente entre los tratamientos. En los tratamientos TV2 y TPa los niveles de COP y sus oscilaciones a través de los años fueron superiores. El efecto de la pastura se mantuvo durante los años de agricultura con trigo. La mayor fertilidad inicial (primer trigo) hizo que la producción y el ciclado de nutrientes sean mayores en este periodo.

Escasas diferencias entre los tratamientos no fertilizados con leguminosas y fertilizados reflejaron el efecto benéfico de la fijación biológica y probablemente los cambios en la disponibilidad de P. Si bien el aporte de N pudo ser significativo, esto no se reflejó totalmente en los rendimientos obtenidos. Es decir, que la inclusión de N en forma biológica dentro de estos sistemas requerirá de una estrategia diferente de fertilización respecto a la situación del monocultivo de trigo.

Tabla 16: Contenido (Mg ha^{-1}) de carbono orgánico asociado a la fracción mineral (COM) de suelo bajo diferentes secuencias de cultivos con (f) y sin (nf) fertilización.

COM (Mg ha^{-1})		TT		TV1		TV2		TPa	
Año	Prof	nf	f	nf	f	nf	f	nf	f
2002	0-5	8,3	9,6	10,2	10,6	8,9	9,0	10,0	10,2
	5-10	8,4	9,5	11,0	11,2	9,5	9,5	10,8	11,2
	10-20	15,9	17,7	20,1	20,2	17,6	16,3	19,2	19,7
⁽¹⁾	0-20	32,6	36,8 **	41,4	42,0	35,9	34,8	40,0	41,2
2004	0-5	8,2	10,2	8,7	9,1	9,7	9,5	10,6	10,5
	5-10	8,9	9,9	9,5	8,7	9,8	9,9	11,2	11,6
	10-20	16,9	17,7	17,0	15,5	16,5	17,2	19,4	19,6
⁽¹⁾	0-20	34,0	37,8 **	35,2	33,4	36,0	36,6	41,2	41,8
2006	0-5	9,0	9,0	9,1	9,8	10,5	9,6	9,4	9,3
	5-10	9,0	9,9	8,9	9,6	9,8	10,2	9,9	10,3
	10-20	17,5	17,5	18,1	18,9	19,8	18,2	18,7	19,5
	0-20	35,5	36,4	36,1	38,3 *	40,0	38,0 *	37,9	39,1

TT, trigo continuo; TV1, 1 año trigo - 1 año verdes de invierno consociados; TV2, 2 años trigo - 2 años verdes de invierno consociados; TPa, 5 años trigo - 5 años pastura consociada. En cada año, ⁽¹⁾ Interacción significativa; efecto significativo de la fertilización en cada secuencia de cultivo *, $p \leq 0,05$ y **, $p \leq 0,01$.

Tabla 17: Contenido (Mg ha^{-1}) de carbono orgánico particulado (COP) de suelo bajo diferentes secuencias de cultivos con (f) y sin (nf) fertilización.

COP (Mg ha^{-1})		TT		TV1		TV2		TPa	
Año	Prof	nf	f	nf	f	nf	f	nf	f
2002	0-5	0,8	1,2	1,1	1,2	1,2	1,6	1,6	2,1
	5-10	0,7	0,9	1,0	1,1	1,2	1,4	1,3	1,7
	10-20	1,5	0,8	1,3	0,9	1,2	2,2	1,9	2,0
⁽¹⁾	0-20	3,0	2,9	3,5	3,2	3,5	5,3**	4,7	5,8*
2004	0-5	0,7	1,0	1,4	1,3	1,3	1,2	1,3	1,1
	5-10	0,6	0,8	1,1	1,3	1,0	0,9	0,9	0,9
	10-20	0,6	0,8	0,6	0,6	1,3	0,5	0,6	0,8
⁽¹⁾	0-20	2,0	2,7*	3,1	3,2	3,6	2,6*	2,8	2,9
2006	0-5	0,9	1,5	1,2	1,3	1,8	1,4	1,4	1,3
	5-10	0,9	0,7	1,0	1,3	1,5	1,2	1,4	1,4
	10-20	1,5	1,1	0,9	1,5	1,7	0,9	1,3	2,0
⁽¹⁾	0-20	3,4	3,3	3,1	4,0*	5,0	3,5*	4,2	4,7

TT, trigo continuo; TV1, 1 año trigo - 1 año verdes de invierno consociados; TV2, 2 años trigo - 2 años verdes de invierno consociados; TPa, 5 años trigo - 5 años pastura consociada. En cada año, ⁽¹⁾ Interacción significativa; efecto significativo de la fertilización en cada secuencia de cultivo *, $p \leq 0,05$ y **, $p \leq 0,01$.

CAPÍTULO II

EFFECTOS DEL MANEJO SOBRE EL EQUILIBRIO DE DIFERENTES FORMAS DE FÓSFORO EDÁFICO

INTRODUCCIÓN

La capacidad del suelo para proveer P es muy variable, ya que sólo una parte del mismo se encuentra disponible para las plantas. El contenido de P total de los suelos depende del material originario, su grado de meteorización, la ocurrencia de lavado y los efectos antrópicos por el uso agronómico (extracción por cosechas, fertilización, abono). La concentración de P total de los suelos varía de 100 a 3000 mg P kg⁻¹ (Sharpley, 2000).

Las plantas absorben el P desde la fracción soluble en el suelo, la cual se reabastece de una fracción lábil o moderadamente lábil de naturaleza orgánica e inorgánica. Esta fracción de P lábil está en equilibrio con fracciones de muy baja labilidad. Las fracciones minerales contribuyen en menor medida al P soluble. Dada la baja concentración de P soluble, el abastecimiento de P desde la fracción lábil es de extrema importancia para garantizar un adecuado suministro a las plantas. La proporción del P total en forma orgánica o inorgánica varía de acuerdo a las condiciones de suelo y clima y diversos factores edáficos de distinta naturaleza afectan su disponibilidad para los cultivos. A nivel físico se destacan la textura, la temperatura, la humedad y la aireación del suelo (PPI, 1999). A nivel químico interactúan la mineralogía, el pH, la capacidad de intercambio, la MO y la presencia de otros nutrientes (Salas *et al.*, 2003; Darwich, 2005; Kooijman *et al.*, 2005). El pH del suelo ha sido indicado como el factor más importante en la regulación del P disponible (Sharpley, 2000), considerando en general que la disponibilidad de P es óptima a pH entre 6-7. La presencia de residuos, raíces y micorrizas actúan modificando el ciclado de P al incrementar la actividad biológica. Los factores del cultivo que influyen sobre su disponibilidad son el desarrollo y distribución de raíces, las diferencias entre especies y variedades, en lo que hace a requerimientos y el nivel de rendimiento, al afectar la cantidad total de P absorbido (Vance *et al.*, 2003).

El P disponible para el cultivo es principalmente de origen inorgánico aunque el P orgánico (Po) cumple también un papel importante sobre la nutrición de las plantas. Su efecto es indirecto ya que se encuentra en formas química y/o físicamente protegidas y debe mineralizarse a partir de la MO antes de estar disponible (Stewart y Tiessen, 1987; Tiessen *et al.*, 1994). La consideración del Po dentro del sistema provee información útil para evitar una fertilización excesiva y sus indeseables consecuencias ambientales (Heredia y Fernández Cirelli, 2007). Además la cuantificación de la velocidad de mineralización del Po en distintas condiciones, permitiría la inclusión de datos reales en los modelos que se utilicen.

Las pérdidas de P en suelos bajo cultivo ocurren a través de la remoción de los productos de cosecha y por erosión o escurrimiento. Cuando los suelos se cultivan, la MO disminuye rápidamente por lo que los primeros efectos se observan en la caída del Po (Tate 1984; Bowman *et al.*, 1991). La labranza aérea y mezcla el suelo, causando la ruptura física de los agregados por intensificación de los ciclos de humectación y secado y acelerando la descomposición biótica y abiótica de la MO (Dormaar y Carefoot, 1996). El Po pasa de esta manera a formas disponibles para los cultivos. Una pérdida de MO del 1% puede representar la disminución de 120-200 kg ha⁻¹ de Po de la capa superficial del suelo (Tiessen *et al.*, 1984; Stevenson y Cole, 1999), el cual puede ser pasar a otras formas o ser absorbido por los cultivos y exportado del sistema. En el sudoeste de la provincia de Buenos Aires se encontró que el P orgánico representa entre el 29 y 51% de la reserva total de este elemento (Galantini *et al.*, 1997; Migliarina *et al.*, 2000) en concordancia con estudios realizados por Vázquez (2001), donde la fracción orgánica alcanzó en promedio, el 54% del P orgánico total, para los suelos con balance negativo del mismo. Según Tiessen *et al.* (1994), el P exportado por los cultivos durante los primeros 40-60 años de agricultura fue mucho menor que el disponible a través de la descomposición de la MO. Ellos indicaron que el exceso de P inorgánico precipitó en forma de compuestos de baja solubilidad como por ejemplo, la apatita. Es decir,

la agricultura produce un importante impacto sobre la disponibilidad de P para los cultivos, tanto por extracción a través de las cosechas como transformando las formas lábiles en formas de baja solubilidad (Bra *et al.*, 2006; Papiernik *et al.*, 2007). Así, cambios en el ambiente edáfico alteran los equilibrios del P, afectando su disponibilidad en el corto, mediano y largo plazo. La intensa interacción de los fosfatos con la matriz del suelo no permite predecir fácilmente los efectos de un determinado balance de P en la disponibilidad de este nutriente en el agro ecosistema. La absorción del P depende en gran medida del grado en que las raíces exploran los diferentes dominios del suelo, en tiempo y espacio (Barber, 1995). Además, los cambios netos en la fuente de Po de suelos cultivados son usualmente muy pequeños en relación al tamaño de la fuente total. En este sentido, los ensayos a campo de larga duración constituyen una herramienta valiosa para detectar cambios significativos en el estudio del comportamiento y transformaciones del P del suelo en situaciones contrastantes de rotaciones agrícolas y aporte de fertilizante fosfatado (Friesen y Blaier, 1988).

P extraíble en suelos de la Región Pampeana argentina

En la región pampeana argentina, los contenidos de P total de los suelos agrícolas son relativamente altos y variables de 200 a 800 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Giuffré, 2005). No obstante, sólo una pequeña fracción que varía comúnmente entre 5 y 20 $\mu\text{g g}^{-1}$ está disponible para los cultivos (García, 2001). Es decir, en un suelo que no contenga cantidades disponibles relativamente adecuadas o de formas rápidamente utilizables (como fertilizantes) los cultivos sufrirán deficiencias, aún cuando la reserva de P total en el suelo exceda ampliamente sus requerimientos.

Para la determinación de P disponible en el suelo en esta región se utiliza normalmente el P extraíble por el método de P Bray-1 (Darwich, 1983; Berardo *et al.*, 1997; Echeverría y García, 1998). Los suelos presentan niveles de P Bray-1 originales bajos ($< 10 \mu\text{g g}^{-1}$) hacia el sudeste de Buenos Aires y Entre Ríos y niveles medios (10-20) a adecuados ($> 20 \mu\text{g g}^{-1}$)

hacia el oeste de la región (García *et al.*, 2001). Desde los noventa, la continua remoción en los granos y forrajes y la baja reposición del nutriente vía fertilización, en orden del 40-50% del P extraído por los granos, ha agudizado la disminución de los niveles de P extraíble. En la actualidad, numerosos suelos del oeste pampeano, en las provincias de Santa Fe, Córdoba, La Pampa y Buenos Aires, presentan contenidos de P Bray menores de $10 \mu\text{g g}^{-1}$ (Vázquez, 2002; Sainz Rozas y Echeverría, 2008). Anteriormente en el sur de la provincia de Buenos Aires, diversos estudios pusieron en evidencia deficiencias de P de los suelos (Darwich, 1980; Loewy y Puricelli, 1982). García (2006) indicó que al sur de Buenos Aires los balances de P son menos negativos o aún levemente positivos respecto al resto de la región pampeana. Sin embargo recalcó que no debería perderse de vista que en los últimos años los requerimientos de nutrientes han aumentado junto al potencial productivo por la difusión de variedades mejor adaptadas y nuevas tecnologías.

Rol de la materia orgánica particulada en el P del suelo

Conocer la cantidad y dinámica del P presente en cada una de las reservas del suelo es de vital importancia ya que la nutrición vegetal y microbiana depende del abastecimiento del P lábil y de su equilibrio con otras fracciones de menor labilidad. Varios estudios en la Región Pampeana (Hepper, 1996; Vazquez *et al.*, 2001), evidenciaron pérdidas importantes de P principalmente asociadas a las fracciones más lábiles; inorgánicas y orgánicas. Los cambios en la MOP pueden proveer información valiosa acerca del patrón de liberación del P asociado a ella y su disponibilidad para los cultivos (Galantini *et al.*, 2004). Vanlauwe *et al.* (2000), afirmaron que la dinámica de la MOP en las rotaciones con leguminosas o en barbecho natural puede influenciar significativamente el ciclado del P, sugiriendo que el contenido de P en ella juega un rol importante en cuanto a su disponibilidad en el suelo. Por ejemplo, se sabe que las leguminosas pueden solubilizar más P pero, cuando el P lábil es bajo, se produce una competencia por este nutriente entre los microorganismos y las plantas (Parfitt *et al.*, 2005).

Suñer *et al.* (2000), concluyeron que la fracción de P más rápidamente afectada por el manejo agrícola en suelos del sudoeste bonaerense fue el P de la MOP. La diferente dinámica y capacidad de reacción de estas fracciones orgánicas también se reflejarán directamente en los equilibrios del P.

Los análisis convencionales de extracción de P del suelo sin embargo, no miden la contribución potencial de los residuos y de las formas orgánicas de mayor labilidad. El fraccionamiento físico de la MO por tamaño de partícula, como ya se ha mencionado, permite analizar fracciones con propiedades y funciones diferentes en el suelo.

Evidentemente, para comprender en forma global la dinámica del P y mejorar la interpretación de los test de fertilidad se deben conocer los contenidos de P orgánico e inorgánico en las distintas fracciones edáficas, considerando el impacto que las prácticas de manejo ejercen sobre ellos. Existe escasa información respecto al efecto de las rotaciones sobre la dinámica de las formas de P ligadas a las fracciones granulométricas del suelo separadas físicamente, con lo cual podría ampliarse el conocimiento sobre el origen real del P disponible para los cultivos.

OBJETIVO ESPECÍFICO

- Evaluar el efecto de largo plazo de las rotaciones con leguminosas y la fertilización sobre la dinámica de las formas de fósforo edáficas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de este capítulo, en las muestras de suelo del año 2002, se realizaron las siguientes determinaciones analíticas:

- P extraíble (Pe); en el suelo entero (tamizado por 2 mm) por el método Bray y Kurtz (1945).

- P total extraíble (Pte); en el suelo tamizado por 2 mm, mediante digestión con ácido perclórico empleando el procedimiento de Sommers y Nelson (1972).
- P orgánico más inorgánico (Po+Pi, previa calcinación de la muestra a 550°C), inorgánico (Pi) y orgánico (Po, por diferencia), por el método de Saunders y Williams (1955), en el suelo tamizado por 2 mm y en las fracciones fina (FF) y gruesa (FG).

Para cuantificar el fósforo extraído por los diferentes métodos se aplicó la técnica colorimétrica de Watanabe y Olsen (1965).

Se estimó el “P ocluido” mediante a la diferencia entre el Pte y el Po+Pi, considerando “P ocluido”, como la fracción de P químicamente resistente, no extraída por el método de Saunders y Williams.

Teniendo en cuenta los porcentajes de fracción fina y gruesa se recalcularon los valores determinados en cada fracción, para expresar los resultados referidos al suelo entero, de la siguiente forma:

$$\text{En la FF: } P = P_{\text{determinado}} \times \text{fracción fina (\%)} / 100$$

$$\text{En la FG: } P = P_{\text{determinado}} \times \text{fracción gruesa (\%)} / 100$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. EFECTOS DE LARGO PLAZO SOBRE DISTINTAS FORMAS DE P

Fósforo en el suelo entero

Los valores de fósforo total extraíble del suelo (Pte) fueron semejantes en todos los tratamientos con tendencia a aumentar en el orden TT < TV1 < TV2 < TPa y con valores ligeramente mayores en las parcelas fertilizadas (Tabla 18).

Debe tenerse en cuenta que durante el periodo en que se fertilizó con $16 \text{ kg de P ha}^{-1}$, las parcelas con trigo en TT recibieron el doble de este nutriente que el resto de los tratamientos. Si bien la dosis aplicada fue baja, esta fue en combinación con N y en general, produjo aumentos en el rendimiento, con el consecuente aumento de la exportación de nutrientes, entre ellos el P (Galantini *et al.*, 2000). En estas condiciones es esperable que ocurra un cambio ligero en el Pte en las parcelas fertilizadas con N y P, debido a la absorción de P desde la profundidad por parte de las raíces de los cultivos y su transporte hacia horizontes superiores, más que a la acumulación de P del fertilizante.

La distribución del Pte en las diferentes capas de suelo analizadas fue homogénea. Se observó una leve tendencia a valores mayores en superficie y en la capa de 15-20 cm. Esta última profundidad se encontraría en el límite entre los horizontes A y AC, pudiendo así existir diferencias por la influencia del suelo de este último, con diferentes contenidos de P.

En relación al P_o+P_i , en los primeros 20 cm de suelo se observó interacción muy significativa entre los efectos de la secuencia de cultivos y la fertilización ($p= 0,0022$). En los tratamientos no fertilizados los niveles de P_o+P_i del suelo siguieron el orden $TPa =TT=TV2>TV1$ (Tabla 19). El efecto de la fertilización sólo fue significativo en TV1, en los 5–20 cm, donde compensó la disminución observada en TV1 respecto del resto de los tratamientos.

La fertilización en TT produjo valores de P_o+P_i mayores en superficie aunque no significativos, disminuyendo su efecto en profundidad. En TV1, la concentración de P_o+P_i fue semejante en superficie y significativamente menor en las parcelas no fertilizadas en el resto de las profundidades. Las diferencias estadísticas se localizaron sólo en los 0-5 cm. Estudios previos en suelos semejantes pusieron en evidencia que parte del P edáfico no es determinado dentro del P_o+P_i extraído por el método de Saunders y Williams (Suñer *et al.*, 2000). Esta parte del P protegida u ocluida puede ser variable dependiendo del manejo agronómico. Sistemas agrícolas con labranza continua podrían volver accesible esta fracción

del P, aumentando así su disponibilidad. Los resultados obtenidos confirmaron que los altos niveles de P_o+P_i observados se originan a partir de la solubilización de formas ocluidas de P poco disponibles en el corto plazo. En este sentido, no se observaron diferencias entre los valores de P_{te} y P_o+P_i en TT, mientras que en las rotaciones con leguminosas el P_{te} fue entre 10 y 15% mayor que la suma del P_o y P_i .

Algunos autores consideran al “fósforo ocluido” como el P adsorbido o precipitado recubierto por óxidos de hierro, silicio o carbonato de calcio, muy poco disponible para las plantas (Giuffré, 2005). Algunos complejos órgano-minerales o microagregados resisten temperaturas superiores a las utilizadas por el método de Saunders y Williams pero en cambio son detectados por medio de la digestión con ácido perclórico (Senesi y Loffredo, 1998).

La mayor concentración de P_o+P_i se encontró en los primeros centímetros, poniendo en evidencia una estratificación del P, acumulado en forma orgánica sobre la superficie y mezclado superficialmente por las labranzas.

Dos aspectos importantes a tener en cuenta acerca de las escasas diferencias encontradas entre el TT y las rotaciones con leguminosas fueron: que en TT al ser trigo todos los años, la cantidad de fertilizante aplicado fue el doble que en las rotaciones con leguminosas (en donde el trigo representa un 50% de los años de cultivo) y, por otro lado, TT tuvo el doble de labranzas que el tratamiento TPa y barbechos más largos que los tratamientos TV. Es por esto que algunas formas de P ocluido podrían haberse incorporado al compartimento inorgánico. En síntesis, el efecto de la secuencia de cultivos sobre el contenido de P_o+P_i se puso de manifiesto cuando los tratamientos no recibieron fertilizante.

La concentración de P_i en los 0-20 cm fue semejante entre los tratamientos con leguminosas y menor que en TT (Tabla 20). Evidentemente, la mayor disponibilidad de N y los cambios

en el pH del suelo generados por las leguminosas favorecerían el ciclado de nutrientes promoviendo los equilibrios del P hacia sus formas orgánicas (Rosell *et al.*, 2000).

No se detectaron cambios significativos por la fertilización, salvo en TV1 ($p=0,0177$), sin embargo las tendencias observadas fueron variables, ya que en TT, TV1 y TV2 se produjeron incrementos por la fertilización mientras que en TPa el Pi disminuyó.

En TPa, durante los 5 años agrícolas con fertilización se generaría una mayor disponibilidad de formas inorgánicas que lentamente pasarían a la fracción orgánica durante el periodo con pastura. En cambio, en los tratamientos con VIC, los ciclos cortos con verdeos estimularían la rápida descomposición de la MO durante el período agrícola, favoreciendo los equilibrios desde Po hacia el Pi.

La distribución del Po en los 0-20 cm de profundidad en TT fue relativamente homogénea, con tendencia a disminuir en profundidad (Tabla 21). La fertilización produjo aumentos significativos del Po en TT en los primeros 5 cm del suelo posiblemente por la mejora en la producción de MS del cultivo. En los tratamientos con leguminosas la variabilidad fue mayor. La compactación producida durante el pastoreo animal de la pastura, junto con la acumulación superficial de materia seca generaría variabilidad en la distribución de las formas orgánicas y en la velocidad de mineralización. El análisis estadístico mostró la existencia un efecto diferencial de la fertilización entre las secuencias de cultivos sobre la concentración de Po ($p=0,0045$). Entre los tratamientos no fertilizados los valores más bajos correspondieron a TV1, los intermedios a TT y TV2 y los mayores a TPa. Los 5 años previos al muestreo de suelo en TPa correspondieron a un periodo de acumulación de formas orgánicas, hecho que explicaría las diferencias encontradas. En el resto de las secuencias, con labranzas anuales, los ciclos de acumulación serían menores y la mineralización más rápida, siendo TV1 el caso extremo, donde la acumulación de MO de fácil descomposición durante el año con leguminosas estimularía la mineralización durante el año con trigo. El

efecto significativo de la fertilización se observó en este tratamiento sugiriendo que la inclusión de leguminosas si bien puede favorecer la producción del cultivo siguiente, lo hace a expensas de una rápida descomposición de la MO lábil. Estos resultados indican la necesidad de reposición de los nutrientes extraídos para mantener la productividad del suelo. Esto es, el aumento del potencial productivo genera mayores exportaciones con balances cada vez más negativos, lo cual debería ser especialmente considerado (García, 2006).

Tabla 18: Concentración ($\mu\text{g g}^{-1}$) de fósforo total extraíble (Pte) en suelo bajo diferentes secuencias de cultivos con (f) y sin (nf) fertilizante.

Prof (cm)	Pte ($\mu\text{g g}^{-1}$)							
	TT		TV1		TV2		TPa	
	nf	f	nf	f	nf	f	nf	f
0-5	506 a	504 a	501 a	589 bcd	541 ab	552 abc	599 cd	633 d
5-10	506 a	497 a	498 a	530 ab	528 ab	529 ab	539 b	550 b
10-15	473 ab	486 b	509 bc	509 bc	444 a	546 c	469 a	544 c
15-20	469 a	496 ab	479 a	520 ab	512 ab	563 bc	534 bc	577 c
0-20	489 a	496 a	497 a	537 b	506 ab	548 bc	535 b	576 c

TT, trigo continuo; TV1, 1 año trigo - 1 año verdeos de invierno consociados; TV2, 2 años trigo - 2 años verdeos de invierno consociados; TPa, 5 años trigo - 5 años pastura consociada. Letras distintas en una misma fila indican diferencias mínimas significativas ($p \leq 0,05$).

Tabla 19: Concentración ($\mu\text{g g}^{-1}$) de fósforo orgánico e inorgánico (Po+Pi) en suelo bajo diferentes secuencias de cultivos con (f) y sin (nf) fertilización.

Prof (cm)	Po + Pi ($\mu\text{g g}^{-1}$)							
	TT		TV1		TV2		TPa	
	nf	f	nf	f	nf	f	nf	f
0-5	502 bcd	541 d	452 a	480 abc	476 ab	523 bcd	530 d	521 bcd
5-10	484 abc	523 cd	447 a	546 d	463 ab	488 bc	503 bc	492 bc
10-15	484 abc	494 bc	447 a	507 bc	458 ab	463 ab	486 abc	485 abc
15-20	466 ab	460 ab	432 a	481 b	484 b	473 b	468 ab	459 ab
0-20	484 bc	504 c	445 a	504 c	470 b	487 bc	497 c	489 bc

TT, trigo continuo; TV1, 1 año trigo - 1 año verdeos de invierno consociados; TV2, 2 años trigo - 2 años verdeos de invierno consociados; TPa, 5 años trigo - 5 años pastura consociada. Letras distintas en una misma fila indican diferencias mínimas significativas ($p \leq 0,05$).

Tabla 20: Concentración ($\mu\text{g g}^{-1}$) de fósforo inorgánico (Pi) en suelo bajo diferentes secuencias de cultivos con (f) y sin (nf) fertilización.

Prof (cm)	Pi ($\mu\text{g g}^{-1}$)							
	TT		TV1		TV2		TPa	
	nf	f	nf	f	nf	f	nf	f
0-5	328 ab	341 b	326 ab	314 ab	306 a	327 ab	331 ab	304 a
5-10	317 a	336 b	306 a	331 b	290 a	307 a	311 a	297 a
10-15	311 ab	321 b	294 a	329 b	290 a	288 a	291 a	288 a
15-20	294 ab	312 b	277 a	315 b	296 ab	305 b	290 ab	277 a
0-20	313 bcd	328 d	301 ab	322 cd	295 ab	307 abc	306 abc	291 a

TT, trigo continuo; TV1, 1 año trigo - 1 año verdeos de invierno consociados; TV2, 2 años trigo - 2 años verdeos de invierno consociados; TPa, 5 años trigo - 5 años pastura consociada. Letras distintas en una misma fila indican diferencias mínimas significativas ($p \leq 0,05$).

Tabla 21: Concentración ($\mu\text{g g}^{-1}$) de fósforo orgánico (Po) de suelo bajo diferentes secuencias de cultivos con (f) y sin (nf) fertilización.

Prof (cm)	Po ($\mu\text{g g}^{-1}$)							
	TT		TV1		TV2		TPa	
	nf	f	nf	f	nf	f	nf	f
0-5	174 bc	200 d	126 a	166 b	170 b	196 cd	200 d	217 d
5-10	167 ab	186 ab	141 a	215 bc	173 ab	181 ab	192 ab	196 b
10-15	173	173	153	178	168	174	195	197
15-20	172 abc	148 a	156 ab	166 abc	189 c	169 abc	178 bc	182 c
0-20	172 b	177 bc	147 a	181 bc	175 b	180 bc	191 cd	198 d
Po/ Po+Pi 0-20 (%)	35,3	35,4	32,5	35,7	37,2	36,9	38,5	40,3

TT, trigo continuo; TV1, 1 año trigo - 1 año verdes de invierno consociados; TV2, 2 años trigo - 2 años verdes de invierno consociados; TPa, 5 años trigo - 5 años pastura consociada. Letras distintas en una misma fila indican diferencias mínimas significativas ($p \leq 0,05$).

Fósforo en las fracciones fina y gruesa

La diferencia en la dinámica y función de las fracciones orgánicas del suelo separadas por tamizado hacen que sea importante analizar sus contenidos de P separadamente. En la fracción fina se encuentran el Pi unido a las partículas minerales de menor tamaño, las que aportan en forma directa al P disponible, y el Po unido a la MO más resistente. En la fracción gruesa se encuentran el Pi en partículas de mayor tamaño, el cual requiere más tiempo para llegar a estar disponible, y el Po de la MOP que es muy dinámico (Picone *et al.*, 1999; Suñer *et al.*, 2002, Suñer, 2007).

Los efectos de las secuencias de cultivos y la fertilización sobre las formas orgánicas e inorgánicas de P de la FF resultaron conforme a los descriptos para el suelo sin fraccionar. En general, los valores de Pi disminuyeron en profundidad en forma gradual (Tabla 22). En los 0-20 cm la concentración de Pi fue semejante entre los tratamientos TV2 y TPa y menor que en TV1 y TT. La respuesta a la fertilización fue significativa sólo en estos últimos tratamientos, con valores máximos en TT f.

La distribución del Po en la FF fue homogénea en TT y TPa y con mayor variabilidad en las secuencias TV. En los suelos nf de las parcelas con VIC, se observó una mayor concentración de Po por debajo de la profundidad límite de labranzas (Tabla 23). Los valores más bajos de Po de 0-20 cm entre los tratamientos nf se encontraron en TV1 y TV2, intermedios en TT y los mayores en TPa. En la FF el efecto significativo de la fertilización sobre el Po se observó en TPa, disminuyendo su concentración. Esto sugeriría que si bien en esta rotación existen cambios importantes sobre la acumulación de residuos en el suelo, *per se* de baja relación C:N, durante los 5 años con pastura, esto podría ser enmascarado por el uso de fertilizantes nitrogenados durante los años bajo cultivo, acelerando la descomposición y transformación a formas inorgánicas del Po de los residuos. Estas formas inorgánicas, a su vez podrían ser exportadas por los cultivos y/o pasar a formar parte de algún tipo de mineral insoluble. Sin embargo esto no fue detectado en este estudio ya que la disminución del Po en TPa f de la FF del suelo no se vio reflejada en aumentos del Pi en la misma ni tampoco en aumentos del Po en la FG, como se verá a continuación.

Tabla 22: Concentración ($\mu\text{g g}^{-1}$) de fósforo inorgánico (Pi) en la fracción fina de suelo bajo diferentes secuencias de cultivos con (f) y sin (nf) fertilización.

Prof (cm)	Pi ($\mu\text{g g}^{-1}$)							
	TT		TV1		TV2		TPa	
	nf	f	nf	f	nf	f	nf	f
0-5	258 abc	298 d	277 bcd	282 cd	243 a	240 a	252 ab	259 abc
5-10	257 abc	292 d	264 bc	273 cd	241 a	242 ab	248 ab	242 ab
10-15	248 bc	286 d	253 bc	266 cd	231 ab	219 a	222 a	226 a
15-20	230 a	266 b	238 a	276 b	226 a	213 a	212 a	216 a
0-20	249 abc	285 d	258 bc	274 cd	235 ab	228 ab	234 ab	236 ab

TT, trigo continuo; TV1, 1 año trigo - 1 año verdes de invierno consociados; TV2, 2 años trigo - 2 años verdes de invierno consociados; TPa, 5 años trigo - 5 años pastura consociada. Letras distintas en una misma fila indican diferencias mínimas significativas ($p \leq 0,05$).

Tabla 23: Concentración ($\mu\text{g g}^{-1}$) de fósforo orgánico (Po) en la fracción fina de suelo bajo diferentes secuencias de cultivos con (f) y sin (nf) fertilización.

Prof (cm)	Po ($\mu\text{g g}^{-1}$)							
	TT		TV1		TV2		TPa	
	nf	f	nf	f	nf	f	nf	f
0-5	180 bc	165 abc	138 a	144 a	154 ab	162 abc	188 c	156 ab
5-10	144 a	182 ab	142 a	140 a	161 ab	177 ab	192 b	161 ab
10-15	158 a	152 a	161 a	158 a	126 a	149 a	178 a	159 a
15-20	183 c	175 c	174 c	120 a	191 c	162 bc	171 c	130 ab
0-20	166 b	169 cd	154 abc	141 a	158 abc	162 bc	183 d	151 ab
Po/ Po+Pi 0-20 (%)	40,1	37,8	37,7	34,1	40,0	41,5	43,9	39,1

TT, trigo continuo; TV1, 1 año trigo - 1 año verdes de invierno consociados; TV2, 2 años trigo - 2 años verdes de invierno consociados; TPa, 5 años trigo - 5 años pastura consociada. Letras distintas en una misma fila indican diferencias mínimas significativas ($p \leq 0,05$).

Se observó que la variabilidad en la concentración de las distintas formas P aumentó a medida que se analizaron las distintas fracciones del suelo, y dentro de ellas, a medida que se analizaron las fracciones más lábiles del P. Así, la variación de los valores de P en la FG, y principalmente los del Po resultó elevada, motivo por el cual los resultados en la FG se discutieron en base a igualdades y tendencias de cambio.

En general, los valores de Po+Pi en la FG de 0-20 cm aumentaron en el sentido $TT < TV1 < TV2 < TPa$ con valores superiores en menor o mayor medida en las parcelas fertilizadas.

La distribución del Pi de la FG fue relativamente homogénea en profundidad (Tabla 24). Los mayores valores se observaron en los tratamientos TV2 y TPa, los intermedios en TV1 y los menores en TT. En cuanto al Po de la MOP, en las parcelas nf, TT y TPa presentaron valores de Po similares entre sí y casi duplicando al de los tratamientos TV (Tabla 25).

La fertilización produjo efectos variables entre los sistemas de cultivo. En TPa, no se observaron efectos importantes o tendencias claras de cambio en las concentraciones de ninguna de las formas de P analizadas. Por otra parte, la fertilización favoreció el aumento del Po+Pi en TT y TV1 debido principalmente a aumentos importantes en las formas

orgánicas de P (Tabla 25). En cambio, en TV2 el efecto principal de la fertilización ocurrió a través de aumentos en la concentración de Pi, sugiriendo nuevamente una velocidad mayor de descomposición de los residuos incorporados al suelo y su transformación rápida hacia formas inorgánicas (Tabla 24). Estos resultados confirmaron el mayor reciclado de las formas de P en la FG, las que representan la fracción más dinámica.

Tabla 24: Concentración ($\mu\text{g g}^{-1}$) de fósforo inorgánico (Pi) en la fracción gruesa de suelo bajo diferentes secuencias de cultivos con (f) y sin (nf) fertilización.

Prof (cm)	Pi ($\mu\text{g g}^{-1}$)							
	TT		TV1		TV2		TPa	
	nf	f	nf	f	nf	f	nf	f
0-5	50	51	79	70	86	107	96	88
5-10	52	50	75	70	88	88	81	99
10-15	51	55	72	72	78	103	84	85
15-20	52	66	76	60	76	96	82	89
0-20	51	55	75	68	82	98	86	90

TT, trigo continuo; TV1, 1 año trigo - 1 año verdeos de invierno consociados; TV2, 2 años trigo - 2 años verdeos de invierno consociados; TPa, 5 años trigo - 5 años pastura consociada.

Tabla 25: Concentración ($\mu\text{g g}^{-1}$) de fósforo orgánico (Po) en la fracción gruesa de suelo bajo diferentes secuencias de cultivos con (f) y sin (nf) fertilización.

Prof (cm)	Po ($\mu\text{g g}^{-1}$)							
	TT		TV1		TV2		TPa	
	nf	f	nf	f	nf	f	nf	f
0-5	21	36	14	18	20	16	15	22
5-10	30	32	9	30	11	12	24	22
10-15	27	24	6	16	6	3	13	10
15-20	1	21	12	26	4	14	18	14
0-20	20	28	10	22	10	11	18	17
Po/ Po+Pi 0-20 (%)	27,7	34,4	12,2	25,2	11,3	10,6	17,8	16,3

TT, trigo continuo; TV1, 1 año trigo - 1 año verdeos de invierno consociados; TV2, 2 años trigo - 2 años verdeos de invierno consociados; TPa, 5 años trigo - 5 años pastura consociada.

B. CAMBIOS EN EL TIEMPO (Pe y pH)

Los diferentes tratamientos provocaron efectos variables sobre el Pe y pH del suelo en cada uno de los años estudiados (Tabla 26). En los tres años de estudio, salvo en 2004 cuando el cultivo en TV2 fue un VIC, los niveles más altos de Pe se encontraron en TT y TV1, coincidiendo con los mayores valores de Pi o reciclado más rápido del Po (Tabla 27). En suelos de la región, se observó que el Pe disminuyó luego de las pasturas con leguminosas (Echeverría *et al.*, 1993). En este caso el Pe disminuyó cuando aumentaron los años continuos con alfalfa o vicia; $TT > TV1 > TV2 > TPa$. Existe una fuerte relación entre el Pe y el Pi. En consecuencia, cuando las leguminosas aumentan el Po a expensas del Pi y el TT aumenta el Pi por efecto de las labranzas, esto se refleja en cambios importantes de la disponibilidad de P. La fertilización tendió a enmascarar estas diferencias.

Los niveles de Pe en los primeros 20 cm variaron en el tiempo, posiblemente, de acuerdo con Baravalle (1992), por el efecto combinado del cultivo con factores climáticos. En TT fertilizado las diferencias pusieron de manifiesto pequeñas variaciones debidas a las condiciones climáticas y posiblemente relacionadas con la transformación de las fracciones orgánicas. En TV1 el valor de Pe fue en general superior que en TV2. En el año 2004, cuando en TV2 f la rotación coincidió con vicia-avena, se observó que el Pe tendió a disminuir en forma considerable. Ese año la interacción observada se debió al comportamiento del Pe en TV1 respecto del resto. Allí, la fertilización provocó la disminución de los valores de Pe al aumentar la producción de MS del trigo, sumada al consumo por parte del VIC en 2003. Los valores de Pe más bajos fueron los de TPa; estables en las parcelas sin fertilización y más variables en las fertilizadas.

Tabla 26: Valores “p” de significancia de los ANOVA y los contrastes de interacción entre efectos de la secuencia de cultivo (SC) y la fertilización (F) sobre el pH y el P extraíble (Pe).

Año	Pe				pH			
	Fuente de Variación				Fuente de Variación			
	SC	F	SC x F	pScheffé	SC	F	SC x F	pScheffé
2002	0,0811	0,0049	0,4785	-	0,3315	<0,0001	<0,0001	0,0072
2004	0,0839	0,7713	0,0035	0,0017	0,3993	0,0247	0,0006	0,0008
2006	0,2076	0,6313	0,6700	-	0,3535	0,8617	0,2361	-

Tabla 27: Fósforo extraíble (Pe) a distintas profundidades de suelo bajo diferentes secuencias de cultivos con (f) y sin (nf) fertilización.

Pe ($\mu\text{g g}^{-1}$)		TT		TV1		TV2		TPa	
Año	Prof (cm)	nf	f	nf	f	nf	f	nf	f
2002	0-5	35,8	42,5	36,9	37,7	31,7	31,2	27,5	27,1
	5-10	32,2	34,8	29,5	35,9	23,2	25,9	21,7	23,4
	10-15	26,0	30,3	24,2	28,6	16,4	16,2	13,7	17,3
	15-20	19,9	18,8	19,7	20,7	12,3	13,1	12,3	12,3
	0-20	28,4 bc	31,6 d	27,6 b	30,7 cd	20,9 a	21,6 a	18,8 a	20,0 a
2004	0-5	35,1	40,1	34,9	29,8	23,6	22,8	18,4	21,6
	5-10	29,5	37,6	29,3	23,9	28,3	19,1	16,1	17,6
	10-20	22,3	25,0	18,6	14,1	13,2	11,2	9,8	12,5
(1)	0-20	27,3 d	31,9 e	25,4 d	20,5 c	19,6 bc	16,1 ab	13,5 a	16,1 ab
2006	0-5	36,3	38,1	38,8	37,9	33,2	31,1	22,1	24,4
	5-10	35,1	37,3	35,5	33,1	26,2	28,3	21,9	22,2
	10-20	28,6	25,3	18,7	24,4	16,2	14,0	15,8	18,6
	0-20	32,2 b	31,5 b	27,9 b	30,0 b	22,9 a	21,8 a	18,9 a	21,0 a

TT, trigo continuo; TV1, 1 año trigo - 1 año verdes de invierno consociados; TV2, 2 años trigo - 2 años verdes de invierno consociados; TPa, 5 años trigo - 5 años pastura consociada. (1) Interacción significativa entre los efectos de los sistemas de cultivos y fertilización. Letras distintas en una misma fila indican diferencias mínimas significativas ($p \leq 0,05$).

El valor de pH del suelo en los diferentes tratamientos y años osciló entre 6 y 7 (Tabla 28).

La secuencia de cultivos y la fertilización produjeron efectos variables. Los valores más bajos se encontraron en TV1 y los más altos en TT, TV2 y TPa. Si bien se observaron oscilaciones, estas fueron pequeñas e indicarían una cierta estabilidad de algunos sistemas como también han documentado otros autores (Baravalle, 1992). La fertilización produjo la disminución del

pH sólo en TT, donde el efecto fue variable a través de los años y limitado principalmente a los primeros 0-5 y 5-10 cm de profundidad. En general, en los suelos de las secuencias con leguminosas se detectaron tendencias definidas, donde pH disminuyó en el siguiente orden: TPa > TV2 > TV1. Los valores de TV2 fueron más altos que los de TV1, posiblemente debido al efecto que ocasionaría el aporte de residuos de leguminosas sobre el pH del suelo (Xu *et al.*, 2006). En TPa los valores fueron más estables. En suelos semejantes, la roturación de pasturas naturales produjo un importante efecto sobre el pH del suelo (Galantini *et al.*, 2005), lo que pareció no ocurrir en estas rotaciones ya estabilizadas.

En resumen, el cambio en el ambiente edáfico alteró los equilibrios del P, afectando su disponibilidad en el corto, mediano y largo plazo.

Tabla 28: Valores de pH de suelo bajo diferentes secuencias de cultivos con (f) y sin (nf) fertilización.

pH		TT		TV1		TV2		TPa	
Año	Prof (cm)	nf	f	nf	f	nf	f	nf	f
2002	0-5	6,7	5,7	6,0	5,7	6,2	6,2	6,6	6,5
	5-10	6,7	5,8	6,0	5,8	6,2	6,2	6,6	6,5
	10-15	6,7	6,0	6,0	5,7	6,3	6,3	6,7	6,6
	15-20	6,5	6,5	6,2	6,0	6,6	6,7	6,6	6,7
(1)	0-20	6,6 c	6,0 ab	6,0 ab	5,8 a	6,3 b	6,4 bc	6,6 c	6,6 c
2004	0-5	6,8	6,2	6,2	6,2	6,3	6,5	6,7	6,4
	5-10	6,8	6,2	6,3	6,2	6,7	6,6	6,3	6,4
	10-20	6,9	6,6	6,4	6,3	6,9	6,8	6,6	6,9
	(1)	0-20	6,8 c	6,4 a	6,3 a	6,3 a	6,7 c	6,6 bc	6,5 bc
2006	0-5	6,5	6,2	6,0	6,0	6,3	6,3	6,6	6,6
	5-10	6,5	6,2	6,0	5,9	6,2	6,2	6,5	6,6
	10-20	6,5	6,4	6,1	6,2	6,5	6,5	6,6	6,8
		0-20	6,5 bc	6,3 b	6,0 a	6,0 a	6,3 b	6,4 b	6,6 c

TT, trigo continuo; TV1, 1 año trigo - 1 año verdes de invierno consociados; TV2, 2 años trigo - 2 años verdes de invierno consociados; TPa, 5 años trigo - 5 años pastura consociada. (1) Interacción significativa entre los efectos de los sistemas de cultivos y fertilización. Letras distintas en una misma fila indican diferencias mínimas significativas ($p \leq 0,05$).

CAPÍTULO III

CAMBIOS EN EL RENDIMIENTO Y LA NUTRICIÓN DEL CULTIVO DE TRIGO

INTRODUCCION

El cultivo de trigo constituye la base de los sistemas productivos en una amplia región del SO de la provincia de Buenos Aires. Allí, los sistemas de labranza interactúan con el clima y la fertilidad nitrogenada para expresar los rendimientos (Krüger y Venanzi, 2008). Una particularidad del SO bonaerense, por su ubicación en la región semiárida es la alternancia entre años secos y húmedos, siendo menos frecuentes aquellos con características promedio. La necesidad de agua de los cereales de invierno es menor que las lluvias ocurridas en otoño e invierno, pero mayor que las de primavera. Es decir, las lluvias son variables y deficientes en el momento de definición del rendimiento. La respuesta a la aplicación de N depende en gran medida de la precipitación durante el ciclo del cultivo y los mayores rendimientos se obtienen con dosis relativamente elevadas para la región en años con abundantes precipitaciones y sin heladas tardías. Esta dependencia del clima genera un riesgo económico que dificulta la adopción de ciertas tecnologías.

Los valores de eficiencia agronómica de uso del fertilizante en cereales de invierno reportados para la zona de Bordenave varían frecuentemente entre 0-45 kg de grano por kg de N aplicado, dependiendo principalmente de los factores climáticos, la especie cultivada y la técnica de fertilización (tipo, dosis y momento de aplicación). Landriscini *et al.* (2006) reportaron valores de eficiencia entre 11 y 34 kg grano por kg N, en cebada cervecera, con dosis de 30 kg N ha⁻¹ como urea.

La inclusión de leguminosas en rotación, como se mencionó anteriormente, aporta N proveniente de la fijación biológica e incrementa los rendimientos del trigo, lo que permite reducir este riesgo (Agamenonni y Vanzolini, 2006). El costo de implantación de pasturas perennes, el período requerido para observar resultados positivos y la relación entre la superficie agrícola-ganadera requerida, limitan su implementación en la zona, especialmente en establecimientos de pequeña a mediana superficie. Una buena alternativa sería la

utilización de leguminosas para pastoreo, solas o consociadas, utilizando tréboles o vicia y avena o triticale como gramínea en ciclos de 1 a 3 años. Estos cultivos presentan la ventaja de poseer ciclos cortos, son fáciles de incluir en establecimientos de pequeña superficie y poseen escasas dificultades para su manejo. En el corto plazo es posible observar un efecto positivo sobre la fertilidad nitrogenada y la estructura del suelo (Haynes, 1999). En ensayos en la zona de Bordenave, Galantini *et al.* (1992) reportaron incrementos en la producción de materia seca y granos en trigo debido a la rotación con verdes de invierno consociados (VIC), equivalentes a la aplicación de 64 kg de N y 16 kg P ha⁻¹, en forma de fosfato diamónico y urea. Este incremento en la producción fue máximo en el primer trigo posterior al verdeo y luego disminuyó rápidamente. Si bien los incrementos pueden ser variables, dependiendo de factores tales como disponibilidad de agua y manejo, en el largo plazo resultan económicamente favorables (Barrios, 2007).

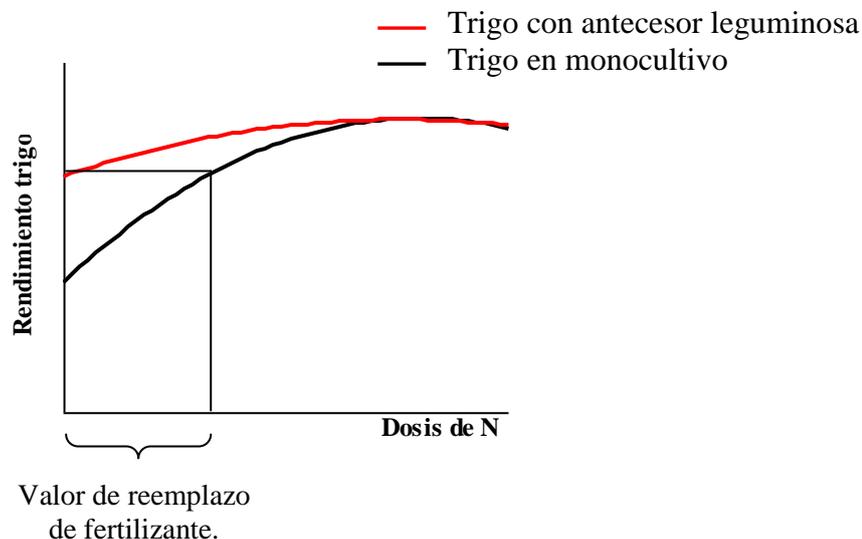
En síntesis, los VIC representan una alternativa productiva y económicamente viable, pero de poca difusión en la región. Los mismos, realizan un importante aporte de N que quedará disponible para el cultivo siguiente, pero no en todas las circunstancias reemplazan completamente a los fertilizantes. En ese sentido, el escaso conocimiento acerca del mejor manejo del N en estas secuencias puede ser una causa de la baja eficiencia en el uso del nutriente y el bajo interés en la implementación de este tipo de sistemas.

Respuesta del trigo a la aplicación de N

La aplicación de dosis crecientes de N al cultivo de trigo en diferentes sistemas con leguminosas permite cuantificar el efecto de la rotación sobre el rendimiento y el N presente en el grano. Al comparar la respuesta del trigo a la fertilización nitrogenada se observan fundamentalmente dos tipos de comportamiento, representados en la Figura 6. En el caso I, ***el rendimiento del trigo con antecesor leguminosa es superior al del trigo en monocultivo a***

bajas dosis, pero con dosis más altas dicha diferencia desaparece. El efecto de la leguminosa está principalmente asociado al aporte de N.

Caso I



Caso II

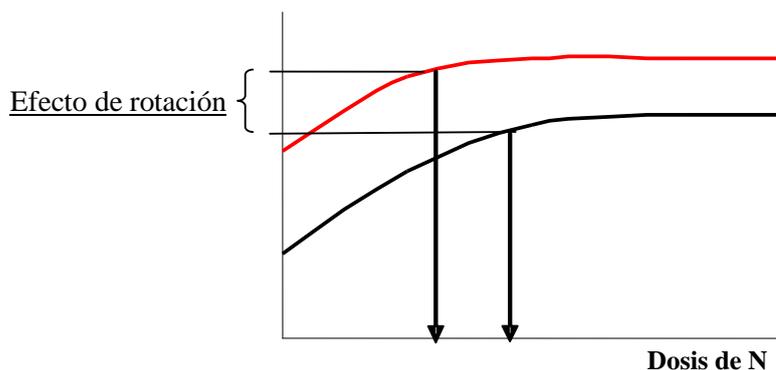


Figura 6: Curvas de respuesta hipotética a la fertilización nitrogenada de trigo bajo distintos antecesores. Adaptado de Ruffo y Parsons (2004).

Una forma simple de estimar el aporte de N de la leguminosa es calculando el “Valor de Reemplazo del Fertilizante”, que representa la dosis de fertilizante a la cual el trigo en monocultivo iguala en rendimiento al trigo sin fertilización con antecesor leguminosa (Bundy *et al.*, 1993). El concepto supone que el incremento en el rendimiento por la leguminosa se debe enteramente a su aporte de N, y que tanto el N liberado de los residuos y como el del

fertilizante presentan similar eficiencia de recuperación. Este índice, no considera otros efectos de la rotación en el suelo, los cuales pueden ser muy importantes.

En el caso II, *las diferencias de rendimiento entre el trigo continuo y el trigo con antecesor leguminosa son máximas a bajas dosis pero continúan siendo significativas aún para dosis que maximizan el rendimiento*. Aquí, además del N, se produce un incremento del rendimiento potencial, que puede denominarse como “efecto de rotación” y que está asociado a mejoras en propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo. Al aplicar el N suficiente para lograr el máximo rendimiento en cada uno de los sistemas, es posible estimar el valor de los beneficios adicionales producto de la rotación de cultivos.

Evaluación de la nutrición del cultivo

Los beneficios de las leguminosas sobre el rendimiento de los cultivos posteriores son el reflejo de mejoras, entre otras, en la disponibilidad y absorción de otros elementos además del N. El análisis de plantas constituye una herramienta valiosa para la evaluación del estado nutricional del cultivo. Esto es así siempre y cuando los procedimientos para interpretar los datos analíticos sean adecuados. La concentración crítica de nutrientes o rangos críticos en cereales son difíciles de definir debido a la rapidez con que la concentración del nutriente disminuye durante la estación de crecimiento. Además del momento de muestreo deben tenerse en cuenta la parte de la planta a muestrear y la variabilidad genética. En trigo la concentración máxima de nutrientes se produce cerca de los 40 días después de la siembra y, en la medida que la planta madura, se observa una disminución rápida de la concentración de N, K y S, y lenta del P. Beaufils (1973) sugirió que si bien la concentración de nutrientes decrece con el tiempo, las relaciones entre ellas deberían mantenerse relativamente constantes. Esta hipótesis forma la base del Sistema Integrado de Diagnóstico y Recomendación (DRIS, Diagnosis and Recommendation Integrated Systems) que ha sido

ampliamente aplicado a diferentes cultivos como maíz (Sumner, 1977b, 1977c; Beverly, 1993), trigo (Sumner, 1977a, 1981) y soja (Sumner, 1977a; Hallmark *et al.*, 1990), así como para detectar desbalances de N:S (Gupta, 1976; Haneklaus *et al.*, 1992). La técnica confronta las relaciones de concentración de nutrientes con aquellas obtenidas en poblaciones de rendimiento máximo u óptimo, a las que denomina Normas DRIS para cada nutriente y cultivo. Se calculan los llamados índices DRIS y estos índices clasifican los nutrientes considerados según su importancia relativa (Sumner, 2000). La principal ventaja del sistema DRIS sobre otros métodos es su habilidad para realizar diagnósticos foliares, independientemente de la edad, variedad y parte de la planta utilizada (Sumner, 2000). Sin embargo, para mejorar la precisión del diagnóstico es necesario establecer Normas DRIS provenientes de estudios regionales y locales distinguiendo climas, nivel de producción, variabilidad de nutrientes, cultivos, etc. (Landriscini *et al.*, 1997). Por otro lado, los déficit hídricos que afectan el crecimiento y/o el rendimiento de los cultivos pueden interferir significativamente sobre los resultados obtenidos. Los trabajos de desarrollo de normas DRIS involucran grandes bases de datos de análisis foliares a partir de las cuales se obtienen resultados más seguros (Sumner, 1979; Tarpley *et al.*, 1985), si bien en algunos casos se han aplicado bases pequeñas con buenos resultados (Letzsch y Sumner, 1984; Hallmark *et al.*, 1990). La verificación de los sistemas de diagnóstico foliar requiere el uso de datos experimentales en los cuales se utilice la respuesta de la planta a la aplicación de fertilizantes para determinar la exactitud del diagnóstico.

De lo expuesto se deduce que el análisis de las curvas de respuesta al N y el balance de nutrientes en las plantas trigo pueden aportar información valiosa sobre el efecto combinado del uso de leguminosas en rotación y la fertilización en estos sistemas, por lo cual se plantearon los siguientes objetivos:

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Determinar el aporte de N por las leguminosas y el efecto de las mismas sobre la disponibilidad de nutrientes, la nutrición del cultivo y la producción de materia seca (MS) del cultivo siguiente,
- II. Evaluar el efecto de las leguminosas en rotación y la fertilización nitrogenada sobre la eficiencia en el uso del N, el balance nutricional (N, P, K y S) del cultivo y el orden relativo de deficiencia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestreo y procesamiento del material vegetal

Se evaluaron la productividad y la dinámica y balance de nutrientes (N, P, K, S) en el trigo, a partir de muestreos de plantas realizados en 2002, 2004 y 2006 en las parcelas TT, TV1 y TPa, con distintas dosis de N.

En 2002, en el periodo de macollaje, de cada tratamiento se tomaron en forma aleatoria muestras compuestas por 2 submuestras de 0,5 m lineales de surco ($0,21 \text{ m}^2$) de la biomasa aérea de las plantas de trigo (cultivar ProINTA Colibrí). En encañazón, de las subparcelas fertilizadas con distintas dosis de N (0, 30, 60, 90 y 120 kg N ha^{-1}) se muestreó el material vegetal de 4 m lineales ($0,84 \text{ m}^2$); en anthesis de 2 m lineales y en madurez fisiológica de 2 m^2 de superficie. En 2004 y 2006 el muestreo de plantas se realizó sólo en madurez fisiológica.

Se registró la producción de materia seca total aérea en cada momento de muestreo y el rendimiento en grano a cosecha.

Todas las muestras se secaron en estufa de aire forzado a 60°C . Las espigas fueron trilladas, separando el grano del resto de la materia seca aérea. Posteriormente el grano fue molido con molino ciclónico y la paja con molino Wiley con tamiz de 40 mesh.

Determinaciones analíticas

- Nitrógeno total (Nt %); Bremner (1996),
- Fósforo (P), Potasio (K) y Azufre (S) (mg kg^{-1}) previa digestión del material con una mezcla de ácido nítrico-perclórico en relación 2:1; Johnson y Ulrich (1959).
- El P se determinó por el método colorimétrico del molibdato de amonio (Murphy y Riley, 1962). El K se determinó, por medio de espectrometría de llama. El S se determinó mediante espectrometría de emisión por plasma (ICP) (Kirkbright *et al.*, 1972).

Cálculo de los índices DRIS y de Balance Nutricional

Se aplicó la metodología DRIS (Walworth & Sumner, 1987) utilizando las Normas DRIS Internacionales, para determinar los Índices de N, P, K y S y el orden de requerimientos nutricionales (ORN) relativos, es decir, cómo estos nutrientes están ordenados en cuanto a sus deficiencias o excesos relativos en los diferentes momentos del ciclo de crecimiento del cultivo. Matemáticamente, los índices se basan en la desviación media de cada relación entre los nutrientes respecto a su valor óptimo, por lo cual, un índice DRIS óptimo para cualquier nutriente debería ser igual a cero. Los índices negativos indican deficiencias relativas y los positivos indican excesos respecto a los nutrientes considerados en el diagnóstico.

$$\text{Indice } N = \frac{(N/K - P/N - S/N)}{3}$$

$$\text{Indice } P = \frac{(P/N - K/P - S/P)}{3}$$

$$\text{Indice } K = \frac{(K/P - N/K + K/S)}{3}$$

$$\text{Indice } S = \frac{(S/N + S/P - K/S)}{3}$$

A partir de la suma en valor absoluto, de los índices se calculó el Índice de Balance Nutricional (IBN). El IBN es una medida del balance relativo de los nutrientes analizados en un cultivo, el cual mejora cuando los IBN se acercan a cero.

Cálculo de la eficiencia de utilización del N

Para la evaluación de la eficiencia en el uso del N (EUN), a partir de las definiciones de diferentes autores (Raun y Johnson, 1999; Fageria y Baligar, 2005; Steinbach, 2007) se determinaron,

EFICIENCIA DE LA FERTILIZACIÓN

- Recuperación aparente del fertilizante aplicado (RAN),

$$\text{RAN} = (\text{N-MSt}_{\text{af}} - \text{N-MSt}_{\text{anf}}) / \text{N}_f$$

- Eficiencia agronómica de uso del fertilizante aplicado (EUF) para la producción de grano (g) o materia seca total aérea (MSt),

$$\text{EUF}_g = (\text{Grano}_f - \text{Grano}_{\text{nf}}) / \text{N}_f$$

$$\text{EUF}_{\text{MS}} = (\text{MSt}_{\text{af}} - \text{MSt}_{\text{anf}}) / \text{N}_f$$

EFICIENCIA DE USO DEL N DISPONIBLE

- Eficiencia de absorción del N disponible (EAN_d) en parcelas no fertilizadas o fertilizadas

$$\text{EAN}_d = \text{N-MSt}_{\text{af}} / \text{N}_d$$

- Eficiencia en el uso del N disponible (EUN) para la producción de grano y MS,

$$\text{EUN}_g = \text{Grano}_f / \text{N}_d$$

$$\text{EUN}_{\text{MSt}} = \text{MSt}_{\text{af}} / \text{N}_d$$

- Eficiencia en la transformación del N absorbido (ETN) en grano,

$$\text{ETN} = \text{Grano} / \text{N-MSt}_{\text{af}}$$

- Eficiencia en el transporte del N absorbido o índice de cosecha de N (ICN),

$$\text{ICN} = \text{N-Grano} / \text{N-MSta}$$

Donde: Grano, rendimiento en grano (kg ha^{-1}); MSta, materia seca total aérea a cosecha (kg ha^{-1}); N-Grano y N-MSta, nitrógeno en grano y en la MSta (kg ha^{-1}); f, tratamientos fertilizados y nf, sin fertilizar; N_f , N aplicado como fertilizante (kg ha^{-1}) y N_d , N disponible (N-NO_3^- en el suelo a la siembra + N_f).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. PRODUCTIVIDAD Y NUTRICION DEL TRIGO (2002)

Acumulación de materia seca total aérea

Durante el ciclo del trigo del año 2002, los valores de producción de materia seca total aérea (MSta) del trigo se mantuvieron, en todos los estadios e independientemente de la dosis de fertilización, menores en TT, intermedios en TV1 y mayores en TPa (Tabla 28). Como tendencia general, entre los tratamientos sin y con antecesor leguminosa las diferencias porcentuales de producción aumentaron con el desarrollo del cultivo y disminuyeron claramente a partir de antesis al incrementarse las dosis de N.

Observando individualmente cada sistema, se detectó que la aplicación de N produjo efectos diferentes entre los distintos estadios. En TT en todo el ciclo se observó un aumento gradual de la MSta a medida que se incrementaron las dosis. En cambio en TV1 y TPa, el trigo no mostró respuestas significativas en ningún estadio salvo en antesis, donde el aumento de la dosis promovió un mayor crecimiento. Evidentemente, estas diferencias estarían asociadas a distintas disponibilidades de N. El N aportado por las leguminosas fue suficiente para el máximo desarrollo del trigo en las etapas iniciales (macollaje y encañazón). Sin embargo no alcanzó a satisfacer los requerimientos durante la etapa de máximo crecimiento en condiciones de buena disponibilidad hídrica (antesis) y produjo efectos variables a cosecha,

como consecuencia de adversidades de tipo meteorológicas. En este sentido, hasta antesis la condición general del cultivo fue excelente pero luego, en madurez fisiológica, sobre todo cuando los antecesores tuvieron leguminosas se determinaron pérdidas importantes de biomasa aérea (Tabla 29). Estas pérdidas se atribuyeron principalmente al estrés hídrico al que fue sometido el trigo por la falta de precipitaciones durante aproximadamente 30 días en la etapa de llenado de grano. En ese período, si bien las temperaturas no fueron altas, la condición de humedad del suelo llegó a niveles de tensión cercanos a punto de marchitez permanente. Sumado a esto, a fines del mes de noviembre se registraron varias heladas con mínimos de hasta de $-3,2^{\circ}\text{C}$, que agudizaron el efecto de la falta de humedad.

Tabla 29: Acumulación de materia seca total aérea (MSta) durante el ciclo del trigo en cada secuencia de cultivos bajo fertilización nitrogenada, año 2002.

		MSta (kg ha ⁻¹)				
DOSIS N (kg ha ⁻¹)	0	30	60	90	120	
ESTADIO	TT					
Macollaje	286					
Encañazón	2317 ab	2071 a	2186 a	3091 b	2389 ab	
Antesis	3685 a	4332 a	5548 b	5736 b	5818 b	
M. Fisiológica	3018 a	3488 ab	3643 ab	4375 ab	4530 b	
		TV1				
Macollaje	328					
Encañazón	2690 a	2814 a	2891 a	3481 a	3443 a	
Antesis	6466 a	6918 ab	8038 c	7996 bc	7805 bc	
M. Fisiológica	5180 a	5575 a	6330 a	5793 a	6513 a	
		TPa				
Macollaje	404					
Encañazón	4541 a	3800 a	3959 a	4215 a	4279 a	
Antesis	7808 a	7300 a	8681 ab	9240 b	9834 b	
M. Fisiológica	6925 a	6968 a	6830 a	7118 a	7230 a	

TT: monocultivo de trigo, TV1: verdeo de invierno consociado-trigo, TPa: pastura consociada-trigo. Fechas de muestreo: macollaje 09/09/02, encañazón, 09/10/02, antesis, 08/11/02, madurez fisiológica, 06/01/03. Letras distintas en una misma fila indican diferencias mínimas significativas entre tratamientos ($p \leq 0,05$).

Acumulación de N, P, K y S

Los valores de concentración de N en planta mostraron diferencias debidas a la fertilización y/o a la secuencia de cultivos en los primeros estadios del trigo (Figura 7). La concentración de N en los tres tratamientos inicialmente fue alta y disminuyó con el desarrollo del cultivo. La diferencia más notoria se observó en TT entre macollaje y encañazón a los 70 y 105 días desde de la siembra, respectivamente a nivel del tratamiento no fertilizado, evidenciando una disminución más acelerada de la concentración foliar. Las curvas indicarían la necesidad de fertilizar, aunque también debería considerarse la frecuencia de ocurrencia de deficiencias hídricas en esta región, hecho que condiciona ampliamente el comportamiento de la respuesta. Durante el periodo vegetativo tanto la rotación con leguminosas como la fertilización aumentaron la concentración de N de las plantas, efecto que luego tendió a desaparecer por la producción de mayor cantidad de materia seca (MS), que produce la dilución del N.

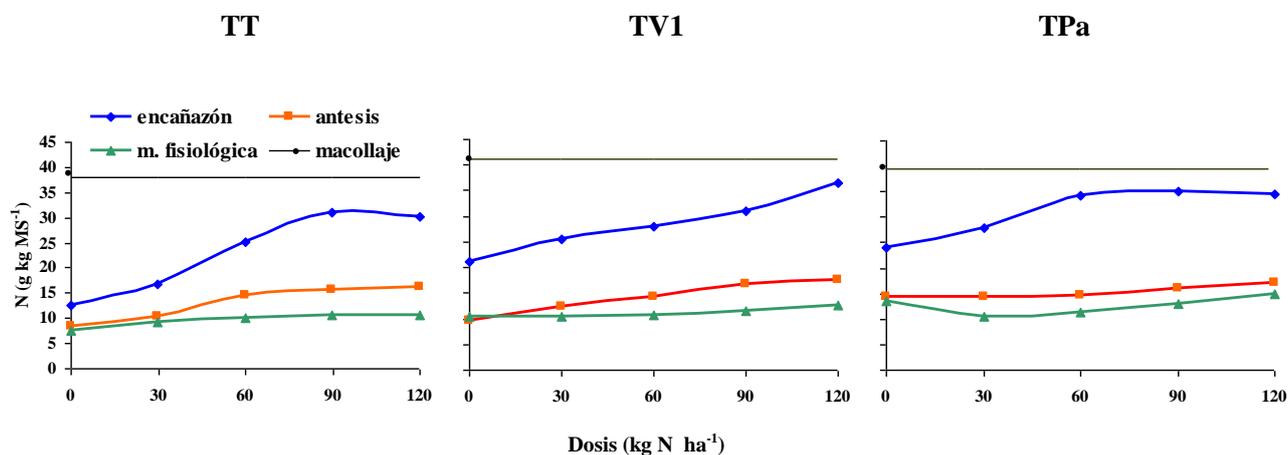


Figura 7: Concentración de N en planta durante el ciclo del trigo del año 2002 vs dosis de N aplicada.

La concentración en planta de un nutriente surge del balance entre su disponibilidad y la cantidad de MS producida y varía en forma casi instantánea durante el ciclo de desarrollo del

cultivo. Por ello, no resulta un parámetro confiable para emitir consideraciones respecto a la productividad de un cultivo. Por otra parte, para evidenciar diferencias entre sistemas de producción resulta más adecuado el análisis de los patrones de absorción de nutrientes en kg ha^{-1} ya que se considera además la materia seca producida.

En el año 2002, en el periodo de macollaje, no se observaron diferencias significativas en la acumulación de nutrientes en el trigo a favor de ninguno de los tratamientos. Durante el resto del ciclo del cultivo y para el promedio de las dosis de fertilización, en cambio, las cantidades de N y K acumuladas en las plantas fueron, menores en el trigo en TT, intermedias en el de TV1 y mayores en TPa (Figura 8 a y c). En el caso del P, las cantidades acumuladas en las plantas con antecesor vicia y pastura fueron similares entre sí y superiores a las del monocultivo durante todo el ciclo (Figura 8 b). Para el S, las diferencias a favor de los antecesores leguminosas se observaron desde encañazón en TPa y en madurez fisiológica en TV1 (Figura 8 d). En todos los casos las curvas de desarrollo del cultivo indicaron una intensa absorción de P durante el periodo de crecimiento temprano hasta llegar a un máximo en floración o antesis (Römer y Schilling, 1986). En ese momento también se detectaron aumentos en el P acumulado asociados a la fertilización con N tanto en TT ($p=0,0088$) como TV1 ($p=0,0229$). En las tres secuencias los mayores valores de acumulación de N y S también se registraron en antesis, a excepción del N en el trigo de TT con 90 kg N ha^{-1} y TPa con 60 y 90 kg N ha^{-1} . Fue el trigo de TV1 hasta antesis, donde las diferencias en la acumulación de nutrientes (en especial N) entre las dosis de fertilización se mantuvieron en forma más estable, en general, con valores mínimos en las dosis de 0 , 30 y 60 kg N ha^{-1} y máximos para 90 y 120 kg N ha^{-1} , sin diferencias entre ellas. Miller (1939) y Czuba (1969) afirmaron que la absorción y el transporte de K aumentan a medida que avanza el periodo vegetativo y declinan en la fase reproductiva. La mayor asimilación de K ocurre entonces con anterioridad a la floración (Erdei *et al.*, 1983), y conforme a esto, la mayoría de las curvas de acumulación

de K en este estudio mostraron diferencias menores entre encañazón y antesis, comparadas con el resto de los nutrientes (Figura 9 c), con excepciones de los de 120 kg N ha^{-1} en las tres secuencias de cultivos. En madurez fisiológica, junto con importantes pérdidas en las cantidades de MSta acumulada obviamente, se observaron también caídas importantes en los niveles de los cuatro nutrientes, con tasas más abruptas, en general, a medida que aumentaron las dosis de N, disipándose cualquier efecto positivo por la fertilización. Este hecho destaca lo riesgoso de la práctica en cultivos de cosecha de la región semiárida.

—◆— 0N —■— 30N —▲— 60N —×— 90N - - - * - - - 120N

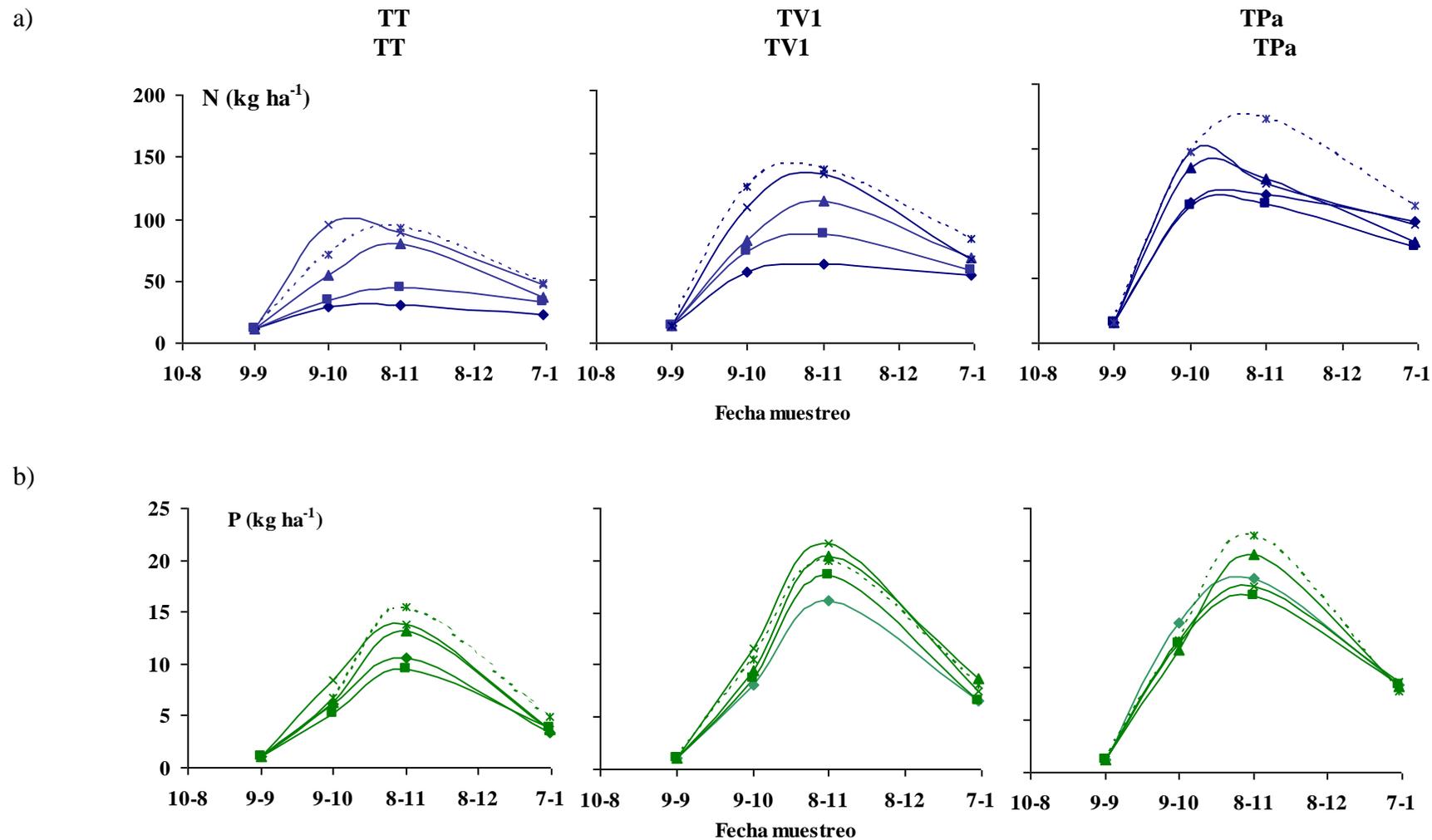


Figura 8 a y b: Contenido de N y P acumulados durante el ciclo de crecimiento en la parte aérea de las plantas de trigo en distinta secuencia de cultivos y con distintas dosis de fertilización nitrogenada; año 2002.

—◆— 0N —■— 30N —▲— 60N —×— 90N ···*··· 120N

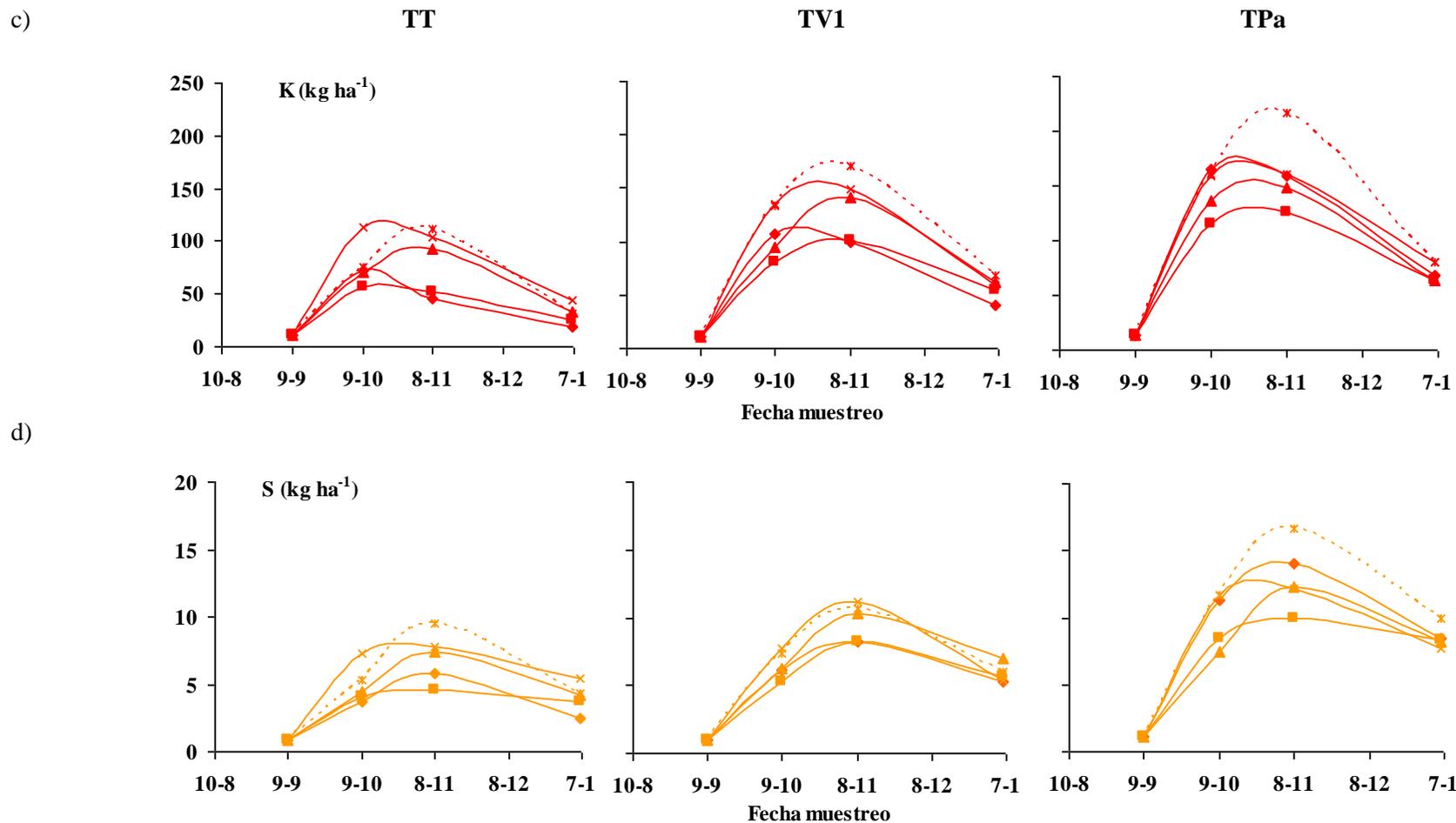


Figura 8 c y d: Contenido de K y S acumulados durante el ciclo de crecimiento en la parte aérea de las plantas de trigo en distinta secuencia de cultivos y distintas dosis de fertilización nitrogenada; año 2002.

Comparando el efecto combinado de los antecesores y dos de las dosis de fertilización (0 y 60 kg N ha⁻¹) sobre la cantidad de los nutrientes acumulados en madurez fisiológica se obtuvieron resultados variables. La extracción de nutrientes del sistema a través de los granos varió de 14,9 a 27,0 kg N, 1,6 a 2,1 kg P, 3,3 a 3,7 kg K y 1,1 a 1,6 kg S por Mg producido. En su mayoría, estos valores coincidieron, con los determinados por Galantini *et al.* (2000; 2005) en el sur bonaerense, con excepción del P donde la exportación fue casi un 50% inferior y también del N en el trigo de TV1 sin fertilización, que excedió ampliamente al reportado por dichos autores.

En cuanto al N, la interacción entre antecesores y dosis resultó muy significativa por lo que ambos factores se analizaron en forma individual (Tabla 30). El trigo sin fertilización acumuló cantidades significativamente mayores de N a medida que aumentaron los años consecutivos con antecesor con leguminosa; TT<TV1<TPa ($p<0,0001$) (Figura 9a). Con la fertilización, desaparecieron las diferencias entre TV1 y TPa debido al efecto negativo que produjo sobre la acumulación de N en el trigo luego de cinco años de pastura consociada ($p=0,0184$). Esto se atribuyó a las mayores pérdidas de MS registradas en el trigo de TPa luego de anthesis, a medida que aumentó la disponibilidad de N. En TT y TV1, si bien se observaron aumentos de la cantidad de N por la fertilización, estos no fueron estadísticamente significativos. Respecto a P y K, sin evidencia de interacción entre factores, las menores cantidades acumuladas correspondieron al trigo en monocultivo y las mayores a los trigos con antecesores VIC y pastura (Figura 9 b y c). Para el S, el orden fue similar, pero en este caso se detectaron diferencias significativas entre TV1 y TPa, con valores máximos en el trigo posterior a la pastura (Figura 9d). Si bien en el trigo fertilizado en TT y TV1 se observaron cantidades superiores de K y S y de P, K y S, respectivamente, la aplicación de 60 kg N ha⁻¹ no produjo efectos significativos sobre la acumulación de ninguno de estos tres elementos.

Tabla 30: valores “p” de significancia del ANOVA del contenido medio de nutriente X en planta de trigo bajo los efectos de la secuencia de cultivos (SC) y la fertilización (F) nitrogenada con 0 y 60 kg N ha⁻¹

Variable (kg X MSt _a ha ⁻¹)	Fuentes de variación		
	SC	F	SC x F
N	0,0007	0,3287	0,0079
P	0,0045	0,2497	0,2203
K	0,0068	0,0776	0,2633
S	0,0045	0,0890	0,6764

X: N, P, K o S

Tomando como referencia estimaciones de la necesidad de los principales nutrientes en cereales sugeridas por García y Ciampitti (2007), se encontró que en la mayoría de los tratamientos el trigo absorbió y transportó hacia los granos cantidades suficientes de N y K (Tabla 31). Únicamente en el monocultivo sin fertilización, con 1100 kg grano ha⁻¹, los valores de N cuantificados fueron menores que los estimados (20 kg N ha⁻¹). Contrario a esto, las cantidades de S y P determinadas en la MSt_a, en todos los casos fueron inferiores a las calculadas como necesarias para cubrir los rendimientos obtenidos, aunque el cultivo alcanzó satisfactoriamente los requerimientos de S de los granos cuando su antecesor fue una pastura. Estos resultados fueron además, coherentes con concentraciones de P en grano de 0,286% reportadas por Ron y Loewy (2005) en trigos de la región. Como se mencionó anteriormente, factores climáticos adversos a finales del ciclo del trigo en 2002, repercutieron con distinta intensidad sobre la productividad en cada tratamiento. Las pérdidas de biomasa registradas luego de antesis, pudieron afectar la interpretación de los índices de cosecha (IC) de los nutrientes en grano. Sin tenerlas en cuenta, al comparar los valores obtenidos con los IC de referencia (García y Ciampitti, 2007), podría sobreestimarse la capacidad de transporte a los granos de los nutrientes absorbidos. Tales fueron los casos del S en todas las secuencias y del N, especialmente en TV1. Por este motivo se calculó la relación entre el contenido de

nutriente en el grano y en la MSta en el momento de mayor producción (antesis), la cual reflejó más claramente algunas tendencias anteriormente no observadas (Tabla 31). Los cocientes resultaron inferiores a los IC de referencia, sobre todo para P y K. A nivel de la secuencia de cultivos, las relaciones de N, P y S más bajas fueron las del trigo en TT, aumentando cuando el antecesor fue una leguminosa, con valores superiores en el trigo posterior al VIC. Esto confirmaría la presunción de una mayor velocidad en el ciclado de nutrientes de este sistema. En cuanto al efecto de la fertilización, los valores disminuyeron cerca de un 20% por el agregado de N en forma inorgánica. Este efecto fue inverso al ocurrido cuando el aporte de N provino de la descomposición de los residuos que contenían vicia o alfalfa. Esto reafirmaría la existencia de un beneficio adicional al del N fijado simbióticamente sobre la producción de los cultivos siguientes por uso de estas leguminosas. En cuanto a los demás nutrientes, no se observaron cambios importantes por efecto de la fertilización con N.

Tabla 31: Distribución de los nutrientes (N, P, K y S) al grano de trigo en distintas secuencias de cultivos, sin y con fertilización nitrogenada.

	TT	TV1	TPa	TT	TV1	TPa
	0 kg N ha ⁻¹			60 kg N ha ⁻¹		
ICN (0,69)	0,72	0,80	0,74	0,73	0,75	0,72
Ngr / N MSta ant.	0,53	0,69	0,61	0,33	0,45	0,44
ICP (0,80)	0,54	0,63	0,60	0,66	0,58	0,67
Pgr/ P MSta ant.	0,17	0,26	0,27	0,18	0,25	0,26
ICK (0,21)	0,19	0,16	0,13	0,15	0,14	0,14
Kgr/ K MSta ant.	0,08	0,07	0,05	0,05	0,06	0,06
ICS (0,34)	0,50	0,50	0,48	0,42	0,41	0,44
Sgr/ S MSta ant.	0,21	0,32	0,29	0,24	0,30	0,33

TT: monocultivo de trigo, TV1: verdeo de invierno consociado-trigo, TPa: pastura consociada-trigo. ICx y x/xMSta ant, donde IC es índice de cosecha, MSta ant., materia seca en antesis, x, el nutriente considerado: N, P, K o S Entre paréntesis, IC de referencia (García y Ciampitti, 2007).

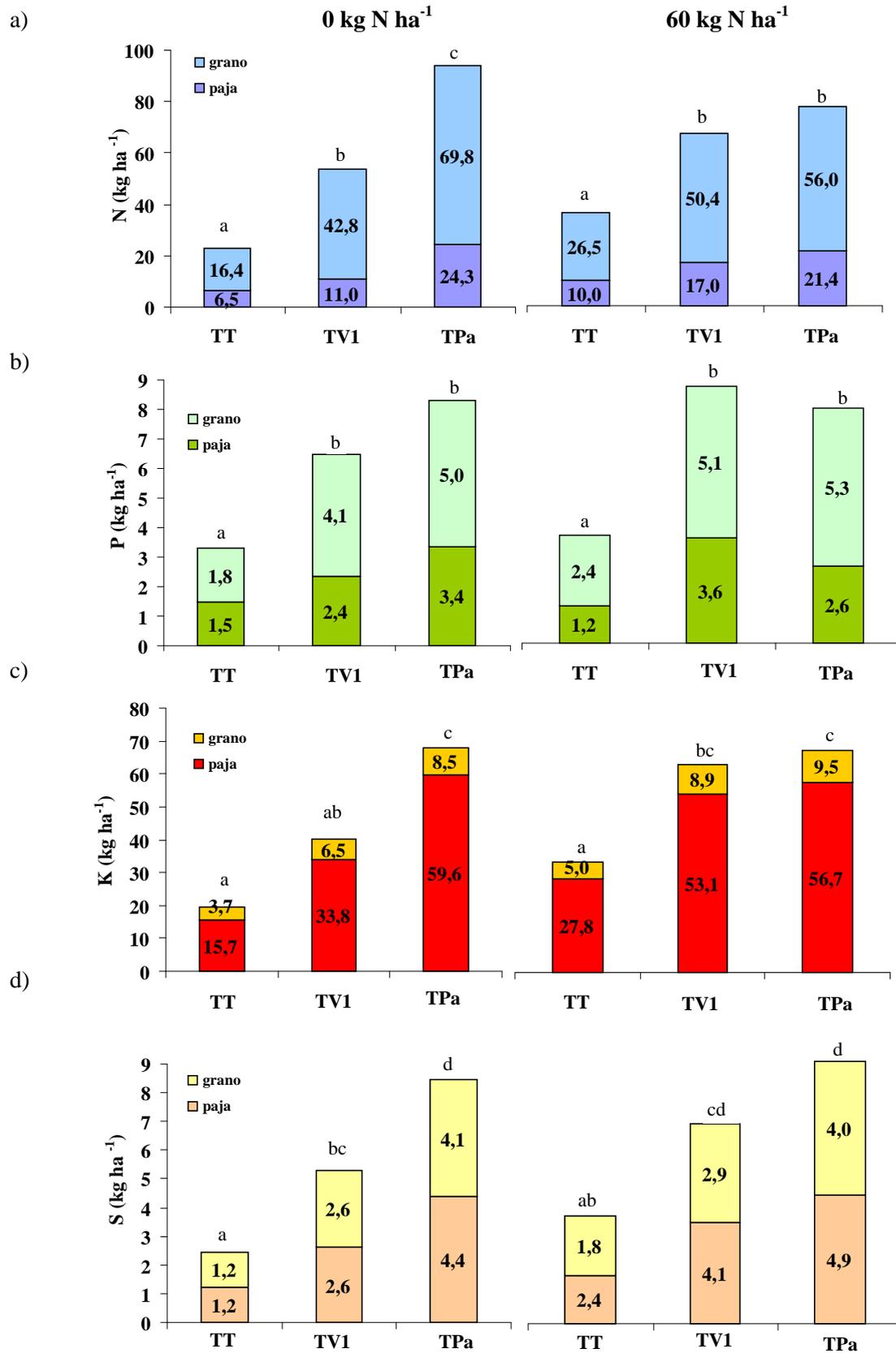


Figura 9: Contenido (kg ha⁻¹) en madurez fisiológica de a) N, b) P, c) K y d) S en trigo en diferentes sistemas de cultivos, fertilizado con 0 y 60 kg de N ha⁻¹. TT: monocultivo de trigo, TV1: verdeo de invierno consociado-trigo, TPa: pastura consociada-trigo. Para cada nutriente y dosis, letras distintas para una misma dosis indican diferencias mínimas significativas ($p \leq 0,05$).

Balance de nutrientes en planta según el método DRIS

Teniendo en cuenta que índices positivos indican excesos relativos, índices negativos deficiencias relativas y aquellos entre $\pm 10/15$ niveles adecuados de un nutriente, fue posible destacar:

En todos los tratamientos el N se mostró como el nutriente con mayor deficiencia relativa (con valores más negativos) y el segundo elemento en importancia fue el S en los sistemas TT y TV1, y el P en TPa, aunque estas deficiencias relativas fueron pequeñas y prácticamente el P no habría sido limitante (Tabla 32). Esto último estaría confirmado por los valores de Pe en el suelo (Tabla 26), los cuales superan los niveles críticos ($10-14 \mu\text{g g}^{-1}$) determinados para la zona (Ron y Loewy, 1996).

Variaciones durante el ciclo del cultivo

El IBN puso en evidencia un mayor desbalance relativo entre nutrientes, a medida que evolucionó el cultivo. En macollaje, el trigo en las tres secuencias presentó valores de los índices relativamente balanceados (entre -10 y +15). Estudios previos encontraron que la metodología DRIS no detecta deficiencias durante el macollaje (Landriscini *et al.*, 2002) y en esta etapa del cultivo de trigo podría utilizarse solamente para determinar algunas tendencias. Estudios llevados adelante en la región demuestran que las deficiencias de S cobran cada vez mayor importancia (Fernández *et al.*, 2007; Galantini *et al.*, 2002). Las leguminosas poseen requerimientos de S más altos que las gramíneas, por lo que pueden provocar deficiencias importantes en los cultivos siguientes. Por otra parte, en el caso de pasturas consociadas, varios estudios han puesto en evidencia deficiencias de P disponible para los cultivos posteriores (Echeverría *et al.*, 1993). Por lo tanto, la incorporación de leguminosas a la

rotación puede modificar el balance de S y P en el cultivo siguiente, lo que se confirma con las tendencias observadas.

En encañazón los índices reflejaron importantes desbalances relativos entre los nutrientes. El análisis de los tratamientos sin fertilizar permitió comparar el efecto de la secuencia de cultivos sobre el balance nutricional del trigo, mientras que el aumento de las dosis permitió evaluar el efecto de la fertilización.

Efecto de la secuencia de cultivos:

- El N fue el elemento más deficiente en todas las secuencias de cultivos. Un menor índice (mayor deficiencia relativa) en TT, intermedio en TV1 y menos negativo en TPa, indicó diferencias entre sistemas en función de la disponibilidad de N.
- En segundo lugar en el orden de requerimientos apareció nuevamente el S y la deficiencia relativa disminuyó en el mismo orden, $TT > TV1 > TPa$.

Efecto de la fertilización con N:

- En las tres secuencias de cultivo, al aumentar la dosis de N aplicada, los índices de N resultaron menos negativos, es decir que el N fue menos deficiente. La disminución fue menor a medida que el tratamiento presentó un mejor IBN en los tratamientos sin fertilizar ($TPa < TV1 < TT$). Esto significa que en un cultivo mejor balanceado a nivel nutricional, inicialmente se observaría una menor respuesta a la aplicación de N.
- El aumento de la dosis de N también produjo distintos efectos en los tratamientos en el segundo elemento en orden relativo de deficiencias. En TT se destacaron S y P; con el aumento del N aplicado el P comenzó a tener índices de deficiencia relativa negativos. En TV1, aumentaron las deficiencias relativas de S, con valores variables de índice negativos y en TPa para dosis bajas de N el segundo lugar lo ocupó el S, mientras que con dosis altas lo hizo el P. Esto, en concordancia con estudios que

indican el mayor requerimiento de S por parte de las leguminosas y asociado al mayor consumo de P disponible por las pasturas (Echeverría *et al.*, 1993).

En antesis el orden de las deficiencias entre secuencias de cultivos fue semejante al observado durante encañazón TT> TV1> TPa. Dentro de cada una, el N fue el más deficiente, seguido por el S. En esta parte del ciclo no se observaron diferencias en cuanto a P. Esto reafirmaría el importante papel del N y del S en la formación de las proteínas del grano a partir de este estadio y que el P es más importante durante el crecimiento inicial.

En general, los índices DRIS fueron sensibles a los cambios en la disponibilidad de N. El aumento en las dosis de fertilizante se tradujo en un aumento de los índices de N.

El IBN puso en evidencia el mayor desbalance en TT. En TV1 y TPa el desbalance se observó en los tratamientos no fertilizados en encañazón. Esto demuestra que si bien las leguminosas aportan una fuente importante de N, esta debería complementarse con fertilización ya que, según las condiciones dadas para la descomposición de los residuos, la dinámica del N podría ser más lenta y su disponibilidad no coincidir con el momento de requerimientos del cultivo.

Tabla 32: Balance de nutrientes en planta; metodología DRIS.

		INDICES				IBN	Orden de Requerimiento
		N	P	K	S		
macollaje							
TT		-11	-1	15	-2	30	N > S > P > K
TV1		-6	-2	11	-4	22	N > S > P > K
TPa		-6	-6	12	0	25	N > P > S > K
encañazón							
TT	0	-41	13	43	-15	112	N > S > P > K
	30	-49	18	29	1	98	N > S > P > K
	60	-23	4	27	-8	63	N > S > P > K
	90	-16	-9	29	-5	58	N > P > S > K
	120	-13	-5	23	-5	46	N > S > P > K
TV1	0	-30	-1	38	-8	77	N > S > P > K
	30	-21	14	19	-13	67	N > S > P > K
	60	-20	9	20	-9	57	N > S > P > K
	90	-20	2	28	-10	60	N > S > P > K
	120	-9	-3	28	-16	57	S > N > P > K
TPa	0	-25	1	28	-3	57	N > S > P > K
	30	-19	8	15	-5	48	N > S > P > K
	60	-8	-5	23	-10	46	S > N > P > K
	90	-14	-12	26	-1	52	N > P > S > K
	120	-14	-10	22	2	48	N > P > S > K
antesis							
TT	0	-104	83	7	14	208	N > K > S > P
	30	-46	47	1	-3	97	N > S > K > P
	60	-30	28	8	-5	72	N > S > K > P
	90	-25	23	10	-9	67	N > S > K > P
	120	-20	22	10	-12	64	N > S > K > P
TV1	0	-72	54	15	3	144	N > S > K > P
	30	-46	52	4	-10	112	N > S > K > P
	60	-38	35	11	-9	93	N > S > K > P
	90	-30	31	8	-9	79	N > S > K > P
	120	-29	23	21	-15	88	N > S > K > P
TPa	0	-46	18	16	11	92	N > S > K > P
	30	-32	27	8	-2	69	N > S > K > P
	60	-37	33	7	-3	80	N > S > K > P
	90	-33	13	18	2	67	N > S > P > K
	120	-33	13	18	2	65	N > S > P > K

TT: monocultivo de trigo, TV1: verdeo de invierno consociado - trigo, TPa: pastura consociada - trigo.

Eficiencia de uso del fertilizante

La eficiencia agronómica de uso del fertilizante (EUF) disminuyó con el aumento de la dosis y/o con los mayores contenidos de N en el suelo por efecto de las leguminosas, coincidiendo esto con numerosos trabajos previos (Simmons, 1987; Raun y Johnson, 1995; Galantini *et al.*, 2006). En esta experiencia, la EUF resultó bastante inferior a la reportada para la zona de Bordenave, donde los valores de promedio en trigo rondan los 10-12 kg de grano por kg de N aplicado (Ron y Loewy, 1996; 2000). En el trigo cultivado luego de cinco años de pastura con leguminosa, no se detectaron respuestas positivas a la aplicación de urea, por lo que la EUF para la producción de MSta y grano fue aproximadamente nula o nula para todas las dosis (Tabla 33). Las pérdidas de MSta registradas luego de la anéisis (Tabla 29), se vieron reflejadas tanto en los rendimientos generales como en caídas sustanciales de los valores de eficiencia. Así, la pérdida de N asociado a esa MSta que fue en promedio de 37 kg N ha⁻¹, dentro de un rango de 8 a 67,7 kg N ha⁻¹, aumentó marcadamente con la dosis de fertilización y en los trigos con leguminosas como antecesor.

La EUF en el trigo con 60 kg de N ha⁻¹ fue superior en TV1 respecto de TT y TPa, tanto en la producción de MSta como de granos. Esto podría indicar la existencia de mejores condiciones físicas del suelo en TV1 para la respuesta.

Los valores promedio de recuperación aparente del nitrógeno del fertilizante (kg N MSta kg N aplicado⁻¹) fueron bastante bajos, con medias de; 0,27 en TT, 0,18 en TV1 y 0 en TPa (Tabla 33). El término “aparente” resulta de considerar que la aplicación del fertilizante en el suelo puede afectar las transformaciones del nutriente en el suelo. La bibliografía indica valores promedio de recuperación aparente para N del 50% del N aplicado como fertilizante, con rango de 10-90% (Novoa y Loomis, 1981; Bock, 1984). En términos agronómicos, por el

método de diferencia en los dos primeros casos el cultivo recuperó en el mejor de los casos un quinto del N aplicado.

Tabla 33: Eficiencia agronómica de uso del N del fertilizante para la producción de materia seca total aérea (MSta) y grano y recuperación aparente del N del fertilizante.

Dosis N (kg ha ⁻¹)	TT	TV1	TPa
	EU_{FMS} (kg MSta / kg N aplicado)		
30	15,7	13,2	1,4
60	10,4	19,2	0,0
90	15,1	6,8	2,1
120	12,6	11,1	2,5
	EU_{Fg} (kg grano / kg N aplicado)		
30	9,6	4,0	5,6
60	4,9	8,7	0,0
90	5,6	4,0	0,0
120	5,5	4,8	0,0
	RAN (kg N MSta / kg N aplicado)		
30	0,35	0,11	0,00
60	0,23	0,23	0,00
90	0,27	0,14	0,00
120	0,21	0,24	0,10
	RAN_g (kg N grano / kg N aplicado)		
30	0,31	0,00	0,00
60	0,17	0,13	0,00
90	0,20	0,09	0,00
120	0,14	0,33	0,05

TT: monocultivo de trigo, TV1: verdeo de invierno consociado-trigo, TPa: pastura consociada-trigo. EU_{FMS} y EU_{Fg}: eficiencia agronómica de uso del fertilizante para la producción de MSta en madurez fisiológica y grano, respectivamente. RAN, recuperación aparente del N del fertilizante.

Eficiencia de utilización del N disponible

Tanto en anthesis como en madurez fisiológica las mayores eficiencias de uso del N disponible (N_d) se dieron en los suelos en rotación con verdeos o pasturas consociados con escasas diferencias entre ellos (Figura 10 a y b). La eficiencia de uso del N_d para la producción de MSta (EUN_{MS}) se mantuvo en el orden TT<TV1<TPa en todo el rango de dosis ensayadas

(Tabla 34), en cambio para la producción granos (EUNg) los valores en TV1 y TPa tendieron a igualarse a partir de los 60 kg de N adicionado. Los valores promedio en TT, TV1 y TPa alcanzaron los 73, 84 y 98 kg MSta kg N_d⁻¹ y 28, 33 y 36 kg grano kg N_d⁻¹, respectivamente.

Con el aumento de la disponibilidad de N en el suelo la EUN_d disminuyó y las diferencias fueron cada vez menores, en todas las secuencias de cultivos estudiadas. Es decir, las diferencias entre los sistemas con y sin leguminosas fueron importantes cuando la disponibilidad de N fue más baja.

A nivel de los tratamientos sin fertilización, cuando la disponibilidad a la siembra fue mayor entre las distintas secuencias de cultivos, la eficiencia de absorción de ese N disponible (EAN_d) aumentó, aunque disminuyó con el aumento progresivo de la dosis. En los tres tratamientos no fertilizados la EAN_d fue mayor que 1, lo que indicaría que la fracción orgánica del suelo a través de su descomposición entregaría al sistema un *plus* de N_d para el cultivo. La eficiencia de transformación del N absorbido en grano (ETN) presentó valores variables en general en TT>TV1>TPa.

Teniendo en cuenta las condiciones climáticas del año 2002, estos resultados indicarían que la liberación gradual de N durante el ciclo del cultivo por degradación de los residuos de leguminosas habría tenido un efecto positivo a nivel cuantitativo sobre el N que el trigo fue capaz de absorber pero no sobre la eficiencia en su uso.

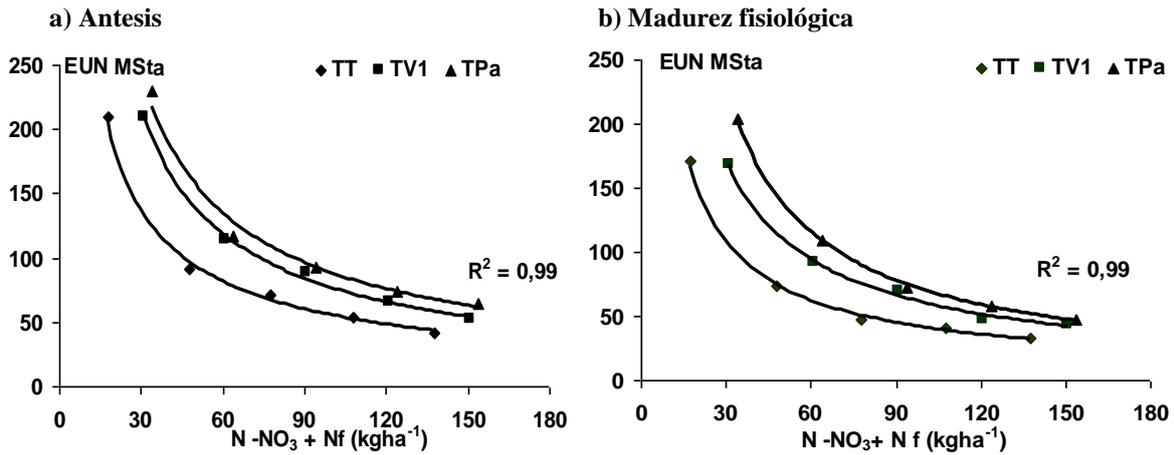


Figura 10: Eficiencia de uso del N disponible para la producción de materia seca total aérea (EUN_{MSta}) hasta los periodos de antesis (a) y madurez fisiológica (b). TT: monocultivo de trigo, TV1: verdeo de invierno consociado – trigo, TPa: pastura consociada – trigo.

Tabla 34: Eficiencia de uso del N disponible (N_d) para la producción de materia seca total aérea (MSta) y granos, eficiencia de absorción del N disponible y eficiencia de transformación del N absorbido.

Dosis N ($kg\ ha^{-1}$)	TT	TV1	TPa
	N- NO_3^- siembra ($kg\ ha^{-1}$)		
	17,6	30,8	33,9
EUN_{MS} ($kg\ MSta / kg\ N_d$)			
0	171,4	168,2	204,3
30	73,3	91,7	109,0
60	46,9	69,7	72,7
90	40,7	48,0	57,4
120	32,9	43,2	47,0
$EUNg$ ($kg\ grano / kg\ N_d$)			
0	62,5	63,9	75,8
30	29,1	34,3	42,8
60	18,0	27,4	27,4
90	14,9	19,2	19,3
120	12,8	16,9	16,3
EAN_d ($kg\ N\ MSta / kg\ N_d$)			
0	1,30	1,75	2,77
30	0,70	0,94	1,17
60	0,47	0,74	0,82
90	0,44	0,55	0,74
120	0,35	0,55	0,69
ETN ($kg\ N\ grano / kg\ N\ MSta$)			
0	48	37	27
30	41	37	37
60	38	37	33
90	34	35	26
120	37	30	24

Eficiencia de uso de N_d para la producción de MSta y grano (EUN_{MS} , $EUNg$), de absorción del N_d y transformación del N absorbido (EAN_d y ETN). TT: monocultivo de trigo, TV1: verdeo de invierno consociado–trigo, TPa: pastura consociada-trigo.

La bibliografía indica que los niveles de N en planta determinados en floración en cereales representan valores cercanos al 80-85% de la cantidad de N total que el cultivo absorberá durante su ciclo (Walldren y Flowerday, 1979). En base a esto y teniendo en cuenta las pérdidas de MS, se analizó el contenido de N en la MSta en antesis en función de la disponibilidad de N como $N-NO_3^-$ a la siembra + N del fertilizante (Figura 11). Las curvas mostraron que un nivel de 100 kg N ha^{-1} en la MSta en antesis se alcanzó a partir de contenidos de 33, 75 y $137 \text{ kg de } N_d$ en el suelo en TPa, TV1 y TT, respectivamente. Para la zona estos valores junto con los de MSta, se asocian con rendimientos aceptables a buenos, dependiendo de la disponibilidad hídrica. También en base a este gráfico, se calculó el aporte adicional de N por parte de la avena+vicia (42 kg ha^{-1}) y de la pastura (104 kg ha^{-1}) respecto del monocultivo trigo. Es decir, que en esas secuencias existiría un aporte significativo de N disponible por oxidación de la MO del suelo desde la siembra hasta el momento de antesis aunque también deberían considerarse posibles pérdidas del N agregado en TT.

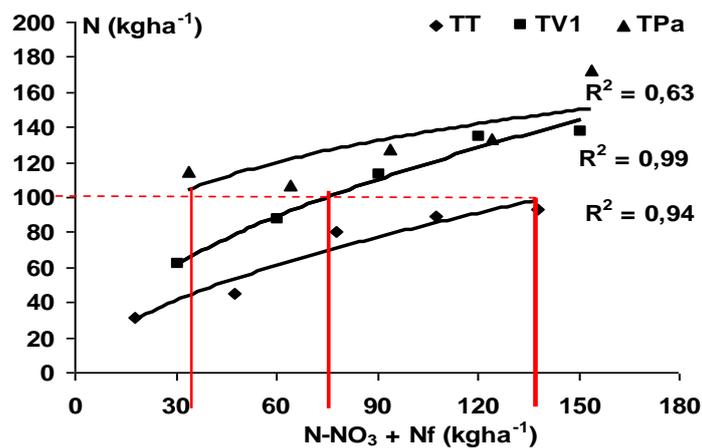


Figura 11: Contenido de N del trigo en antesis (kg ha^{-1}) en relación a la disponibilidad de N en el suelo ($N-NO_3^-$ siembra + N fertilizante) TT: monocultivo de trigo, TV1: verdeo de invierno consociado-trigo, TPa: pastura consociada-trigo.

La Tabla 35 presenta el contenido de N disponible del suelo y en el cultivo en diferentes momentos de su ciclo en los tratamientos no fertilizados. Por el método de la diferencia se calculó la cantidad de N entregada por el suelo entre los diferentes momentos estudiados, sin considerar el N en las raíces de las plantas ni las pérdidas de N por lavado o por volatilización.

Los sistemas que incluyeron leguminosas realizaron hasta antesis aportes mayores de N que el monocultivo de trigo ($TPa > TV1 > TT$). Sin fertilización, el aporte extra realizado por oxidación de la MO en los suelos con leguminosas fue de 16,6 kg N ha⁻¹ en TV1 y 63,8 kg N ha⁻¹ en TPa. Esto implica una menor necesidad de adición de N inorgánico y niveles de producción de trigo potencialmente superiores.

Tabla 35: Contenido de N del sistema en los tratamientos sin fertilización.

Fuente	siembra	macollaje	encañazón	antesis	cosecha
N (kg ha ⁻¹)					
TT					
Suelo*	17,6	31,7		25,8	
Planta	0,0	10,9	29,0	31,5	22,9
Suelo+planta	17,6	42,6		57,3	
Δ Sbra- macollaje	25,0				
Δ Sbra- antesis				39,7	
TV1					
Suelo	30,8	29,4		24,9	
Planta	0,0	13,5	56,5	62,2	53,8
Suelo+planta	30,8	42,9		87,1	
Δ Sbra- macollaje	12,1				
Δ Sbra- antesis				56,3	
TPa					
Suelo	33,9	34,2		22,9	
Planta	0,0	16,1	109,0	114,5	94,0
Suelo+planta	33,9	50,3		137,4	
Δ Sbra- macollaje	16,4				
Δ Sbra- antesis				103,5	

TT: monocultivo de trigo, TV1: verdeo de invierno consociado-trigo, TPa: pastura consociada-trigo. *: N-NO₃⁻ en el suelo (kg ha⁻¹) Venanzi S., EEA Bordenave del INTA, comunicación personal.

B. RENDIMIENTO DEL TRIGO DURANTE EL CICLO DE CADA SECUENCIA DE CULTIVOS

Si bien en la región semiárida pampeana, en general las precipitaciones se concentran en otoño y primavera con una estación seca a fines del invierno, la variabilidad en su distribución intra e interanual es alta (Figura 6). Esto implica variabilidad en los rendimientos, como se observó en este estudio. La Tabla 36 muestra las precipitaciones mensuales ocurridas en la EEA INTA Bordenave en el periodo estudiado, la sumatoria desde agosto a diciembre en cada año y los valores medios mensuales históricos entre 1928-2006.

En el año 2002 el período de barbecho se caracterizó por poseer buenas precipitaciones, que superaron las necesidades teóricas para ese periodo. No obstante, la fecha de siembra se demoró hasta el día 21/06. Posteriormente, ocurrieron buenas precipitaciones durante el otoño y lluvias oportunas a fines del invierno y en primavera (durante el periodo de espigazón) acumulándose 688,3 mm en total. Estas condiciones sólo permitieron lograr rendimientos generales considerados entre bajos y “normales”. Como se mencionó anteriormente, 30 días seguidos sin lluvia en la etapa de llenado de grano, y una helada intensa a fin de noviembre, tuvieron una importante influencia al respecto. La respuesta a la fertilización nitrogenada mostró cierta tendencia positiva aunque no significativa estadísticamente. En 2004 las lluvias de invierno compensaron el déficit hídrico que normalmente se observa en la primavera para los cereales de invierno, resultando en una producción mayor que la media. La campaña 2006 se caracterizó por la falta de precipitaciones adecuadas para el cultivo lo que llevó a rendimientos considerados casi despreciables (Figura 12).

La Figura 13 describe los rendimientos medios del trigo en los sin fertilización y el rendimiento promedio entre los tratamientos fertilizados, en cada secuencia de cultivos. En 2002 y 2004, en TT se observaron diferencias claras entre desvíos estándar de las medias de

los rendimientos con y sin fertilización. En 2006, la variabilidad en los rendimientos, producto principalmente del acentuado déficit hídrico hizo que los desvíos representen valores cercanos al 50% de los niveles de producción alcanzados.

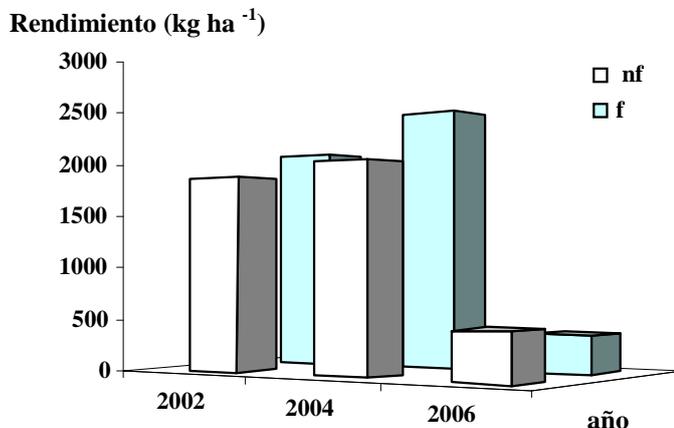


Figura 12: Rendimiento medio del trigo sin fertilizar (nf) y fertilizado (f); años 2002, 2004 y 2006.

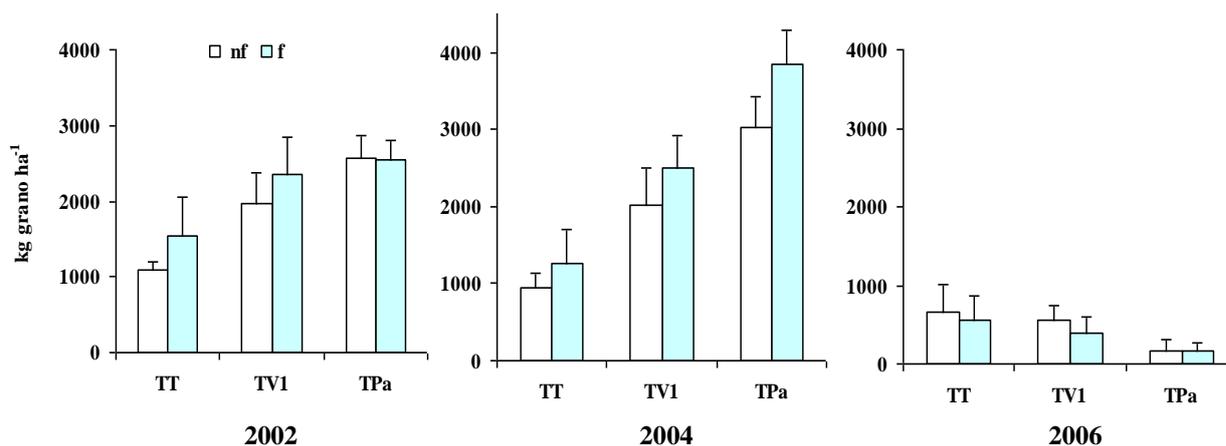


Figura 13: Rendimientos promedio del trigo (kg ha⁻¹) en las parcelas no fertilizadas (nf) y fertilizadas (f) en los años 2002, 2004 y 2006.

Tabla 36: Precipitaciones mensuales ocurridas en Bordenave durante el periodo en estudio, sumatoria de agosto a diciembre y valores medios históricos 1928-2006 (Hist.).

Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	∑agosto-diciembre
	(mm)												
2002	14	89	43	50	57	4	35	106	27	91	113	62	399
2003	46	84	36	29	31	2	7	29	19	144	56	57	305
2004	20	42	163	80	0	28	96	27	37	87	62	230	443
2005	112	36	43	10	9	12	20	24	67	33	56	68	248
2006	81	163	39	15	0	7	19	5	32	121	9	97	264
Hist.	72	70	94	53	39	25	22	24	46	76	70	77	293

Distribución de las precipitaciones y rendimientos

La influencia de las lluvias sobre los tratamientos estudiados fue variable. Esto se vio reflejado en el rendimiento del trigo en TPa y en TT en función de la precipitación acumulada de los meses de agosto a diciembre, período que mostró los mayores coeficientes de determinación (Figura 14a y b).

En el primer caso, una importante proporción de la variación del rendimiento explicada por la precipitación, se debería en parte a los altos rendimientos logrados en años de precipitaciones abundantes. La disminución de los rendimientos observada en TPa hacia el final del período agrícola coincidió con años de bajas precipitaciones. La disminución de los rendimientos del trigo, por la pérdida de fertilidad del suelo al aumentar el número de años desde la última pastura, es conocida (Forjan, 2000). En TPa, si bien se observó una disminución del N disponible hacia la última campaña, el efecto de las precipitaciones sobre el rendimiento del cultivo resultó dominante, y enmascaró cualquier variación relacionada con la fertilidad del suelo. En 2003, lluvias abundantes en el mes de octubre permitieron lograr rendimientos elevados. En TT los rendimientos no mostraron mayor relación con las precipitaciones. Esto podría atribuirse a la baja fertilidad del suelo, consecuencia del extenso periodo con monocultivo.

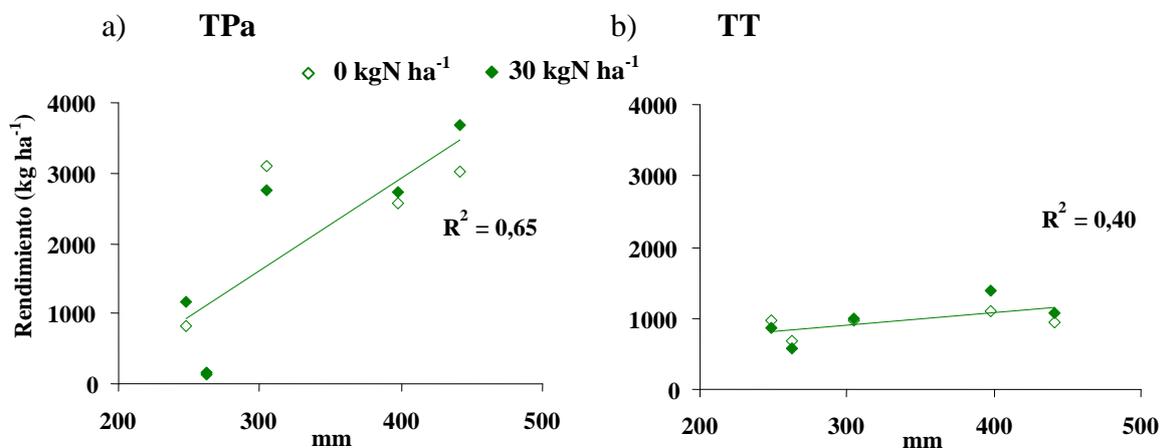


Figura 14: Relación entre rendimiento del trigo sin fertilizar y con 30 kg N ha⁻¹ en TPa y TT y la lluvia acumulada desde agosto a diciembre (2002-2006). Datos de rendimientos medios en 2003 y 2005 suministrados por la EEA Bordenave del INTA.

Para el análisis de la variación del rendimiento en grano y MSta en distintas etapas de cada secuencia de cultivos, se presentaron las curvas de respuesta del trigo a la aplicación de N en los años 2002, 2004 y 2006 (Figuras 15 y 16). Los valores de significancia de las regresiones y de los ANOVA para el efecto conjunto de la secuencia de cultivos y la fertilización se detallan en las Tablas 37 y 38, respectivamente.

Como se señaló anteriormente, estos años se caracterizaron por importantes diferencias en los factores climáticos, especialmente en lo referido a cantidad y frecuencia de las precipitaciones, por lo que se esperó observar al menos cierta variación de los efectos de la fertilización entre las secuencias de cultivos. Sin embargo, el análisis estadístico no detectó interacciones significativas entre dichas fuentes de variación, ninguno de los años. Es decir que dentro de cada año, el rendimiento medio del trigo en respuesta a la aplicación de urea se comportó de manera similar entre las secuencias de cultivos. Este comportamiento se dio tanto a nivel de la producción de granos como de MSta. Además, en cada secuencia y año, se observaron funciones de respuesta de forma similar de estos dos parámetros (Figuras 15a, b, c y 16a, b, c).

El año 2002, los rendimientos en grano del trigo entre secuencias, para el promedio de las dosis, aumentaron de manera muy significativa en el sentido $TT < TV1 < TPa$. La fertilización, por su parte, no produjo cambios significativos en el rendimiento al comparar entre dosis los valores promedio de las secuencias. La producción de granos de trigo en TPa no varió por la aplicación de N (Figura 15a). La fertilidad aportada por la pastura permitió alcanzar el rendimiento potencial bajo las condiciones edafoclimáticas y de manejo del año en estudio. En las secuencias TT y TV1 las curvas mostraron tendencias de un incremento gradual en la producción del trigo a medida que aumentaron las dosis de N. Tanto en el

tratamiento TT como en TV1 las mayores respuestas se dieron con la dosis máxima (120 kg N ha⁻¹) alcanzando 657 y 575 kg grano ha⁻¹, respectivamente.

La diferente disponibilidad de N producto de la dosis y los cultivos previos produjo efectos sobre la producción de MSta semejantes a los observados en el grano (Figura 16a). Es decir, que entre los tres antecesores existió un aumento de la producción paja cuando mayor fue la disponibilidad de N proveniente de la descomposición de residuos durante el ciclo del cultivo y en TT y TV1, con incrementos de la dosis de fertilizante la tendencia de aumento en la producción fue cada vez menor. En TPa, la adición de N no elevó los niveles de rendimiento.

El año 2004, la producción de grano para el promedio de las dosis entre secuencias, también aumentó en forma significativa en el sentido TT < TV1 < TPa. En cambio, a diferencia de 2002, se observó un efecto muy significativo de la fertilización sobre el rendimiento para los promedios entre secuencias (Figura 15 b), con diferencias máximas entre las dosis extremas (0 y 120 kg N ha⁻¹) y valores intermedios para las restantes, sin diferencias entre ellas.

En 2006, el efecto del estrés hídrico prevaleció sobre el de la secuencia de cultivos. La falta de precipitaciones adecuadas, sumado a la sequía del 2005, hizo que los rendimientos medios del trigo se consideren “virtualmente perdidos”. El nivel de producción se invirtió, siendo menor en TPa, intermedio en TV1 y mayor en TT, si bien no se encontraron diferencias significativas por efecto de la secuencia de cultivos ni por la fertilización sobre el rendimiento en grano (Figura 15c). Tanto en 2004 como en 2006, las variaciones en la disponibilidad de N producto de la fertilización y los antecesores, nuevamente produjeron efectos sobre la producción de MSta semejantes a los observados en el grano (Figura 16b y 16c).

El efecto de rotación de la pastura y del verdeo de invierno consociados sobre el rendimiento del trigo, fue superior al producido por la aplicación de 120 kg de N como fertilizante en TT.

(1500 y 2100 en TPa y, 900 y 1100 kg grano ha⁻¹ en TV1, en 2002 y 2004, respectivamente). Como se mencionó anteriormente los beneficios de la inclusión de leguminosas forrajeras en los sistemas de producción, conocidos como “efecto de rotación”, no se limitarían solamente al aporte de N, sino que derivarían de su combinación con otros factores como: mejoras en la estructura del suelo, reducción de enfermedades, reducción de sustancias fitotóxicas, y producción de sustancias promotoras del crecimiento (Hesterman, 1988, Migliarina *et al.*, 2000). En dichos años, el efecto adicional al aporte de N de las leguminosas representó un 60% en TPa y un 35% en TV1, del incremento total de los rendimientos. El aporte de N de la vicia depende de la producción de biomasa y su manejo agronómico (Mc Leod, 1982). Agamenoni y Vanzolini (2006) observaron un mayor aporte de N cuando el cultivo fue cosechado o desecado como abono verde, que cuando este fue consumido como forraje, eliminándose gran parte del N en la biomasa. Esto sugeriría que los rendimientos de trigo en TV1 podrían ser mayores que los registrados en este ensayo si el verdeo se utilizara en manejos que favorezcan el reciclado de mayor cantidad de biomasa aérea al suelo.

En 2002 y 2004 se observaron diferencias significativas por la secuencia de cultivos en la cantidad de N acumulado en los granos y la MSta del trigo, siguiendo el orden TT<TV1<TPa (Figuras 15d, 15e, 16d y 16e). La cantidad de N acumulada en los granos y MSta en el monocultivo en 2002, respondió hasta dosis elevadas de N, probablemente como consecuencia de las favorables condiciones de humedad de ese año. Un comportamiento semejante, pero con contenidos de N en planta más elevados caracterizó al trigo en TV1. En TPa y para las condiciones del sistema de producción (material genético, clima, suelo, etc.), la cantidad de N disponible por combinación de N derivado de la pastura y el fertilizante, superó los requerimientos necesarios para lograr el máximo potencial de rendimiento y produjo elevados porcentajes de proteína en el grano. Los excesos de N llevaron a alcanzar

contenidos proteicos superiores al 12%, valor límite que puede considerarse como un índice de ineficiencia en el uso del N para la producción de materia seca (Bergh *et al.*, 2002). En la rotación con pastura, este límite fue ampliamente superado.

En 2006, no se encontraron diferencias significativas producto de la secuencia de cultivos ni por la fertilización, si bien la tendencia entre secuencias se invirtió, resultando mayores las cantidades de N en la MS de TT, y menores en el trigo de TPa (Figuras 15f y 16f).

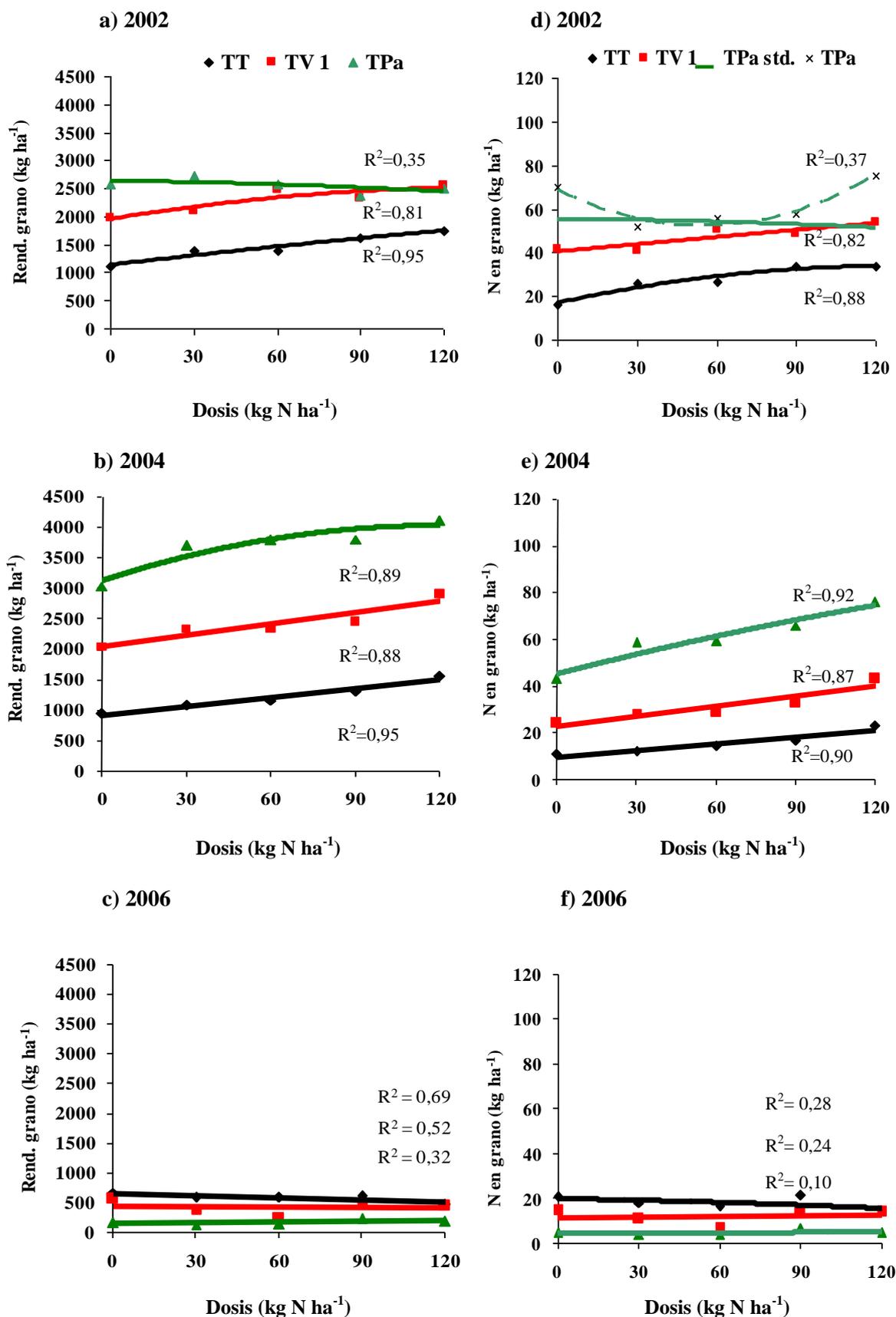


Figura 15: Rendimiento en grano (a, b y c) y N en grano (d, e y f), de trigo en distintas secuencias de cultivos, con distintas dosis de fertilización; años 2002 (a, d), 2004 (b, e) y 2006 (c, f). TPa std: valores N en grano estandarizados según contenido proteico máximo de 12%.

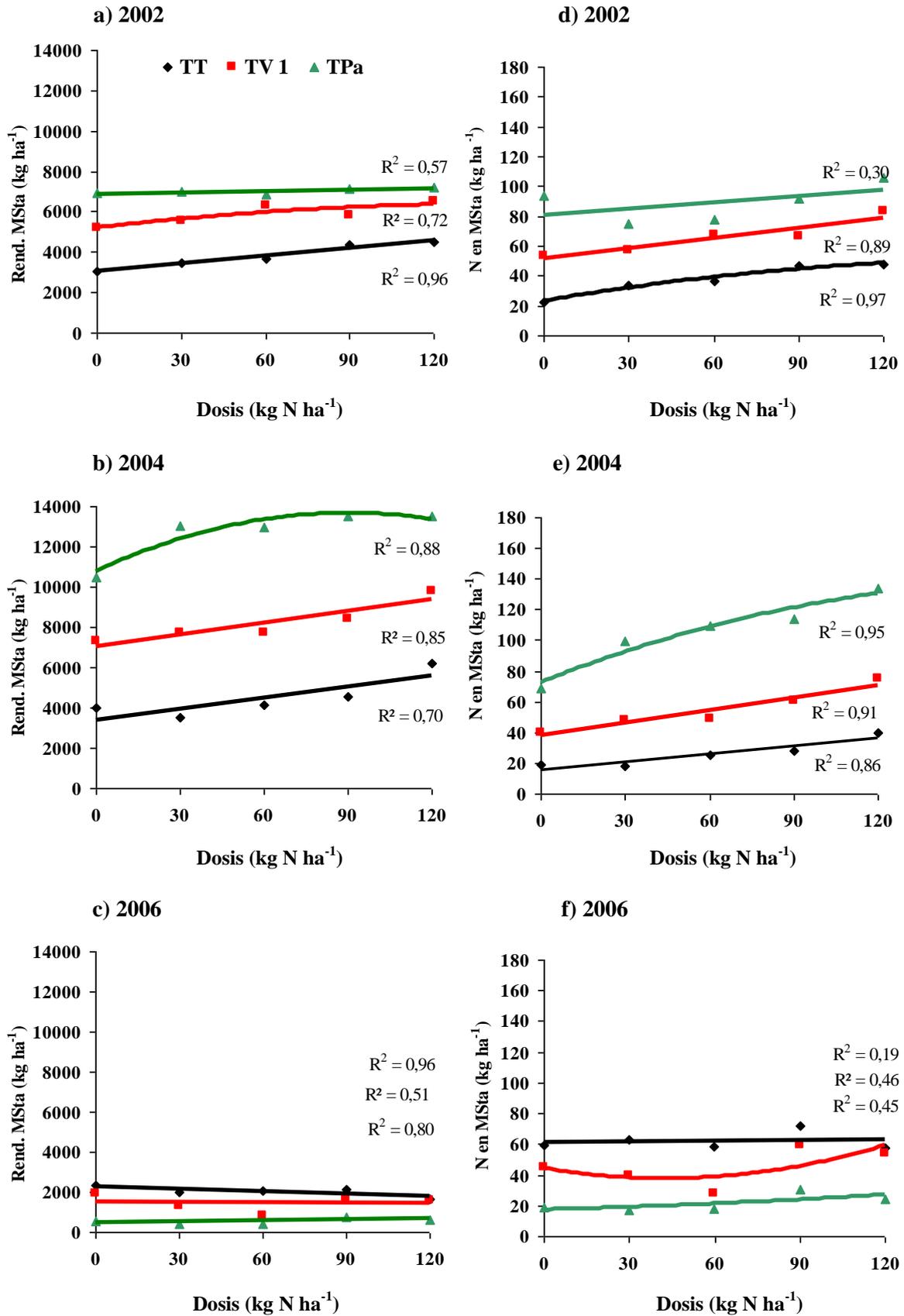


Figura 16: Materia seca total aérea en madurez fisiológica (MSta) (a, b y c) y N en la MSta (d, e y f), de trigo en distintas secuencias de cultivos, con distintas dosis de fertilización, años 2002 (a, d), 2004 (b, e) y 2006 (c, f).

Tabla 37: Significación de las regresiones entre la producción de granos, materia seca total aérea (MSta) a cosecha, N grano y N en la MSta, vs dosis de N, años 2002, 2004 y 2006.

Variable	Valores de "p" regresión								
	2002			2004			2006		
	TT	TV1	TPa	TT	TV1	TPa	TT	TV1	TPa
Granos	0,0054	0,0480	0,0917	0,0050	0,0199	0,0365	0,0917	0,8460	0,3963
MSta	0,0037	0,0470	0,1400	0,0275	0,0263	0,0960	0,0914	0,8463	0,3931
N grano	0,0185	0,0240	0,0881	0,0137	0,0214	0,0450	0,3652	0,8669	0,6043
N MSta	0,0057	0,0171	0,0037	0,0232	0,0116	0,0510	0,7924	0,4184	0,2231

TT, trigo continuo; TV1, 1 año trigo - 1 año verdeos de invierno consociados; TV2, 2 años trigo - 2 años verdeos de invierno consociados; TPa, 5 años trigo - 5 años pastura consociada.

Tabla 38: Significación de los ANOVA entre los efectos de la secuencia de cultivos y la fertilización para las variables producción de granos, materia seca total aérea (MSta) a cosecha, N grano y N en la MSta, vs. dosis de N; años 2002, 2004 y 2006.

Variable	Valores de "p" ANOVA								
	2002			2004			2006		
	SC	F	SCxF	SC	F	SCxF	SC	F	SCxF
Grano	0,0002	0,1426	0,3186	0,0001	0,0007	0,9454	0,0652	0,1640	0,5657
MSta	0,0001	0,0591	0,7443	<0,0001	0,0021	0,5711	0,0726	0,2230	0,4892
N grano	0,0047	<0,0001	0,1894	<0,0001	<0,0001	0,4063	0,0848	0,3134	0,5221
N MSta	<0,0001	<0,0001	0,1050	<0,0001	<0,0001	0,0988	0,0797	0,2588	0,3629

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

CAMBIOS EN EL SUELO DE LARGO Y CORTO PLAZO

Los efectos de la secuencia de cultivos y la fertilización fueron variables entre los diferentes tratamientos y profundidades, afectando tanto al COM y al COP como también a la relación COP:COT y sus contenidos de N.

El monocultivo con trigo mostró el mayor nivel de degradación de la MO.

La inclusión de leguminosas incrementó los niveles de CO. Las secuencias con trigo y verdeos de invierno consociados en ciclos cortos incrementaron el COM, indicando una mayor humificación de los residuos y ciclado más rápido de nutrientes. En cambio, en aquellos de ciclo largo se incrementaron los niveles de COP, con una velocidad de descomposición, que condujo a mayores desbalances. La rotación con pastura presentó los valores más elevados en ambas fracciones orgánicas, sin embargo en algunos casos no llegaron a ser estadísticamente diferentes a los de las rotaciones cortas con leguminosas.

Los efectos de la secuencia de cultivos y la fertilización se reflejaron en la relación COP:COT, evidenciando las diferencias entre la dinámica de ambas fracciones, donde los equilibrios más importantes se deberían a la cantidad y a la variación en la velocidad de humificación de los residuos incorporados al suelo. Posiblemente esto ocurra por los efectos contrapuestos sobre la producción de materia seca y la velocidad de humificación en cada caso. El efecto de la fertilización fue significativo en el monocultivo. Al incorporar leguminosas, el manejo de la fertilización cobró mayor importancia. La misma, en función de la eficiencia de uso del N, a través de su efecto sobre los aportes y la velocidad de descomposición de los residuos, alteró la relación entre las fracciones orgánicas.

En estos sistemas bajo labranza, sólo se observa una ligera acumulación superficial de las fracciones lábiles, mientras que adquiere relevancia la determinación de la profundidad de labranza efectiva para realizar los estudios. La alta variabilidad observada en la profundidad

límite de las labranzas (10-15 cm) remarcó la importancia de la definición de la profundidad límite a muestrear.

Si bien se observó una disminución de los niveles de MO del suelo en ciertos tratamientos, esto no se reflejó en cambios significativos en los niveles de Pte ni Po+Pi entre los tratamientos. La similitud entre el Pte y el Po+Pi observada en TT ocurrió principalmente debido al efecto del mayor número de años con agricultura sobre la solubilización de formas ocluidas del P, poco disponibles en el corto plazo. En las secuencias cortas con leguminosas la fertilización promovió la acumulación de formas inorgánicas de P. En cambio, en la secuencia con pastura se vieron favorecidos los equilibrios desde el Pi hacia el Po. La variación en los valores de concentración del P edáfico aumentó a medida que se analizaron las fracciones granulométricas de mayor tamaño y, dentro en cada fracción, cuando se trató de las formas de P de mayor labilidad. El estudio del P en la FG del suelo, resultó de relevancia para el análisis de la dinámica de los sistemas de producción estudiados. Así, el P asociado a la MOP fue el que de mostró mayor sensibilidad en respuesta a los efectos del manejo y las condiciones meteorológicas en el corto plazo.

La MOP es un indicador muy dinámico, el cual estaría más asociado a la *Fertilidad* del suelo que a su *Calidad*. Para la mejor evaluación del estado orgánico de un sistema debe tenerse en cuenta tanto la cantidad de MOP como su relación con otras fracciones, su calidad y el contenido de nutrientes en ella, además del conocimiento del efecto que los factores de manejo y climáticos ejercen sobre ella.

El monocultivo de trigo produce la pérdida paulatina del CO del suelo, efecto que disminuye con la aplicación de fertilizantes. Las leguminosas son una importante alternativa para mantener las reservas de C del suelo, pero requieren un balance adecuado entre el manejo de la rotación y la fertilización. Las secuencias cortas con leguminosa, maximizan el ciclado del C y nutrientes, disminuyendo la respuesta del trigo a la fertilización temprana. Estos planteos

constituyen sistemas eficientes, productivos y económicamente viables, pero necesitan de una reposición adecuada de nutrientes para mantenerse en forma sostenible en el tiempo.

La fertilización nitrogenada, a través de su efecto sobre los aportes y la velocidad de descomposición de los residuos, altera la relación entre las fracciones orgánicas.

Las diferentes secuencias de cultivos modifican el ambiente edáfico y los equilibrios de P, afectando su disponibilidad en el corto, mediano y largo plazo. El mayor reciclado de las formas de P ocurre en la fracción gruesa del suelo, representando la fracción más dinámica. La fertilización altera tanto la cantidad como la calidad, principalmente del P asociado a la fracción gruesa del suelo, modificando las relaciones C:P de la MOP.

En el corto plazo, los cambios en el contenido de CO edáfico debidos a la secuencia de cultivos fueron variables en el tiempo dependiendo del cultivo y las precipitaciones, mientras que aquellos debidos a la fertilización fueron generalmente no significativos.

Al igual que en otros estudios, se observó que los verdeos de invierno consociados ejercen un efecto importante y de corto plazo, donde la aplicación de fertilizante al trigo siguiente tiene un efecto nulo sobre la respuesta, que aumenta durante el segundo trigo consecutivo y se hace máxima en el tercero. Probablemente, cambios en el momento de la fertilización produzcan efectos muy diferentes y/o variables según los años climáticos. En el largo plazo debería reflejarse el verdadero valor de la respuesta a la fertilización. Es decir que, este tipo de sistemas no permite apreciar el verdadero efecto potencial de esta práctica, por lo que deberían plantearse sistemas de producción diferentes o alternativos, con dosis y momentos de aplicación adecuados a cada uno de ellos.

Los resultados presentados correspondieron a un momento puntual de cada uno de los ciclos de las secuencias estudiadas y por ello dependieron de la etapa de la secuencia bajo condiciones meteorológicas particulares. Así, los cambios en los contenidos de las fracciones orgánicas, y sus contenidos de N, pusieron en evidencia dinámicas muy diferentes. La

fertilización generalmente afecta la producción de materia seca de los cultivos, siendo el factor generador de interacción.

EFFECTOS SOBRE LA PRODUCTIVIDAD EL TRIGO

Los resultados obtenidos permitieron plantear las siguientes observaciones:

El efecto del antecesor avena+vicia mostró un comportamiento intermedio entre el de TT y TPa, asemejándose a la pastura en TPa cuando contó con aportes de N como fertilizante.

En el año 2002, el N en los granos del trigo luego de la pastura (55-70 kg ha⁻¹) superó ampliamente al del monocultivo (17-34 kg ha⁻¹), evidenciando el importante efecto de las leguminosas.

Respecto al *Valor de Reemplazo de Fertilizante*, para las condiciones de este estudio, tanto en el año 2002 como en 2004, el efecto de la leguminosa no pudo ser sustituido por la aplicación de 120 kg de N ha⁻¹ inorgánico. Esto ocurrió debido a que la secuencia con leguminosas produjo un efecto favorable mucho más amplio, mejorando las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo (Andriulo *et al.*, 1990; Miglierina *et al.*, 2000; Galantini *et al.*, 2002), lo que además se reflejó, en mayores rendimientos y un mejor balance nutricional del cultivo. El trigo en las secuencias con leguminosas absorbió más N del suelo, principalmente por un mayor aporte por la descomposición de la MO, requirió de menos cantidad de fertilizante para alcanzar rendimientos más altos y fue más eficiente en el uso del N disponible.

La diferencia entre el contenido de N máximo alcanzado en TV1 y TT representaría el “efecto de rotación”. La rotación con vicia aportó en promedio 24 kg N ha⁻¹ cuando no se utilizó fertilizante nitrogenado.

La fertilización generalmente afectó la producción de materia seca de los cultivos de manera diferente en cada una de las secuencias estudiadas. Probablemente, las diferencias entre las secuencias de cultivos de este ensayo no permitieron apreciar el efecto potencial de la fertilización, por lo que deberían plantearse sistemas de producción diferentes o alternativos, con dosis y momentos de aplicación adecuados a cada sistema.

En años normales, los niveles de producción del trigo en rotación superaron al monocultivo, tanto en cantidad como en calidad de los granos, evidenciando el importante efecto de las leguminosas.

Al aumentar la fertilidad del suelo, sea por efecto de la inclusión de leguminosas o de la fertilización, los rendimientos del trigo se volvieron más dependientes de la aleatoriedad de las precipitaciones. Cuando las reservas de agua en el suelo resultaron insuficientes, se produjo un importante estrés hídrico en las plantas de los tratamientos con mayores niveles de N durante estadios críticos, con pérdidas importantes de biomasa y caídas en los rendimientos potenciales. Aspectos de manejo, como antecesores y fertilización, deberían apuntar a la optimización de la eficiencia de uso del N, al menos hasta el periodo de antesis, ya que posteriormente la respuesta variará en función de las condiciones meteorológicas de cada año en particular.

En base al esquema de manejo actual de la Rotación I, no se esperarían cambios importantes en los niveles orgánicos, lo que sugeriría que se trata de sistemas que ya han alcanzado cierto equilibrio, con diferencias sólo por la dinámica propia de cada secuencia.

Los cambios en el contenido de COT del suelo demostraron esa dinámica propia de cada secuencia o rotación y otra dependiente de las variables climáticas, donde la interacción de estos factores genera cambios específicos para cada momento. La interpretación de los resultados de un muestreo (fotografía) permite conocer el estado de un sistema pero no en

todos los casos su dinámica (película). En este caso, los resultados de cada uno de los años estudiados permitieron obtener conclusiones importantes, las que a se vez, en conjunto, resaltaron la dinámica de cada sistema de producción, siendo esto de relevancia en cuanto a la toma de decisiones en base a perspectivas futuras.

Los resultados obtenidos demostraron que las fracciones orgánicas del suelo son muy dinámicas y dependientes de los factores climáticos y de manejo, lo que conduce directamente al planteo de interrogantes como:

¿Cuál es el óptimo balance entre el uso de la MO como fuente de nutrientes y energía y su conservación como un condicionante del ambiente edáfico? Asumiendo que la MO pueda ser manipulada prácticamente ¿cuánto y hasta cuándo podría ser ésta alterada? Esto, resulta tanto una cuestión agronómica, como económica y social.

BIBLIOGRAFÍA

- Agamennoni, R. y J. I. Vanzolini. 2006. Diferentes manejos para la vicia y su efecto sobre el rendimiento y calidad del trigo. Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACS (Ed.), Salta. P. 380.
- Alvarez, R., C.R. Alvarez, H.S. Steinbach, J.M. Salas y S. Grigera. 2002. Materia Orgánica y Fertilidad de los Suelos en la Pampa Ondulada. Informaciones Agronómicas del Cono Sur 14: 11-14.
- Alvarez, R. and R.S. Lavado. 1998. Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils, Argentina. Geoderma 83: 127-141.
- Amanuel, G., R.F. Kuhne, D.G. Tanner and P.L.G. Vlek. 2000. Biological nitrogen fixation in faba bean (*Vicia faba* L.) in the Ethiopian highlands as affected by P fertilization and inoculation. Biol. Fert. Soils 32: 353-359.
- Andriulo, A., J.A. Galantini, C. Pecorari y E. Torioni. 1990. Materia orgánica del suelo en la región pampeana. I. Un método de fraccionamiento por tamizado. Agrochimica (Italia) XXXIV (5-6) 475-489.
- Andriulo, A., M.C. Nasal, A.B. Irizar, S.B. Restovich y F. Rimatori. 2008. Efectos de diferentes sistemas de labranzas, secuencias 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 Argentina (Ed. J.A. Galantini), 117-129.
- Azam, F., K.A. Malik and M.I. Sajjad. 1986. Uptake by wheat plant and turnover within soil fractions of residual N from leguminous plant material and inorganic fertilizer. Plant Soil 95: 97-108.
- Baldock, J.A. and R.B. Musgrave. 1980. Effects of manure and mineral fertilizer on continuous and rotational crop sequences. Agron. J. 72: 511-518.
- Baldock, J.A. and J.O. Skjemstad. 2000. The role of the mineral matrix in protecting natural organic materials against biological attack. Organic Geochemistry 31: 697-710.
- Baravalle, R.A. 1992. Dinámica del fósforo edáfico en Haplustoles Énticos de la región semiárida pampeana. Tesis Magíster en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Sur, 70 pp.

- Barber, S. A. 1995. Soil Nutrient Bioavailability: A mechanistic Approach. 2nd Edition Harcover. 384 pp.
- Barrios, A.G. 2007. Rentabilidad de sistemas de producción en la Región Semiárida Pampeana. Tesis de Magíster en Ciencias de la Administración. Universidad Nacional del Sur, 450 pp.
- Bauer, A. and A.L. Black. 1981. Soil C, nitrogen, and bulk density comparisons in two cropland tillage systems after 25 years and in virgin grassland. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 1166-1170.
- Bauer, A. and A.L. Black. 1994. Quantification of the effect of soil organic matter content on soil productivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 185-193.
- Bayer, C., L. Martin-Neto, J. Mielniczuk, C.N. Pilon and L. Sangoi. 2001. Changes in soil organic matter fractions under subtropical no-till cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1473–1478.
- Bayer, C. e J. Mielnickzuk. 1999. Dinâmica e função da matéria orgânica. En Santos G.A., Camargo, F.A.O. (Eds.), *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. Porto Alegre: Gênese. 1999. 9-26.
- Bayer, C., D. Pinheiro, G. Mafra Ribeiro and K. Scheuermann. 2002. Carbon stocks in organic matter fractions as affected by land use and soil management, with emphasis on no tillage effect. *Ciencia Rural*, Santa Maria 32, No 3: 401-406.
- Beaufils, E.R. 1973. Diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). A general scheme for experimentation and calibration based on principles developed from research in plant nutrition. *Soil Sci.* 1: 1-132. University of Natal. Sur Africa.
- Berardo, A., F. Grattone, R. Rizzalli and F. Garcia. 1997. Long-term effects of P fertilization in wheat yields, efficiency and soil test levels. *Better Crops* 12 (2): 18-20.
- Bergh, R., M. Zamora, M. Seghezzo y E. Molfese. 2002. La fertilización nitrogenada en trigo: Un factor determinante de la Calidad. *Revista FertiPASA* No 17: 5-10.
- Beverly, R. 1993. Reevaluation reveals weaknesses of DRIS and Sufficiency Range diagnoses for wheat, corn and alfalfa. *Communications in Soil Sci. and Plant Analysis.* 24: 487-501.
- Blake, G.R. and K.H. Hartge. 1986. Bulk Density. In: Arnold Klute (Ed.) *Methods of Soil*

Analisis. Part 1: 363-375.

- Blevins, R.L., J.H. Herbeck and W.W. Frye. 1990. Legume cover crops as nitrogen source for no-till corn and grain sorghum. *Agron. J.* 82: 769-772.
- Bock, B.R. 1984. Efficiency Use of Nitrogen in Cropping Systems. En: Nitrogen in Crop Production. R.D. Hauck; J.D. Beaton; C.A.I. Goring; R.G. Hoelf; G.W. randall and D.A. Russel (Ed.). ASA-CSSA-SSSA Madison USA. 273-294.
- Bolger, T.P., J.S. Pate, M.J. Unkovich and N.C. Turner. 1995. Estimates of seasonal nitrogen fixation of annual subterranean clover-based pastures using the ^{15}N natural abundance technique. *Plant Soil* 175: 57-66.
- Bolinder, M.A., D.A. Angers, E.G. Gregorich and M.R. Carter. 1999. The response of soil qalyti indicators to conservation management. *Can. J. Soil Sci.* 79: 37-45.
- Bowman, R.A., W.D Guenz and D.J. Savory. 1991. Spectroscopic method for estimation of soil organic carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:563-566.
- Bra, C., L. Torrent, J.Giralde, P. Gon and R. Ordone. 2006. Long- term effect of tillage on phosphorus forms and sorption in a Vertisol of southern Spain. *European journal of Agronomy.* 25:264-269.
- Bray, R.H. and L.T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorous in soils. *Soil Sci.* 59: 39-45.
- Bremner, J.M. 1996. Nitrogen total. In *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods.* (Ed. D.L. Sparks), *Soil Sci.Soc. Am. J.-ASA, Madison, WI, USA.* 1085-1123.
- Bundy, L., T. Andraski and R. Wolkowski. 1993. Nitrogen credits in soybean-corn crop sequences on three soils. *Agron. J.* 85:1061-1067.
- Buschiazzo, D.E., A.R. Quiroga and K. Stahr. 1991. Patterns of organic matter accumulation in soils of the semiarid Argentinian Pampas. *Z. Pflanzenem. Bodenk.* 154: 347-441.
- Buschiazzo, D.E., S. Aimar and T. Zobeck. 1999. Wind erosion in soils of the semiarid Argentinian Pampas. *Soil Sci.* 164: 133-138.
- Buyanosky, G., M. Aslam and G. Wagner. 1994. Carbon turnover in soil physical fractions. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 58: 1167-1173.
- Campbell, C.A., K.E. Bowren, M. Schnitzer, R.P. Zentner and L. Townley-Smith. 1991a. Effect of crop rotations and fertilization on soil organic matter and some biochemical

- properties of a thin Black Chernozem. *Can. J. Soil Sci.* 71: 377-387.
- Campbell, C.A., G.P. Lafond, R.P. Zentner and V.O. Biederbeck. 1991b. Influence of fertilizer and straw baling on soil organic matter in a thin Black Chernozem in western Canada. *Soil Biol. Biochem.* 23: 443-446.
- Campbell, C.A., B.G. McConkey, R.P. Zentner, F. Sellers and D. Curtin. 1996. Long-term effects of tillage and crop rotations on soil organic C and total N in a clay soil in southwestern Saskatchewan. *Can J. Soil Sci.* 76: 395-401.
- Campbell, C.A., E.A. Paul and W.B. Mc Gill. 1976. Effect of cultivation and cropping on the amounts and forms of soil N. Pp. 9-101. In W.A. Rice (Ed.) *Proc., Western Can. Nitrogen Symp., Alberta Soil Sci. Workshop, Calgary. 20-21 Jan. 1976.* Alberta Agric., Edmonton, Alberta, Canada.
- Campbell, C.A. and W. Souster. 1982. Loss of organic matter and potentially mineralizable nitrogen from Saskatchewan soils due to cropping. *Can. J. Soil Sci.* 62: 651-656.
- Carter, M.R., E.G. Gregorich, D.W., Anderson, J.W., Doran, H.H., Janzen and F.J. Pierce. 1997. Concepts of soil quality and their significance. In *Soil quality for crop production and ecosystem health* (Eds. Gregorich, E.G. y Carter, M.). Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands.
- Carter, M.R. and B.A. Stewart. 1996. *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils.* CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Casanovas, E.M., G.A Studdert y H.E. Echeverría. 1995. Materia orgánica del suelo bajo rotaciones de cultivos. II. Efecto de los ciclos de agricultura y pastura. *Ciencia del Suelo* 13: 21-27.
- Casas, R. 2001. *La conservación de los suelos y la sustentabilidad de los sistemas agrícolas.* Vol. 4. Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria, Buenos Aires.
- Christensen, B.T. 1992. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. *Adv. Soil Sci.* 20: 2-90.
- Czuba, R. 1969. Uptake of nutrients by winter wheat. *Ricz. Nauk. Roln. Ser. A.* 96: 5-28 (Pol.).
- Dalal, R.C., B.P. Harms, E. Krull and W.J. Wang. 2005. Total soil organic matter and its labile pools following mulga (*Acacia aneura*) clearing for pasture development and

- cropping. 1. Total and labile carbon. *Aus. J. Soil Res.* 43: 13-20.
- Darwich, N.A. 1980. Niveles de fósforo asimilable en los suelos pampeanos. *Actas de la IX Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo*. Paraná, Entre Ríos. Tomo II: 707-709.
- Darwich, N.A. 1983. Niveles de P disponible en suelos pampeanos. *IDIA* 409-412: 1-5. INTA. Bs. As., Argentina.
- Darwich, N.A. 1991. Estado actual y manejo de los recursos naturales en la región pampeana húmeda sur. Pp. 51-62, en: *Seminario Juicio a Nuestra Agricultura. Hacia el desarrollo de una agricultura sostenible*. Buenos Aires, 1991. Buenos Aires, Ed. Hemisferio Sur.
- Darwich, N.A. 2005. *Manual de Fertilidad de suelos y Uso de Fertilizantes (2º Edición)*. Gráfica Arnedinho 182 pp.
- Davidson, E.A. and I.L. Ackerman. 1993. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils. *Biogeochemistry* 20: 161-193.
- Domínguez, G.F., N.V. Diovisalvi, G.A. Studdert and M.G. Monterubbianesi. 2009. Soil organic C and N fractions under continuous cropping with contrasting tillage systems on mollisols of the southeastern Pampas. *Soil Till. Res.* 102: 93-100.
- Domínguez, G.F., G.A. Studdert, M.J. Eiza, N.V. Diovisalvi y N. Fioriti. 2006. Relación entre la materia orgánica y el rendimiento de maíz. *XX Congreso Arg. de la Ciencia del Suelo*, Salta. Acta de resúmenes p. 329.
- Doran, J.W. and T.B. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. p. 3-21. In Doran J.W., D.C. Coleman, D.F. Bezdisk, B.A. Stewart (Eds). *Defining soil quality for sustainable environment*. Soil Sci. Soc. of Am. Special Publication 35, ASA-SSSA, Madison, WI.
- Doran, J.W., M. Sarrantonio and M.A. Liebig. 1996. Soil health and sustainability. In D.L., Sparks (Ed.): *Adv. in Agron.* 56: 1-54. Academic Press, San Diego, CA.
- Doran, J.W. and M.S. Smith. 1987. Organic matter management and utilization of soil and fertilizer nutrients. In S.H. Mickelson (Ed.) *Soil Fertility and Organic Matter as Critical Components of Production Systems*. SSSA Spec. Pub. No 19.

- Dormaar, J. and J.M. Carefoot. 1996. Implications of crop residues management and conservation tillage on soil organic matter. *Canadian Journal of Plant Science*. 76 (4) 627-634.
- Ebelhar, S.A., W.W. Frye and R.L. Blevins. 1984. Nitrogen from legume cover crops for no-tillage corn. *Agron. J.* 76: 51-55.
- Echeverría, H.E. y R. Bergonzi. 1995. Estimación de la mineralización de nitrógeno en suelos del sudeste bonaerense. *Boletín Técnico No.135*, 15 p. CERBAS, Centro Regional Buenos Aires Sur, INTA. EEA Balcarce.
- Echeverría, H.E. y F.O. Garcia. 1998. Guía para la fertilización fosfatada de trigo, maíz, girasol y soja. *Boletín Técnico No 149*. EEA INTA Balcarce.
- Echeverría, N., T. Grossi, C.A. Purricelli y H. Pelta. 1993. Evolución de cuatro parámetros del suelo en dos manejos contrastados. XIV Congreso Arg. de la Ciencia del Suelo. Acta de resúmenes p. 305.
- Eiza, M. J., N. Fioriti, G.A. Studdert y H. Echeverría. 2005. Fracciones de carbono orgánico en la capa arable: efecto de los sistemas de cultivo y fertilización nitrogenada. *Ciencia del Suelo* 23 (1): 59-67.
- Ellert, B.H. and J.R. Bettany. 1995. Calculation of organic matter and nutrient stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Sci.* 75: 529-538.
- Elliott, E.T. 1997. Rationale for developing bioindicators of soil health. In C. Pankhurst, B.M. Doube, V.V.S.R. Gupta (Eds), *Biological indicators of soil health*. pp. 49-78. (CAB International: UK).
- Elliott, E.T. and C.A.Cambardella. 1991. Physical separation of soil organic matter. *Agric. Ecosystems Environ.* 34: 407-419.
- Elliott, E.T. and D.C. Coleman. 1988. Let the soil work for us. *Ecological Bulletins* 39: 23-32.
- Erdei, L., Z. Olah and A. Bérczi. 1983. Nutrition of winter wheat during the life cycle. II. Influx and translocation of potassium and phosphorus. *Physiol. Plant.* 58, 131-135.
- Espinoza, Y. 2004. Calidad de la materia orgánica bajo diferentes prácticas de manejo en un suelo ácido tropical. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)* 21: 126-140.
- Fageria, N.K. and V.C. Baligar. 2005. Enhancing Nitrogen Use Efficiency in Crop Plants.

- Adv. in Agron. 8: 97-185.
- FAO. 2007. Secuestro de carbono en tierras áridas. Informes sobre recursos mundiales de suelos. No 102. Roma.
- Feller, C. and M.H. Beare. 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma* 79: 69-116.
- Fernández, R.E., J.A. Galantini, M.R. Landriscini, A. Marinissen y M. Enrique. 2007. Fertilización con N y S en trigo con distinto antecesor: efecto sobre la nutrición, el rendimiento y la calidad. *Revista Investigaciones Agropecuarias (RIA) – INTA* 36 (2): 29-48.
- Fischer, R.A., F. Santiveri and I.R. Vidal. 2002. Crop rotation, tillage and crop residue management for wheat and maize in the sub-humid tropical highlands: I. Wheat and legume performance. *Field Crops Res.* 79: 107-122.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2007. Carbon Sequestration in Dryland Soils. *World Soils Resources Reports* 102. pp.135. Rome.
- Forjan, H. 2000. Rotaciones en sistemas mixtos. La pastura perenne, base de la agricultura sustentable en la región. *Mat. Didáctico No 1 Chacra Experimental Integrada Barrow (Convenio MAA-INTA)*, 11 pp.
- Franzluebbers, A.J., F.M. Hons and D.A. Zuberer 1995. Tillage and crop effects on seasonal soil carbon and nitrogen dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1618-1624.
- Friesen, D.K. and G.J. Blaier. 1988. A dual radiotracer study of transformations of organic, inorganic and plant residue phosphorus in soil in presence and absence of plants. *Aust. J. Soil Res.* 26: 355-366.
- Galantini, J.A. 2001. Contenido y calidad de las fracciones orgánicas del suelo bajo rotaciones con trigo en la región semiárida pampeana. *Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA-INTA)* 30 (1) 125-146.
- Galantini, J.A. 2005. Separación y análisis de las fracciones orgánicas. En L. Marban y S. Ratto (Eds.): *Manual “Tecnología en Análisis de Suelos: Alcances a laboratorios agropecuarios” de la AACCS. Capitulo IV parte 2, 103-114.*
- Galantini, J.A. y J.O. Iglesias. 2007. Capacidad de secuestro de carbono y efecto de las prácticas agronómicas en suelos de la Región Pampeana de Argentina. En J.F.

- Gallardo Lancho (Ed.): La captura de carbono en ecosistemas terrestres Iberoamericanos. pp. 169-182.
- Galantini, J.A., J.O. Iglesias, A.M. Miglierina, R.A. Rosell y A. Glave. 1992. Rotación y fertilización en sistemas de producción de la región semiárida bonaerense argentina. I. Productividad (calidad y rendimiento) del trigo. *Rev. Fac. Agronomía (U.B.A.)*: 13, 67-75.
- Galantini, J.A. y M.R. Landriscini. 2007. Equilibrio y dinámica de las fracciones orgánicas del suelo: Relación con la fertilidad del suelo y la sustentabilidad del sistema. Capítulo 14 "De la Biología del Suelo a la Agricultura" (Eds. A. Thuar, F. Cassán, C. Olmedo) Universidad Nacional de Río Cuarto, 229-245.
- Galantini, J.A., M.R. Landriscini, R. Fernández, G. Minoldo, J. Cacchiarelli y J.O. Iglesias. 2006. Trigo: Fertilización con nitrógeno y azufre en el sur y sudoeste bonaerense. *Revista: Informaciones Agronómicas del Cono Sur, INPOFOS*, pp. 23-25.
- Galantini, J.A., M.R. Landriscini, J.O. Iglesias, A.M. Miglierina and R.A. Rosell. 2000. The effects of crop rotations and fertilization on wheat productivity in the Pampean semiarid region of Argentina. 2. Nutrient balance, yield and grain quality. *Soil Till. Res.* 53: 137-144.
- Galantini, J.A., M.R. Landriscini, A.M. Miglierina, J.O. Iglesias y R.A. Rosell. 1997. Dinámica de fósforo en agroecosistemas pampeanos: efecto de la labranza sobre la distribución de fracciones granulométricas. VIII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo, La Serena, Chile.
- Galantini, J.A., A.M. Miglierina, R.A. Rosell, J.O. Iglesias y M.R. Landriscini. 1996. Distribución del CO y Nt en fracciones granulométricas de un Hapludol bajo dos sistemas de labranza. XV Congreso Arg. de la Ciencia del Suelo, Santa Rosa. pp. 57-58.
- Galantini, J.A. and R.A. Rosell. 1997. Organic fractions, N, P and S. Changes in an Argentine Semiarid Haplustoll under different crop sequences. *Soil Till. Res.* 42: 221-228.
- Galantini, J.A. and R.A. Rosell. 2006. Long term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamics under different production systems in semiarid Pampean soils. *Soil Till. Res.* 87: 72-79.

- Galantini, J.A., R.A. Rosell, G. Brunetti y N. Senesi. 2002. Dinámica y calidad de las fracciones orgánicas de un Haplustol durante la rotación trigo-leguminosas. *Ciencia del Suelo* 20 (1): 17-26.
- Galantini, J.A., R.A. Rosell y J.O. Iglesias. 1994. Determinación de materia orgánica en fracciones granulométricas de suelos de la región semiárida bonaerense. *Ciencia del Suelo* 12: 81-83.
- Galantini, J.A., N. Senesi, G. Brunetti and R. Rosell. 2004. Influence of texture on the nitrogen and sulphur status and organic matter quality and distribution in semiarid Pampean grassland soils. *Geoderma* 123: 143-152.
- Galantini, J.A. y L. Suñer. 2008. Las fracciones orgánicas del suelo. Análisis en los suelos de la Argentina. *Agriscientia* XXV: 41-55.
- Galantini, J.A., L. Suñer y H. Krüger. 2005. Dinámica de las formas de P en un Haplustol de la Región semiárida Pampeana durante 13 años de trigo continuos. *Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA) – INTA* 34: 13-31.
- García, F.O. 2001. Balance de fósforo en suelos de la región pampeana, INPOFOS *Informaciones agronómicas del Cono Sur* No 9 pp.1-3.
- García, F.O. 2003. Introducción. Simposio, El Fósforo en la Agricultura Argentina. pp. 2-3. INPOFOS. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- García, F.O. 2006. La nutrición de los cultivos y la nutrición de los suelos. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 29: 13-16. INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- García, F.O., e I.A. Ciampitti. 2007. Planilla de cálculo para estimar requerimientos nutricionales de cultivos de cereales, oleaginosos, forrajeras e industriales. IPNI Cono Sur- International Plant Nutrition Institute.
- García, F., L. Picone, A. Berardo. 2006. Fósforo. Pp. 99-121. En: *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. H.E. Echeverría y F.O. García (Eds). Editorial INTA BA, Argentina.
- Giddens, J. 1957. Rate of loss of carbon from Georgia soils. *Soil Sci. Soc. Proc.* 21: 513–515.
- Giuffrè, L. 2005. El fósforo como elemento crítico. En: L. Marbán y S. Ratto (Eds.) *Tecnologías en análisis de suelos: alcance a laboratorios agropecuarios*. Capítulo VI:

- Fósforo. AACR. ISBN 987-21419-1-6, pp. 147-175.
- Glave, A. 1988. Manejo de suelos y agua en la región semiárida pampeana. En: Fundación Cargil (Ed.), *Erosión: sistemas de producción, manejo y conservación del suelo y del agua*, pp. 1-69.
- Glendining, M.J. and D.S. Powlson. 1991. The effect of long term applications of inorganic fertilizer on soil organic nitrogen. pp. 329-338. In W.S. Wilson *et al.*, (Ed.). *Advances in soil organic matter research. Impact of agriculture and the environment*. R. Soc. Chem., Cambridge, England.
- Gómez, L., V. Nakama y C. Puricelli. 1981. Carta detallada de suelos. EEA INTA Bordenave, escala 1:10000. Informe interno INTA.
- González Montaner, J., M. Di Napoli, R. Pozzi, V. Stangaferro y E. Tecco. 2004. Influencia de la fertilización sobre el balance de rastrojos y el estado nutricional de los cultivos en una rotación en siembra directa en Argiudoles del sur de Santa Fe. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná (ER), p. 221.
- Gonzalez Pérez, M., L. Martin-Neto, S. Saab, E.H. Novotny, D.M.B.P. Milori, V.S. Baagnato, L.A. Colnago, W.J. Melo and H. Knicker. 2004. Characterization of humic acids from a Brazilian Oxisol under different tillage systems by EPR, ¹³C NMR, FTIR and fluorescence spectroscopy. *Geoderma* 118: 181-190.
- Gregorich, E.G., M.R. Carter, D.A. Angers, C.M. Monnreal and B.H. Eller. 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Can. J. Soil Sci.* 74: 367-385.
- Gregorich, E.G. and B.H. Ellert. 1993. Light fractions and macroorganic matter in mineral soils. P. 397-407. In M.R. Carter (Ed.) *Soil sampling and methods of analysis*. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Grudmann, G.L., P. Renault, L. Rosso and R. Bardin. 1995. Differential effects of soil water content and temperature of nitrification and aeration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1342-1349.
- Gupta, U.C. 1976. Tissue sulfur levels and additional sulfur needs for various crops. *Can. J. Plant Sci.* 56: 651-657.

- Haas, H.J., C.E. Evans and E.F. Miles. 1957. Nitrogen and carbon changes in Great Plains soils as influenced by cropping and soil treatments. USDA Tech. Bull. 1164. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
- Hallmark, W., R. Beverly, M.E. Sumner, C. De Mooy, H. Morris, J. Pesek and J.D. Fontenot. 1990. Soybean phosphorus and potassium requirement evaluation by three M-DRIS data bases. *Agronomy J.* 82: 323-328.
- Haneklaus, S., E. Evans and E. Sching. 1992. Baking quality and sulfur content of wheat. I. Influence of grain sulfur and protein concentration on loaf volume. *Sulfur in Agriculture* 16: 31-34.
- Havlin, J.L., D. Kissel, L. Maddux, M. Claassen and J. Long. 1990. Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54: 448-452.
- Haynes, R.J. 1999. Size and activity of the soil microbial biomass under grass and arable management. *Biology and Fertility of Soils*, 30: 210-216.
- Haynes, R.J. 2000. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. *Soil Biol. Biochem.* 32: 211-219.
- Haynes, R.J. and M.H. Beare. 1996. Aggregation and organic matter storage in mesothermal, humid soils. pp. 213–262. In M.R. Carter and B.A. Stewart (Ed.) *Structure and organic matter storage in agricultural soils*. Adv. Soil Sci. CRC, Lewis Publ., Boca Raton, FL.
- Hepper, G., G. Hevia, D.E. Buschiazzi, A.M. Urioste y A. Bono. 1996. Efectos de la agricultura sobre fracciones de fósforo en suelos de la región semiárida pampeana central. *Ciencia del Suelo* 14 (2): 96-99.
- Heredia, O.S. and A. Fernández Cirelli. 2007. Environmental risks of increasing phosphorus addition in relation to soil sorption capacity. *Geoderma* 137: 426-431.
- Hesterman, O. 1988. Exploiting forage legumes for nitrogen contribution in cropping systems (155-166) in: Hargrove W. (Ed.) *Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen*. ASA Special Publication No 51. Madison. WI.
- Hevia, G.G., D.E. Buschiazzi, D.N. Hepper, A.M. Urioste and E.L. Antón. 2003. Organic matter in size fractions of soils of the semiarid Argentina. Effects of climate, soil texture and management. *Geoderma* 116: 265-277.

- Janzen, H.H. 1987. Effect of fertilizer on soil productivity in long term spring rotations. *Can. J. Plant Sci.* 67: 165-174.
- Janzen, H.H., C.A. Campbell, R.C. Izaurralde, B.H. Ellert, N. Juma, W.B. MacGill and R.P. Zentner. 1998. Management effect on soil C storage on the Canadian prairies. *Soil Till. Res.* 47: 181-195.
- Jenkinson, D.S. 1990. The turnover of organic carbon and nitrogen in soil. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 361-368. No 337.
- Johnson, C.M. and A. Ulrich. 1959. Analytical methods for use in plant analysis. *California Agricultural Experimental State Bulletin* 766: 25-78.
- Johnston, A.E. 1991. Soil fertility and soil organic matter. In W.S. Wilson *et al.* (Eds.) *Advances in Soil Organic matter research: Impact on agriculture and the environment.* R. Soc. Chem., Cambridge, England pp. 299-314.
- Jones, M.B., W. Delwiche and A. Williams. 1977. Uptake and loss of ¹⁵N applied to annual grass and clover in lysimeters. *Agron. J.* 69: 1019-1023.
- Karlen, D.L., M.J. Mausbach, J.W. Doran, R.G. Cline, R.F. Harris and G.E. Schuman. 1997. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 4-10.
- Kirkbright, G.F., E. Ward and T.S. West. 1972. Determination of sulphur and phosphorus by atomic emission spectrometry with induction- coupled high frequency plasma source. *Anal. Chim. Acta* 62: 241-51.
- Kleber, M., P. Sollins and R. Sutton. 2007. A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: Self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces. *Biogeochemistry* 85: 9-24
- Klingebiel, A.A. and P.H. Montgomery. 1961. Land capability classification. USDA Agricultural Handbook 210. US Government Printing Office, Washington, DC.
- Knoepp, J.D. and W.T. Swank. 2002. Using soil temperature and moisture to predict forest soil nitrogen mineralization. *Biol. Fertil. Soils* 36: 177-182.
- Kooijman, A.M., J. Jongejans and J. Sevink. 2005. Parent material effects on Mediterranean woodland ecosystems in N.E. Spain. *Catena* 59: 55-68.

- Koutika, L.S., C. Nolte, M. Yemefack, R Ndango, D. Folefoc and S. Weise. 2005. Leguminous fallows improve soil quality in south-central Cameroon as evidenced by the particulate organic matter status. *Geoderma*. V. 125, Issues 3-4: 343-354.
- Krüger, H.R. y S. Venanzi. 2008. Rendimientos de trigo en el sudoeste bonaerense. II - efectos de rotación y fertilización nitrogenada. VII Congreso Nacional de Trigo. Simposio nacional de cereales de siembra otoño invernal. Potrero de los Funes, San Luis.
- Lal, R. 2002. Soil carbon dynamics in cropland and rangeland. *Environmental Pollution* 116 (3): 353-362.
- Lal, R. 2004. Agricultural activities and the global carbon cycle. *Nutr. Cycl Agroecosyst* 70: 103-116.
- Landriscini, M.R., J.A. Galantini y R.A. Rosell. 1997. Determinación de normas para la aplicación del sistema DRIS en el cultivo de trigo de la región semiárida Bonaerense. *Ciencia del Suelo* 15: 17-21.
- Landriscini, M.R., J.A. Galantini y R.A. Rosell. 2002. Azufre foliar en el sur bonaerense: dinámica en el cultivo y método DRIS. Jornada Nacional de Azufre. AACS, Fertilizar-INTA. 5 pp.
- Landriscini, M.R., L. Suñer y M.A. Lázzari. 2006. Uso eficiente del nitrógeno en cebada cervecera. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de Suelos de la Región Andina. Resúmenes pág. 343 y Trabajo Completo en CD Rom.
- Leifeld, J. and I. Kögel-Knabner. 2005. Soil organic matter fractions as early indicators for carbon stock changes under different land use. *Geoderma* 124: 143-155.
- Letsch, W.S. and M.E. Sumner. 1984. Effect of population size and yield level on selection of Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS) norms. *Commun. in Soil Sci. and Plant Analysis* 15: 997-1006.
- Loewy, T. 1987. Rotación leguminosa- trigo y fertilidad nitrogenada del suelo. *Ciencia del Suelo* 5 (1): 57-64.
- Loewy, T. y C.A. Puricelli. 1982. Disponibilidad de fósforo en suelos del área de la EEA Bordenave (Bs.As.). Informe técnico No 28. EEA INTA Bordenave.
- Lowdermilk, W.C. 1953. Conquest of the Land Through Seven Thousand Years. *Agriculture*

- Information Bulletin No 99, USDA, Soil Conservation Service, Washington, D.C.
- Mann, L.K. 1985. Changes in soil carbon storage after cultivation. *Soil Sci.* 142: 279-288.
- Marriott E.E. and M.M. Wander. 2006. Total and Labile Soil Organic Matter in Organic and Conventional Farming Systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 950–959.
- McGill, W.B., H.W. Hunt, R.G. Woodmansee and J.O. Reuss. 1981. PHOENIX: a model of the dynamics of carbon and nitrogen in grassland soils. In: Clark, F.E. and Rosswall, T. Editors, 1981. *Terrestrial Nitrogen Cycles: Processes, Ecosystem, Strategy and Management Impacts* 33 *Ecol. Bull.*, Stockholm, pp. 49-115.
- McLeod, E. 1982. *Feed the soil.* Organic Agriculture Research Instituted, Graton CA. 209 p. Citado por Overviu of Cover Crops and Green Manures Fundamentals of Sustainable Agriculture, ATTRA – National Sustainable Agriculture Information service PO Box 3657 Fayetteville, AR 72702.
- Miglierina, A.M. 1991. *Materia orgánica y sistemas de producción en la región semiárida bonaerense.* Tesis de Magister en Ciencias del Suelo. Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, 94 pp.
- Miglierina, A.M., J.O. Iglesias, M.R. Landriscini, J.A., Galantini and R.A. Rosell. 2000. The effects of crop rotations and fertilization on wheat productivity in the pampean semiarid region of Argentina. 1. Soil physical and chemical properties. *Soil Till. Res.* 53: 129-135.
- Miller, E.C. 1939. A physiological study of the winter wheat plant at different stages of its development. *Kansas Agric. Exp. Stn. Tech. Rep.* N° 47.
- Millhouon, E.P. and T.M. Moreau. 1994. Cotton yield and soil properties following thirty five years of winter cover crop rotation. In *Proceedings of the beltwide cotton conference.* San Diego, CA.
- Minoldo, G., J.A. Galantini y J.O. Iglesias. 2007. Efecto de las rotaciones con leguminosas y la fertilización. En: *Sistemas productivos del Sur y Sudoeste Bonaerense.* Revista Técnica Especial en Siembra Directa, pág. 32-35.
- Moscatelli, G. 2005. Avances en la selección de indicadores de calidad en series representativas de la región pampeana y aplicación de un sistema de información geográfica. Seminario internacional Indicadores de Calidad de suelo. Marcos Juárez.

- Moscatelli, G. y C. Irurtia. 2005. Reflexiones acerca de los indicadores de salud de suelos. XIII Congreso de Aapresid, Rosario, Santa Fe, Argentina, pp. 211-218.
- Mullen, R.W., W.E. Thompason and W.R. Raun. 1999. Estimated increase in atmospheric carbon dioxide due to worldwide decrease in soil organic matter. *Commun. Soil Sci. Plant Analysis* 30: 1713-1719.
- Murphy, J. and J.P. Riley. 1962. A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. *Anal.Chim.* 27: 31-36.
- Nortcliff, S. 2002. Standardization of soil quality attributes. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 88: 161-168.
- Novoa, R. and R.S. Loomis. 1981. Nitrogen and Plant Production. *Plant and Soil* 58: 178-201.
- Oades, JM. 1984. Soil organic matter and structural stability, mechanisms and implications for management. *Plant and Soil* 76:319-337.
- Omay, A.B., C.W. Rice, L.D. Maddux and W.B. Gordon. 1997. Changes in soil microbial and chemical properties under long-term crop rotation and fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 1672-1678.
- Paoloni J.D. y R. Vazquez. 1985. Necesidades teóricas de los cereales de invierno y probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones como base para el balance hídrico. *An. Edafol. Agrobiol.* XLIV 1545-1556.
- Papastylianou, I. 1999. Estimation of nitrogen fixed by legumes in long-term vs short-term cropping systems. *Agron. J.* 91: 329-334.
- Papiernik, S.K., M.J. Lindstrom, T.E. Schumacher, J.A. Schumacher, D.D. Malo and D.A. Lobb. 2007. Characterization of soil profiles in a landscape affected by long-term tillage. *Soil Till. Res.* 93: 335-345.
- Parfitt, R.L., G.W. Yeates, D.J. Ross, A.D. Mackay and P.J. Budding. 2005. Relationships between soil biota, nitrogen and phosphorus availability, and pasture growth under organic and conventional management. 2005. *Applied Soil Ecology* 28: 1-13.
- Peterson, G.A., A.D. Halvorson, J.L. Havlin, O.R. Jones, D.G. Lyon and D.L. Tanaka. 1998. Reduced tillage and increasing cropping intensity in the Great Plains conserve soil carbon. *Soil Till. Res.* 47: 207-218.

- Picone, L., E. Zamuner y A. Berardo. 1999. Efecto de la fertilización y estación del año en las transformaciones de algunas fracciones del fósforo en el suelo. XIV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Pucón. Temuco. Chile.
- Plante, A.F., R.T Conant, C.E. Stewart, K. Paustian and J. Six. 2006. Impact of soil texture on the distribution of soil organic matter in physical and chemical fractions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 287-296.
- Potter, K.N., H.A. Tolbert, O.R. Jones, J.E. Matocha, J.E. Morrison and P.W. Unger. 1998. Distribution and amount of soil organic C in long-term management system in Texas. *Soil Till. Res.* 47: 309-321.
- PPI. 1999. Important factors affecting crop response to phosphorus. *Better Crops* 83 (1): 16-19. Potash and Phosphate Institute. Norcross, Georgia, EE.UU.
- Puget, P., R. Lal, C. Izaurralde, M. Post and L. Owens. 2005. Stock and distribution of total and corn-derived soil organic carbon in aggregate and primary particle fractions for different land use and soil management practices. *Soil Sci.* 170: 256-279.
- Quiroga, A., D. Buschiazzo and N. Peinemann. 1996. Soil organic matter particle size fractions in soils of the semi-arid argentinian pampas. *Soil Sci.* 161: 104-108.
- Rasmussen, P.E., R.R. Allmaras, C.R. Rohde and N.C. Roager Jr. 1980. Crop residue influences on soil carbon and nitrogen in a wheat-fallow system. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 596-600.
- Rasmussen, P.E. and H.P. Collins. 1991. Long-term impacts of tillage, fertilizer, and crop residue on soil organic matter in temperate semiarid regions. *Adv. Agron.* 45: 93-134.
- Raun, W.R. and G.V. Johnson. 1995. Soil-plant buffering of inorganic nitrogen in continuous winter wheat. *Agron. J.* 87: 827-834.
- Raun, W.R. and G.V. Johnson. 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agron. J.* 91: 357-363.
- Rees, R.M., I.J. Bingham, J.A. Baddeley and C.A. Watson. 2005. The role of plants and land management in sequestering soil carbon in temperate arable and grassland ecosystems. *Geoderma* 128: 130-154.
- Reeves, D.W. 1997. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil Till. Res.* 43: 131-167.

- Römer, W. and G. Schilling. 1986. Phosphorus requirements of the wheat plant in various stage of its life cycle. *Plant and Soil* 91: 221-229.
- Ron, M.M. y T. Loewy. 1996. Recomendaciones de fertilización fosfórica para trigo en suelos del S.O. bonaerense (Argentina). *Ciencia del Suelo* 14: 16-19.
- Ron, M.M. y T. Loewy. 2005. Remoción de fósforo en granos de trigo y cebada en el SO bonaerense. Simposio "Fertilidad 2005" Nutrición, Producción y Ambiente. Pp. 118-120. 27 y 28 de abril de 2005, Rosario.
- Rosell, R.A. and J.A. Galantini. 2006. Carbon Sequestration in Soils of the Western Mountain Ridges and Deserts of Argentina. Chapter 6. In: *Carbon Sequestration in Soils of Latin America* (Eds. R. Lal, C.C. Cerri, M. Bernoux, J. Etchevers and C.E.P. Cerri). The Haworth Press Inc. NY, pp. 103-117.
- Rosell, R.A., J.A. Galantini and L.G. Suñer. 2000. Long term crop rotation effects on organic carbon, nitrogen and phosphorus in Haplustoll soil fractions. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 14: 309-315.
- Ruffo, M.L. y A.T. Parsons. 2004. Cultivos de cobertura en sistemas agrícolas. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 21: 13-16. INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- SAGyP, CFA. 1995. El deterioro de las tierras en la República Argentina. La Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca y el Consejo Federal Agropecuario en Alerta Amarillo.
- Sainz Rozas, H. y H.E. Echeverría. 2008. Relevamiento de la concentración de fósforo asimilable en suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo "Semiárido: Un desafío para la Ciencia del Suelo". Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.
- Salas, A.M., E.T. Elliot, D.G. Westfall, C.V. Cole and J. Six. 2003. The role of particulate organic matter in Phosphorus cycling. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 181-189.
- Saunders, W.M.H. and E.G. Williams. 1955. Observations on the determination of total organic phosphorus in soil. *Soil Sci.* 6: 254-267.
- Schnitzer, M. 2000. A lifetime perspective on the chemistry of soil organic matter. *Adv. in Agron.* 68: 1-58. *Soil Organic Matter*. Elsevier, New York.
- Schnitzer, M. and S.U. Khan. 1978. (Eds.) *Soil organic matter*. New York, Elsevier Scientific

Publishing Co. 319 pp.

- Senesi, N. and E. Loffredo. 1998. The chemistry of soil organic matter. In Soil Physical Chemistry. Ed D.L. Sparks. Chapter 6, 239-370, CRC Press, Washintong DC, USA.
- Sharpley, A. 2000. Phosphorus availability. En: Handbook of Soil Science (Ed. M.E. Sumner). CRC Press. Boca Raton, EE.UU. D18-D38.
- Sidiras, N., C. Avgoulas, D. Bilalis and N. Tsougrianis. 1999. Effects of tillage and fertilization on biomass, roots, N-accumulation and nodule bacteria of vetch (*Vicia sativa* cv. Alexander). J. Agron. Crop Sci. 182: 209-216.
- Sierra, J. 1997. Temperature and soil moisture dependence of N mineralization in intact soil cores. Soil Biol. Biochem. 29: 503-510.
- Singer, M.J. and S. Ewing. 2000. Soil Quality. In Handbook of Soil Science. Chapter 11 (Ed. Sumner, M. E.), 271-298, CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Smith, P., J.U. Smith, D.S. Powlson, W.B. McGill, J.M.R. Arah, O.G. Chertov, K. Coleman, U. Franko, S. Froking, D.S. Jenkinson, L.S. Jensen, R.H. Kelly, H. Klein-Gunnenwiek, A.S. Komarov, C. Li, J.A.E. Molina, T. Muller, W.J. Parton, J.H.M. Thornley and A.P. Whitmore. 1997. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long term experiments. Geoderma 81: 153-225.
- Simmons, S.R. 1987. Growth, development and physiology. In B. Tucker (Ed.), Wheat and wheat improvement. 77-114. Agronomy Monograph 13. ASA, CSSA, SSSA. Madison, Wisconsin, USA.
- Sollins, P., C. Glassman, E.A. Paul, C. Swanston, K. Lajtha, J.W. Hei and E.T. Elliott. 1999. Soil carbon and nitrogen: Pools and fractions. pp. 89-105. In Standard soil methods for long-term ecological research (Ed. Robertson G.P. et al.). Oxford Univ. Press, Oxford, UK.
- Sollins, P., P.R. Homann and B.A. Caldwell. 1996. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. Geoderma 74 (1-2): 65-105.
- Sommers, L.E. and D.D.W. Nelson. 1972. Determination of total phosphorus in soil. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 36: 902-904.
- Sparks, D.L. 2003. Environmental Soil Chemistry. Academic Press, Elsevier Science, USA,

Hardback, 352 pp., ISBN 0-12-656446-9. pp. 94-95.

- Soil Science Society of America. 1996. Glossary of soil science terms. SSSA, Madison, WI.
- Steinbach, H.S. 2007. Funciones de producción. (Capítulo III). Pp. 39-51. En: Fertilización de cultivos de grano y pasturas(Eds. Facultad de Agronomía UBA). 2^{da} ed. Buenos Aires, Argentina. 223 pp.
- Steinbach, H.S. and R. Alvarez. 2006. Changes in Soil Organic Carbon Contents and Nitrous Oxide Emissions after Introduction of No-Till in Pampean Agroecosystems. *J. Environ. Qual.* 35: 3-13.
- Stevenson, F.J. and M.A. Cole. 1999. Cycles of soil: Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients. John Wiley & Sons, Nueva York, EE.UU. 2nd edition. 427 pp.
- Stewart, J.W. and H. Tiessen. 1987. Dynamics of soil organic phosphorus. *Biogeochemistry* 4: 41-60.
- Studdert, G.A. and H.E. Echeverría. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1496-1503.
- Studdert, G.A. y H.E. Echeverría. 2002a. Agricultura continua, labranzas y carbono orgánico en la capa arable en el sudeste bonaerense. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn, Chubut, Argentina.
- Studdert, G.A. y H.E. Echeverría. 2002b. Rotaciones mixtas, labranzas y carbono orgánico en la capa arable en el Sudeste Bonaerense. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn, Chubut, Argentina.
- Studdert, G.A., H.E. Echeverría and E.M. Casanovas. 1997. Crop-pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a typical argiudol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 1466-1472.
- Stute, J.K. and J.L. Posner. 1995. Synchrony between legume nitrogen release and corn demand in the upper midwest. *Agron. J.* 87: 1063-1069.
- Sumner, M.E. 1977a. Applications of Beaufils diagnostic indices to maize data published in the literature irrespective of age and conditions. *Plant and Soil.* 46: 359-369.
- Sumner, M.E. 1977b. Preliminary N, P and K foliar diagnosis norms for soybean. *Agronomy J.* 69: 226-230.
- Sumner, M.E. 1977c. Effect of corn leaf sampled on N, P, K, Ca, and Mg content on

- calculated DRIS indexes. *Commun. Soil Sci. and Plant Analysis*. 8: 269-280.
- Sumner, M.E. 1979. Interpretation of foliar analysis for diagnostic purposes. *Agron. J.* 71: 1343-348.
- Sumner, M.E. 1981. Diagnosing the sulfur requirement of corn and wheat using foliar analysis. *Agron. J.* 45: 87-90.
- Sumner, M.E. 2000. Diagnóstico de los requerimientos de fertilización de cultivos extensivos. INPOFOS Cono Sur 9, archivo agronómico No 5, 8 pp.
- Suñer, L.G. 2007. Dinámica del fósforo en suelos agrícolas de la Región Semiárida Pampeana. Tesis de Magíster en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Sur, 120 pp.
- Suñer, L.G., J.A. Galantini y R.A. Rosell. 2000. Formas de fósforo en Molisoles de la provincia de Buenos Aires y su relación con otros parámetros edáficos. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, 11-14 abril, Comisión I – 57, CD-ROM.
- Suñer, L.G., J.A. Galantini, R.A. Rosell y M.D. Chamadoira. 2002. Cambios en el contenido de las formas de fósforo en suelos de la región semiárida pampeana cultivados con trigo (*Triticum aestivum*). *Rev. Fac. Agron., La Plata* 104 (2): 105-111.
- Swift, M.J. and P. Woome. 1993. Organic matter and sustainability of agricultural systems: definition and measurement. In: K. Mulongoy and R. Merckx (Eds.), *Soil Organic Matter Dynamics and Sustainability of Tropical Agriculture*, John Wiley and Sons (1993), pp. 3-18.
- Tan, Z., R. Lal, L. Owens and R.C. Izaurralde. 2007. Distribution of light and heavy fractions of soil organic carbon as related to land use and tillage practice. *Soil Till. Res.* 92: 53-59.
- Tang, C. and Q. Yu. 1999. Impact of chemical composition of legume residues and initial soil pH on pH change of a soil after residue incorporation. *Plant and Soil* 215: 29-38.
- Tarpley, M.L., D.L. Robinson, B.K. Gustavson and M.M. Eichorn Jr. 1985. The DRIS for interpretation of Coastal bermuda grass analysis. *Commun. Soil Sci Plant Anal* 16: 1335-48.
- Tate, K.R. 1984. The biological transformation of phosphorus in soil. *Plant Soil* 76:245-256.

- Tiessen, H., J.W.B. Stewart and J.R. Bettany. 1982. Cultivation effects on the amounts and concentration of carbon, nitrogen and phosphorous in grassland soils. *Agron. J.* 74: 831-835.
- Tiessen, H., J.W.B. Stewart and C.V. Cole. 1984. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 853-858.
- Tiessen, H., J.W.B. Stewart and A. Oberson. 1994. Innovative soil phosphorus availability indices. Assessing organic phosphorus. In: *Soil testing: prospects for improving nutrient recommendations* (Eds. J.L. Havlin y J.S. Jacobsen). *Soil Sci. Soc. Am. J. Spec. Publ.* 40, Madison, WI, 143-162.
- Tisdall, J.M. and J.M. Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. of Soil Sci.* 33: 141-163.
- Uppendra, M., A. Sainju, T. Lenssen, Caesar-Thonthat and J. Waddell. 2007. Dryland plant biomass and soil carbon and nitrogen fractions on transient land as influenced by tillage and crop rotation. *Soil Till. Res.* 93: 452-461.
- Urioste, A.M., G.G. Hevia, E.N. Hepper, L.E. Antón, A.A. Bono and D.E. Buschiazzo. 2006. Cultivation effects on the distribution of organic carbon, total nitrogen and phosphorus in soils of the semiarid region of Argentinian Pampas. *Geoderma* 136: 621-630.
- Vance, C.P., C. Uhde-Stone and D.L. Allan. 2003. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist* 157: 423-448.
- Vanlauwe, B., K. Aihou, S. Aman, B.K. Tossah, J. Diels, O. Lyasse, S. Hauser, N. Sanginga and R. Merckx. 2000. Nitrogen and phosphorus uptake by maize as affected by POM quality, soil, and land-use history for soils from the West African moist savanna zone. *Biology and Fertility of Soils* 30: 440-449.
- Vázquez M.E, A. Pellegrini, G. Millán y A. Deak. 2001. Cambios cuali y cuantitativos en la fertilidad fosforada de algunos suelos de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Agrochimica XLV* (3-4): 120-123.
- Venanzi, S., J.A. Galantini, J. Iglesias, M. Barreiro, A. Albin, A. Rausch, M. Ripoll y H. Krüger. 2001. Sistemas de labranzas: 1. Distribución y calidad de la materia orgánica del suelo. V Congreso Nacional de Trigo, Carlos Paz, Córdoba.

- Von Lützow, M., I. Kögel-Knabner, K. Ekschmitt, H. Flessa, G. Guggenberger, E. Matzner and B. Marschner. 2007. Soil organic matter fractionation methods: relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. *Soil Biology and Biochemistry*, V. 39, Issue 9, 2183-2207.
- Voss, R.D. and W.D. Shrader. 1984. Rotation effects and legume sources of nitrogen for corn. In D.F. Bezdick (Ed.) *Organic farming*. Spec. Pub. 46. pp. 61-68. Amer. Soc. Agron., Soil Sci. Soc. Am. and Crop Sci. Soc. Am. Madison, WI.
- Walworth, J.L. and M.E. Sumner. 1987. The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). *Adv. Soil Sci.* 6: 149-188.
- Wander, M.M. 2004. Soil organic matter fractions and their relevance to soil function. In: F. Magdoff and R. Weil (Eds). *Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture*, CRC Press, Boca Raton (2004), 67–102.
- Watanabe, F.S. and S.R. Olsen. 1965. Test of an ascorbic acid method for determining phosphorus in water and NaHCO₃ extracts from soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 29: 677-678.
- Whitbread, A.M., G.J. Blair and R. Lefroy. 2000a. Managing legume leys, residues and fertilizers to enhance the sustainability of wheat cropping systems in Australia. The effects on wheat yields and nutrient balances. *Soil Till. Res.* 54: 63-75.
- Whitbread, A.M., G.J. Blair and R. Lefroy. 2000b. Managing legume leys, residues and fertilisers to enhance the sustainability of wheat cropping systems in Australia. Soil physical fertility and carbon. *Soil Till. Res.* 54: 77-89.
- Wortmann, C.S., B.D. McIntyre and C.K. Kaizzi. 2000. Annual soil improving legumes: agronomic effectiveness, nutrient uptake, nitrogen fixation and water use. *Field Crops Res.* 68: 75-83.
- Xu, J.M., C. Tang and Z.L. Chen. 2006. The role of plant residues in pH change of acid soils differing in initial pH. *Soil Biology and Biochemistry* 38: 709-719.
- Zalba, P. and A.R. Quiroga. 1999. Fulvic acid carbon as a diagnostic feature for agricultural soil evaluation. *Soil Sci.* 164: 57-61.

ANEXO I

Descripción de los perfiles modales de la asociación de suelos pertenecientes a la Unidad cartográfica No 3 de la Estación Experimental Bordenave del INTA (Gómez *et al.*, 1981).

Serie Bordenave

El suelo de la serie Bordenave es oscuro, profundo (clase D) en lomas y pendientes, cuya secuencia de horizontes es: A-AC-C-2 (tosca). Es un suelo genético presentando una capa arenosa Holocena, además es un suelo bien drenado (clase 4).

Descripción del perfil modal; las características de esta serie se observan en el perfil de observación número 6, ubicada a 900 m al E de las oficinas técnicas de la EEA INTA Bordenave:

- | | |
|--------------|--|
| Horizonte A | 0-25 cm; negro parduzco (7,5 YR 2/2) en húmedo, y pardo grisáceo (7,5YR 5/2) en seco, arenoso franco, estructura en bloques subangulares medios-moderados que rompen a bloques menores, ligeramente duro en seco y friable en húmedo, con límite inferior claro y suave. |
| Horizonte AC | 25-36 cm; pardo muy oscuro (7,5 YR 2/3), pardo (7,5 YR 4/3) en seco, franco arenoso, estructura en bloques subangulares medios moderados que rompen a bloques menores, ligeramente duro en seco y friable en húmedo, con límite inferior claro y suave. |
| Horizonte C | 36-155 cm; pardo oscuro (7,5 YR 3/3) en húmedo y pardo opaco (7,5 YR 5/3) en seco; arenoso franco, estructura masiva; blando en seco y friable en húmedo, con límite inferior gradual y suave. |
| Horizonte 3 | 155 a + cm; pardo opaco (7,5 YR 5/4) en húmedo y gris claro (7,5 YR 8/1) en seco; duro en seco; extremadamente firme en húmedo, abundantes carbonatos libres y concreciones de CO ₃ Ca (tosca). |

Serie Darregueira

El suelo de la serie Darregueira es oscuro, moderadamente profundo (clase C) en las lomas y pendientes, cuya secuencia de horizontes es: A-AC-C-2C-3 (tosca). Es un suelo genético presentando una capa arenosa Holocena, además es un suelo bien drenado (clase 4).

Descripción del perfil modal; las características de esta serie se observan en el perfil de la calicata C3, ubicada a 975 m al ESE de las oficinas técnicas de la EEA INTA Bordenave:

- Horizonte A 0-23 cm; negro parduzco (7,5 YR 2/2) en húmedo, y pardo grisáceo (7,5YR 5/2) en seco, arenoso franco, de estructura en bloques subangulares medios-moderados que rompen a bloques menores, ligeramente duro en seco y friable en húmedo, con límite inferior claro y suave.
- Horizonte AC 23-37 cm; pardo muy oscuro (7,5 YR 2/3), pardo (7,5 YR 4/3) en seco, franco arenoso, estructura en bloques subangulares medios moderados que rompen a bloques menores, ligeramente duro en seco y friable en húmedo, con límite inferior claro y suave.
- Horizonte C 37-61 cm; pardo oscuro (7,5 YR 3/3) en húmedo y pardo opaco (7,5 YR 5/3) en seco; arenoso franco, estructura masiva; blanda en seco y friable en húmedo, con límite inferior gradual y suave.
- Horizonte 2C 61-100 cm; pardo oscuro (7,5 YR 3/4) en húmedo y pardo opaco (7,5 YR 5/4) en seco; arenoso franco, estructura masiva, blanda en seco y friable en húmedo, con limite inferior abrupto y ondulado.
- Horizonte 3 100 a + cm; pardo opaco (7,5 YR 5/4) en húmedo y gris claro (7,5 YR 8/1) en seco; duro en seco; extremadamente firme en húmedo, con abundantes carbonatos libres y concreciones de CO_3Ca (tosca).

Los datos analíticos pertenecientes a este suelo se describen en la Tabla 39

Serie Azopardo

El suelo de la serie Azopardo es oscuro, profundo (clase D) de las lomas y pendientes, cuya secuencia de horizontes es: A-AC-2Bt- 2BC-2C-3 (tosca). Es un suelo bigenético que presenta dos capas Holocenas sobrepuestas a un horizonte calcáreo Pleistoceno (tosca), siendo un suelo bien drenado (clase 4).

Descripción del perfil modal; las características de esta serie se observan en el perfil de la calicata C11, ubicada a 1780 m al S-SO de las oficinas técnicas.

- Horizonte A 0-24 cm; negro parduzco (7,5 YR 3/2) en húmedo, y pardo grisáceo (7,5YR 5/2) en seco, franco arenoso; estructura en bloques subangulares medios-débiles que rompen a bloques menores, blando en seco y friable en húmedo, con límite inferior claro y suave.
- Horizonte AC 24-43 cm; pardo muy oscuro (7,5 YR 2/3) en húmedo, pardo (7,5 YR 4/3) en seco, franco arenoso, estructura en bloques subangulares medios débiles que rompen a masivo, blando en seco y friable en húmedo, con límite inferior claro y suave.
- Horizonte 2Bt 43-60 cm; pardo oscuro (7,5 YR 3/4) en húmedo y pardo opaco (7,5 YR 5/4) en seco; franco arenoso; estructura en bloques subangulares medios moderados que rompen a bloques menores; ligeramente duro en seco y firme en húmedo, ligeramente plastico y adhesivo, escasos barnices de clayskins, límite inferior gradual y suave.
- Horizonte 2BC 60-73 cm; pardo (7,5 YR 4/4) en húmedo y pardo opaco (7,5 YR 5/4) en seco; franco arenoso; estructura en bloques subangulares medios moderados que rompen a bloques menores; ligeramente duro en seco y firme en húmedo, límite inferior gradual y suave.
- Horizonte 2C 7-118 cm; pardo (7,5 YR 4/6) en húmedo y naranja (7,5 YR 5/4) en seco; franco arenoso; estructura en bloques subangulares medios débiles que rompen a masivo; blando en seco y friable en húmedo, límite inferior abrupto y suave.
- Horizonte 3 118 a + cm; pardo opaco (7,5 YR 5/4) en húmedo y gris claro (7,5 YR 8/1) en seco; duro en seco; extremadamente firme en húmedo, abundantes carbonatos libres y concreciones de CO_3Ca (tosca).

Los datos analíticos pertenecientes a este suelo se describen en la Tabla 40

Tabla 39

Serie Darregueira.

Datos analíticos de laboratorio del perfil modal C3.

Situación: Latitud 37° 45' 19'' S, Longitud 63° 05' 06'' O.

Altitud 204 m s.n.m.

Horizonte	A1	AC	C1	C2	2 (tosca)
Profundidad, cm	4-20	28-34	40-55	70-90	105-110
Carbono orgánico, %	0,86	0,37	0,29	0,15	
Nitrógeno total, %	0,069	0,046			
Relación C/N	12,5	8,0			
Arcilla, 2 μ %	6,1	11,2	10,6	6,9	
Limo, 2-20 μ %	9,1	5,2	5,1	3,5	
Limo 2-50 μ %	16,6	10,6	8,7	9,0	
Arena muy fina, 50-74 μ %	3,0	3,4	3,1	3,1	
Arena muy fina, 74-100 μ %	5,1	2,1	3,0	1,7	
Arena fina, 100-250 μ %	57,1	58,0	59,1	67,8	
Arena media, 250-500 μ %	12,0	14,6	15,5	11,5	
Arena gruesa, 500-1000 μ %	0,1	0,1			
Fósforo asimilable ByK, ppm	7,70	4,90			
Calcáreo, CO ₃ Ca %					36,0
Equivalente de humedad, %	10,8	11,8	11,2	8,4	22,3
pH en pasta	7,0	6,8	6,8	7,1	8,0
pH en agua, 1:2,5	7,2	7,3	7,6	7,8	8,2
Cationes de intercambio, me/100g					
Ca ⁺⁺	7,0	7,3	7,8	6,7	
Mg ⁺⁺	2,2	3,9	3,4	3,5	
Na ⁺	0,3	0,1	0,1	0,1	1,6
K ⁺	1,4	1,5	1,0	0,5	0,9
Suma de bases, me/100g (S)	10,6	12,8	12,3	10,8	
Capacidad de intercambio, me/100g (T)	11,0	12,1	10,8	9,9	18,3
% saturación de T	96	100	100	100	
% saturación de S+H	75	80	82	86	
Conductividad, DS m ⁻¹ extracto	0,3	0,2	0,2	0,3	
pH	7,4	7,4	7,4	7,8	
Na ⁺	2,5	1,4	1,7	2,8	
K ⁺	0,7	0,5	0,3	0,1	

ANEXO II

Tabla 41: Densidad aparente (DA) de distintas capas y valor medio, de 0-20 cm de suelo bajo labranza convencional y diferentes secuencias de cultivo, con (f) y sin (nf) fertilización.

DA (Mg m ⁻³)	Prof (cm)	TT		TV1		TV2		TPa	
		nf	f	nf	f	nf	f	nf	f
2002	0-5	1,14	1,28	1,10	1,14	1,11	1,12	1,11	1,09
	5-10	1,26	1,32	1,22	1,24	1,23	1,22	1,21	1,26
	10-15	1,31	1,32	1,28	1,30	1,27	1,31	1,33	1,39
	15-20	1,28	1,29	1,27	1,29	1,29	1,32	1,29	1,32
	0-20	1,25	1,30	1,22	1,24	1,23	1,24	1,24	1,27
2004	0-5	1,12	1,26	1,12	1,15	1,12	1,12	1,11	1,12
	5-10	1,27	1,32	1,23	1,26	1,22	1,23	1,22	1,26
	10-20	1,30	1,32	1,28	1,30	1,28	1,30	1,30	1,34
	0-20	1,25	1,31	1,23	1,25	1,23	1,24	1,23	1,27
2006	0-5	1,24	1,24	1,17	1,17	1,18	1,18	1,20	1,19
	5-10	1,25	1,27	1,15	1,17	1,19	1,22	1,18	1,21
	10-20	1,31	1,32	1,39	1,38	1,36	1,35	1,25	1,27
	0-20	1,27	1,29	1,28	1,28	1,27	1,28	1,22	1,24

TT, trigo continuo; TV1, 1 año trigo - 1 año verdeos de invierno consociados; TV2, 2 años trigo - 2 años verdeos de invierno consociados; TPa, 5 años trigo - 5 años pastura consociada.

Tabla 42: Contenido (Mg ha⁻¹) de carbono orgánico total (COT) de diferentes capas de los primeros 20 cm de suelo bajo diferentes secuencias de cultivo con (f) y sin (nf) fertilización.

Prof (cm)	COT (Mg ha ⁻¹)							
	TT		TV1		TV2		TPa	
	nf	f	nf	f	nf	f	nf	f
0-5	9,1	10,8	11,3	11,7	10,1	10,6	11,5	12,3
5-10	9,1	10,4	12,1	12,2	10,7	10,9	12,1	13,0
10-15	8,8	10,2	11,4	11,4	9,8	9,8	11,2	11,7
15-20	8,5	8,3	10,0	9,8	9,0	8,7	9,9	10,0

TT, trigo continuo; TV1, 1 año trigo - 1 año verdeos de invierno consociados; TV2, 2 años trigo - 2 años verdeos de invierno consociados; TPa, 5 años trigo - 5 años pastura consociada.

Tabla 43: Contenido (Mg ha^{-1}) de carbono orgánico asociado a la fracción mineral (COM) de diferentes capas de los primeros 20 cm de suelo bajo diferentes secuencias de cultivo con (f) y sin (nf) fertilización.

Prof (cm)	COM (Mg ha^{-1})							
	TT		TV1		TV2		TPa	
	nf	f	nf	f	nf	f	nf	f
0-5	8,3	9,6	10,2	10,6	8,9	9,0	10,0	10,2
5-10	8,4	9,5	11,0	11,2	9,5	9,5	10,8	11,2
10-15	8,1	9,7	10,6	10,7	9,1	8,6	10,0	10,6
15-20	7,7	8,0	9,6	9,5	8,5	7,7	9,2	9,2

TT, trigo continuo; TV1, 1 año trigo - 1 año verdeos de invierno consociados; TV2, 2 años trigo - 2 años verdeos de invierno consociados; TPa, 5 años trigo - 5 años pastura consociada.

Tabla 44: Contenido (Mg ha^{-1}) de carbono orgánico particulado (COP) en diferentes capas de los primeros 20 cm de suelo bajo diferentes secuencias de cultivo con (f) y sin (nf) fertilización.

Prof (cm)	COP (Mg ha^{-1})							
	TT		TV1		TV2		TPa	
	nf	f	nf	f	nf	f	nf	f
0-5	0,80	1,15	1,10	1,14	1,22	1,62	1,55	2,07
5-10	0,69	0,92	1,04	1,05	1,17	1,46	1,27	1,76
10-15	0,72	0,53	0,83	0,65	0,70	1,11	1,13	1,11
15-20	0,70	0,26	0,51	0,26	0,45	1,06	0,77	0,79

TT, trigo continuo; TV1, 1 año trigo - 1 año verdeos de invierno consociados; TV2, 2 años trigo - 2 años verdeos de invierno consociados; TPa, 5 años trigo - 5 años pastura consociada.

Tabla 45: Contenido (kg ha^{-1}) de nitrógeno total (Nt) en diferentes capas en los primeros 20 cm de suelo bajo diferentes secuencias de cultivo con (f) y sin (nf) fertilización.

Prof (cm)	Nt (Mg ha^{-1})							
	TT		TV1		TV2		TPa	
	nf	f	nf	f	nf	f	nf	f
0-5	798	998	803	901	938	974	966	986
5-10	907	858	946	936	996	958	1071	1046
10-15	891	891	883	858	838	904	1024	1029
15-20	819	748	781	755	768	818	787	851

TT, trigo continuo; TV1, 1 año trigo - 1 año verdeos de invierno consociados; TV2, 2 años trigo - 2 años verdeos de invierno consociados; TPa, 5 años trigo - 5 años pastura consociada.

Tabla 46: Contenido (kg ha^{-1}) de nitrógeno de la materia orgánica particulada (N-MOP) de diferentes capas en los primeros 20 cm de suelo bajo diferentes secuencias de cultivo con (f) y sin (nf) fertilización.

Prof (cm)	N- MOP (Mg ha^{-1})							
	TT		TV1		TV2		TPa	
	nf	f	nf	f	nf	f	nf	f
0-5	74	115	94	74	100	162	128	147
5-10	76	92	110	62	105	128	133	132
10-15	66	53	77	46	57	111	106	97
15-20	64	19	38	39	45	99	77	66

TT, trigo continuo; TV1, 1 año trigo - 1 año verdeos de invierno consociados; TV2, 2 años trigo - 2 años verdeos de invierno consociados; TPa, 5 años trigo - 5 años pastura consociada.