

**Universidad de la República**  
**FACULTAD DE AGRONOMIA**

**EVOLUCIÓN EN LAS FORMAS Y CONTENIDOS DE FÓSFORO DEL SUELO  
BAJO SISTEMAS DE ROTACIONES DE PASTURAS Y CULTIVOS CON  
LABOREO CONVENCIONAL Y SIEMBRA DIRECTA**

por

María del Rosario ABELLA FAGUAGA  
Alicia NIN GARCIA

TESIS presentada como uno de  
los requisitos para obtener el título  
de Ingeniero Agrónomo

MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2003

*A mis padres Charo y Julio  
A mi esposo Francisco  
A mis hijos Juan Luis,  
María del Pilar y Agustín José*

*Alicia*

*A mis padres María Celia y Raúl  
A mi esposo Juan  
A mis hijos Milagros, Annie,  
Juan Manuel, Juan Francisco y Carmela*

*Rosario*

Tesis aprobada por:

Director:

---

Ing. Agr. M. Sc. Jorge Hernández

---

Ing. Agr. Oswaldo Ernst

---

Ing. Agr. M. Sc. Martín Bordoli

Fecha: 22 de setiembre 2003

Autoras:

---

María del Rosario Abella Faguaga

---

Alicia Nin García

## AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Agr. Ms Sc. Jorge Hernández por la excelente dirección y permanente colaboración durante todas las etapas de realización de este trabajo.

A los Ing. Agr. Mariana Nin y Oswaldo Ernst por su colaboración en el trabajo de campo y obtención de datos.

A los integrantes de la cátedra de Fertilidad de Suelos. Queremos agradecer especialmente a la Ing. Agr. Aurora Cerveñansky por su constante apoyo a lo largo de todo el trabajo; a la Ing. Agr. M. Sc. Amabelia del Pino, ya que sus ideas nos resultaron siempre de gran ayuda; al Ing. Agr. Andrés Berger por su colaboración. A la Téc. Lab. Leticia Martínez agradecemos sus aportes y buena disposición. Al Ing. Agr. Omar Casanova debemos nada menos que el hecho de haber realizado la tesis, gracias a su impulso inicial.

A nuestras familias por el constante apoyo y estímulo brindados.

## TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN

AGRADECIMIENTOS

LISTA DE CUADROS Y FIGURAS

I.	<u>INTRODUCCIÓN</u>	1
II.	<u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	
	A. FORMAS Y CONTENIDOS DE FÓSFORO EN EL SUELO	3
	1. Fósforo total	3
	2. Fósforo inorgánico	5
	3. Fósforo orgánico	6
	B. CAMBIOS EN FORMAS ORGÁNICAS DEL FÓSFORO EN EL SUELO	
	1. Limitantes de métodos para estimar el fósforo disponible	9
	2. Cultivo y fertilización fosfatada	12
	3. Pastura y fertilización fosfatada	15
	4. Variaciones estacionales	17
	5. Pérdidas por erosión	18
	6. Laboreo y siembra directa	20
	C. BIOMASA	22
III.	<u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	29
	A. GENERALIDADES	29
	1. Ubicación del ensayo	29
	2. Tratamientos	30
	3. Diseño experimental	32
	4. Muestreos de suelo y determinaciones analíticas	33
	5. Evaluaciones complementarias en el experimento	35
	6. Análisis estadístico	36
IV.	<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	37
	A. PRIMER ESTUDIO: CAMBIOS EN EL FÓSFORO ORGÁNICO EN LOS DISTINTOS SISTEMAS	37
	B. SEGUNDO ESTUDIO: EVOLUCIÓN DEL FÓSFORO EN LA BIOMASA MICROBIANA Y EN LA FRACCIÓN LÁBIL (P Bray)	47
	1. Fósforo en la biomasa microbiana	47
	2. Evolución de la disponibilidad de fósforo en el suelo	53
V.	<u>CONCLUSIONES</u>	58
VI.	<u>RESUMEN</u>	59
VII.	<u>SUMMARY</u>	60
VIII.	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	61

## LISTA DE CUADROS Y FIGURAS

Cuadro 1. Cultivos realizados y dosis de P aplicadas para los distintos tratamientos en los diferentes años.....	31
Cuadro 2. Labores y aplicaciones de herbicidas y fertilizantes nitrogenados en los diferentes tratamientos en el año 2001.....	32
Cuadro 3. Contenido de fósforo orgánico en mg de P kg-1 de suelo, profundidad 0 a 6 cm, en el período 1994 – 2000.....	37
Cuadro 4. Contenido de fósforo orgánico, profundidad 6 a 12 cm, expresados en mg de P kg-1 de suelo, en el período 1994 – 2000.....	38
Cuadro 5. Contenido de carbono orgánico en gr de C kg-1 de suelo, 0 a 6 cm de profundidad, en el período 1994 – 2000.....	41
Cuadro 6. Contenido de carbono orgánico en gr kg-1 de suelo, 6 a 12 cm de profundidad, en el período 1994 – 2000.....	41
Cuadro 7. Contenido de fósforo en biomasa a la profundidad 0-7.5 cm, en el período junio a diciembre 2001. Datos promedio para cada tratamiento.....	47
Cuadro 8. Valores de probabilidad para los contrastes calculados para el contenido de P en biomasa de los diferentes tratamientos.....	48
Cuadro 9. Contenido de P disponible en el suelo (Bray N° 1) de 0 a 7.5 cm de profundidad, período junio a diciembre de 2001.....	53
Figura 1. Contenido de P orgánico en mg de P kg-1 de suelo, profundidad 0 a 6 cm, en el período 1994 – 2000.....	39
Figura 2. Contenido de P orgánico en mg de P kg-1 de suelo, profundidad 6 a 12 cm, en el período 1994 – 2000.....	39
Figura 3. Contenido de carbono orgánico en gr C kg-1, profundidad 0 a 6 cm, en el período 1994 – 2000.....	42
Figura 4. Contenido de carbono orgánico en gr kg-1 de suelo, profundidad 6 a 12 cm, en el período 1994 – 2000.....	42

Figura 5. Temperatura media del aire y del suelo en Estación Experimental Mario A. Cassinoni. Promedios mensuales del período junio a diciembre de 2001.....	51
Figura 6. Evolución del fósforo en la biomasa microbiana y fósforo asimilable (Bray N° 1) en el suelo en los diferentes meses para el promedio de los tratamientos con laboreo continuo y siembra directa.....	54
Figura 7. Evolución de la temperatura y humedad del suelo en los diferentes meses...	55
Figura 8. Evolución de la temperatura del suelo en laboreo continuo, siembra directa con rastrojo de soja, siembra directa con rastrojo de sorgo.....	57

## I. INTRODUCCION

El fósforo se encuentra en el suelo bajo formas orgánicas e inorgánicas. La mayoría de los estudios que se han llevado a cabo hasta el momento centran su atención en la fracción inorgánica. Debido a que es principalmente bajo esta forma que las plantas toman el fósforo presente en el suelo el estudio de la dinámica del fósforo en relación con las plantas se ha centrado en los compuestos inorgánicos. Otra línea de investigación apunta a los cambios en disponibilidad del nutriente en el suelo. La disponibilidad del fósforo en el suelo para las plantas estaría afectada fundamentalmente por las reacciones del fósforo con constituyentes del suelo, lo que determinaría la formación de compuestos insolubles, pero con distinto grado de reactividad.

Sin embargo, hay razones que justifican que las formas orgánicas del fósforo del suelo también sean objeto de análisis. El fósforo presente en formas orgánicas puede constituir hasta un 50% del fósforo total en suelos no cultivados. Los procesos de mineralización, al transformar las formas orgánicas en inorgánicas, permiten que los compuestos orgánicos pasen a estar disponibles para las plantas. El fósforo presente en la biomasa microbiana del suelo es una parte del nutriente que participa dinámicamente de los procesos de mineralización-inmovilización.

Se han observado cambios en la disponibilidad del fósforo del suelo para las plantas relacionados con variables de manejo (laboreo del suelo o siembra directa; rotaciones con pasturas que incluyen leguminosas) y con el clima (principalmente a través de la influencia en la temperatura y humedad del suelo).

En el presente trabajo se plantean dos estudios. En uno de ellos se intenta cuantificar las pérdidas y ganancias de fósforo orgánico bajo diferentes sistemas de rotaciones de cultivos y pasturas, y cultivos continuos con laboreo y siembra directa. En el segundo estudio se intenta cuantificar las variaciones en el fósforo presente en la biomasa

microbiana y su efecto en la disponibilidad de fósforo para las plantas en función del manejo de los suelos (sistemas de rotaciones y laboreo) y el clima (temperatura y humedad).

## II- REVISION BIBLIOGRÁFICA

### A. FORMAS Y CONTENIDOS DE FÓSFORO DEL SUELO

#### 1. Fósforo total

El fósforo en el suelo puede separarse en dos grandes grupos: fósforo en la solución del suelo y fósforo en fase sólida.

El fósforo la fase sólida del suelo puede clasificarse en general como orgánico e inorgánico, dependiendo de la naturaleza de los compuestos en que se halla. La fracción orgánica se halla en el humus y otros materiales orgánicos, que pueden o no estar asociados con él. La fracción inorgánica se halla en numerosas combinaciones con hierro, aluminio, calcio, flúor y otros elementos.

Se mencionan a continuación algunos de los antecedentes nacionales en caracterización del contenido de fósforo en suelos del Uruguay. Spangenberg (1931) analizó 31 muestras de suelo de horizonte A de suelos de “La Estanzuela” (departamento de Colonia), y encontró valores que oscilaban entre 166 y 258 mg P kg<sup>-1</sup>, con un promedio de 231 mg P kg<sup>-1</sup>. En un estudio realizado en los bañados del norte del departamento de Rocha, Spangenberg y Henry (1938) tomaron muestras del horizonte A de suelos de diferentes zonas de la región. El análisis de las 26 muestras mostró un rango de variación entre 122 y 489 mg P kg<sup>-1</sup>. En la década del 70 se comienzan a recabar datos de las diferentes fracciones del P en el suelo. En investigaciones realizadas por Escudero y Morón (1978) en 37 suelos del país se encontraron contenidos de P total entre 90 y 493 mg P kg<sup>-1</sup>, con un promedio de 255 mg P kg<sup>-1</sup>.

Hernández et al., 1995, estudiaron 31 muestras de los 15 primeros centímetros del horizonte A de distintos suelos del Uruguay. El contenido total de P osciló entre 126 y 887 mg P kg<sup>-1</sup>, con un promedio de 321 mg P kg<sup>-1</sup>. No teniendo en cuenta el valor extremo de 887 mg P kg<sup>-1</sup>, el valor más alto encontrado corresponde a 536 mg P kg<sup>-1</sup>, y el valor promedio para los 30 suelos fue 302 mg P kg<sup>-1</sup>. Los contenidos guardan relación con el material de origen de los suelos. Los contenidos más altos están asociados a suelos desarrollados a partir de sedimentos cuaternarios con influencia de la alteración de basalto, y sedimentos limo arcillosos de la Formación Fray Bentos. La textura de los suelos formados a partir de estos materiales es pesada, y presenta también altos contenidos de materia orgánica.

Las dos fracciones -orgánica e inorgánica- en las que se divide el fósforo en el suelo y que facilitan su estudio, en realidad forman parte de un único ciclo complejo. Smeck (1985), señala que mientras los estudios ecológicos generalmente han enfatizado el flujo de P dentro de compartimientos orgánicos (flora, fauna, litera, microorganismos y materia orgánica del suelo), los estudios en pedología y fertilidad han tradicionalmente examinado las transformaciones del P inorgánico dentro del suelo; y que es necesario integrar ambos enfoques para desarrollar un conocimiento más comprensivo de la dinámica del P en el ecosistema suelo.

## 2. Fósforo inorgánico

El fósforo es absorbido por las plantas principalmente en sus formas inorgánicas. Si bien las plantas pueden absorber ciertos fosfatos orgánicos solubles, su importancia como fuente de fósforo es insignificante dada su baja concentración en la solución, lo que

indica la necesidad de una rápida reposición a partir de compuestos presentes en la fase sólida (Tisdale, 1977).

En los compuestos de fósforo inorgánico, de uno a tres iones de hidrógeno del ácido fosfórico son reemplazados por cationes metálicos (hierro, aluminio y calcio). Los fosfatos de hierro y aluminio se encuentran más comúnmente en suelos ácidos, mientras que los fosfatos de calcio predominan en los suelos neutros y calcáreos (Hernández, 1999). La fracción predominante dentro de la fracción inorgánica en un estudio realizado en 37 suelos del Uruguay fue el P asociado al hierro, en promedio  $18.6 \text{ mg P kg}^{-1}$  (Escudero y Morón, 1978).

Los compuestos fosfatados presentes en los suelos tienen baja solubilidad, por lo que el contenido de fósforo en la solución del suelo es extremadamente bajo. Según Hernández (1999) en Uruguay, “en condiciones de campo natural sin fertilizar no es de esperar valores mayores a los  $0.05 \text{ mg P kg}^{-1}$ , en tanto que en suelos con fertilizaciones medias estos valores pueden alcanzar los  $0.1$  a  $0.2 \text{ mg P kg}^{-1}$ ”.

Los valores de P inorgánico total encontrados por Hernández et al. (1995) en 31 suelos de campo natural del Uruguay oscilaron entre  $43$  y  $458 \text{ mg P kg}^{-1}$ , con un valor promedio de  $155 \text{ mg P kg}^{-1}$  (48,6% del P total). La variación en torno a este porcentaje en la totalidad de los suelos estudiados fue pequeña, lo cual según los autores indica una relación bastante constante entre formas inorgánicas y orgánicas de P en el horizonte A de suelos sin roturar que no han recibido fertilización.

### 3. Fósforo orgánico

El fósforo orgánico en los suelos se encuentra bajo diferentes formas que pueden ser agrupadas en las siguientes fracciones:

-Humus del suelo, donde este elemento se encuentra formando parte de compuestos muy diversos, de diferente estabilidad, por lo que se los ha clasificado en fracción lábil y no lábil. Hernández (1999) menciona valores de P en la materia orgánica del orden de 0.3 y 0.4% para suelos del Uruguay.

-Restos frescos de cultivos no humificados y heces de animales. Según Hernández (1999) “los restos frescos incorporados a un suelo pueden variar en contenidos del orden de 0.1 a 0.2 % de P en la materia seca”.

-Biomasa microbiana del suelo, en la que el P forma parte de las estructuras de los microorganismos del suelo. Morón y Kiehl (1992) en el estudio realizado sobre dinámica del fósforo en tres sistemas agrícolas en el suroeste de Uruguay, encontraron valores de P en la biomasa microbiana del suelo que variaban promedialmente entre 7.45 y 22.78  $\mu\text{g}$  de P  $\text{g}^{-1}$ .

El contenido de P orgánico total en los suelos varía considerablemente. En nuestro país, se encontraron valores de P orgánico en el horizonte A entre 65 y 429  $\text{mg P kg}^{-1}$ , con un promedio de 166  $\text{mg P kg}^{-1}$  (Hernández et al., 1995). En el mismo estudio se encontró que en relación con el contenido total de P de los 31 suelos, el 51.4% del mismo se encuentra formando parte de la fracción orgánica (máximo 67.1%, mínimo 33.3%, desvío estándar 7%). La relación C/P de la fracción orgánica de los suelos osciló entre 84:1 y 253:1, con un promedio de 170:1.

Si bien los enfoques clásicos de estudio del P orgánico en los suelos apuntaron a identificar los compuestos orgánicos fosfatados, solo pudieron ser identificadas las fracciones inositol fosfato, ácidos nucleicos y fosfolípidos, los cuales apenas constituyen

el 50% del total de P orgánico del suelo. Enfoques más recientes apuntaron a separar diferentes constituyentes del pool orgánico de acuerdo con su grado de estabilidad. Es así que Hedley (1982) propuso un método de extracciones sucesivas, a través de las cuales el fósforo presente en el suelo bajo diferentes fracciones orgánicas e inorgánicas es extraído según su grado de estabilidad química, y por consiguiente, diferente grado de importancia en su disponibilidad para las plantas.

En un modelo de simulación en gran escala y en el largo plazo, Parton et al. (1988) estudiaron el efecto del clima y manejo en la dinámica del P y otros nutrientes en agroecosistemas. En el submodelo de fósforo, la fracción de P orgánico fue dividida en 3 fracciones: a) una fracción activa, constituida por la biomasa microbiana y metabolitos, b) una fracción protegida física y químicamente que es más resistente a la descomposición, y c) una fracción que es química y físicamente protegida.

Otro enfoque, más reciente y muy utilizado en los estudios de carbono orgánico en los suelos, consiste en el fraccionamiento físico de la materia orgánica del suelo, separando diferentes fracciones de la llamada “materia orgánica particulada” (POM: particulate organic matter) de la fracción orgánica asociada a compuestos minerales (Cambardella y Elliot, 1992, 1994). Dicha metodología ha sido aplicada en estudios del P en la fracción orgánica por Gregorich y Ellert (1993), Six et al. (1998).

Otro enfoque reciente ha sido estudiar el P presente en la biomasa microbiana del suelo. Stewart & Tiessen (1987), citados por Morón (1992) afirman que el componente central del ciclo activo del P orgánico –que muchas veces pasa desapercibido pues sólo una pequeña porción del total de la materia orgánica puede ser biológicamente activa- es la biomasa microbiana. Siqueira y Franco (1988), citados por el mismo autor, sostienen que debido a su magnitud y al hecho de ser el mayor componente lábil de la materia orgánica del suelo, la biomasa microbiana es un importante reservorio de nutrientes potencialmente disponibles.

Al esquematizar el ciclo del fósforo, Stewart y Sharpley (1987) comparan la actividad microbiana con una rueda que se pone en movimiento en respuesta a las entradas de carbono. La marcha de la rueda podría enlentecerse o detenerse por una disminución en la entrada de carbono, por lo que el suministro de P para las plantas estaría limitado al P inorgánico lábil. Cuando la rueda está en marcha las plantas tienen mayor cantidad de P en solución pues éste está siendo repuesto desde formas inorgánicas y orgánicas lábiles.

## B. CAMBIOS EN FORMAS ORGÁNICAS DEL FÓSFORO EN EL SUELO

En un ecosistema natural en el corto y mediano plazo, las fracciones de fósforo en el suelo se encuentran en un equilibrio dinámico. A partir del momento en que el hombre comienza a utilizar el suelo el equilibrio es alterado a través de prácticas como la fertilización fosfatada, el laboreo, los cultivos, que determinan importantes modificaciones en el equilibrio del ciclo del fósforo en el suelo. Tanto las cantidades totales de fósforo, como las de las distintas fracciones y sus relaciones pueden ser alteradas. Estos cambios tienen consecuencia directa en los niveles de P disponible para las plantas.

### 1. Limitantes de métodos para estimar el fósforo disponible

Tanto el fósforo orgánico como el inorgánico comprenden una gran cantidad de compuestos muy heterogéneos, que pueden ser agrupados en fracción lábil y fracción no lábil, con un límite entre ambas muy difuso. Esta separación depende de la capacidad que tengan los compuestos de solubilizarse o degradarse y pasar a formar parte de la solución del suelo, y de esta manera contribuir a la nutrición de las plantas.

La fracción lábil o disponible es entonces la fracción de fósforo presente en fase sólida capaz de reponer el fósforo presente en la solución del suelo en la medida que disminuya su valor de equilibrio. La absorción por parte de las raíces de plantas en crecimiento disminuye constantemente la concentración de P respecto al valor de equilibrio.

El P disponible se mide mediante métodos de extracción, generalmente agitando una muestra de suelo con una solución, en los que se solubiliza la fracción, o una parte proporcional, de lo que sería disponible para las plantas. En Uruguay el método más utilizado es el Bray N° 1 (Zamuz y Castro, 1974). El laboratorio de suelos de INIA – La Estanzuela realiza también la extracción de P a partir del intercambio con una resina aniónica saturada con hidrógeno.

Bowman y Cole (1978) realizaron un estudio para evaluar el uso del método de extracción con  $\text{NaHCO}_3$  (método de Olsen) para medir contenidos de P orgánico lábil en el suelo. Según estos autores, la combinación del contenido de P inorgánico y de P orgánico medidos con este método debería reflejar un mayor grado de sensibilidad en cuanto a respuesta de la planta, especialmente en aquellos casos en los que los valores de P inorgánico son deficientes. Estos autores mencionan los resultados de investigadores canadienses (Stewart, Halm y Cole 1973; Halm, Stewart y Halstead 1972), quienes al trabajar con pasturas encontraron que los valores de P inorgánico eran demasiado bajos como para explicar la respuesta de las plantas sin considerar la mineralización de una reserva de P orgánico lábil. Los resultados del estudio realizado por Bowman y Cole muestran que el método de extracción con  $\text{NaHCO}_3$  es útil para evaluar la mineralización de diferentes sustratos orgánicos, principalmente aquellos compuestos de P orgánico asociados con una liberación relativamente rápida de P inorgánico.

Stewart y Sharpley (1987), afirman que los métodos de análisis de P disponible presentan la desventaja de que sólo miden las formas inorgánicas, sin tener en cuenta la

contribución de las formas orgánicas mineralizables y las historias de manejo previo. En el mismo sentido, Gartrell y Bolland (1987), en una revisión sobre la nutrición fosfatada de pastura afirman que es necesario considerar los aportes provenientes de la mineralización del P orgánico.

Los resultados del trabajo realizado por Hoffman et al. (com. pers.) sobre la respuesta al agregado de P en cebada cervecera sembrada sin laboreo y su relación con la evolución de P en el suelo durante el período de barbecho concuerdan con los resultados de los trabajos mencionados anteriormente. El ensayo fue instalado en un suelo de alta fertilidad, luego de 5 años de pastura, en Paysandú, Uruguay. A pesar de que el fósforo disponible era bajo (6 ppm), no existió respuesta al agregado de P, lo que coincide con lo encontrado por Capurro et al. (1982) en cebada cervecera y Achaval y Ducamp (1998) en maíz. Según los autores el P disponible podría haber sido estimado incorrectamente al haber cantidades importantes de  $\text{CaCO}_3$  en el suelo y al no considerarse los aportes de P de origen orgánico (que deberían ser altos al tratarse de un suelo de alta fertilidad con 5 años de pastura previos).

La mayoría de los métodos para determinar el P disponible del suelo se basan en la medición del contenido de P inorgánico, y no tienen en cuenta la contribución potencial de la mineralización del P orgánico. Thien y Myers (1992) desarrollaron un método para determinar un índice de disponibilidad del P que incluyera las dinámicas tanto del P orgánico como del inorgánico. Estimularon la actividad microbiana en un suelo mediante el agregado de C y N y luego compararon los niveles de las distintas fracciones de P en el suelo bioactivo y en el suelo sin tratar, con el objetivo de determinar las reservas de P orgánico e inorgánico que estarían rápidamente disponibles gracias a la actividad microbiana. Observaron menor cantidad de P inorgánico en los suelos bioactivos luego de un período de incubación, lo que atribuyeron a inmovilización microbiana. El P orgánico lábil fue en promedio 2.4 veces mayor en los suelos bioactivos que en los sin tratar. La actividad microbiana aumenta la disponibilidad del P,

y la mayoría de los análisis de suelo no reflejan esto, ya que solamente miden el P inorgánico.

López Hernández y Niño (1993) estudiaron en condiciones de laboratorio la mineralización de P en suelos provenientes de materiales madre de diferentes texturas. Encontraron mayores tasas de mineralización en los suelos provenientes de materiales madre de textura fina (1.25 y 1.03 mg de P kg<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>) con respecto a suelos provenientes de areniscas (0.48 mg de P kg<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>). Esta mayor tasa de mineralización de suelos de textura fina coincide con mayores contenidos de sustratos capaces de mineralizarse (por ejemplo C total, P orgánico y P inorgánico microbiano).

Harrison (1982) analizó la mineralización de P orgánico lábil en relación con propiedades del suelo. Una de las conclusiones obtenidas en el trabajo es que la tasa de mineralización del P orgánico lábil es 5 veces mayor en primavera que en otoño.

Barber (1984) introduce el concepto de biodisponibilidad, según el cual el proceso de suministro de nutrientes para las plantas debe abarcar tanto el concepto de disponibilidad de nutrientes desde el punto de vista químico como el proceso de absorción radicular que estudia la fisiología vegetal. Existe evidencia de que, en el caso del fósforo, hay variaciones en determinadas características radiculares que afectan el proceso de absorción, y que pueden ser tan o más importantes que la variación de la concentración de fósforo en la solución del suelo.

## 2. Cultivo y fertilización fosfatada

Cuando el P soluble es agregado al suelo ocurren dos reacciones entre el P en solución y el suelo: a) rápida, en la cual el P es adsorbido desde la solución, y b) lenta, en la cual el P es retenido en una forma más firme. De esta manera, la proporción de fertilizante

agregado que permanece disponible disminuye exponencialmente con el tiempo (Barrow, 1980).

Solamente una pequeña parte de los fertilizantes fosfatados aplicados a los suelos son utilizados por los cultivos (10-20%), ya que el resto se fija en formas químicas que no están disponibles para las plantas. Dalton et al. (1951) estudiaron el efecto de la materia orgánica en la disponibilidad de los fosfatos. Los resultados muestran que la materia orgánica agregada al suelo provoca un aumento de la solubilidad del fosfato presente en el suelo. La materia orgánica de fácil descomposición resulta más efectiva que las sustancias orgánicas de descomposición lenta. Los autores atribuyen la capacidad de la materia orgánica para hacer disponible el fosfato del suelo a la posibilidad de ciertos productos metabólicos de descomposición microbiana de formar moléculas complejas estables con el hierro y el aluminio (causantes de la fijación del fosfato en suelos ácidos).

El fósforo orgánico es la fracción que presenta mayor disminución cuando se realizan cultivos continuos laboreados sin fertilización. La aplicación de fertilizantes fosfatados no detiene esa disminución, mientras que sí aumenta la concentración de P inorgánico (Morón y Kiehl, 1992). La inclusión de pasturas en la rotación permite mantener el contenido de P orgánico.

Chauhan et al. (1981) mostraron que el agregado de celulosa en la superficie del suelo aumentó la actividad microbiana y por lo tanto el contenido de fósforo orgánico microbiano y fósforo inorgánico inmovilizado. En un suelo deficiente en P, sin embargo, se observó un aumento en el P orgánico solamente cuando se aplicó celulosa más fertilizante fosfatado.

Morón y Kiehl (1992) registraron la siguiente evolución del P inorgánico en su trabajo realizado en la rotación de cultivos en la Estación Experimental INIA – La Estanzuela,:

en el sistema con agricultura continua sin fertilización, durante el período 1964-1987, disminuyó 9.2%; en el sistema de agricultura continua con fertilización aumentó de 48.6% del P total a 64.6%; y en el sistema de agricultura en rotación con pasturas con fertilización aumentó de 49.8% del P total a 60.5%.

Hass et al. (1961) estudiaron el efecto de cultivar el suelo y de agregar estiércol en los contenidos de P total, P inorgánico, P orgánico y P disponible-Olsen del suelo a una profundidad de 0-15 en 15 estaciones experimentales en Estados Unidos. En un período promedio de 33 años, la rotación de cultivos sin agregar fertilizantes o estiércol provocó una caída del 9% en el P total. El agregado de 6.2 a 12.3 kg de P/ha/año de estiércol de aves elevó el contenido de P total en un 14%. El P inorgánico no fue influenciado por la rotación de cultivos sin estiércol, pero en cambio el P orgánico fue reducido en promedio 35% comparado con los correspondientes suelo vírgenes. La aplicación de estiércol incrementó considerablemente el P inorgánico pero no tuvo efecto en reducir las pérdidas de P orgánico.

Rubaeck et al. (1999) analizaron el efecto del uso y manejo del suelo en la fracción orgánica del P del suelo. No observaron efectos de la fertilización en el P orgánico del suelo. Por el contrario, el uso del suelo tuvo un efecto significativo en las formas y labilidad del P orgánico del suelo, con mayores niveles en los suelos con vegetación permanente en comparación con los suelos laboreados.

Morón (1992) presenta en su revisión datos obtenidos por Dalal y Meyer (1986) que estudiaron los cambios producidos en los primeros 10 cm de suelo por los cultivos de cereales de invierno y sorgo en 6 series de suelos del sureste de Australia. Tres series no fueron fertilizadas con fósforo, otras dos recibieron cantidades muy bajas, y por último la que recibió las cantidades más elevadas promediaba 7.7 kg de P ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. El P orgánico disminuyó en 5 de las series estudiadas, variando desde un mínimo de 13% a

un máximo de 38%. El promedio de la disminución para todas las series fue de 24%. En ninguna de las 6 series el P inorgánico presentó cambios significativos.

En la misma revisión, Morón (1992) cita los resultados obtenidos por Tiessen et al. (1982), quienes estudiaron las pérdidas de P en suelos de pradera utilizados para cultivo con bajos agregados de fertilizantes durante 60 a 70 años. El P total disminuyó 12% en dos de los suelos estudiados, principalmente debido a la pérdida de P orgánico, ya que el P inorgánico no presentó variación significativa. En el suelo de textura más liviana la pérdida de P total fue mayor (29%), explicada por pérdida de la fracción orgánica como inorgánica.

Según Morón A. (1992) los trabajos citados parecen indicar que cuando se cultiva un suelo virgen el P orgánico es el principal afectado. La fertilización no evita la disminución del P orgánico, y generalmente produce un aumento del P inorgánico. No se verificó cuánto de la disminución del P orgánico es producto de la mineralización y cuánto es causado por erosión.

Igue K. et al. (1971) encontraron evidencia de que la adición de nutrientes provocó la inmovilización de P, según los autores a través del aumento de la población microbiana. Los autores analizaron la mineralización de P orgánico en 3 suelos ácidos de Costa Rica. Las muestras de suelo fueron incubadas a temperatura y humedad controladas y los tratamientos fueron: encalado (0 y 4000 kg ha<sup>-1</sup>), agregado de nutrientes (testigo; agregado de N-K-Mg-B-Zn-Mo-; agregado de P y agregado de P y N-K-Mg-B-Zn-Mo), temperatura (23°C y 35°C) y analizadas al inicio, 1, 3 y 10 meses. En los 3 suelos estudiados el agregado de fertilizantes fosfatados provocó aumentos significativos del P total y P inorgánico. En cuanto al P orgánico, solamente se observó aumento en uno de los suelos, muy deficiente en P, que los autores atribuyen a una mayor masa microbiana formada.

En un trabajo de Parton et al. (1988) se estudió en un modelo de simulación el impacto de cultivar un suelo sin fertilizar durante 100 años, considerando erosión nula. El P orgánico disminuye marcadamente hasta aproximadamente 60 años, mientras que el P inorgánico se muestra poco afectado.

La reducción de los tiempos de barbecho en las regiones semiáridas de Estados Unidos por motivos económicos, a menudo acompañada por una reducción del laboreo y cambios en las prácticas de fertilización, provocan cambios en los niveles de P inorgánico y P orgánico. Con el objetivo de analizar estos cambios, McCallister et al. (2002) estudiaron las distintas fracciones del fósforo bajo diferentes intensidades de cultivos (trigo con barbecho y rotación de trigo con otros cultivos –*Panicum sp.*). No encontraron descensos significativos en los niveles de P en el suelo con mayores intensidades de cultivo, quizás debido al corto período de tiempo de la rotación (5 a 10 años) y a la aplicación de fertilizante fosfatado en las rotaciones.

### 3. Pastura y fertilización fosfatada

Russell (1980) encontró un gran incremento en el contenido de materia orgánica en el horizonte superficial en una pradera en la que se agregó fertilizante y se pastoreó con ovejas. La aplicación de 483 kg de P/ha como superfosfato en el período 1926-57 provocó un incremento de todas las fracciones. El P orgánico pasó de 13 a 55 ug de P g<sup>-1</sup> en los primeros 5 cm, mientras que en el sector de 5 a 10 cm pasó de 6 a 30 ug de P g<sup>-1</sup>. Según el autor la evolución del P orgánico parece estar más relacionada al contenido de materia orgánica que a las fuentes y niveles de P aplicado.

Jackman (1964) encontró en diez suelos de Nueva Zelanda con pasturas fertilizadas de buena calidad, en períodos de 30 o más años, acumulación de materia orgánica con la consecuente inmovilización de N, S y P en las tres primeras pulgadas de profundidad.

Simpson et al. (1974) no encontraron efectos de las dosis de superfosfato ni de la presión de pastoreo sobre la acumulación de P orgánico al analizar el efecto de tres dosis de superfosfato a dos presiones de pastoreo con ovejas desde 1964 a 1970 en Australia. Una media de 21.4 ug de P g<sup>-1</sup> como P orgánico fue acumulado en todos los tratamientos del experimento. Según los autores, la síntesis de P orgánico fue gobernada por otros factores diferentes a la disponibilidad de P inorgánico. Esta misma ausencia de efecto de las dosis de fertilizante o de la dotación animal fue observada por Kohn et al. (1977), Blair et al. (1979) y Batten et al. (1979).

Sin embargo, McLachlan (1968) y Lewis et al. (1987) obtuvieron en sus estudios resultados contradictorios con los anteriormente citados. McLachlan encontró niveles mayores de P orgánico con mayores dotaciones y Lewis et al. encontraron acumulaciones de P orgánico en los 10 cm superficiales que variaban entre 1.3 y 1.8 kg de P/ha por cada 100 kg de superfosfato simple.

Del Pino y Hernández J. (2002) analizaron el ciclaje de fósforo por animales bajo pastoreo en campo natural y mejoramientos con leguminosas en Salto, Uruguay. La mayor parte de los nutrientes consumidos por los animales en pastoreo son reciclados a través de heces y orina, así como también se reciclan los nutrientes provenientes de restos de plantas no consumidos que son descompuestos por los microorganismos y la fauna del suelo. Los resultados del estudio muestran que los contenidos de las diferentes formas de P en heces, especialmente aquellas más rápidamente disponibles para las plantas, fueron mayores en las heces de los animales que consumieron pasturas mejoradas fertilizadas que en las heces de los animales que consumieron campo natural

(P inorgánico soluble en agua en campo natural  $0.50 \text{ g kg}^{-1}$ , mientras que el promedio de los mejoramientos fue  $0.82 \text{ g kg}^{-1}$ ).

#### 4. Variaciones estacionales

Los suelos cultivados reciben aportes de fósforo a través de residuos de plantas y de fertilizantes. A medida que estas entradas y la remoción de P por parte de las plantas varían con la edad del cultivo, la temperatura, y la humedad del suelo, ocurren variaciones estacionales en el contenido y distribución del fósforo en el suelo.

Con el objetivo de evaluar estas variaciones Sharpley (1985), estudió el ciclo del P en suelos agrícolas con y sin agregado de fertilizante. El contenido de fósforo orgánico fue mayor en invierno que en verano, tanto en el suelo fertilizado como en el no fertilizado; mientras que las variaciones estacionales no tuvieron un patrón consistente en el contenido de fósforo inorgánico. El autor atribuye el mayor contenido de fósforo orgánico en otoño-invierno al agregado de residuos orgánicos frescos, y los valores más bajos en primavera-verano temprano a la mineralización del P orgánico y remoción por parte de las plantas.

Tate et al. (1991a) no encontraron diferencias significativas en el P inorgánico lábil extraído por resinas, pero se observó en el P inorgánico extraído con bicarbonato un pico máximo en invierno y un pico mínimo en verano.

Otro estudio de las variaciones estacionales de las fracciones orgánica e inorgánica de P fue llevado a cabo por Magid y Nielsen (1992) en 3 suelos arenosos (bajo cultivo, pastura y campo natural) en Nueva Zelanda. En los 3 suelos estudiados el P inorgánico tuvo un pico mínimo en el invierno. La fracción orgánica, por su parte, tuvo un máximo en invierno y un mínimo en primavera. La variación estacional fue altamente

significativa para todas las fracciones de P del suelo. Estos autores observaron grandes fluctuaciones en las mediciones del P en la solución del suelo en las muestras tomadas mensualmente desde marzo 1989 a agosto 1990.

##### 5. Pérdidas por erosión

El P puede ser perdido en solución por lixiviación dentro del perfil del suelo, en solución por escurrimiento superficial y en las partículas de suelo por escurrimiento superficial, procesos que ocurren naturalmente pero que aumentan de manera significativa cuando el hombre utiliza el suelo. Según Williams (1974) y Sharpley y Menzel (1987), citados por Morón (1992), las pérdidas de P por lixiviación son de magnitudes muy bajas. Es decir que las mayores pérdidas de P se darían por escurrimiento.

Frere et al. (1980) encontraron en un submodelo desarrollado para estudiar pérdidas de nutrientes utilizadas para cultivos pérdidas de P en forma soluble por escurrimiento superficial entre 0.04 y 4.7 kg de P ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Para el P transportado en partículas de sedimento se citan magnitudes de 0.9 a 50 kg de P ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.

Williams (1974) afirma que dada la misma cantidad de suelo erosionado, en un sistema de pasturas fertilizado (donde las fertilizaciones fosfatadas en cobertura determinan una gran acumulación de P en los primeros centímetros del perfil) la pérdida de fósforo puede ser significativamente más importante que en un sistema agrícola.

En la revisión sobre el fósforo en el sistema suelo-planta Morón (1992) afirma que la erosión del suelo es un proceso selectivo en el cual el sedimento está enriquecido en partículas finas y materia orgánica. El P se concentra especialmente en las fracciones finas y la materia orgánica contiene relativamente altos niveles de P, por lo que el

sedimento generalmente presenta un enriquecimiento respecto al suelo del cual se origina.

En el trabajo realizado por Morón y Kiehl (1992) en una rotación de cultivos en la Estación Experimental INIA – La Estanzuela en el período 1964 - 1989, el balance total de P total del suelo reveló que la erosión fue la principal vía de salida de los tres sistemas estudiados. En el sistema de agricultura continua sin fertilización las pérdidas anuales por erosión calculadas fueron 18.52 kg de  $P_2O_5$ /ha/año, 2.6 veces superior a la cantidad extraída por las cosechas (7.04 kg de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>); el contenido de P total disminuyó en el período 1964-87 un 19%. Los autores de este trabajo mencionan que García (1983) afirmó que las pérdidas de suelo en este experimento podrían ser disminuidas en 50% solamente realizando cultivos que respetasen las curvas de nivel y que McDowell & McGregor (1984) y O'Halloran et al. (1987) lograron importantes reducciones en las pérdidas de P total por los procesos erosivos con la aplicación de prácticas de conservación de suelos. En el sistema de agricultura continua con fertilización el balance fue de -0.86 kg de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, lo cual indica una condición próxima al equilibrio. A pesar de que las pérdidas de suelo fueron menores que en el sistema anterior, la pérdida de P por erosión fue mayor (26.74 kg de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>), lo que concuerda con la observación de Sharpley (1980) de que para distintos suelos la fertilización fosfatada provoca acentuados aumentos en la razón de enriquecimiento. En el tercer sistema estudiado, agricultura en rotación con pasturas con fertilización, las pérdidas por erosión fueron calculadas en 17.50 kg de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y el balance fue +14.86 kg de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.

## 6. Laboreo y siembra directa

El no laboreo del suelo, los mayores niveles de materia orgánica, el mejor equilibrio biológico, el probablemente mayor reciclaje realizado por la biomasa y las menores pérdidas por erosión en los sistemas en los que se utiliza la siembra directa afectan el fósforo en el suelo de manera diferente a los sistemas con laboreo.

La intensidad del laboreo afecta la estructura del suelo y la pérdida de materia orgánica. Six et al. (1998) encontraron que el laboreo tiene un gran efecto en la agregación del suelo y en la cantidad y tipo de partículas de materia orgánica asociadas con los agregados del suelo.

En el estudio citado anteriormente, Magid y Nielsen (1992) encontraron que el contenido de P total fue algo menor en el suelo laboreado, y aproximadamente constante a lo largo del período estudiado en los tres suelos.

Tracy et al. (1990) estudiaron la mineralización de C, N, P y S en suelos con laboreo y siembra directa. Los suelos sin laborear tuvieron una mayor acumulación de nutrientes en los primeros 2.5 cm que en los suelos laboreados. No se observó efecto del laboreo en la mineralización de nutrientes por debajo de los 5 cm.

Maroko et al. (1999) también encontraron mayores niveles de P orgánico que podría estar fácilmente disponible para las plantas en sistemas conservacionistas que en sistemas con laboreos continuos. Los métodos convencionales de extracción de P inorgánico no fueron capaces de detectar la contribución a la biodisponibilidad del P del suelo por parte de los sistemas basados en la conservación de la materia orgánica. Los autores sugieren que el P en la biomasa microbiana (extraíble con cloroformo) podría ser utilizado como un índice de la biodisponibilidad de P inmediatamente después de aplicar un manejo conservacionista.

El laboreo del suelo afecta también los contenidos de humedad y temperatura, que a su vez influyen en el fósforo del suelo.

El P inorgánico está relacionado inversamente con el contenido de humedad del suelo. Las regresiones calculadas por Magid y Nielsen (1992) entre la fracción de P inorgánico y el contenido de humedad dieron coeficientes de correlación altamente significativos. Dado que no se observó efecto significativo de la temperatura del suelo en el contenido del P inorgánico, los autores concluyeron que la relación entre P inorgánico y humedad se debía principalmente a cambios físicos en el suelo y en segundo lugar a los efectos del secado del suelo en la biomasa microbiana. **¿Qué rango de temp y humedad?**

Dado que la mineralización de P orgánico puede suministrar grandes cantidades de P disponible tanto en suelos fertilizados como no fertilizados, una disminución en el contenido de P orgánico del suelo resultará en una reducción de la fertilidad del suelo en cuanto a P. Por lo tanto, las prácticas de manejo agrícola que mantienen o aumentan los contenidos de P orgánico (tales como siembra directa), favorecen la conservación de la fertilidad del suelo a largo plazo (Sharpley, 1985).

Moroizumi y Horino (2002) llevaron a cabo un estudio comparativo en condiciones de campo para evaluar el efecto del laboreo en la temperatura y contenido de agua del suelo en los meses de agosto-setiembre (fines de invierno) de 1993. Las temperaturas en el suelo laboreado tendieron a ser mayores en el suelo no laboreado (las diferencias fueron 1.6°C en la superficie y 1.0°C a 4 cm de profundidad). Durante el día se alcanzaron diferencias de 5.5°C en la superficie y 2.9°C a 4 cm. En cuanto a la humedad, en el suelo laboreado no hubo disminución de los valores de potencial hídrico por debajo de la zona laboreada. Sin embargo, hubo desecación de la zona laboreada. Hubo mucho menos evaporación en la columna laboreada que en la columna sin laboreo debido al efecto mulching del laboreo.

### C. BIOMASA

La biomasa microbiana es el componente más activo de la materia orgánica del suelo, por lo que las mediciones del contenido de la misma permiten estimar la porción de nutrientes orgánicos que tienen la capacidad de estar disponibles en el corto plazo.

Anderson y Domsch (1980) estudiaron el contenido de nutrientes de la biomasa microbiana de los primeros 12.5 cm de 29 suelos. Determinaron primero el contenido de C de las células microbianas en los suelos y luego calcularon los contenidos de N, P, K y Ca utilizando las relaciones obtenidas al medir (1) el contenido promedio de C con respecto al contenido mineral de cultivos puros de 24 especies de microorganismos del suelo y (2) las contribuciones relativas de las células de bacterias y hongos a la biomasa microbiana de 17 suelos. Los resultados mostraron un contenido promedio de P en la microflora de los suelos de  $83 \text{ kg ha}^{-1}$  (mínimo  $1.7 \text{ kg ha}^{-1}$ , máximo  $244 \text{ kg ha}^{-1}$ ), valores que concuerdan con datos encontrados en otros laboratorios. Los autores afirman que la información cuantitativa obtenida en el estudio permite concluir que cantidades importantes de los nutrientes se encuentran ligadas a la biomasa, y que “dado que las células microbianas están ampliamente distribuidas en el suelo y que luego de muertas son rápidamente mineralizadas por la microflora sobreviviente (Anderson y Domsch 1978a; Jenkinson 1976; Nelson et al. 1979), es probable que los nutrientes retenidos temporariamente en la biomasa contribuyan de manera importante a la reserva de nutrientes disponibles para las plantas en los suelos”.

En 1982 Brookes et al. desarrollaron un método para medir la cantidad de P en los microorganismos del suelo. El P en la biomasa se calcula por la diferencia entre el P inorgánico extraído mediante  $\text{NaHCO}_3$  0.5M (pH 8.5) de un suelo fresco fumigado con  $\text{CHCl}_3$  y el P extraído de un suelo sin fumigar. Parte del P inorgánico liberado por el

$\text{CHCl}_3$  es retenido por el suelo durante la fumigación y extracción, por lo que se corrigió incorporando una cantidad conocida de P inorgánico durante la extracción. La mayor parte del P liberado se encuentra en formas inorgánicas, y la proporción aumenta con la duración de la fumigación. El P no microbiano es muy poco, o nada afectado por la fumigación. El P inorgánico liberado por el  $\text{CHCl}_3$  se divide entre 0.4 para calcular el P en la biomasa microbiana, asumiendo que 40% del P en la biomasa puede ser extraído como P inorgánico por el  $\text{CHCl}_3$ . Las determinaciones deben hacerse en suelo húmedo, ya que el P inorgánico extraído con  $\text{NaHCO}_3$  fue casi tres veces mayor cuando un suelo húmedo se secó al aire, probablemente debido al P inorgánico liberado por los organismos muertos por el secado y a la materia orgánica que debido al secado fue alterada física y químicamente y se volvió soluble en  $\text{NaHCO}_3$ . Esta última recomendación fue confirmada por Sparling y West (1988) en su estudio sobre la importancia del contenido de agua del suelo al estimar el contenido de C, N y P en la biomasa microbiana del suelo mediante los métodos de fumigación y extracción. De acuerdo con los resultados obtenidos recomiendan humedecer los suelos secados al aire o con estrés hídrico antes de fumigar. Magid y Nielsen (1992) también encontraron una relación inversa entre el contenido de humedad del suelo y el P inorgánico, que atribuyeron en parte a los efectos del secado del suelo en la biomasa microbiana, aunque según ellos los cambios físicos en el suelo que permitirían que se solubilizaron compuestos químicos antes no disponibles son más importantes. Gregorich y Ellert (1993) también recomiendan usar muestras de suelo fresco para las determinaciones de los procesos biológicos del suelo –tales como la biomasa microbiana-, ya que el secado afecta la biomasa microbiana total, el tipo de microorganismos activos y la actividad enzimática.

Hedley y Stewart (1981) desarrollaron un método muy similar al anterior para medir el contenido de fosfatos microbianos en el suelo. Al igual que en el método anterior se calculó la diferencia entre el P extraído por  $\text{NaHCO}_3$  de muestras fumigadas con  $\text{CHCl}_3$  y sin fumigar. Las diferencias con el método anterior son: a) se extrajo el P del suelo

mediante resinas antes de lisar las células microbianas con  $\text{CHCl}_3$ , b) se midió el P total y no solamente el P inorgánico, y c) se extendió el período de extracción con  $\text{NaHCO}_3$  de 30 minutos a 16 horas.

Sarathchandra et al. (1984) estudiaron las características microbiológicas y bioquímicas de 21 suelos bajo pastura en Nueva Zelanda. Utilizando el método propuesto por Brookes et al. (1982) encontraron valores de P en biomasa microbiana que variaban entre 20 y 88  $\mu\text{g}$  de P  $\text{g}^{-1}$  de suelo, media 52  $\mu\text{g}$  de P  $\text{g}^{-1}$ , lo que corresponde a 0.5% y 11.7% del P total, media 4.7%. Los valores encontrados son más altos que los publicados hasta ese momento en otros países, hecho que los autores atribuyen a un mayor contenido de materia orgánica de los suelos estudiados.

Patra et al. (1990) estudiaron los cambios estacionales de la biomasa microbiana del suelo en los primeros 23 centímetros de 2 suelos, uno bajo pastura y otro bajo agricultura. Se realizaron muestreos aproximadamente mensuales durante 1 año. El contenido promedio de P en biomasa en el suelo con agricultura fue  $47 \pm 3.3 \text{ kg ha}^{-1}$  y en el suelo bajo pastura  $129 \pm 4.8 \text{ kg ha}^{-1}$ . El trabajo tuvo un alto error experimental y de muestreo, que según los autores escondieron los pequeños cambios anuales en el contenido de biomasa microbiana.

Hernández et al. (sin publicar) estudiaron las variaciones de la biomasa microbiana en los primeros 7.5 cm de profundidad de 4 suelos del Uruguay (3 bajo pradera y 1 bajo campo natural sin historia de fertilización fosfatada), en relación con las variaciones de humedad y temperatura, y su efecto en la disponibilidad de P del suelo. Las muestras tomadas mensualmente fueron tamizadas a 2 mm y preincubadas durante 10 días para luego determinar el P presente en la biomasa microbiana según el método de Brookes et al., 1992 y el fósforo asimilable por el método Bray N° 1. También se registraron el contenido de humedad gravimétrica del suelo y la temperatura media mensual del aire. Los contenidos promedio de P en la biomasa microbiana oscilaron entre 17 y 77 mg P

kg<sup>-1</sup> de suelo. Los valores más altos correspondieron al campo natural. Los autores explican la menor biomasa microbiana de los suelos con pradera con respecto al campo sin roturar a menores contenidos de materia orgánica y mayor estabilidad de la misma en los suelos con uso agrícola intensivo. Los valores más bajos coincidieron en todos los sitios con las temperaturas más bajas (julio-agosto). También coincidió en todos los suelos estudiados un pico máximo en setiembre (primavera temprana). A partir de octubre el P presente en la biomasa microbiana disminuyó, a la vez que aumentaron las temperaturas y disminuyó el contenido de humedad del suelo. Si bien las correlaciones entre los valores de P en la biomasa microbiana y los de P asimilable no fueron significativos se observó cierta tendencia al aumento en el P asimilable del suelo en la medida de una disminución en la biomasa microbiana, lo que indicaría una mineralización neta del P orgánico. Por el contrario, el aumento en la biomasa microbiana coincide con una disminución de los niveles de P disponible, lo que indicaría una inmovilización de P.

Rheinheimer et al. (2000) analizaron el fósforo de la biomasa microbiana en 4 suelos de Rio Grande do Sul, Brasil, bajo diferentes sistemas de manejo. El valor promedio de P en biomasa fue 30 mg de P dm<sup>-3</sup> de suelo. Los tratamientos con siembra directa tuvieron mayores niveles de P en biomasa en 2 de los 4 suelos con respecto al laboreo convencional. Las diferentes rotaciones de cultivos no tuvieron efecto en el fósforo microbiano.

Los tres sistemas estudiados por Morón y Kiehl (1992), presentaron diferentes niveles de P en la biomasa microbiana del suelo. La inclusión de pasturas provocó un aumento en el contenido de P presente en la biomasa microbiana del suelo en relación a los sistemas de agricultura continua no fertilizados o fertilizados. Los valores medios obtenidos fueron: rotación continua de cultivos sin fertilización, 7.45 ug de P g<sup>-1</sup>; rotación continua de cultivos con fertilización, 12.21 ug de P g<sup>-1</sup> y rotación de pasturas con cultivos con fertilización, 22.78 ug de P g<sup>-1</sup>.

En un estudio realizado en los mismos sistemas de junio a noviembre de 1989, García y Morón (1992) analizaron el tamaño y la dinámica estacional de la biomasa microbiana del suelo. El valor promedio de P en biomasa determinado usando la técnica de fumigación con cloroformo fue  $15.1 \text{ ug de P g}^{-1}$  de suelo seco. Las muestras se tomaron en los primeros 20 cm de profundidad. Los mayores valores de P en biomasa se encontraron en el sistema de rotación con pasturas con fertilización, y fueron significativamente más altos que en los sistemas de agricultura continua (en promedio el doble). La aplicación de fertilizantes inorgánicos causó niveles siempre mayores, aunque no siempre significativos, de P en biomasa en los sistemas de agricultura continua. Los autores explican esto por un enriquecimiento en P de la célula microbiana cuando aumenta la disponibilidad del nutriente. Esta capacidad de almacenaje de P de las células microbianas cuando se aplican fertilizantes puede reducir la retención del P por parte del suelo.

Vargas y Scholles (2000) estudiaron la biomasa microbiana y la producción de C-CO<sub>2</sub> y N mineral en un suelo de Rio Grande do Sul, Brasil, sometido a diferentes sistemas de manejo. Los sistemas con siembra directa presentaron más biomasa y actividad microbiana que los tratamientos con laboreo convencional. Los mayores valores de biomasa y actividad microbiana se observaron en la capa de 0 a 5 cm, en comparación con la capa 5-15 cm.

Seeling y Zasoski (1993) analizaron los efectos de los microorganismos en el mantenimiento de las concentraciones de fósforo orgánico e inorgánico en la solución en un suelo bajo pastura. Los resultados encontrados les permitieron concluir que las concentraciones de P orgánico e inorgánico en la solución del suelo habían sido influenciadas de manera importante por los organismos del suelo. Según los autores, el fósforo inmovilizado en la biomasa mantiene una gran parte del fósforo del suelo bajo

formas que no han sido transformadas en formas inorgánicas menos solubles, por lo que esta reserva de fósforo se encuentra accesible para las plantas.

Perrot et al. (1990) citados por Seeling y Zasoski en el mismo trabajo, registraron en su estudio de la biomasa microbiana en una pastura en Nueva Zelanda durante 2 años, cambios estacionales en el tamaño de la reserva de fósforo en la biomasa microbiana. Encontraron un aumento del P microbiano en el invierno y una disminución en la primavera. Estos cambios podrían deberse al aumento de la temperatura del suelo en primavera, ya que Sarathchandra et al. (1989) mostraron que cuando la temperatura aumentaba el fósforo era liberado de la reserva de biomasa microbiana.

Tate et al. (1991) estudiaron la biomasa microbiana en 2 suelos bajo pastura. En sus conclusiones advierten sobre las diferencias que podrían existir entre la biomasa que midieron en las muestras luego de ser incubadas y la que está realmente presente en el suelo del que se tomaron las muestras. Los autores afirman que si bien los factores climáticos influyen las poblaciones microbianas, éstos varían de año a año en las condiciones de Nueva Zelanda, y por lo tanto es posible que modifiquen o impidan la ocurrencia de patrones estacionales regulares. No encontraron resultados significativos en cuanto a la respuesta de la biomasa microbiana al agregado de fósforo.

Del Pino (1994) también encontró variaciones estacionales en el contenido de P microbiano al analizar 7 suelos diferentes de Nueva Zelanda. El P en la biomasa varió entre 3% y 12% del P total (lo que en los primeros 7.5 cm de suelo correspondió a una variación entre 15 kg de P ha<sup>-1</sup> y 82 kg de P ha<sup>-1</sup>) y fue mayor en primavera y verano que en otoño e invierno. Esta diferencia disminuyó a medida que la fertilidad del sitio aumentaba.

Brookes et al. (1984) analizaron el P en la biomasa microbiana del suelo. Estudiaron la relación entre el P en la biomasa microbiana medido según el método desarrollado por

Brookes et al (1982) y el C en la biomasa microbiana medido según el método de fumigación de Jenkinson y Powlson (1976). Se encontró una relación lineal entre el P y el C en la biomasa del suelo en los 15 suelos estudiados, pero no lo suficientemente alta como para ofrecer nada más que una estimación aproximada del contenido de C en la biomasa. Al confirmar mediante la repetición de análisis el dato de P en biomasa de uno de los suelos que no seguía la tendencia del resto de los suelos, los autores afirman que estas mediciones reflejan las relativamente grandes fluctuaciones en las concentraciones de P en la biomasa del suelo. Se observó en los suelos bajo pastura una tendencia a contenidos de P en biomasa mayores y con menor variación que en los suelos con laboreo (3.6 a 4.3% comparado con 1.4 a 3.5%).

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### A. GENERALIDADES

##### 1. Ubicación del ensayo

Las muestras de suelo fueron tomadas de un ensayo instalado en 1993 en la Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni, ubicada 10 km al sur de la ciudad de Paysandú. El campo experimental estuvo dentro de un esquema de rotación cultivo-pastura desde 1970. En el otoño de 1993, al comenzar el ensayo, había una pastura de 7 años dominada por *Cynodon dactylon*, compuesta originalmente por *Lotus corniculatus*, *Trifolium repens* y *Festuca arundinacea*. El suelo corresponde a un Brunosol eútrico típico de la Unidad San Manuel (Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay, MGAP-DSF, 1976).

##### 2. Tratamientos

Los tratamientos en el período 1994 – 1998 fueron:

- Cultivo continuo con laboreo convencional (LCC)
- Cultivo continuo con laboreo convencional en rotación con pasturas (LCP)
- Cultivo continuo bajo siembra directa (SDC)
- Cultivo bajo siembra directa en rotación con pasturas (SDP)

A partir del año 1999 se sembraron dos cultivos diferentes en las parcelas bajo siembra directa, por lo que los tratamientos en el período 1999 – 2001 fueron:

- Cultivo continuo con laboreo convencional (LCC)
- Cultivo continuo con laboreo convencional en rotación con pasturas (LCP)
- Cultivo de sorgo en una secuencia continua de cultivos en siembra directa (SDC)

- Cultivo de sorgo bajo siembra directa en rotación con pasturas (SDP)
- Cultivo de soja en una secuencia continua de cultivos en siembra directa (SDCsj)
- Cultivo de soja bajo siembra directa en rotación con pasturas (SDPsj)

En 1993, 1994, 1995, 1997 y 2000 se sembraron dos cultivos por año. En 1996 y 1998 no se sembró el cultivo de invierno y en 1999 el cultivo de verano se perdió por la sequía.

La fertilización fosfatada expresada en kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/há que recibió el ensayo y los cultivos que se realizaron en las parcelas se resume en el siguiente cuadro:

**Cuadro 1.** Cultivos realizados y dosis de P aplicadas para los distintos tratamientos en los diferentes años.

Año	Cultivo	Tratamientos		
		LC (laboreo convencional)	LCP, SDP (rotación con pasturas)	SD (siembra directa)
		kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup>		
1993	Cebada	33	33	66
	Sorgo	0	0	0
1994	Trigo	49.5	49.5	49.5
	Girasol	0	0	0
1995	Trigo	39.6	39.6	39.6
	Sorgo	0	0	0
1996	-----	0	0	0
	Maíz	32	0	32
1997	Avena	32.2	0	32.2
	Maíz	0	0	0
1998	-----	0	0	0
	Soja / Maíz	46	46	46
1999	Trigo	0	0	0
	-----	0	0	0
2000	Trigo	0	0	0
	Soja /	0	0	0
	Sorgo			

Las labores, aplicaciones de herbicidas y de fertilización nitrogenada que se realizaron en el ensayo en el año 2001 (durante el cual se tomaron las muestras mensualmente desde junio a diciembre para analizar el P en biomasa y el P disponible) se resumen en el siguiente cuadro:

**Cuadro 2.** Labores y aplicaciones de herbicidas y fertilizantes nitrogenados en los diferentes tratamientos en el año 2001.

	LCC	SDC	LCP	SDP	SDP <sub>sj</sub>	SDC <sub>sj</sub>
23 marzo		Roundup pre-cosecha (3 lt)		Roundup pre-cosecha (3 lt)		
15 abril	cosecha	cosecha	cosecha	cosecha	cosecha	cosecha
23 abril	excéntrica	Roundup (3 lt)	excéntrica	Roundup (3 lt)	Roundup (3 lt)	Roundup (3 lt)
30 junio	cincel		cincel			
5 octubre		Roundup (3 lt)		Roundup (3 lt)		
19 octubre					Roundup (3 lt)	Roundup (3 lt)
22 octubre	cincel + disquera		cincel + disquera			
23 octubre	siembra	siembra	siembra	siembra	siembra	siembra
23 octubre	46 kg/há N	46 kg/há N	46 kg/há N	46 kg/há N	46 kg/há N	46 kg/há N
2 noviembre	Guardian 2.5 lt /há	Guardian 2.5 lt /há	Guardian 2.5 lt /há	Guardian 2.5 lt /há	Guardian 2.5 lt /há	Guardian 2.5 lt /há
12 diciembre		100 kg/há urea				

### 3. Diseño experimental

El diseño original del experimento fue de parcelas al azar en 3 bloques. El tamaño de las parcelas fue de 10 metros de ancho y 50 metros de largo. El tratamiento correspondiente

a cultivo continuo con laboreo convencional (LCC) sólo tuvo dos repeticiones en el experimento.

#### 4. Muestreos de suelo y determinaciones analíticas

Fueron realizados dos estudios:

a. Primer estudio: Cambios en el tiempo en los contenidos de fósforo orgánico de los distintos sistemas.

Se utilizaron muestras históricas del experimento tomadas a profundidades 0 a 6 cm y 6 a 12 cm a comienzos de cada año desde el inicio del experimento en el año 1994 y conservadas en el Laboratorio de Suelos de la Estación Experimental Mario A. Cassinoni.

Se determinó en estas muestras:

- a) Contenido de fósforo orgánico: método por diferencia entre fósforo extraído con una solución de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  1M de una muestra de suelo calcinada a  $550^\circ\text{C}$  durante 1 hora y otra sin calcinación (Walker y Adams, 1958). Luego se determina el fósforo en ambos extractos por el método colorimétrico (Murphy y Riley, 1962). La diferencia entre ambos valores es el contenido de fósforo orgánico.
- b) Fósforo asimilable: por el método Bray N° 1, mediante la extracción con una solución de  $\text{NH}_4\text{F}$  0.03M y  $\text{HCl}$  0.025M y posterior determinación del fósforo del extracto mediante el agregado de molibdato de amonio y reducción selectiva con cloruro stagnoso.

b. Segundo estudio: Evolución mensual del fósforo presente en la biomasa microbiana y el fósforo asimilable en los distintos sistemas.

Se realizaron muestreos mensuales de suelo de cada uno de los tratamientos, desde junio a diciembre del 2001, según el siguiente detalle:

- 20 de junio
- 27 de julio
- 21 de agosto
- 20 de setiembre
- 25 de octubre
- 22 de noviembre
- 18 de diciembre

Se realizaron de 15 a 20 tomas de cada parcela con calador a la profundidad de 7.5 cm. En los tratamientos con siembra directa se retiró el residuo de superficie antes de muestrear. Las muestras fueron colocadas en bolsa de polietileno cerrada, manteniéndolas en conservadora a baja temperatura durante el traslado, y luego en heladera a 4°C hasta el momento de su procesamiento.

Cada muestra fue desagregada a mano a humedad de muestreo y tamizada a 2 mm. Posteriormente las muestras fueron preincubadas durante 7 días a 23° C aproximadamente en una caja de plástico cerrada, para evitar la pérdida de agua, y con un vaso conteniendo NaOH 1 M para retener el CO<sub>2</sub> liberado. Al cabo de los 7 días se realizaron las siguientes determinaciones por duplicado:

- a) Fósforo presente en la biomasa microbiana: según técnica de Brookes et al. (1982) modificada. De cada muestra de suelo incubada se tomaron seis submuestras equivalentes a 5 gramos de suelo seco. Dos de esas submuestras se fumigaron con CHCl<sub>3</sub> durante 24 horas al vacío. Las cuatro restantes se dejaron

24 horas en desecador con NaOH 1M. Se ventilaron las muestras fumigadas hasta pérdida de olor a cloroformo. En dos de las submuestras no fumigadas, y en las dos fumigadas se realizó la extracción de fósforo con 100 ml de una solución de NaHCO<sub>3</sub> 0.5 M a pH 8.5, agitando durante 30 minutos, y filtrando con filtro Wathman N° 2. En las dos submuestras no fumigadas restantes, se realizó la misma extracción con la solución de NaHCO<sub>3</sub> 0.5 M a pH 8.5, a la cual se le agregaron 5 ml de una solución de P de 50 mg P kg<sup>-1</sup> a los efectos de corregir la cantidad de P inorgánico liberado de la biomasa retenido por el suelo. De todos los filtrados se tomó una alícuota de 10 ml, colocándola en matraces de 50 ml. Se ajustó el pH con p-nitrofenol 0.25% peso/volumen y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.9 M y se agregó a cada matraz 8 ml de reactivo (Murphy y Riley, 1962). Se aforó a 50 ml con agua deionizada. Se preparó una escala con 0, 2, 5, 10 y 15 ppm de P. La medición se realizó en espectrofotómetro con un largo de onda de 882 nm.

- b) Fósforo asimilable: mediante el método de Bray y Kurtz (1945). Las determinaciones se hicieron en las muestras a humedad de campo y en las mismas muestras secadas al aire. Se midió el contenido de humedad del suelo por el método gravimétrico (mediante secado de la muestra a estufa) a los efectos de corregir el valor de análisis de muestra húmeda.

## 5. Evaluaciones complementarias en el experimento

Se midió la temperatura del suelo mediante termómetros colocados en el suelo a 5 cm de profundidad en el período agosto – diciembre 2001. En los períodos en que los termómetros estuvieron fuera del suelo por diversas causas (retirados para recolección de datos, desenterrados por animales) la temperatura para los distintos tratamientos se estimó utilizando datos de temperatura del suelo de la estación meteorológica de la EEMAC. Se colocaron en total 4 termómetros, en los siguientes tratamientos:

- Cultivo continuo con laboreo convencional (LCC)
- Cultivo continuo con laboreo convencional y rotación con pasturas (LCP)
- Cultivo de sorgo bajo siembra directa en rotación con pasturas (SDP)
- Cultivo de soja bajo siembra directa en rotación con pasturas (SDPsj)

## 6. Análisis estadístico

Se realizó el procesamiento de los datos experimentales mediante el procedimiento PROC GLM del SAS (SAS Institute, 1985). Se realizó el análisis de varianza para tratamientos. Dentro del mismo se realizó la partición de suma de cuadrados de los tratamientos en contrastes ortogonales.

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

##### A. PRIMER ESTUDIO: CAMBIOS EN EL FÓSFORO ORGÁNICO EN LOS DISTINTOS SISTEMAS.

El Cuadro 3 muestra el contenido de fósforo orgánico expresado en mg de P kg<sup>-1</sup> de suelo en los primeros 6 centímetros de profundidad en los años 1994, 1996, 1998 y 2000. En las últimas columnas se presentan la diferencia de fósforo orgánico entre el final y el comienzo del período estudiado, la variación en porcentaje y la media para cada tratamiento.

**Cuadro 3.** Contenido de fósforo orgánico en mg de P kg<sup>-1</sup> de suelo, profundidad 0 a 6 cm, en el período 1994-2000.

Tratamiento	Año				Diferencia 2000-94	Variación %	Promedio tratamiento mgPkg <sup>-1</sup>
	94	96	98	2000			
	-----mg P kg <sup>-1</sup> -----						
LCC	195	196	197	199	4	2	197
LCP	195	180	229	207	12	6	203
SDC	213	205	243	210	-3	-1	218
SDP	213	227	206	224	11	5	217
Media	203	202	219	210			
Coef.var.	4.81	10.22	7.24	13.74			
Pr>F	0.26	0.32	0.16	0.84			

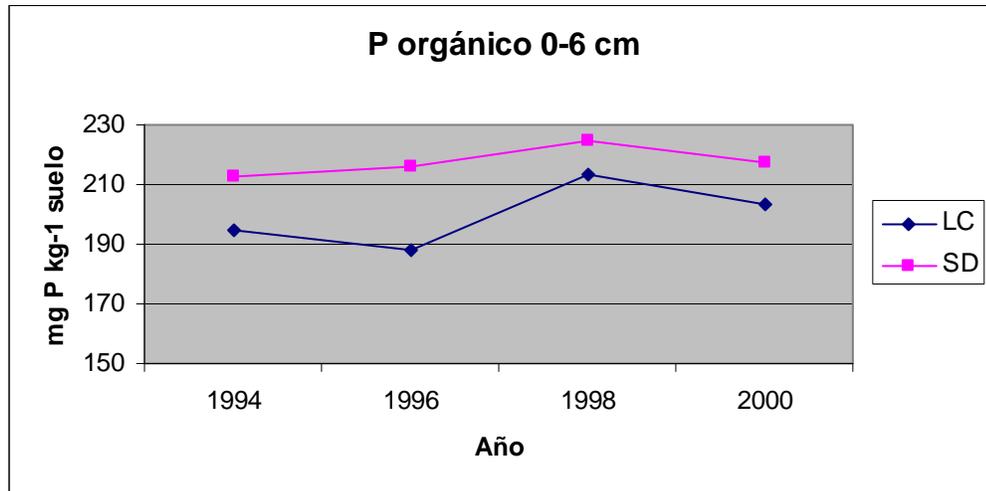
El Cuadro 4 muestra el contenido de fósforo orgánico en mg de P kg<sup>-1</sup> de suelo de 6 a 12 cm de profundidad para cada uno de los tratamientos estudiados desde el año 1994 al año 2000. En las últimas columnas se presentan la diferencia de fósforo orgánico entre el

comienzo y el final del período estudiado, la variación en porcentaje y la media para todo el período estudiado.

**Cuadro 4.** Contenido de fósforo orgánico, profundidad 6 a 12 cm, expresados en mg de P kg<sup>-1</sup> suelo, en el período 1994-2000.

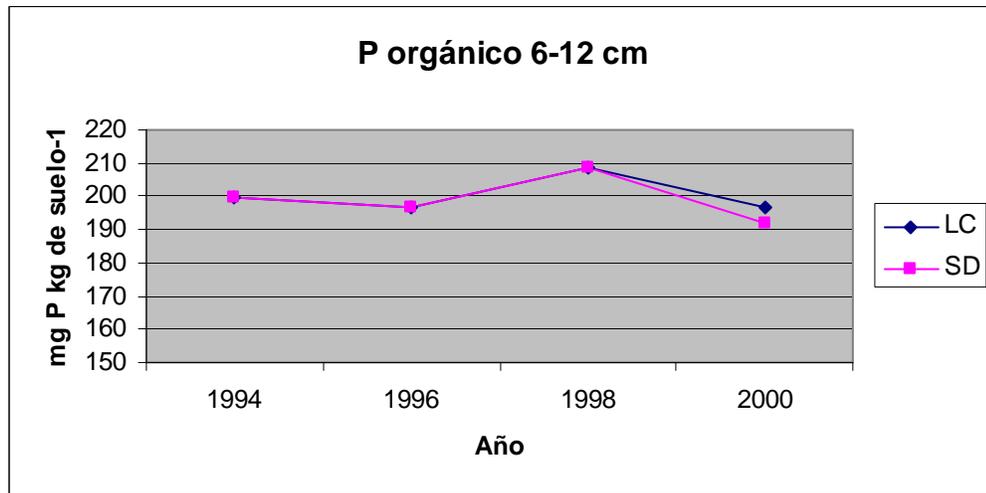
Tratamiento	Año				Diferencia 2000-94	Variación %	Promedio tratamiento mgPkg <sup>-1</sup>
	94	96	98	2000			
	-----mg P kg <sup>-1</sup> -----						
LCC	199	192	229	193	-6	-3	203
LCP	199	157	216	200	1	0.5	193
SDC	200	205	203	200	0	0	202
SDP	200	189	214	184	-6	-3	197
Media	199	185	215	194			
Coef.var.	1.84	26.81	10.36	11.33			
Pr>F	0.99	0.79	0.73	0.87			

En la Figura 1 se presenta el promedio del contenido de fósforo orgánico de los tratamientos con laboreo y con siembra directa para la profundidad 0 a 6 cm.



**Figura 1.** Contenido de P orgánico en mg de P kg<sup>-1</sup> de suelo, profundidad 0 a 6 cm, en el período 1994-2000.

En la Figura 2 se presenta el promedio del contenido de fósforo orgánico de los tratamientos con laboreo y con siembra directa para la profundidad 6 a 12 cm.



**Figura 2.** Contenido de P orgánico en mg de P kg<sup>-1</sup> de suelo, profundidad 6 a 12 cm, en el período 1994-2000.

Los sistemas en los que se practicó siembra directa presentaron en promedio mayores contenidos de P orgánico que los sistemas bajo laboreo continuo durante todo el período estudiado (217 y 200 mg de P kg<sup>-1</sup> de suelo respectivamente). Esto estaría relacionado a menores condiciones de oxidación de la materia orgánica y/o al efecto de acumulación de compuestos orgánicos en los primeros centímetros de suelo cuando se utiliza la siembra directa.

Las diferencias encontradas entre tratamientos en el contenido de P orgánico no fueron estadísticamente significativas en cada una de las fechas de muestreo.

Se utilizaron datos del contenido de carbono orgánico del mismo ensayo calculados en un trabajo anterior (Ernst, com.pers.) para compararlos con los datos de fósforo orgánico. Los resultados obtenidos para los distintos tratamientos desde el año 1994 al 2000 se presentan a continuación (Cuadros 5 y 6), expresados en gr de C kg<sup>-1</sup> de suelo.

En la última columna se presenta la diferencia de carbono orgánico al inicio y al final del período estudiado.

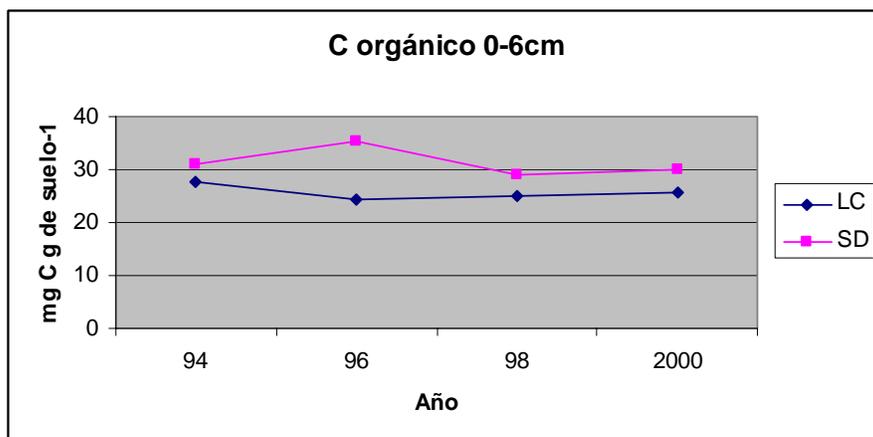
**Cuadro 5.** Contenido de carbono orgánico en gr de C kg<sup>-1</sup> de suelo, 0 a 6 cm de profundidad, en el período 1994-2000.

Tratamiento	Año				Diferencia 2000-94	Variación %	Promedio tratamiento g C kg <sup>-1</sup>
	94	96	98	2000			
	-----g C kg <sup>-1</sup> -----						
LCC	27	25	24	25	-2	-7.4	25.4
LCP	28	24	26	26	-2	-7.1	26.5
SDP	31	33	28	30	-1	-3.2	31.5
SDC	31	38	30	30	-1	-3.2	33

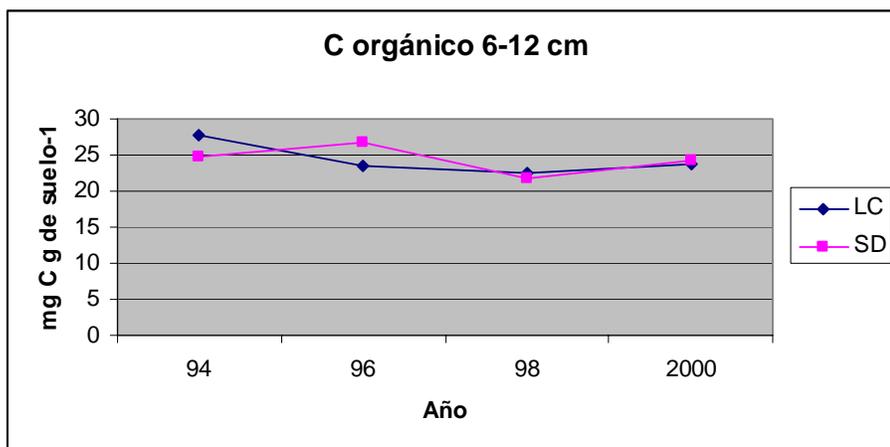
**Cuadro 6.** Contenido de carbono orgánico en g kg<sup>-1</sup> de suelo, 6 a 12 cm de profundidad, en el período 1994-2000.

Tratamiento	Año				Diferencia 2000-94	Variación %	Promedio tratamiento g C kg <sup>-1</sup>
	94	96	98	2000			
	-----g C kg <sup>-1</sup> -----						
LCC	27	26	22	24	-3	-11	25
LCP	28	21	22	24	-4	-14	25
SDP	25	23	22	25	0	0	25
SDC	25	31	21	23	-2	-8	26

En las Figuras 3 y 4 se indica la evolución del contenido de carbono promedio para los sistemas con laboreo convencional y siembra directa.



**Figura 3.** Contenido de carbono orgánico en  $\text{g kg}^{-1}$ , profundidad 0 a 6 cm, en el período 1994-2000.



**Figura 4.** Contenido de carbono orgánico en  $\text{g kg}^{-1}$  de suelo, profundidad 6 a 12 cm, en el período 1994-2000.

El carbono sigue la tendencia encontrada para el fósforo orgánico, aunque un poco más acentuada. En los primeros 12 centímetros de suelo se encontraron mayores contenidos en promedio de carbono orgánico en los tratamientos bajo siembra directa que en los sistemas bajo laboreo continuo (29 y 25.5  $\text{g de C org kg}^{-1}$  de suelo respectivamente). En

la capa superficial (0 a 6 cm) de los tratamientos bajo siembra directa se encontraron contenidos promedio de 32 g de C org kg<sup>-1</sup> de suelo y 26 g de C org kg<sup>-1</sup> de suelo en los sistemas bajo laboreo continuo. Estos últimos presentaron además una distribución del contenido carbono orgánico más uniforme dentro del perfil.

Se observaron oscilaciones en el contenido tanto de fósforo como de carbono orgánico en todos los tratamientos a ambas profundidades a lo largo del período estudiado. Dichas oscilaciones podrían ser explicadas en primer lugar por una mayor acumulación de materia orgánica en los primeros centímetros del suelo producida durante la etapa de pastura (Russell, 1980; Jackman, 1964) y en consecuencia un aumento en el carbono y fósforo orgánico, y una rápida mineralización de la materia orgánica fresca (fracción muy lábil) durante la etapa de cultivo. En segundo lugar por una reducción en los procesos erosivos. En los tratamientos en los que se implantó una pastura este aumento coincide con la mayor producción de materia seca de la misma con el consiguiente incremento en la materia orgánica depositada en las capas superficiales y una reducción en los procesos erosivos. Díaz (1992) encontró que los sistemas que fueron rotados con pasturas anuales y plurianuales presentaban fluctuaciones de pérdida y ganancia de materia orgánica en coincidencia con la etapa de cultivo y pastura respectivamente. La materia orgánica incorporada al suelo durante la etapa de pastura presentaba mayores tasas de pérdida debido a su labilidad, su escaso grado de humificación y asociación a otros coloides del suelo. Sin embargo, McCallister et al. (2002) no encontraron descensos significativos en los niveles de fósforo del suelo con mayores intensidades de cultivo.

Los estudios de la evolución de diferentes formas de fósforo en el suelo y de la materia orgánica que contiene el fósforo orgánico en el suelo citados en la bibliografía abarcan períodos que superan los 10 años: Selles et al. (1999) estudiaron la distribución y formas de P en distintos sistemas durante 12 años; Bayer et al. (2001) analizaron los cambios en las fracciones de la materia orgánica en distintos sistemas también durante 12 años;

Morón y Khiel (1992) estudiaron la evolución de las distintas fracciones de fósforo en 3 sistemas agrícolas durante 25 años. El presente trabajo se realizó durante un período de tiempo menor a los citados (7 años), lo que podría explicar que no se haya observado diferencias entre los tratamientos, que sí se observó en otros trabajos. En el caso del estudio llevado a cabo por Morón y Khiel, la tendencia del fósforo orgánico a disminuir se ve reflejada en la curva ajustada mediante una regresión utilizando los datos de los 25 años, aunque en algunas ocasiones se dieron aumentos de un año a otro, e incluso en períodos no tan largos, tal como se observó en este trabajo.

El fósforo orgánico forma parte de la materia orgánica del suelo por lo que sigue el esquema de acumulación y pérdida de la misma (Dalal, 1977, citado por Morón, 1992).

En los sistemas conservacionistas donde se realiza siembra directa, además de existir un mayor aporte de materia orgánica a los primeros centímetros del suelo como resultado de la no remoción de los residuos de las cosechas y por lo tanto una menor exportación en productos agrícolas (Díaz, 1992; Morón, 1992), la estructura del suelo permanece más estable. Ciertas fracciones de materia orgánica, sobre todo aquellas que tienen un mayor tiempo de mineralización-inmovilización, se encuentran protegidas dentro de los agregados de suelo, que al ser perturbados por efecto del mismo dejan expuestas esas fracciones a los agentes oxidantes (Adu et al, 1978 citado por Six, J., 1995; Díaz, 1992). El laboreo trae como resultado además que los residuos vegetales provenientes de los cultivos sean enterrados más profundamente, lo que explica que la materia orgánica, y en consecuencia el fósforo orgánico y el carbono orgánico, presenten una distribución más homogénea dentro del perfil del suelo. Tracy et al. (1990) encontraron que los suelos en los que se practicaron métodos conservacionistas presentaban un mayor contenido de materia orgánica en los 2.5 primeros cm del suelo. Sá et al. (2001) al estudiar el efecto del no laboreo sobre las fracciones de materia orgánica del suelo encontró que existía un importante incremento de materia orgánica en los primeros 10

cm de suelo en los sistemas sin laboreo como consecuencia del aporte de residuos orgánicos y la falta de perturbación en los agregados del mismo.

Es de esperar que en sistemas agrícolas existan pérdidas de fósforo orgánico a lo largo de los años. Las principales vías de pérdidas de fósforo en los suelos son el escurrimiento y la oxidación (Morón y Kiehl, 1992). Las pérdidas de fósforo y carbono orgánico en los sistemas bajo laboreo continuo con respecto a los sistemas bajo siembra directa, pueden ser explicadas por mayores pérdidas de materia orgánica debido a un mayor escurrimiento, oxidación y lixiviación de la misma. El factor dominante en la desaparición de la materia orgánica es su oxidación y ella es progresivamente más lenta a medida que la materia orgánica remanente es más estable, presentando un comportamiento asintótico, es decir con ritmo decreciente de pérdidas (Díaz, 1992). El proceso erosivo también interviene en forma acentuada en las pérdidas de materia orgánica en sistemas agrícolas fertilizados y sin fertilizar, además este proceso es selectivo sobre la materia orgánica, donde se estimó que la concentración de la materia orgánica en los sedimentos es en promedio 2.1 veces mayor que en el suelo que los originó (Barrows et al., 1963 citado por Díaz, 1992). Díaz, 1995, reporta pérdidas de materia orgánica en sistemas agrícolas fertilizados del orden de  $670 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  y de  $929 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ .

Varios autores verifican mayores pérdidas de materia orgánica a medida que aumenta la intensidad del laboreo debido a la erosión (Tracy et al., 1990; Magid y Nielsen, 1992; Díaz, 1992; Ernst y Siri, 1995, Six et al., 1998).

Algunos autores reportan la ausencia de efecto sobre el contenido de fósforo orgánico al aumentar la presión de pastoreo (Simpson et al., 1974, Del Pino y Hernández, 2002), otros reportan resultados contradictorios, donde a mayor intensidad de pastoreo, mayores niveles de fósforo orgánico en los primeros centímetros de suelo (McLachlan, 1968).

B. SEGUNDO ESTUDIO: EVOLUCIÓN DEL FÓSFORO EN LA BIOMASA MICROBIANA Y EN LA FRACCIÓN LÁBIL (P Bray)

1. Fósforo en la biomasa microbiana

En el Cuadro 7 se indican los valores promedio del contenido de P en la biomasa microbiana para los diferentes tratamientos en las distintas fechas de muestreo. También se indica el promedio, desvío estándar y probabilidad de la F del análisis de varianza para cada fecha de muestreo.

**Cuadro 7.** Contenido de fósforo en biomasa a la profundidad 0-7.5 cm, en el período junio a diciembre 2001. Datos promedio para cada tratamiento.

	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio del tratamiento
	-----mg P kg <sup>-1</sup> -----							
LCC	16	26	27	34	59	26	15	29
LCP	16	33	18	30	59	29	15	28
SDCsg	28	38	36	34	36	34	21	32
SDCsj	36	49	22	22	44	23	26	31
SDPsg	29	40	23	26	31	27	29	29
SDPsj	25	26	19	31	23	31	23	25
Media	25	36	24	29	35	28	22	
Coef.var.	28.7	18.9	36.3	32.6	36.2	27.2	21.9	
Pr>F	0.18	0.02	0.23	0.67	0.10	0.58	0.01	

En el Cuadro 8 se indica la probabilidad de los contrastes ortogonales realizados entre tratamientos para cada fecha.

**Cuadro 8.** Valores de probabilidad para los contrastes ortogonales calculados para el contenido de P en biomasa de los diferentes tratamientos.

Contraste	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
LC vs SD	ns	0.0265	ns	ns	ns	ns	0.0008
LCC vs LCP	ns	ns	ns	ns	0.0160	ns	ns
SDC vs SDP	ns	0.0270	ns	ns	ns	ns	ns
SDC <sub>sg</sub> vs ns		0.0864	ns	ns	ns	ns	ns
SDC <sub>sj</sub>							
SDP <sub>sg</sub> vs SDP <sub>sj</sub>	ns	0.0324	ns	ns	ns	ns	ns

Los contenidos de P en la biomasa microbiana en los primeros 7.5 cm de suelo oscilaron entre 16 y 59 mg de P kg<sup>-1</sup> de suelo. Los datos observados por Hernández et al (sin publicar) en 4 suelos de Uruguay bajo pradera y campo natural a la misma profundidad oscilaron entre 17 y 77 mg de P.kg<sup>-1</sup>. García y Morón (1992) analizaron los primeros 20 cm de 3 suelos y encontraron valores entre 8 y 24 mg de P.kg<sup>-1</sup>, lo que corresponde entre 20 y 51 kg de P.ha<sup>-1</sup>. Anderson y Domsch (1980) encontraron un contenido promedio de 83 kg de P microbiano.ha<sup>-1</sup> en los primeros 12.5 cm de 26 suelos bajo cultivo. Del Pino encontró valores entre 30 y 160 mg P kg<sup>-1</sup> de suelo en los primeros 7.5 cm de suelo en suelos con historia de fertilización.

Se observaron resultados significativos ( $p < 0.001$ ) en el contenido de fósforo en biomasa de los distintos tratamientos en los meses de julio, octubre y diciembre. La prueba de contrastes ortogonales determinó que en los meses de julio y diciembre la media de los tratamientos en los que se realizó siembra directa es mayor ( $p > 0.05$ ) que la media de los tratamientos con laboreo convencional. Con excepción del mes de octubre, la media del contenido de P en biomasa fue más alta en los tratamientos con siembra directa que en los tratamientos con laboreo convencional. Estas diferencias estarían asociadas a un mayor contenido de masa microbiana, favorecida por la acumulación de restos en

superficie y condiciones de sobrevivencia al no existir laboreo. Los diferentes métodos de laboreo, al influir en factores como temperatura, humedad, aireación y disponibilidad de nutrientes, actúan sobre la actividad y biomasa microbiana a través de la manera en que se depositan los restos de cultivos anteriores y el grado de mezclado del suelo. Rheineimer et al. (2000) también encontraron que los tratamientos con siembra directa tuvieron mayores niveles de P en biomasa en 2 de los 3 suelos estudiados con respecto al laboreo convencional. El mayor contenido de materia orgánica, nutrientes y masa microbiana en los suelos sin laborear fue verificada por varios autores (Tracy et al., 1990; Ernst y Siri, 1995; Maroko et al., 1999; Selles et al., 1999; Vargas y Scholles, 2000; Bayer et al., 2001).

No se observaron tampoco diferencias significativas consistentes a lo largo del período estudiado en las cantidades de P microbiano para las diferentes especies vegetales cultivadas. Esto coincide con lo observado por Rheinheimer et al. (2000). Sin embargo se observa cierta tendencia a un mayor contenido de P en la biomasa microbiana en los tratamientos de siembra directa con sorgo.

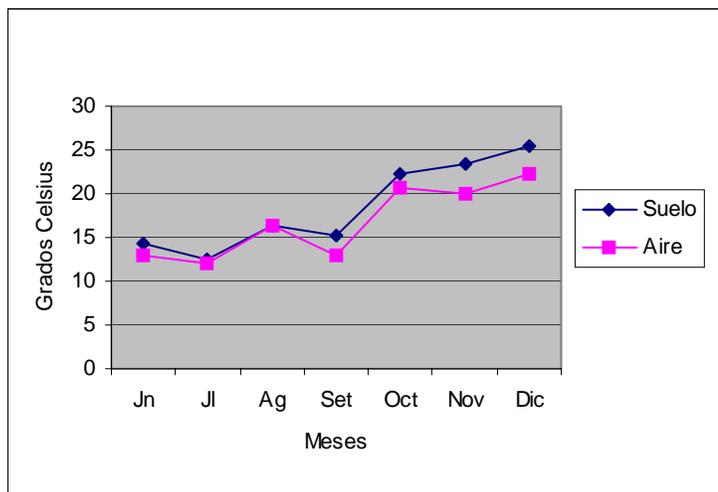
Serían de esperar mayores niveles en el contenido de P en la biomasa microbiana en los suelos bajo pastura con respecto a suelos bajo cultivo. En rotaciones en los que se incluyen años de pasturas el balance de la materia orgánica se modifica hacia la ganancia durante el período de pasturas ya que se eliminan los laboreos anuales y se incrementa la incorporación de materia orgánica (Díaz, 1992). García y Morón (1992) encontraron que el sistema de rotación que incluyó 3 años de pasturas tuvo en promedio el doble de contenido de P en biomasa que el sistema de cultivos con fertilización y tres veces más que el sistema de cultivos sin fertilización. En el presente estudio no se observaron diferencias entre los tratamientos en los que se incluyeron pasturas en la rotación y en los que solamente se incluyeron cultivos. Es importante considerar que la pastura estuvo instalada en el período 1995-1998, por lo que el efecto de la misma ya no sería constatable en una muestra sacada en el año 2001.

Los coeficientes de variación fueron relativamente altos, lo que indica un error experimental elevado. Esto lleva a que en algunos casos, aunque existieron diferencias entre los tratamientos, no fueron significativas, y solo puede indicarse si existe alguna tendencia. Patra et al. (1990), quienes tuvieron un alto error experimental y de muestreo en su trabajo al medir la biomasa microbiana del suelo, advierten sobre las dificultades de medir la biomasa microbiana del suelo en muestras tomadas en diferentes momentos del año, con diferentes contenidos de humedad. Brookes et al. (1984) también encontraron grandes fluctuaciones en los contenidos de P en biomasa.

Se observaron oscilaciones en el P presente en la biomasa microbiana del suelo a lo largo del período analizado. Varios autores han estudiado los cambios estacionales de la biomasa microbiana. Patra et al. (1990) no encontraron diferencias significativas entre los contenidos de P en biomasa a través del tiempo, al igual que Tate et al. (1991) y García y Morón (1992). Perrot et al. (1990) encontraron un aumento del P microbiano en el invierno y una disminución en la primavera. Por el contrario, Del Pino (1994) encontró mayores niveles de P en biomasa en primavera y verano que en otoño e invierno. Hernández et al. (sin publicar) también encontraron menores niveles en invierno y un pico de máxima al comienzo de la primavera. El aumento de biomasa en el invierno encontrado por Perrot et al. (1990) podría deberse a mejores condiciones hídricas en el invierno, ya que se trata de suelos con bajos contenidos hídricos; mientras que Del Pino(1994) y Hernández et al. (sin publicar) trabajaron en suelos con mayores contenidos hídricos y encontraron un descenso en el contenido de P en la biomasa microbiana en el verano debido a menores niveles hídricos y mayores temperaturas.

En el trabajo realizado por Hernández et al. (sin publicar) los valores más bajos de P en biomasa ocurrieron en los meses de julio-agosto (invierno), en coincidencia con las temperaturas más bajas. Los valores máximos variaron según los suelos, pero en todos coincidió un pico de máxima en primavera temprana (setiembre). En el presente estudio

los valores máximos se dieron más tarde, en octubre. Esto se debe a una situación atípica, en la que las temperaturas del mes de agosto fueron más altas que lo normal y las de setiembre más bajas. El aumento de la temperatura en el mes de setiembre, que coincidió con el aumento de biomasa en el trabajo de Hernández et al. (sin publicar), en nuestro caso ocurrió en el mes de octubre (Figura 5).



**Figura 5.** Temperatura media del aire y del suelo en Estación Experimental Mario A. Cassinoni. Promedios mensuales del período junio a diciembre de 2001.

A partir del mes de octubre se observa una disminución en el P presente en la biomasa microbiana, particularmente en el mes de diciembre. Esto tendría su explicación en el aumento de la temperatura y principalmente en una disminución en el contenido de humedad del suelo, que afectaría a las poblaciones microbianas. Varios autores mencionan la importancia del contenido de humedad en los procesos biológicos del suelo, en especial los relacionados con la biomasa microbiana, tanto en el laboratorio (Brookes et al., 1982; Sparling y West, 1988; Magid y Nielsen, 1992; Gregorich y Ellert, 1993) como en condiciones de campo (Hernández et. al., sin publicar).

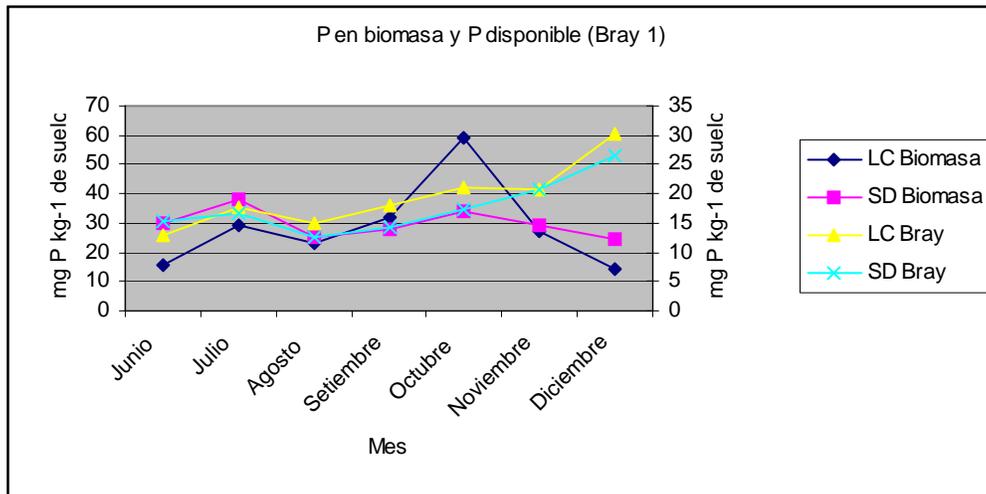
Agregar gráfica humedad

## 2. Evolución de la disponibilidad de fósforo en el suelo

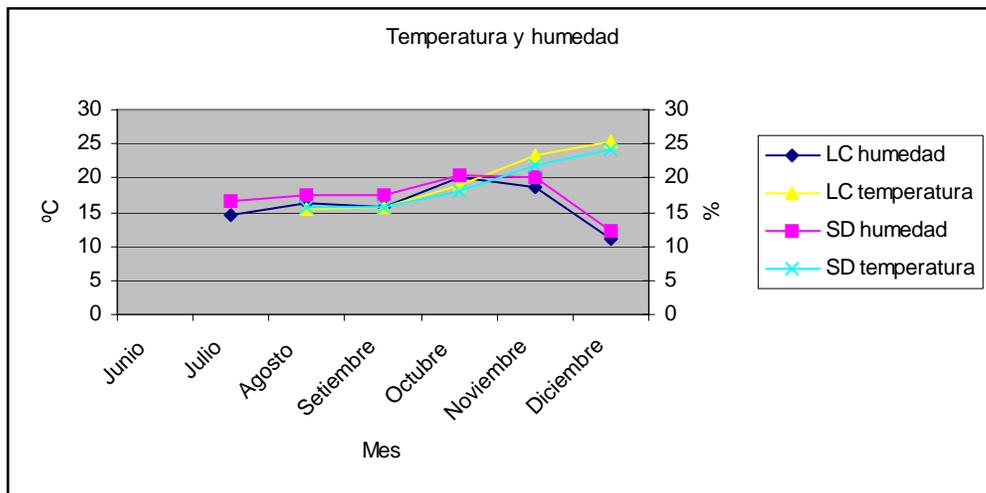
Se analizó el fósforo disponible en cada muestreo. El análisis fue realizado en muestra húmeda (a humedad de muestreo). Los datos correspondientes a cada tratamiento para cada fecha de muestreo se indican en el Cuadro 9. También se indican la probabilidad de los contrastes ortogonales realizados entre tratamientos para cada fecha.

**Cuadro 9.** Contenido de P disponible en el suelo (Bray N°1) de 0 a 7.5 cm de profundidad, período junio a diciembre de 2001.

	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Media
	----- mg P kg <sup>-1</sup> suelo -----							
LCC	15	19	17	21	24	19	31	20
LCP	11	16	13	15	18	22	29	17
SDCsg	16	21	15	17	20	21	29	19
SDCsj	19	19	13	17	19	26	30	20
SDPsg	13	13	11	11	16	16	21	14
SDPsj	14	14	11	12	13	20	26	15
Media	15	17	13	15	18	21	28	
Coef. var.	8.5	18.1	17.8	20.6	23.0	27.0	28.6	
Pr>F	0.01	0.05	0.09	0.04	0.27	0.46	0.68	
LCC vs LCP	ns	ns	ns	ns	0.0160	ns	0.0008	
SDC vs SDP	ns	0.0044	ns	ns	ns	ns	ns	



**Figura 6.** Evolución del fósforo en la biomasa microbiana y fósforo asimilable (Bray N° 1) en el suelo en los diferentes meses.



**Figura 7.** Evolución de la temperatura y humedad del suelo en los diferentes meses.

En el trabajo realizado por García y Morón (1992) el P microbiano no estuvo relacionado significativamente con el P disponible determinado por los métodos Bray N° 1 y resinas. Hernández et al. (sin publicar) tampoco obtuvieron correlaciones

significativas pero observaron que en general una disminución de la biomasa microbiana coincidió con un aumento en el P asimilable del suelo. Esta última tendencia se observó también en el presente trabajo, donde la disminución del contenido de P en biomasa a partir del mes de octubre coincide con un aumento del P disponible medido según el método Bray N° 1.

El laboreo realizado y la cobertura del suelo modifican el régimen hídrico y térmico del suelo. En los casos de siembra directa, en los que el suelo no fue roturado y los restos de cultivos anteriores se mantuvieron en la superficie, hubo mayores contenidos de humedad que en los tratamientos bajo laboreo continuo para todo el período estudiado. Esto coincide con lo encontrado por Salton y Mielniczuk, 1995, citados por Vargas y Scholles, 2000 y Moriozumi y Horino, 2002.

En los meses más cálidos, fines de primavera y principios de verano, los tratamientos bajo siembra directa tuvieron temperaturas inferiores a los tratamientos con laboreo. En los suelos con siembra directa la amplitud térmica se reduce, afectando fundamentalmente la máxima diaria y determinando una temperatura media inferior (Ernst y Siri, 1997).

Además de constituir una fuente de nutrientes para los microorganismos, los residuos en la superficie del suelo son responsables, según Salton y Mielniczuk (1995), citados por Vargas y Scholles (2000) de menores variaciones en la temperatura y humedad del suelo. Estas condiciones de temperaturas más templadas y mayores contenidos hídricos favorecerían la sobrevivencia de la biomasa microbiana en los sistemas de siembra directa, ya que se ha comprobado que descensos en el C microbiano coincide con temperaturas altas y estrés hídrico durante el verano (Cattletan y Vidor, 1990, y García y Rice, 1994, citados por Vargas y Scholles, 2000).

Las diferentes especies vegetales cultivadas determinan la cantidad, calidad y persistencia de los residuos, lo que influye en la población microbiana. La utilización de rotaciones de cultivos con alta producción de residuos posibilita el aumento de la biomasa y una mayor actividad microbiana, además de los beneficios derivados de la cobertura del suelo y de la mayor disponibilidad de nutrientes (Vargas y Scholles, 2000). Al comparar el tipo de cultivo en los tratamientos con siembra directa se observa que en las parcelas en las que se cultivó soja las temperaturas del suelo son menores en los meses cálidos que en las parcelas en las que se cultivó sorgo con siembra directa.

Cuadro y gráfica temperatura

## V. CONCLUSIONES

- Si bien no se observaron diferencias significativas en la evolución del fósforo orgánico en los distintos tratamientos estudiados, durante el período analizado los tratamientos con siembra directa tendieron a tener un mayor contenido de fósforo orgánico que los tratamientos con laboreo continuo, particularmente en los primeros 6 cm de profundidad.
- Los tratamientos con siembra directa tendieron a presentar mayor contenido de fósforo en biomasa que los tratamientos con laboreo continuo.
- El fósforo presente en la biomasa microbiana fluctúa a lo largo del período estudiado. Tanto los tratamientos con laboreo convencional como los tratamientos en los que se realizó siembra directa presentan picos máximos en julio y octubre. La disminución luego del pico de octubre ocurre al mismo tiempo que disminuye la humedad y aumenta la temperatura del suelo.
- La disponibilidad de fósforo también mostró variaciones en los meses evaluados, aunque menos pronunciadas. Hasta octubre acompañó las fluctuaciones del P en biomasa, a partir de ese mes aumentó al disminuir el P en biomasa. **Magnitud.**

## VI. RESUMEN

El trabajo consistió en dos estudios. En el primero se analizaron los cambios en el contenido de fósforo orgánico del suelo en sistemas de cultivo continuo con laboreo convencional y bajo siembra directa, y en rotación con pasturas, durante un período de 7 años. En el segundo se estudiaron los cambios en el fósforo presente en la biomasa microbiana y el fósforo disponible del suelo, en función de las variaciones en temperatura y humedad del suelo.

Se realizaron muestreos de suelo de un experimento de rotaciones de cultivos y pasturas iniciado en el año 1993. Para el estudio sobre contenido de fósforo orgánico total fueron analizadas muestras de 0-6 y 6-12 cm de profundidad de tratamientos de cultivo continuo con laboreo convencional (LCC), cultivo continuo en siembra directa (SDC), rotaciones de cultivos con laboreo y pasturas (LCP) y rotaciones de cultivos en siembra directa con pasturas (SDP). Para el estudio sobre determinación de fósforo presente en la biomasa microbiana se realizó el muestreo mensual de los tratamientos anteriormente mencionados a una profundidad de 0-7.5 cm durante un período de 7 meses. Se colocaron termómetros en el suelo en los diferentes tratamientos, registrando la temperatura durante el período. Se realizó la determinación del contenido de fósforo presente en la biomasa microbiana y el contenido de fósforo disponible por el método Bray 1. Se trabajó sobre muestra a humedad de muestreo.

En el estudio en el que se analizó el P orgánico en el período 1994-2000 no hubo diferencias significativas entre tratamientos, pero los sistemas en los que se practicó siembra directa presentaron en promedio mayores contenidos de P orgánico que los sistemas bajo laboreo continuo durante todo el período estudiado (217 y 200 mg de P kg<sup>-1</sup> respectivamente).

En el segundo estudio, en el que se analizó el P presente en la biomasa microbiana del suelo en los meses de julio a diciembre del 2001, los contenidos de P en la biomasa microbiana en los primeros 7.5 cm de suelo oscilaron entre 16 y 59 mg de P kg<sup>-1</sup> de suelo. Si bien no hubo diferencias significativas, los tratamientos con siembra directa tendieron a tener un mayor contenido de P en biomasa que los tratamientos con laboreo convencional. No se observó efecto de la pastura en el contenido de P microbiano. Todos los tratamientos presentaron un pico máximo de P en biomasa en octubre y luego una disminución a medida que aumentaba la temperatura y disminuía el contenido de humedad del suelo. La disminución de la biomasa microbiana coincidió con un aumento del P disponible medido según el método Bray N° 1.

VII. SUMMARY

## VIII. BIBLIOGRAFÍA

1. ANDERSON, J.P.E; DOMSCH, K.H. 1980. Quantities of plant nutrients in the microbial biomass of selected soils. *Soil Science*. 130 (4): 211-216.
2. ARAÚJO, M.S.B.; SALCEDO, I.H. 1997. Formas preferenciais de acumulacao de fósforo em solos cultivados com cana-de-acúcar na regioo nordeste. *R. bras. Ci. Solo, Vicoso*, 21: 643-650.
3. BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PILLON, C.N.; SANGOI, L. 2001. Changes in soil organic matter fractions under subtropical no-till cropping systems. *Soil Sci. Soc. American Journal*. 65:1473-1478.
4. BOWMAN, R.A.; COLE, C.V. 1978. Transformations of organic phosphorus substrates in soils evaluated by NaHCO<sub>3</sub> extraction. *Soil Science*. 125 (1): 49-54.
5. BRAY, R.H.; KURTZ, L.T. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.*, 59: 39-45.
6. BROOKES, P.C.; POWLSON, D.S.; JENKINSON, D.S. 1984. Phosphorus in the soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*. 16 (2): 169-175.
7. BROOKES, P.C.; POWLSON, D.S.; JENKINSON, D.S. 1982. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. *Soil Biology and Biochemistry*. 14: 319-329.
8. CAMBARDELLA, C.A.; ELLIOTT, E.T. 1994. Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils. *Soil Science American Journal*. 58:123-130.
9. CAMBARDELLA, C.A.; ELLIOTT, E.T. 1992. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society Journal*. 56:777-783.
10. CHAUHAN, B.S.; STEWART, J.W.B.; PAUL, E.A. 1981. Effect of labile inorganic phosphate status and organic carbon additions on the microbial uptake of phosphorus in soils. *Canadian Journal of Soil Science*. 61: 373-385.
11. DEL PINO, A. 1994. Relationship between soil fertility and the components and seasonality of forage supply of a hill pasture. Tesis M. Agr. Sc. Palmerston North, New Zealand, Massey University. 200p.

12. DEL PINO, A.; HERNANDEZ, J. 2002. Ciclaje de fósforo por animales bajo pastoreo en campo natural y mejoramientos con leguminosas sobre suelos de basalto. *Agrociencia*. 2: 47-52.
13. DIAZ ROSSELLO, R. 1992. Evolución de la materia orgánica en rotaciones de cultivos con pasturas. INIA. *Investigaciones Agronómicas*. 1 (I): 103-110.
14. DOORMAR, J.F. 1972. Seasonal pattern of soil organic phosphorus. *Canadian Journal of Soil Science*. 52: 107-112.
15. ERNST, O.; SIRI, G. 1995. Siembra directa, sus posibilidades en el sistema pastura-cultivos. *Cangüé*. 2 (3): 23-26.
16. ERNST, O.; SIRI G. 1995. Rastrojo en superficie: entre ventajas y problemas. *Cangüé*. 2 (4): 18-21.
17. ERNST, O.; SIRI G. 1997. Crecimiento inicial de cultivos sembrados sin laboreo, efecto de la temperatura del suelo. *Cangüé*. 9: 21-25.
18. GARCIA PRECHAC, F. 1992. Propiedades físicas y erosión en rotaciones de cultivos y pasturas. INIA. *Investigaciones Agronómicas*. 1 (I): 127-140.
19. GARCIA, A.; MORON, A. 1992. Estudios de C, N y P en la biomasa microbiana del suelo en tres sistemas de rotación agrícola. INIA *Investigaciones Agronómicas*. 1 (I): 111-126.
20. HARRISON, A. F. 1981. Labile organic phosphorus mineralization in relationship to soil properties. *Soil Biology and Biochemistry*. 14: 343-351.
21. HARRISON, A. F. 1987. Soil organic phosphorus, a review of world literature. publicación, United Kingdom, Inprint of Luton, Ltd. 257p.
22. HEDLEY, M. J.; STEWART, W. B. 1982. Method to measure microbial phosphate in soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 14: 377-385.
23. HERNANDEZ, J.; OTEGUI, O.; ZAMALVIDE, J. P. 1995. Formas y contenido de fósforo en algunos suelos del Uruguay. Facultad de Agronomía. *Boletín de Investigación* N°43.
24. HERNANDEZ, J.; DEL PINO, A. 1998. Variaciones estacionales en la disponibilidad de fósforo. In: XXIII Congreso Brasileiro de Fertilidade de Solo. Caxambú, MG. Resumos. Caxambú, Sociedade Brasileira de Ciencia do Solo.

25. IGUE, K.; FUENTES, R.; BORNEMISZA, E. 1971. Mineralización de P orgánico en suelos ácidos de Costa Rica. 21: 47-52.
26. LOPEZ-HERNANDEZ, D.; NIÑO, M. 1993. Phosphorus mineralization during laboratory incubation in soils derived from different textured parent materials. Amsterdam, Elsevier Science Publishers B.V. 550p.
27. MAGID, J.; NIELS, N. E. 1992. Seasonal variation in organic and inorganic phosphorus fractions of temperate climate sandy soils. *Plant and soil*. 144: 155-165.
28. MAROKO, J.B.; BURESH, R.J.; SMITHSON, P.C. 1999. Soil phosphorus fractions in unfertilized fallow-maize systems on two tropical soils. *Soil Science Society American Journal*. 63: 320-326.
29. MORON, A.; KIEHL, J. 1992. Dinámica del fósforo en tres sistemas agrícolas en el suroeste de Uruguay. INIA. *Investigaciones Agronómicas*. 1 (I): 61-84.
30. MORON, A. 1992. El fósforo en el sistema suelo planta. INIA. *Investigaciones Agronómicas*. 1 (I): 45-60.
31. PATRA, D. D.; BROOKES, P.C.; COLEMAN, K.; JENKINSON, D.S. 1980. Seasonal changes of soil microbial biomass in arable and a grassland soil which have been under uniform management for many years. *Soil Biology and Biochemistry*. 22 (6): 739-742.
32. RHEINHEIMER, D. S.; ANGHIONONI, I.; CONTE, E. 2000. Fósforo da biomassa microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo. *R. Bras. Solo*, 24:589-597.
33. RUBAEK, G. H.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W.; CHRISTENSEN, B. T. 1999. Organic phosphorus in soil size characterized by phosphorous-31 nuclear magnetic resonance and resin extraction. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1123-1132.
34. SA, J.C. de M. ; CERRI, C.C. ; DICK, W.A.; LAL, R.; VENSKE FILHO, S.P.; PICCOLO, M.C.; FEIGL, B.E. 2001. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for tillage chronosequence in a Brazilian oxisol. *Soil Science Society American Journal*. 65: 1486-1499.
35. SARATHCHANDRA, S.U.; PERROTT, K.W.; UPSDELL, M.P. 1984. Microbiological and biochemical characteristics of a range of New Zealand soil under established pasture. *Soil Biology and Biochemistry*. 16 (2): 177-183.

36. SEELING, B.; ZASOSKI, R.J. 1993. Microbial effects in maintaining organic and inorganic solution phosphorus concentrations in a grassland topsoil. *Plant and Soil*. 148: 277-284.
37. SELLES, F.; McCONKEY, B.G.; CAMPBELL, C.A. 1999. Distribution and forms of P under cultivator-and zero –tillage for continuous-and fallow-wheat cropping systems in the semi –arid Canadian prairies. *Soil & Tillage*. 48: 235-241.
38. SHARPLEY, A. N. 1985. Phosphorus cycling in unfertilized and fertilized agricultural soil. *Soil Science Society American Journal*. 49: 905-911.
39. SHARPLEY, A. N.; SMITH, S.J. 1985. Fraction of inorganic and organic phosphorus in virgin and cultivated soils. *Soil Science Society American Journal*. 49: 127-130.
40. SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; DORAN, J. W. 1998. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated an native grassland soils. *Soil Science Society American Journal*. 62: 1367-1377.
41. SPARLING, G. P. 1983. A comparison of methods for measuring ATP and microbial biomass in soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 15 (2): 227-229.
42. SPARLING, G.P.; WEST, A.W. 1989. Importance of soil water content when estimating soil microbial C, N and P by the fumigation – extraction methods. *Soil Biology and Biochemistry*. 21 (2): 245-253.
43. SPARLING, G. P.; WHALE, K. N.; RAMSAY, A. J. 1985. Quantifying the contribution from the soil microbial biomass to the extractable P levels of fresh and air-dried soils. *Australian Journal of Soil Research*. 23: 613-21.
44. TATE, K. R.; ROSS, D. J.; RAMSAY, A. J. WHALE, K. N. 1991. Microbial biomass and bacteria in two pasture soils: An assessment of measurement producers, temporal variations, and the influence of P fertility status. *Plant and Soil*. 132: 233-241.
45. THIEN, S. J.; MYERS, R. 1992. Determination bioavailable phosphorus in soil. *Soil Science Society American Journal*. 56: 814-818.
46. TIESSEN, H.; SREWART, J. W.; COLE, C. V. 1984. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. *Soil Science Society American Journal*. 48:853-858.

47. TRACY, P.W.; WESTFALL, D.G.; ELLIOTT, E.T.; PETERSON, G.A.; COLE, C.V. 1990. Carbon, nitrogen, phosphorus, and sulfur mineralization in plow and no-till cultivation. *Soil Science Society American Journal*. 54: 457-461.
48. VARGAS, L.K.; SCHOLLES, D. 2000. Biomassa microbiana e producao de C-CO<sub>2</sub> en mineral de um podzólico vermelho-escuro submetido a difeentes sistema de manejo. *R. Bras. Ci. Solo*. 24: 35-42.
49. XIAOMING, Z.; BINKLEY, D.; DOXTADER, K. G. 1992. A new method for estimating gross phosphorus mineralization rates in soil. *Plant and Soil*. 147: 243-250.

## IX. ANEXOS