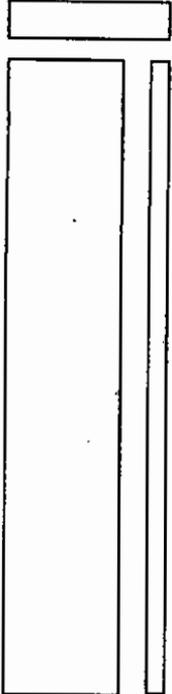




Universidad de la República  
FACULTAD DE AGRONOMIA

21 MAYO 1996



**FORMAS Y CONTENIDOS DE  
FOSFORO EN ALGUNOS  
SUELOS DEL URUGUAY**

J. HERNANDEZ - O. OTEGUI - J.P. ZAMALVIDE

**BOLETIN DE INVESTIGACIONES Nº 43**

**MONTEVIDEO**

1995

**URUGUAY**

FACULTAD DE AGRONOMIA  
DEPARTAMENTO DE DOCUMENTACION Y BIBLIOTECA

Las solicitudes de adquisición y de intercambio con esta publicación deben dirigirse al Departamento de Documentación, Facultad de Agronomía, Garzón 780, Montevideo-URUGUAY

**Comisión de Publicaciones:**

Ing. Agr. Osvaldo del Puerto (egresado)  
Ing. Agr. Hugo Petrocelli (docente)  
Ing. Agr. Héctor González (docente)  
Ing. Agr. Virginia Rossi (docente)  
Bach. Marcelo Nougue (estudiante)  
Bach. Mario Lema (estudiante)  
Bach. Gustavo Uriarte (Editor)

Formas y contenidos de fósforo en algunos suelos del Uruguay (I)  
/ J. Hernández; O. Otegui; J. P. Zalmalvide.-- Montevideo:  
Facultad de Agronomía, 1995. -- 28 p.-- (Boletín de Investigación; 43)

- 1 - SUELO
- 2 - FOSFORO
- I - Hernández, J. , coaut.
- II - Otegui, O. , coaut.
- III - Zalmalvide, J.P. , coaut.

CDU 631.4

## FORMAS Y CONTENIDOS DE FOSFORO EN ALGUNOS SUELOS DEL URUGUAY (1)

J. Hernández, O. Otegui y J.P. Zamalvide (2)

### RESUMEN

Se analizaron 31 muestras de los primeros 15 cm. de horizonte A de diferentes suelos sin fertilizar del país, desarrollados a partir de diferentes materiales madre. Se determinó el contenido de P total, P orgánico y de diferentes fracciones de P inorgánico (P-Al, P-Fe y P-Ca). Los contenidos de P total oscilaron entre 126 y 887 ppm, con un promedio de 321 ppm. En promedio, el 51% del contenido total de P se encontraba formando parte de la fracción orgánica de los suelos. Los mayores contenidos de P total estuvieron asociados con materiales madre ricos en P (rocas efusivas). En general, los suelos desarrollados a partir de sedimentos de granulometría fina presentaron mayores contenidos totales de P. Suelos desarrollados a partir de materiales altamente meteorizados y/o de texturas gruesas presentaron los menores contenidos de P. Dentro de las fracciones inorgánicas de P, se encontró una predominancia de la fracción P-Fe en todos los suelos (en promedio, 47% del total de las tres fracciones), sobre todo en aquellos derivados de materiales madre con altos contenidos de óxidos de Fe (basalto y algunos materiales del basamento cristalino). La fracción P-Al fue también importante en suelos arenosos ácidos, en tanto que la fracción P-Ca adquirió relevancia en suelos desarrollados sobre materiales madre ricos en Ca. Suelos sujetos a condiciones de escasa meteorización mostraron contenidos mayores de P en todas las fracciones. Las relaciones C/N/P de la materia orgánica de los suelos oscilaron entre 84:8:1 y 253:22:1, con un promedio de 170:16:1. No se encontró relación entre los contenidos totales de P y los correspondientes niveles de P asimilable.

Palabras clave: P total, P orgánico, P inorgánico, fraccionamiento de Chang y Jackson, relaciones C/N/P.

### SUMMARY

Total P, organic P, P-Al, P-Fe and P-Ca fractions were determined in 31 samples (0-15 cm.) from uncultivated uruguayan soils, developed on different parent materials. Total P content ranged between 126 and 887 ppm, with an average of 321 ppm. Organic P represented, as on average, 51% of total P. The highest total P levels were related to high P contents in parent materials (basaltic rocks) or with fine-textured parents materials. Strongly weathering conditions, as well as coarse textured parents materials, determined low total P contents in the soils. P-Fe was the predominant inorganic fraction in all the soils (averaging 47 % of the three inorganic fractions), especially in basaltic and granitic derived soils. The iron oxides content was highly correlated with the P level in the P-Fe fraction. P-Al and P-Ca fractions were important in acid sandy soils, and in soils derived from high Ca content materials, respectively. P content was inversely related to the degree of soil weathering. The C/N/P ratio in the soil organic matter ranged from 84:8:1 to 253:22:1, with an average of 170:16:1. No relationships were found between total P content and the corresponding available P level.

Keywords: Total P, Organic P, Inorganic P, Chang-Jackson P fractions, C/N/P ratio.

---

Recibido el 16 de setiembre, 1991

Aprobado el 29 de marzo, 1992

(1) El presente trabajo forma parte de los estudios realizados en el marco del proyecto "Fertilización Fosfatada en Pasturas" financiado por la O.E.A.

(2) Profesor Adjunto en Fertilidad de Suelos, Ing. Agr. contratada por el proyecto "Fertilización Fosfatada en Pasturas" y Profesor Titular de la Cátedra de Fertilidad de Suelos, respectivamente.

## INTRODUCCION

El fósforo (P) en los suelos se encuentra formando parte tanto de la fracción orgánica como de la fracción mineral de los suelos. En la fracción inorgánica de los suelos se han intentado identificar los compuestos de P presentes, a través de métodos físicos y químicos. Los resultados de las investigaciones realizadas han permitido constatar la presencia de una serie de compuestos muy heterogéneos, cuya estructura en general no se corresponde exactamente con minerales de P conocidos. Por otra parte, el tipo de compuestos presentes varía según características de los suelos, tales como el material generador de los mismos y las condiciones de meteorización. Uno de los métodos propuestos para caracterizar el P inorgánico de los suelos, más que identificar los compuestos de P de dicha fracción, separa diferentes fracciones, cada una de las cuales agrupa una serie de compuestos de P con características de solubilidad comunes. Esta metodología, propuesta por Chang y Jackson (1957), básicamente separa en primera instancia tres fracciones: la de compuestos donde el P se encuentra ligado al catión Al, aquellos donde se encuentra ligado al Fe, y aquella donde se encuentra ligado al Ca. Se separa luego una cuarta fracción, a la cual se la denominó "fosfatos ocluidos", que los autores definen como compuestos de P recubiertos por óxidos de Fe. La base del método utilizado es la solubilización de cada una de las fracciones en forma secuencial, a partir de una muestra de suelo, y posterior determinación del contenido de P en cada una de ellas. Esta metodología, a pesar de ser muy discutida en cuanto a su validez, ha permitido estudiar la composición de la fracción inorgánica de P de los suelos y su relación con otras características de los mismos. En tal sentido, el análisis de 18 perfiles de suelo (sin cultivar), representativos de cinco grandes grupos de suelos de la localidad de Alberta (Canadá), permitió confirmar la tendencia ya observada por otros autores de una disminución en los contenidos de P-Ca en la medida que aumentaba la intensidad de los procesos de meteorización de los suelos, aunque también se destacó una marcada influencia del material madre en la composición de fracciones de P del suelo (Alexander y Robertson, 1968). Estos autores también observaron la tendencia hacia un aumento en la proporción de la fracción P-Fe con el grado de desarrollo del suelo, y una disminución de la misma con la profundidad. Por otra parte se encontró una alta relación entre el contenido de P-Ca de los suelos y el pH o contenido de  $\text{CaCO}_3$  de los mismos, siendo P-Ca la fracción dominante en suelos calcáreos. En este trabajo no se encontró relación entre el contenido de P de la fracción P-Fe y el porcentaje de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  libres en el suelo. Dahnke et. al. (1963) sin embargo, no encontraron una relación clara entre los contenidos de P en la fracción P-Ca y el pH de un amplio rango de suelos de El Salvador, lo cual estaría explicado por un escaso rango de variación en el pH de las muestras en relación con una alta variabilidad en el material

madre de dichos suelos. Otros autores (Hawkins y Kunze, 1965) ya habían enunciado que la distribución porcentual de las fracciones P-Ca, P-Al y P-Fe podría ser utilizada como indicador de las condiciones de meteorización del suelo, en Vertisoles del estado de Texas. Vieira y Bornemisza (1968), trabajando con grandes grupos de suelos altamente meteorizados de la Amazonia, observaron que la fracción P-Ca representa una proporción muy pequeña del P inorgánico, en tanto que los fosfatos ocluidos y el P-Fe constituyen las fracciones más relevantes en terras rojas, gley poco húmicos y latosoles concrecionarios; mientras que en otros latosoles surge como importante la fracción P-Al. Similares resultados fueron encontrados por Fassbender y Díaz (1970) en suelos lateríticos y aluviales. En condiciones de meteorización menos rigurosas (baja temperatura y escasa precipitación anual), la fracción predominante en los suelos es la fracción P-Ca (Westin y Buntley, 1967), tal como surge de los análisis de fracciones de P de Borolls y Ustolls de South Dakota.

Esta metodología de fraccionamiento del P inorgánico ha sido utilizada también en estudios relacionados con la disponibilidad de P de los suelos. Trabajos realizados en evaluación de métodos de estimación de P asimilable o disponible han incluido la caracterización de las diferentes fracciones de P de los suelos, a los efectos de evaluar aquellas fracciones de mayor incidencia en la absorción de P por las plantas y su relación con el P extraído por métodos de análisis de P asimilable. En general se ha observado que la fracción P-Al es la que explica mejor las diferencias observadas en absorción de P por las plantas y/o rendimiento relativo (Susuki et al., 1963; Payne y Hanna, 1965; Halstead, 1967; Zamalvide et al., 1975). Otros autores han encontrado, sin embargo, una mayor contribución de la fracción P-Fe de los suelos (Al-Abbas y Barber, 1964). La fracción P-Ca muestra en la mayoría de los trabajos una muy baja contribución a la absorción de P por las plantas; solamente en suelos en los cuales se da como fracción dominante, aparece con cierto grado de importancia (Fassbender et al., 1968; Balerdi et al., 1968; Tripathi et al., 1970). Los trabajos realizados con el objetivo de evaluar métodos de estimación del P disponible de los suelos, han utilizado esta metodología de fraccionamiento de formas de P inorgánico, a los efectos de investigar la capacidad de las diferentes soluciones extractivas para solubilizar el P de diferentes fracciones. Otros autores, además, han estudiado dicho comportamiento en distintos grupos de suelo, asociado a diferentes características, tales como contenido de arcilla y pH (Westin y Buntley, 1966). Algunos trabajos estudian, además, en cuál de las fracciones inorgánicas de P se da la mayor recuperación del fertilizante. Halstead (op.cit.) encontró la mayor recuperación en las fracciones P-Al y P-Fe.

Han sido propuestas una serie de modificaciones al método clásico de fraccionamiento de Chang y Jackson. Algunas de dichas variantes han sido citadas por Olsen y Khasawneh (1980). Generalmente están referidas a cambios en el pH de algunos de los

extractantes y alteración de la secuencia de extracción de las diferentes fracciones de P (Glenn et al., 1959, citado por Petersen y Corey, 1966); o a cambios en el tiempo de extracción del P de alguna fracción (Williams et al., 1967). El objetivo buscado a través de dichas modificaciones en la secuencia de extracción, fue evitar la sobreestimación del P presente en cada fracción (por solubilización del P de fracciones aún no determinadas), o la subestimación del mismo (por readsorción del P solubilizado en aquellas fracciones aún no determinadas). Estas modificaciones han permitido mejorar las estimaciones del contenido de P de cada fracción.

El P presente en formas orgánicas del suelo, si bien ha recibido menos atención que el P de la fracción inorgánica, ha sido estudiado a través de diferentes enfoques, algunos de ellos desarrollados sobre todo en los últimos años. Las diferentes metodologías para el estudio de esta fracción básicamente se refieren a: a) Determinación del contenido total de P en forma orgánica y su relación con otros constituyentes de la materia orgánica del suelo (C, N y S orgánico); b) Caracterización de compuestos orgánicos de P en los suelos; c) Caracterización de diferentes fracciones de P orgánico y su capacidad de mineralización y disponibilidad posterior de P para las plantas; y d) Estimación del contenido de P en la biomasa microbiana del suelo.

En relación con el primer enfoque, investigaciones realizadas en otros países han caracterizado los contenidos de P orgánico total de los suelos y las relaciones C/N/P y C/N/P/S de la materia orgánica del suelo. Las determinaciones del contenido de P orgánico total se han realizado básicamente a través de dos metodologías diferentes: métodos por extracción y métodos por ignición. Los métodos por extracción involucran el tratamiento de la muestra de suelo con ácidos, bases, o ambos, seguido de la determinación de P en el extracto antes y después de la oxidación de la materia orgánica. Los métodos por ignición se basan en la extracción ácida de P de dos muestras del mismo suelo, una de las cuales se llevó previamente a ignición para oxidar la materia orgánica; por diferencia entre ambas determinaciones se obtiene el contenido de P orgánico (Olsen y Sommers, 1982). Ambas metodologías han brindado resultados confiables en las estimaciones del contenido de P orgánico de suelos pocos meteorizados (Condrón et al., 1990). Sin embargo, de acuerdo a estos autores, en suelos altamente meteorizados ambas metodologías no brindan resultados comparables, encontrando que los métodos por ignición pueden sobreestimar el contenido de P orgánico de los suelos. Barrow (1961) resume la información obtenida por diversos autores a través de este tipo de metodología en diferentes tipos de suelos y condiciones de clima y manejo de los mismos. Las relaciones C/N/P y C/N/P/S mencionadas anteriormente presentan variaciones importantes según una serie de factores como tipo de suelo, condiciones de pedogénesis, profundidad de muestreo, efectos de clima (fundamentalmente lluvia y temperatura), condiciones de drenaje, factores de cultivo (años de cultivo, tipo de cultivo, fertilizaciones fosfatadas previas) y contenido total de

P de los suelos. Condrón et al. (op. cit.) mencionan, además, que las relaciones C/P pueden ser diferentes según el método utilizado para determinar el contenido de P orgánico, especialmente en suelos altamente meteorizados. Se ha prestado atención a la variación en los contenidos totales de P orgánico y de las relaciones C/N/P de suelos en sistemas de rotaciones con pasturas, sobre todo en lo relativo a los procesos de mineralización e inmovilización de P, y su efecto en el contenido de P disponible para las plantas (Jackman, 1964; Saunders y Metson, 1971; Dormaar, 1972; Kohn et al., 1977); Parton et al., 1988; Tracy et al., 1990). Hawkins y Kunze (1965) mencionan relaciones C/P bajas para algunos Grumosoles del estado de Texas, lo cual explicaría la falta de respuesta al agregado de P en cultivos, sobre todo teniendo en cuenta niveles bajos de P en la fracción inorgánica de dichos suelos.

Con respecto al segundo enfoque, los avances en la caracterización de compuestos orgánicos de P ha sido escaso. Black (1975) menciona que aproximadamente el 2% del P orgánico se encuentra bajo forma de ácidos nucleicos, el 1% formando parte de fosfolípidos, y el 35% como inositol fosfatos, siendo el 62% restante de naturaleza desconocida. En la actualidad no se han realizado muchos avances en el conocimiento de otros compuestos de P que formen parte de la fracción orgánica de los suelos. Condrón et al. (1990a), mediante una extracción alcalina secuencial, encontraron diferencias en los compuestos de P orgánico (ortofosfatos mono y diéster y ácido teicoico) de suelos que diferían desde el punto de vista de su vegetación nativa y contenido de humedad. Cuando dichos suelos habían sido cultivados durante 70 a 80 años, sólo se encontró ortofosfato monoéster, lo cual indica, según los autores, una diferencia en la estabilidad de los compuestos frente a la mineralización.

En relación con el tercer enfoque, Bowman y Cole (1978) propusieron un método de fraccionamiento del P orgánico de los suelos, con el objetivo de evaluar el aporte que realiza la mineralización de P orgánico a la disponibilidad de P para pasturas. La base del método consiste en estimar diferentes "pools" de P orgánico, de acuerdo a su grado de estabilidad frente a diferentes reactivos químicos, y que tendrían relación con la diferente capacidad de ser mineralizados frente a condiciones favorables para el proceso.

Otros autores (Brookes et al., 1982; Hedley y Steward, 1982) proponen otra metodología para estimar una fracción identificada como P en la biomasa microbiana, que comprendería al P presente en tejidos microbianos. La metodología consiste, básicamente, en la extracción de P de dos muestras del mismo suelo, una de las cuales fue tratada previamente con cloroformo para matar la flora microbiana; la diferencia en contenidos de P de ambas muestras sería una estimación del P presente en la biomasa microbiana del suelo. Los resultados obtenidos por varios autores indican una contribución relativamente importante del P de la biomasa microbiana en los niveles de disponibilidad de P de los suelos (Brookes et al., 1984; Marumoto et al. 1984; Williams

y Sparling, 1984; Sparling et al., 1985). Si bien estos resultados se refieren a la liberación potencial de P a partir de estructuras microbianas (en condiciones de laboratorio), la intensidad del proceso en el campo será dependiente de la existencia de condiciones de clima y suelo favorables. Es probable que estos procesos expliquen en parte las variaciones estacionales observadas en los niveles de disponibilidad de P de suelos bajo pasturas.

A través de este tipo de metodologías y otras similares se ha enfocado el estudio de la dinámica de formas orgánicas e inorgánicas del P en los suelos bajo pasturas y cultivos, tratando de caracterizar y cuantificar los cambios entre las diferentes formas en el tiempo y su incidencia en la disponibilidad de P para las plantas (Chauhan, 1979; Hedley et al., 1982; Sharpley y Smith, 1983, 1985; Sharpley, 1985; Sharpley et al., 1987; Steward et al., 1987).

## **ANTECEDENTES NACIONALES EN CARACTERIZACION DEL CONTENIDO DE FOSFORO EN SUELOS DEL URUGUAY**

Los primeros datos publicados sobre determinación del contenido de P en suelos del país datan del año 1910 (Schroeder), referidos a suelos de diferentes departamentos. Si bien los resultados obtenidos se destacan por ser los primeros datos de caracterización de nutrientes en los suelos, la metodología empleada es poco clara, no pudiéndose extraer conclusiones válidas en torno a qué proporción o formas de P eran determinadas por el método utilizado por el autor.

Estudios realizados posteriormente por otros autores precisan un poco más la metodología utilizada en la caracterización de los contenidos de P de diferentes suelos del país. La metodología citada se refiere a una extracción ácida fuerte con ácido nítrico, la cual mineralizaría la casi totalidad del P orgánico y solubilizaría parte del P presente en formas inorgánicas (fundamentalmente P ligado al Ca). A continuación se citan una serie de trabajos, en donde sólo en el primero se menciona específicamente el método analítico utilizado (extracción ácida), en tanto que en los restantes no existe mención del método de caracterización de P, aunque es probable que fuere el mismo, considerando sobre todo la magnitud de los valores encontrados para los distintos suelos analizados. En la mayoría de los casos no es posible lograr una identificación precisa del tipo de suelo analizado ni su ubicación geográfica. De cualquier manera estos datos han permitido tener una caracterización primaria de los niveles de P en suelos del país, desde el punto de vista de la producción agropecuaria.

Soneira y Guerra (1929) determinaron el contenido de P de suelos de los Dptos. de Salto, Cerro Largo, Rivera y Montevideo, con el objetivo de evaluar su potencialidad para la producción citrícola. Los valores encontrados oscilan entre 57 y 231 ppm de P

para nueve suelos del Dpto. de Salto, 144 y 393 ppm de P para siete suelos del Dpto. de Cerro Largo, 83 y 238 ppm. de P para dos suelos del Dpto. de Rivera, y 179 y 262 ppm de P para tres suelos del Dpto. de Montevideo. Los datos se refieren a 21 muestras de suelo del horizonte A de 14 establecimientos en los departamentos mencionados.

Spangenberg (1931) analizó 31 muestras de suelo de horizonte A de suelos de "La Estanzuela" (Dpto. de Colonia), encontrando valores que oscilaban entre 166 y 258 ppm, con un promedio de 231 ppm de P.

En un estudio realizado en los bañados del norte del Dpto. de Rocha, Spangenberg y Henry (1938) tomaron muestras de suelo (horizonte A) de diferentes zonas de la región. El análisis de las mismas (26 observaciones) mostró un rango de variación entre 122 y 489 ppm de P. En este trabajo se tiene una idea más precisa de los sitios de muestreo; en grandes rasgos abarcaría suelos de lomadas y planicies de la zona este del país (actuales unidades Alférez, Lascano, San Luis, India Muerta, fundamentalmente). Spangenberg (1944a), en un estudio realizado para la Comisión Nacional de Estudio del Problema Forrajero, presentó datos de contenidos totales de P de suelos del Dpto. de Rivera. Las muestras abarcaron siete secciones policiales del departamento, en tres de las cuales, predominaban suelos de textura liviana, que mostraron un rango de variación en contenidos de P total entre 84 y 268 ppm para el horizonte A de los suelos. En las restantes secciones el rango de variación en el contenido de P total de los suelos muestreados osciló entre 174 y 515 ppm de P, correspondiendo a suelos de textura media a pesada. En un trabajo posterior (1944b), realizado por el autor en el Dpto. de Cerro Largo, se analizaron muestras de horizonte A de suelos de seis secciones del departamento, encontrándose valores que oscilaban entre 92 y 449 ppm de P total. De estos valores se destacan los correspondientes a suelos de la tercera sección, con los niveles más bajos encontrados entre los suelos muestreados. Dichos suelos se ubican en planicies de la cuenca de la Laguna Merim. En el otro extremo, las secciones 11a., 6a. y 1a. mostraron valores promedio altos de P total en los suelos. El autor menciona la presencia de leguminosas (*Medicago* sp. y *Adesmia bicolor*) en el tapiz desarrollado en estos suelos. Se hicieron estimaciones de niveles de P asimilable por el método Egner, encontrándose en general valores bajos, con la excepción de algunas muestras, que dieron valores relativamente altos, tanto en el horizonte A como en el subsuelo (5 a 9 ppm de P). En correspondencia con estos valores, los niveles de P total fueron medios a altos, comparados con el promedio de los suelos de la misma sección policial, y esto en parte se confirmaba con la presencia de leguminosas nativas en el tapiz.

Finalmente, Spangenberg (1945) realizó un estudio de evaluación de campos para la producción agropecuaria en el Dpto. de Lavalleja. Fueron tomadas muestras de suelo de nueve secciones policiales del departamento, encontrándose una gran variación en los datos de análisis de P (entre 122 y 1664 ppm de P total). Se destacan

los datos correspondientes a dos secciones (séptima y décima), los cuales oscilaban entre 939 y 1664 ppm de P para cinco muestras de la séptima sección (valle Fuentes); y 546 y 1550 ppm de P para cuatro muestras de la décima sección (Arroyo Manzaneros). El autor relaciona estos altos contenidos de P de los suelos con el material madre del cual derivan (rocas volcánicas). En relación con estos datos, se observó la presencia de leguminosas nativas en el tapiz (Trébol carretilla), y el análisis químico de la pastura mostró altos contenidos de P en la materia seca (0.24 a 0.35%). En este estudio además se realizó una determinación del contenido de P asimilable de los suelos por el método Egner. Los valores correspondientes a muestras de suelo tomadas en la séptima y décima secciones oscilaban entre 3.5 y 8.7 ppm de P, en tanto que los correspondientes a las otras secciones fueron del orden de 1 ppm de P.

En la década del 70 se comienza a profundizar en el conocimiento de las formas químicas de P en los suelos. En 1970 se realizaron fraccionamientos de P inorgánico (P-Al, P-Fe y P-Ca) tomando muestras de los horizontes A y B de algunos de los primeros perfiles correspondientes a suelos típicos de las unidades identificadas en las primeras etapas del mapeo de suelos del Uruguay (Zamalvide, com. pers.). De los resultados obtenidos para los horizontes A surge una dominancia general de la fracción P-Fe. Esta primacía de la fracción P-Fe se hace muy notoria, tanto en cantidades absolutas como relativas, en los suelos sobre basalto y en suelos muy meteorizados sobre Basamento Cristalino.

### CUADRO N° 1

**Contenidos de fósforo en diferentes fracciones de Chang y Jackson para algunos perfiles de suelo del Uruguay.**

SUELO	HORIZONTE	ppm P		
		P-Ca	P-Al	P-Fe
Acrisol Rivera	A	7	4	16
	B	9	1	15
Luvisol Cristalino	A	12	5	42
	B	4	6	26
Brunosol Basalto	A11	15	11	53
	A12	11	11	60
Planosol Ocrico L. Merim	A	7	11	11
	B	4	5	8
Brunosol F. Bentos	A11	58	58	38
	A13	23	17	20

Contrariamente a la tendencia general observada, aparece como dominante de la fracción P-Ca en aquellas muestras con  $\text{CaCO}_3$  o que éste se encuentre a poca distancia en profundidad en el perfil. Tal es el caso de un Vertisol sobre lodolitas de la Formación Libertad, o un suelo superficial sobre Fray Bentos. Los datos a continuación son ejemplos de algunos suelos analizados.

En un trabajo posterior, Zamalvide et.al. (op.cit.) realiza una caracterización de diferentes formas de P de la fracción inorgánica de diferentes suelos, con la metodología desarrollada por Chang y Jackson. El objetivo del trabajo fue seleccionar métodos de estimación del contenido de P asimilable en un amplio rango de suelos del país, utilizando el dato de fracciones de P inorgánico para evaluar de qué fracciones provenía el P absorbido por las plantas, y su relación con el P extractado por diferentes soluciones para cada método. En este trabajo se utilizaron muestras de horizonte A provenientes de diferentes chacras, con historias variables de fertilización fosfatada anterior.

En investigaciones posteriores realizadas por Escudero y Morón (1978), con el objetivo de evaluar la capacidad de retención de P en diferentes suelos del país, se analizaron muestras de horizonte A de suelos que no habían recibido fertilización fosfatada previa, caracterizando diferentes formas de P: contenido de P total, y fracciones de P inorgánico, por el método de fraccionamiento de Chang y Jackson. Los contenidos totales de P de los 37 suelos analizados oscilaron entre 90 y 493 ppm, con un promedio de 255 ppm. Dentro de la fracción inorgánica, los mayores contenidos de P se encontraron en la fracción P-Fe (en promedio, 18.6 ppm), lo cual está de acuerdo con los datos mencionados previamente (Zamalvide, op. cit.). La fracción P-Al surge también como relevante en suelos ácidos de texturas livianas, en tanto que suelos derivados de materiales ricos en Ca presentan importantes contenidos de P en la fracción P-Ca.

## MATERIALES Y METODOS

### Suelos

Se seleccionaron 31 muestras de los 15 primeros centímetros de horizonte A de distintos suelos del país, desarrollados a partir de diferentes materiales madre, y de importancia en la producción de pasturas sembradas y/o mejoramientos extensivos. En todos los casos se trabajó con muestras de campo natural sin fertilizaciones fosfatadas previas, con la excepción de los suelos 5 y 24, que corresponden a campo natural regenerado, con posible historia previa de fertilización fosfatada.

Las muestras fueron secadas al aire, molidas y tamizadas a 2 mm. Cuando el tipo de análisis lo requería, se realizó una molienda y tamizado de la muestra a 100 mallas.

### **Métodos de caracterización de las diferentes fracciones de fósforo**

- a. Fósforo total: método por fusión con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (Olsen y Sommers, 1982).
- b. Fósforo orgánico: método por diferencia entre fósforo extraído con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  de una muestra de suelo calcinada a 550 grados centígrados y otra sin calcinación (Walker y Adams, 1958).
- c. Fósforo inorgánico: por diferencia entre fósforo total y orgánico.
- d. Fracciones de fósforo inorgánico: por el método de fraccionamiento de Chang y Jackson (1957). Por dificultades metodológicas no se determinó el fósforo ocluido en óxidos de hierro. Se calculó la diferencia entre el fósforo inorgánico y la suma de las res fracciones determinadas (fósforo ligado al aluminio, hierro y calcio), la cual se refiere como fósforo "ocluído" en el presente trabajo.

### **Caracterización física y química de los suelos**

- a. Análisis mecánico (porcentaje de arcilla, limo y arena): por el método internacional de la pipeta (modificado de Black, 1965).
- b. Óxidos de hierro: por reducción con ditionito de sodio y determinación del hierro por espectrofotometría de absorción atómica.
- c. pH: por el método potenciométrico, con una relación suelo: solución de 1:2.5 en agua desionizada y KCl 1N.
- d. Capacidad de Intercambio Catiónico: por el método por percolación de la muestra con acetato de amonio normal neutro.
- e. Bases de intercambio: en el extracto de percolación con acetato de amonio normal neutro se determinó calcio y magnesio por espectrofotometría de absorción atómica, y potasio y sodio por espectrofotometría de emisión.
- f. Aluminio intercambiable: en los suelos que podían presentar aluminio intercambiable, se realizó la extracción del mismo con KCl 1N y posterior determinación por titulación volumétrica (Thomas, 1982).
- g. Carbono orgánico: por modificación del método de Mebius (Nelson y Sommers, 1982), por oxidación con dicromato de potasio 0.5N en medio ácido con aporte externo de calor.
- h. Nitrógeno orgánico: por el método Kjeldahl, con digestión de la muestra con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en block de aluminio y posterior destilación de amonio.

En los cuadros Nos. 2 y 3 se indican los datos correspondientes a los suelos estudiados.

## RESULTADOS Y DISCUSION

### 1. Contenido de fósforo total

El contenido total de P de los 31 suelos analizados osciló entre 126 y 887 ppm (0.013 a 0.089%), con un promedio de 321 ppm (0.032%) (cuadro N°3). No teniendo en cuenta el valor extremo que representa un Litosol sobre basalto, con 887 ppm, el valor más alto encontrado corresponde a 536 ppm, de tal forma que el valor promedio para los 30 suelos es de 302 ppm.

El análisis más detallado de las variaciones entre suelos permite observar diferencias más o menos marcadas en función del material madre de los suelos y/o el tipo de suelo. Agrupando los suelos en base al material madre del cual derivan, tal como se indica en el cuadro N° 4, se destacan los suelos desarrollados sobre materiales derivados de basalto, por sus altos contenidos de P total. Dentro de éstos, el Litosol mostró el nivel más alto, y si bien no se estudiaron otros suelos superficiales sobre basalto, trabajos anteriores indican altos contenidos de P para estos suelos (Escudero y Morón, op.cit.). Los tres restantes suelos sobre basalto son Vertisoles Háplicos, con valores algo menores.

La mayoría de los materiales con granulometría fina (arcilla y limo) dan origen a suelos con contenidos medios a altos de P total, tal como es el caso de los suelos desarrollados a partir de sedimentos de las Formaciones Libertad, Fray Bentos y Yaguarí. En estos suelos (Vertisoles y Brunosoles), los contenidos más altos de P total están asociados a texturas más finas y mayores niveles de materia orgánica.

Los suelos derivados de materiales del Basamento Cristalino presentan medios a bajos contenidos de P total, correspondiendo a Argisoles de textura media y contenidos relativamente bajos de materia orgánica.

Los materiales de tipo areniscas dan lugar a suelos con bajos contenidos totales de P, como es el caso de Planosoles y Argisoles desarrollados a partir de materiales del Cretácico, y Luvisoles y Acrisoles desarrollados a partir de areniscas de la Formación Tacuarembó. En los primeros el rango de variación en los contenidos de P es algo mayor que para los segundos, en virtud de una mayor variabilidad en el material madre que dio origen a los suelos considerados.

Otros suelos que mostraron bajos contenidos de P total (en promedio 182 ppm) fueron los de las asociaciones Río Branco y La Charqueada (cuadro N°3). Estos suelos están desarrollados sobre materiales madre limo arcillosos de origen Cuatemario de la

**CUADRON° 2**-Parámetros analíticos de los 31 suelos estudiados, correspondientes al análisis de muestras del horizonte A (primeros 15 cm.)

TIPO DE SUELO/UNIDAD D.S.F.	Arcilla %	Limo %	Arena %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	pH H <sub>2</sub> O
1.VERTISOL ITAPABI-T.A. I	51,7	41,5	6,8	2,79	6,0
2.VERTISOL ITAPEBI-T.A. II	49,4	42,9	7,7	1,30	5,6
3.VERTISOL QUEGUAY CHICO	42,7	50,8	6,5	1,04	5,9
4.VERTISOL FRAILE MUERTO	56,6	36,0	7,4	1,17	5,6
5.VERTISOL LOS MIMBRES	50,3	37,1	12,6	0,35	5,3
6.VERTISOL TALA-ROD. I	45,0	50,4	4,6	0,48	6,0
7.VERTISOL TALA-ROD. II	36,1	44,9	19,0	0,42	6,1
8.BRUNOSOL LOS MIMBRES	34,2	32,6	33,2	0,71	5,4
9.BRUNOSOL ARROYO BLANCO	28,1	23,4	48,5	0,64	5,5
10.BRUNOSOL SAN MANUEL	30,7	38,3	31,0	0,59	6,1
11.BRUNOSOL BEQUELO	37,5	40,4	22,1	0,30	6,0
12.BRUNOSOL YOUNG	36,4	34,2	29,4	0,40	5,9
13.BRUNOSOL TOLEDO I	26,0	61,0	13,0	0,89	6,7
14.BRUNOSOL TOLEDO II	26,1	53,8	20,1	0,64	5,7
15.BRUNOSOL COLONIA PALMA	21,8	20,5	57,7	0,33	5,7
16.BRUNOSOL C. NIETO	22,9	22,1	55,0	0,74	6,1
17.BRUNOSOL CUCH. CORRALITO	18,4	10,8	70,8	0,37	5,4
18.LUVISOL CERRO CHATO	24,4	34,4	41,2	1,19	5,1
19.ARGISOL S. POLANCO I	26,0	22,3	51,7	1,33	5,3
20.ARGISOL S. POLANCO II	23,1	26,0	50,9	0,68	5,3
21.PLANOSOL RIO BRANCO	21,0	60,5	18,5	0,35	5,7
22.SOLOD LA CHARQUEADA I	15,0	42,9	42,1	0,20	5,3
23.SOLOD LA CHARQUEADA II	19,0	41,1	39,9	0,36	5,9
24.ARGISOL ALGORTA	12,3	11,8	75,9	0,21	5,3
25.PLANOSOL ALGORTA	9,6	6,9	83,5	0,12	5,7
26.ACRISOL RIVERA	10,1	8,2	81,7	0,55	5,5
27.LUVISOL TACUAREMBO I	8,6	9,3	82,1	0,19	5,2
28.LUVISOL TACUAREMBO II	10,1	15,5	74,4	0,13	5,2
29.LUVISOL MANUEL ORIBE	15,2	23,3	61,5	0,49	5,0
30.LITOSOL CURTINA	37,9	41,7	20,4	4,15	5,5
31.GLEYSOL SAN RAMON	62,5	33,7	3,8	0,56	6,1

pH	meq/100g.						% C.Org.	% N.Org.
	KCl	C.I.C.	Ca	Mg	K	Na		
4,8	51,9	30,8	7,0	0,6	0,4	-	4,23	0,30
4,9	54,9	31,2	10,1	0,7	0,4	-	4,95	0,39
4,8	38,5	21,2	8,7	0,8	0,6	-	4,40	0,33
4,2	34,9	14,7	8,4	1,0	0,6	-	3,04	0,29
4,3	33,0	22,0	8,8	1,0	0,5	-	3,99	0,37
5,0	44,5	29,8	6,4	0,9	0,9	-	3,47	0,31
5,1	29,1	20,9	4,1	0,5	0,6	-	5,14	0,40
4,4	31,3	17,4	3,2	0,7	0,4	-	3,14	0,28
4,4	21,1	12,1	2,7	0,8	0,4	-	2,73	0,37
5,3	32,3	18,6	3,1	0,7	0,4	-	2,92	0,25
5,2	39,3	26,9	2,8	2,0	0,3	-	3,92	0,38
4,9	35,8	25,4	4,1	1,0	0,4	-	3,88	0,34
5,1	17,0	8,8	2,0	0,7	0,3	-	1,91	0,19
4,4	16,8	8,4	3,0	0,6	0,5	-	2,47	0,20
4,6	16,6	9,8	2,0	0,3	0,3	-	1,49	0,13
5,1	23,0	15,8	1,6	0,8	0,3	-	2,46	0,23
4,5	17,9	8,9	1,8	0,4	0,3	-	1,91	0,16
4,2	16,4	3,9	2,6	0,5	0,3	0,3	2,35	0,26
4,2	19,6	5,8	2,3	0,3	0,4	0,4	2,56	0,24
4,1	13,5	4,9	2,4	0,4	0,7	0,5	2,51	0,20
4,2	7,9	2,4	1,1	0,2	0,3	-	1,15	0,11
4,3	13,0	8,8	2,1	0,3	0,8	-	1,85	0,15
4,3	10,2	3,9	2,0	0,3	0,5	-	1,28	0,11
4,5	9,9	4,6	1,1	0,3	0,3	-	1,19	0,10
4,8	7,2	3,1	1,3	0,4	0,4	-	1,15	0,12
4,6	5,5	1,7	0,8	0,3	0,3	0,1	0,79	0,08
4,2	7,0	1,7	0,8	0,4	0,4	0,2	1,04	0,12
4,2	7,6	2,0	1,2	0,6	0,4	0,5	1,80	0,14
4,2	10,7	3,5	1,2	0,6	0,2	0,2	1,62	0,22
4,7	43,2	20,2	6,7	0,6	0,3	-	6,25	0,57
4,9	52,1	32,9	8,9	0,9	2,2	-	4,59	0,39

**CUADRO N° 3** Contenidos de P. en diferentes fracciones y sus relaciones para muestras de horizonte A (primeros 15 cm) de los 31 suelos estudiados.

TIPO DE SUELO/UNIDAD D.S.F.	FRACCIONES DE P INORG.						
	P(1) ASIM.	P TOT.	P INORG	P ORG	P-Al	P-Fe	P-Ca
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1. VERTISOL ITAPABI-T.A. I	4,0	536	265	271	12,0	35,0	17,8
2. VERTISOL ITAPEBI-T.A. II	3,9	442	226	216	20,0	25,1	6,4
3. VERTISOL QUEGUAY CHICO	2,7	468	191	277	9,0	33,1	5,9
4. VERTISOL FRAILE MUERTO	2,7	280	140	140	12,8	12,9	4,8
5. VERTISOL LOS MIMBRES	8,3	378	170	208	35,8	25,7	16,1
6. VERTISOL TALA-ROD. I	6,2	401	206	195	15,1	15,4	7,4
7. VERTISOL TALA-ROD. II	2,9	421	161	260	17,8	13,4	9,1
8. BRUNOSOL LOS MIMBRES	6,0	342	157	185	18,0	20,0	5,6
9. BRUNOSOL ARROYO BLANCO	6,0	330	141	189	10,3	23,8	7,6
10. BRUNOSOL SAN MANUEL	5,4	283	144	139	12,4	13,1	5,8
11. BRUNOSOL BEQUELO	4,6	497	244	253	16,8	12,6	13,4
12. BRUNOSOL YOUNG	5,0	392	129	263	12,0	20,2	11,1
13. BRUNOSOL TOLEDO I	3,2	456	228	228	9,0	14,7	9,9
14. BRUNOSOL TOLEDO II	1,0	265	131	134	4,6	9,4	4,0
15. BRUNOSOL COLONIA PALMA	3,2	171	77	94	3,7	11,8	5,1
16. BRUNOSOL C. NIETO	4,3	322	161	161	17,7	10,7	12,6
17. BRUNOSOL CUCH. CORRALITO	8,3	264	128	136	15,0	13,6	5,1
18. LUVISOL CERRO CHATO	2,9	274	153	121	10,0	18,9	3,7
19. ARGISOL S. POLANCO I	6,4	304	162	142	7,1	27,9	3,3
20. ARGISOL S. POLANCO II	1,6	202	101	101	6,6	8,8	3,0
21. PLANOSOL RIO BRANCO	2,4	187	98	89	6,3	7,2	1,2
22. SOLOD LA CHARQUEADA I	3,9	163	90	73	10,4	6,8	2,8
23. SOLOD LA CHARQUEADA II	1,2	195	130	65	4,6	15,0	4,2
24. ARGISOL ALGORTA	13,0	191	112	79	16,2	15,4	6,8
25. PLANOSOL ALGORTA	2,2	126	43	83	5,8	7,6	2,6
26. ACRISOL RIVERA	4,1	152	81	71	8,0	10,4	2,1
27. LUVISOL TACUAREMBO I	7,2	140	72	68	9,7	7,1	3,7
28. LUVISOL TACUAREMBO II	5,1	197	67	130	11,8	3,8	5,8
29. LUVISOL MANUEL ORIBE	2,5	239	123	116	10,5	20,4	2,8
30. LITOSOL CURTINA	3,9	887	458	429	14,0	73,9	45,7
31. GLEYSOL SAN RAMON	5,1	435	212	223	21,5	28,8	9,3
PROMEDIO	4,5	321	155	166	12,4	18,1	7,9
DESVIOS STANDARD	2,4	154	77	82	6,3	12,9	8,0
MINIMO	1,0	126	43	65	3,7	3,8	1,2
MAXIMO	13,0	887	458	429	35,8	73,9	45,7

TOTAL(2)	P(3)	FRACC. INORG. FRACC./ (4)		% (5)			P(6)	FRACCION ORGANICA			
FRACC. INORG.	INORG. OCLUIDO P	FRACC. INORG		P-Al	P-Fe	P-Ca	ORG	C/N	C/P	N/P	%P
ppm	ppm	%					%				
64,8	200,2	24,5	18,5	54,0	27,5	50,6	14,1	156,1	11,1	0,37	
51,5	174,5	22,8	38,8	48,7	12,4	48,9	12,7	229,2	18,1	0,25	
48,0	143,0	25,1	18,8	69,0	12,3	59,2	13,3	158,8	11,9	0,37	
30,5	109,5	21,8	42,0	42,3	15,7	50,0	10,5	217,1	20,7	0,27	
77,6	92,4	45,6	46,1	33,1	20,7	55,0	10,8	191,8	17,8	0,30	
37,9	168,1	18,4	39,8	40,6	19,5	48,6	11,2	177,9	15,9	0,33	
40,3	120,7	25,0	44,2	33,3	22,6	61,8	12,9	197,7	15,4	0,29	
43,6	113,4	27,8	41,3	45,9	12,8	54,1	11,2	169,7	15,1	0,34	
41,7	99,3	29,6	24,7	57,1	18,2	57,3	7,4	144,4	19,6	0,40	
31,3	112,7	21,7	39,6	41,9	18,5	49,1	11,7	210,1	18,0	0,28	
42,8	201,2	17,5	39,3	29,4	31,3	50,9	10,3	154,9	15,0	0,37	
43,3	85,7	33,6	27,7	46,7	25,6	67,1	11,4	147,5	12,9	0,39	
33,6	194,4	14,7	26,8	43,7	29,5	50,0	10,1	83,8	8,3	0,69	
18,0	113,0	13,7	25,6	52,2	22,2	50,6	12,4	184,3	14,9	0,31	
20,6	56,4	26,8	18,0	57,3	24,8	55,0	11,5	158,5	13,8	0,37	
41,0	120,0	25,5	43,2	26,1	30,7	50,0	10,7	152,8	14,3	0,38	
33,7	94,3	26,3	44,5	40,4	15,1	51,5	11,9	140,4	11,8	0,41	
32,6	120,4	21,3	30,7	58,0	11,3	44,2	9,0	194,2	21,5	0,30	
38,3	123,7	23,6	18,5	72,8	8,6	46,7	10,7	180,3	16,9	0,32	
18,4	82,6	18,2	35,9	47,8	16,3	50,0	12,5	248,5	19,8	0,23	
14,7	83,3	15,0	42,9	49,0	8,2	47,6	10,5	129,2	12,4	0,45	
20,0	70,0	22,2	52,0	34,0	14,0	44,8	12,3	253,4	20,5	0,23	
23,8	106,2	18,3	19,3	63,0	17,6	33,3	11,6	196,9	16,9	0,29	
38,4	73,6	34,3	42,2	40,1	17,7	41,4	11,9	150,6	12,7	0,39	
16,0	27,0	37,2	36,3	47,5	16,3	65,9	9,6	138,6	14,5	0,42	
20,5	60,5	25,3	39,0	50,7	10,2	46,7	9,9	111,3	11,3	0,52	
20,5	51,5	28,5	47,3	34,6	18,0	48,6	8,7	152,9	17,6	0,38	
21,4	45,6	31,9	55,1	17,8	27,1	66,0	12,9	138,5	10,8	0,42	
33,7	89,3	27,4	31,2	60,5	8,3	48,5	7,4	139,7	19,0	0,42	
133,6	324,4	29,2	10,5	55,3	34,2	48,4	11,0	145,7	13,3	0,40	
59,6	152,4	28,1	36,1	48,3	15,6	51,3	11,8	205,8	17,5	0,28	
38,4	116,4	25,2	34,7	46,5	18,8	51,4	11,1	169,7	15,5	0,36	
22,7	58,2	6,8	11,1	12,1	7,1	7,0	1,6	37,8	3,3	0,09	
14,7	27,0	13,7	10,5	17,8	8,2	33,3	7,4	83,8	8,3	0,23	
133,6	324,4	45,6	55,1	72,8	34,2	67,1	14,1	253,4	21,5	0,69	

NOTAS: (1) Método Bray Nº1. (2)  $\Sigma(P-Al, P-Fe, P-Ca) = \Sigma F$ . (3) P inorgánico -  $\Sigma F$ . (4)  $\Sigma F/P$ . inorg. (5) Porcentajes sobre la suma de las tres fracciones. (6) Porcentaje sobre el contenido total de P.

### CUADRO N° 4

**Contenidos promedio mínimos y máximos de P total de suelos desarrollados sobre diferentes materiales geológicos. En la columna correspondiente a promedios, se indica entre paréntesis, el número de valores considerados.**

<u>Geología</u>	<u>Tipo de Suelo</u>	<u>pp. P total</u>		
		<u>Promedio</u>	<u>Mínimo</u>	<u>Máximo</u>
Arapey	Vertisoles	583(4)	442	887
	Litosoles			
Libertad	Vertisoles	386(4)	265	456
	Brunosoles			
F. Bentos	Brunosoles	374 (4)	283	497
Yaguari	Brunosoles	350 (3)	330	378
	Vertisoles			
Cristalino	Argisoles	260 (3)	202	304
Cretácico	Argisoles	194 (3)	126	264
	Planosoles, Brunosoles			
Tacuarembó	Luvissoles	163 (3)	140	197
	Acrisoles			

Formación Dolores (Durán, 1985), desarrollándose en planicies circundantes a la Laguna Merim. Los datos coinciden con los presentados por Escudero y Morón (op.cit.) para suelos similares. En este caso los bajos contenidos de en P total estarían relacionados con bajos contenidos de dicho elemento en el material que dio origen a los suelos.

De acuerdo con estos datos, existe una marcada influencia del material madre de los suelos en los contenidos totales de P. En la mayoría de los casos los suelos se han desarrollado a partir de materiales madre de origen cuaternario, los cuales difieren en su granulometría y composición química.

Un aspecto importante a tener en cuenta es la falta de relación entre los contenidos de P total de los suelos y las correspondientes estimaciones del contenido en forma asimilable. El análisis del contenido de P disponible por el método Bray N° 1 (cuadro N° 3) muestra valores muy bajos y con un escaso rango de variación, y además se observa que los suelos con mayores contenidos totales de P no muestran valores más elevados de P en forma asimilable, como es el caso de suelos desarrollados a partir de basalto. Tal comportamiento se ve corroborado al realizar una regresión entre ambos

parámetros, donde el valor de  $r^2$  encontrado es extremadamente bajo (0.0003 para todos los suelos, y 0.0115 si no se considera en el análisis al suelo 24, con un valor elevado de P asimilable en relación con los demás suelos analizados).

El análisis comparativo entre los resultados obtenidos para el contenido total de P de los suelos analizados y datos mencionados por algunos autores, indica que los valores obtenidos corresponden a contenidos medios a bajos del P total. Fassbender y Bornemisza (1987) cita rangos de 0.02 a 0.08%. Tisdale y Nelson (1985) mencionan un rango de variación más amplio (de 40 a 998 ppm, con un valor promedio del orden de las 400 ppm). Sin embargo, estos datos se refieren a suelos muy variados, desde el punto de vista del material madre y las condiciones de formación.

## **2. FORMAS Y CONTENIDOS DE FOSFORO INORGANICO**

### **2.1. Contenido total**

Los contenidos de P inorgánico total se obtuvieron por diferencia entre el contenido total y el contenido en forma orgánica. Esto no aseguraría una alta precisión del dato, al no surgir directamente de una determinación analítica. De cualquier manera, al trabajar con suelos con contenidos de P muy contrastantes, no dejan de ser válidas las comparaciones entre ellos.

De acuerdo con los datos del cuadro N° 3, el contenido de P inorgánico osciló entre 43 y 458 ppm, con un valor promedio de 155 ppm. Esto representa un 48.6% del contenido total de P. La variación en torno a este porcentaje es bastante pequeña, lo cual 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. Esta tendencia sería alterada en la medida que el suelo fuera roturado (mineralización de formas orgánicas) y fertilizado (aumento de los niveles de P inorgánico). Por otra parte, al existir pocas variaciones en las proporciones relativas de P inorgánico en los distintos suelos en relación con el total, surgen los mismos comentarios realizados anteriormente al discutir las variaciones en los contenidos de P total en los distintos suelos en función de material madre y tipo de suelo.

En la sección 3 se hace un comentario de los contenidos de P orgánico de los suelos, y su relación con los niveles de P inorgánico, por lo que algunos aspectos serán mencionados más adelante.

Se estableció la relación existente entre los contenidos de P inorgánico de los suelos y algunas características de los mismos. En el cuadro N° 5 se indican estas relaciones. En este estudio

no se tuvo en cuenta al Litosol de la Asoc. Curtina, por presentar valores atípicos. Las correlaciones simples indican en general un grado de relación importante entre las

características consideradas y el contenido en P inorgánico. Existen relaciones muy estrechas entre contenidos de P inorgánico y porcentaje de óxidos de hierro y niveles de Ca intercambiable. Por otra parte, considerando las fracciones arcilla, limo y arena de los suelos, las variaciones en los niveles de P inorgánico guardan estrecha relación con el contenido de arcilla de los suelos, y en cierta medida, con el contenido de limo de los suelos. La correlación con la fracción arena es alta, pero negativa. Cabe destacar, sin embargo, que estas características (arcilla, óxidos de hierro y calcio) presentan cierto grado de relación entre sí, sobre todo la fracción arcilla con Ca intercambiable ( $r=0.8803$ ;  $P=0.0001$ ) y óxidos de hierro ( $r=0.4977$ ;  $P=0.0051$ ).

---

### CUADRO N° 5

#### **Análisis de correlación entre el contenido de P inorgánico de los suelos con características físicas y químicas.**

	%Arcilla	%Limo	%Arena	%Ox. Fe	pH(H <sub>2</sub> O)	pH(KCl)	meqCa/100g
Coefficiente r	0,7572	0,5734	-0,7639	0,6137	0,5385	0,5295	0,7812
Probabilidad	0,0001	0,0009	0,0001	0,0003	0,0021	0,0026	0,0001

---

Las correlaciones con pH, sin dejar de ser importantes, presentan un grado de significación menor, existiendo también cierto grado de correlación entre pH (H<sub>2</sub>O) y contenido de arcilla ( $r=0.4015$ ;  $P=0.0279$ ), y pH (H<sub>2</sub>O) con Ca intercambiable ( $r=0.5301$ ;  $P=0.0026$ ).

## **2.2 Fracciones del fósforo inorgánico**

### *2.2.1. Formas y contenidos de fósforo en cada fracción*

En el cuadro N°3 se indican las diferentes fracciones de P inorgánico separadas por el método propuesto por Chang y Jackson. Se determinó el contenido de P ligado a cationes Al, Fe y Ca, en tanto que los valores de P "ocluído" fueron obtenidos por diferencia entre el total de P inorgánico y la suma de las tres fracciones mencionadas en primer término, tal como se indicó en la sección de Materiales y Métodos. También se indican los valores porcentuales de cada fracción. En términos generales se observa que la fracción predominante de las tres determinadas corresponde a los fosfatos ligados al Fe (46.5% del total de las tres fracciones), en tanto que los fosfatos ligados al Al y al Ca representan proporciones menores (34.7 y 18.8% respectivamente).

El análisis más detallado de los datos muestra variaciones porcentuales más altas para las fracciones P-Al y P-Ca (expresadas en relación al total). En términos absolutos y relativos la fracción P-Fe se muestra importante en suelos desarrollados sobre basalto, constituyendo un 56% del total de las tres fracciones. Esto se observa en forma más resumida en el cuadro N° 6, donde se han agrupado los suelos por el material madre que les dio origen. Suelos muy ácidos y meteorizados sobre materiales del Basamento Cristalino, presentan aún mayores porcentajes de P ligado al Fe, aunque en términos absolutos éste representa la mitad de los encontrados para suelos sobre basalto. En relación con la importancia relativa de la fracción P-Fe en los suelos desarrollados sobre basalto y cristalino, es de destacar los altos contenidos de óxidos de hierro de estos suelos, que superan en general el 1%.

### CUADRO N°6

**Contenidos y proporciones de P en las diferentes fracciones de P inorgánico. Valores promedio de grupos de suelo según el material generador.**

Geología	ppm.				% sobre la suma de las tres fracciones		
	P-Al	P-Fe	P-Ca	Poc.	P-Al	P-Fe	P-Ca
Arapey	13,8	41,8	19,0	211	18,5	56,0	25,5
Libertad	11,6	13,2	7,6	149	35,8	40,7	23,5
Fray Bentos	14,7	14,2	10,7	114	37,1	35,9	27,0
Yaguarí	21,4	23,2	9,8	107	39,3	42,6	18,0
Cristalino	7,9	18,5	3,3	109	26,6	62,3	11,1
Cretácico	12,3	12,2	4,8	65	42,0	41,6	16,4
Tacuarembó	9,8	7,1	3,9	53	47,1	34,1	18,8
Dolores ?	7,1	9,6	2,7	87	36,6	49,5	13,9

La fracción P-Al aparece como importante en suelos formados sobre areniscas de Formación Tacuarembó y de formaciones cretácicas. En estos suelos, las fracciones relevantes son las ligadas a Al y Fe, por tratarse de suelos de pH ácido, algunos con Al intercambiable en el complejo de intercambio, y derivados de materiales madre que sufrieron procesos de alteración intensos.

La fracción P-Ca de los suelos es cuantitativamente la menos importante de las tres. Sin embargo, algunos materiales generadores de suelo presentan altos contenidos de Ca, lo cual determina que en términos absolutos y relativos la

fracción P-Ca aparezca como de importancia en algunos suelos. Tal es el caso de suelos desarrollados sobre sedimentos limo arcillosos de las formaciones Fray Bentos, Libertad y Yaguarí. En cierta medida, también, los productos de alteración de basalto presentan altos contenidos de Ca, lo que determina que los suelos formados a partir de ellos presenten importantes contenidos de P inorgánico ligado al Ca.

Los suelos desarrollados sobre materiales cuaternarios de la zona este del país (cuenca de la Laguna Merim), presentan bajos niveles de P en las tres fracciones determinadas; cuantitativamente, la fracción predominante es la del P ligado al Fe, y en segundo lugar, el P ligado al Al. La importancia relativa de la fracción P-Fe no está asociada con altos contenidos de óxidos de hierro. Sin embargo, las condiciones topográficas en las cuales se desarrollan estos suelos (planicies), asociado a una gran diferenciación textural del perfil, determinan que en ciertos períodos del año permanezcan con excesos importantes de agua, lo que determina condiciones de reducción temporarias. En tal caso, cationes como el Fe son reducidos, aumentando su solubilidad. Al retornar las condiciones de oxidación se produce una reprecipitación del Fe en formas más reactivas, capaces de reaccionar con iones fosfato del suelo, para formar compuestos fosfatados ligados al Fe.

Como ya fue mencionado en la sección de Materiales y Métodos, la fracción P ocluído de los suelos (referida a los fosfatos ocluídos en óxidos de hierro) no pudo ser determinada. Se calculó el contenido de P remanente en la fracción inorgánica de los suelos, luego de realizar la extracción de las formas P-Al, P-Fe y P-Ca. Esta fracción es indicada en el cuadro N° 3 y en el cuadro N° 6 como P "ocluído", haciendo la precisión de que no es posible afirmar que todo el P allí referido esté ocluído en óxidos de hierro. En promedio, las tres fracciones determinadas constituyen el 25.2% del P inorgánico; o sea que de las tres cuartas partes del P inorgánico no se conoce bajo qué formas se encuentra, no pudiéndose afirmar que todo esté bajo forma de P ocluído.

### *2.2.2. Relaciones entre las diferentes fracciones y otras características de los suelos*

Se estudió la relación existente entre las diferentes fracciones del P inorgánico, indicándose los valores de correlación en el cuadro N° 7. Se hace la aclaración que tanto en este estudio, como en los siguientes, se omite al Litosol de la Asociación Curtina, por presentar valores atípicos. La fracción P "ocluído" fue la que mostró la más alta correlación simple con el contenido de P inorgánico total. Dentro de las fracciones de

P determinadas, las fracciones P-Fe y P-Ca fueron las que mostraron mayor relación con el P inorgánico total.

### CUADRO N°7

**Coefficientes de correlación entre las diferentes fracciones del P inorgánico de los suelos. El número entre paréntesis indica la probabilidad del coeficiente.**

	P. In. Tot.	P-Al	P-Fe	P-Ca	P-"ocl"
P In. Total	----	0,4375 (0,0156)	0,6751 (0,0001)	0,6781 (0,0001)	0,9748 (0,0001)
P-Al		----	0,3434 (0,0632)	0,6300 (0,0002)	0,2720 (0,1459)
P-Fe			----	0,4642 (0,0098)	0,5532 (0,0015)
P-Ca				----	0,5630 (0,0012)

Las relaciones entre las tres fracciones analizadas muestra una alta correlación entre las fracciones P-Ca y P-Al, y en menor grado entre P-Ca y P-Fe. Por otra parte, la fracción P "ocluído" mostró estar altamente correlacionada con P-Fe.

En el cuadro N° 8 se indican las correlaciones entre las diferentes formas de P de la fracción inorgánica y otras características de los suelos. En general, todas las fracciones mostraron altas correlaciones con los niveles de Ca intercambiable y el porcentaje de arcilla. Esto estaría relacionado con un mayor contenido absoluto de P en todas las fracciones a medida que los suelos provienen de materiales madre de granulometría más fina y altos contenidos de Ca, asociado a una baja intensidad de los procesos de meteorización. Es importante destacar la alta correlación existente entre porcentaje de arcilla y contenido de Ca intercambiable ( $r=0.8803$ ;  $P=0.0001$ ).

Otro factor que mostró altas correlaciones con las fracciones de P inorgánico, excepto con P-Al, fue el porcentaje de óxidos de hierro. Las mayores correlaciones fueron con las fracciones P-Fe y P "ocluído". Esto se relaciona con el material madre de los suelos y/o el grado de meteorización: contenidos más elevados de P en las fracciones P-Fe y P "ocluído" se dan en suelos provenientes de materiales madre ricos en Fe y/o condiciones de alta meteorización.

**CUADRO N°8**

**Correlaciones entre fracciones de P inorgánico y características de suelo. El número entre paréntesis indica la probabilidad del coeficiente.**

	P-Al	P-Fe	P-Ca	P-"oc"
% Ac	0,5468 (0,0018)	0,6544 (0,0001)	0,5718 (0,0010)	0,6764 (0,0001)
% Lm	0,0508 (0,7898)	0,2119 (0,2611)	0,2200 (0,2427)	0,6343 (0,0002)
% Ar	-0,3399 (0,0661)	-0,4948 (0,0054)	-0,4528 (0,0120)	-0,7536 (0,0001)
% Ox.Fe	-0,0181 (0,9242)	0,6489 (0,0001)	0,3514 (0,0569)	0,6031 (0,0004)
pH (H <sub>2</sub> O)	0,0130 (0,9455)	0,1175 (0,5364)	0,4624 (0,0101)	0,5919 (0,0006)
pH (KCl)	0,2392 (0,2029)	0,1500 (0,4287)	0,5172 (0,0034)	0,5378 (0,0022)
Ca int. meq/100 g.	0,5731 (0,0009)	0,5859 (0,0007)	0,6909 (0,0001)	0,7033 (0,0001)

La fracción P "ocluído" mostró altas correlaciones con todas la características de suelo estudiadas, siendo las más relevantes Ca intercambiable, arcilla y limo.

El pH de los suelos sólo mostró correlaciones importantes con las fracciones P "ocluído" y P-Ca, de tal forma que al aumentar el pH de los suelos, aumenta el contenido de P en la fracción unida al Ca y en el "pool" de compuestos que integrarían la fracción P "ocluído". La relación existente entre el contenido de P en la fracción P-Ca y el pH de los suelos indicaría que en suelos sujetos a procesos de meteorización de escasa intensidad, y por lo tanto pH más elevado, el contenido de P en la fracción P-Ca sería más relevante.

### 3. CONTENIDOS DE FOSFORO ORGANICO

#### 3.1. Contenido total

Los contenidos de P en la fracción orgánica de los horizontes A de los suelos estudiados osciló entre 65 y 429 ppm, con un promedio de 166 ppm (cuadro N° 3).

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. Si bien el rango de variación de estos porcentajes va de 33.3 a 67.1%, el desvío standard es del 7%, lo cual indica una escasa variación entre suelos que provienen de diferentes materiales madre y condiciones de meteorización. En la figura N° 1 se observan las relaciones entre P total y P orgánico. Las altas proporciones de P orgánico, en relación con el contenido total, están explicadas por los altos contenidos de materia orgánica del horizonte A de los suelos, tal como se deduce del contenido de C orgánico de los suelos estudiados (2.78% en promedio, cuadro N° 2). Esto está relacionado con los procesos de formación de los suelos del Uruguay, que han dado lugar a suelos de pradera, con altos contenidos de materia orgánica en el horizonte de mayor desarrollo radicular.

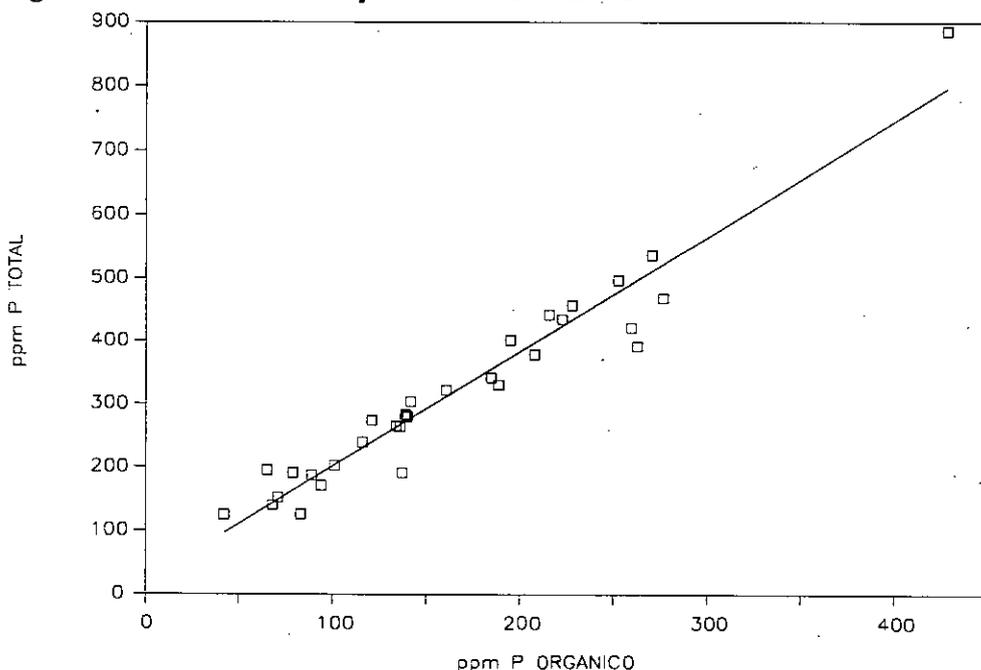
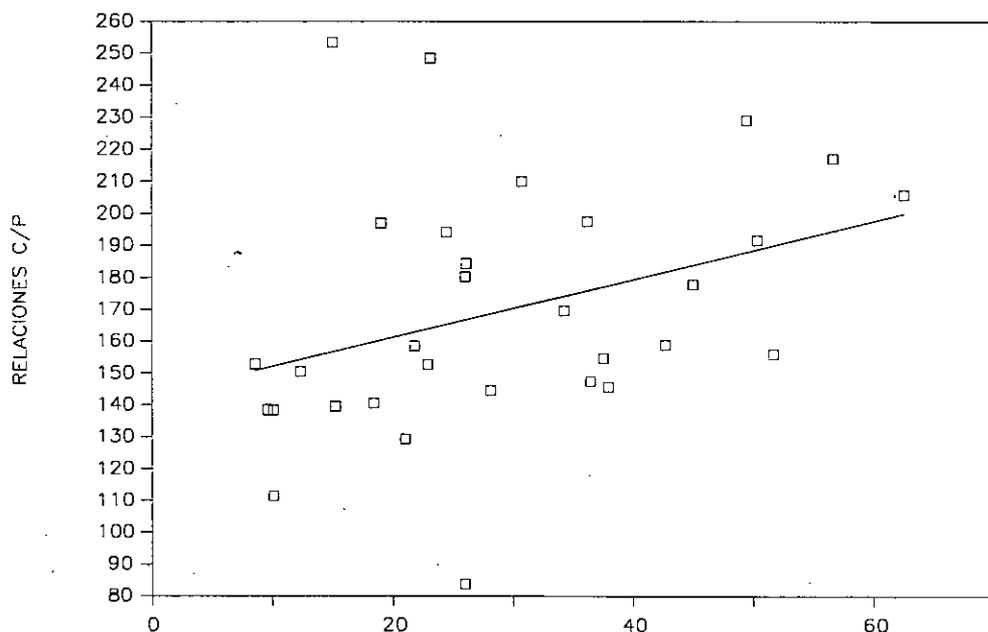


figura 1 Relación entre el contenido total de P y el contenido en forma orgánica.

### 3.2. Relaciones C/N/P en la fracción orgánica de los suelos

Se estudiaron las relaciones C/P y N/P de la fracción orgánica de los suelos, encontrándose que la relación C/P oscilaba entre 84:1 y 253:1, con un promedio de 170:1. De acuerdo con los datos del cuadro N° 3 y la figura N° 2, se observa que la relación C/P es en general más baja en suelos de textura más liviana, lo

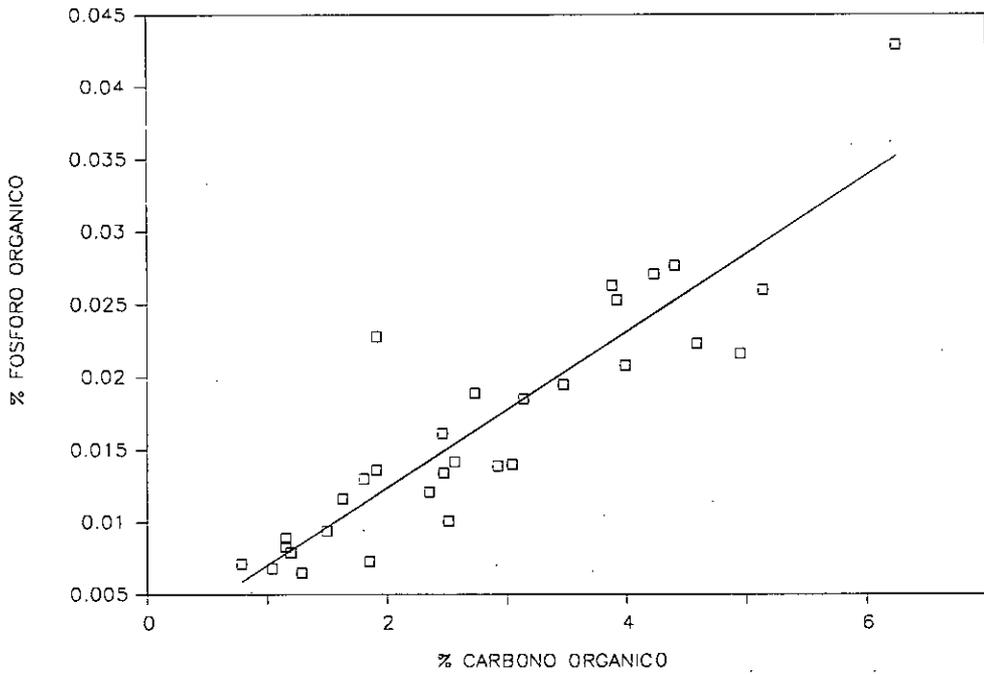
que podría indicar una diferente composición de los compuestos en la fracción orgánica de los suelos. Se calculó el porcentaje de P de la materia orgánica del suelo, asumiendo un factor promedio de 1.724 para obtener el dato de materia orgánica a partir del porcentaje de C orgánico de los suelos. Dichos valores se indican en el cuadro N°3, donde el valor promedio para todos los suelos es de 0.36%. De dichos datos se destacan los correspondientes a suelos de textura liviana, donde se observan valores más elevados de porcentaje de P en la materia orgánica.



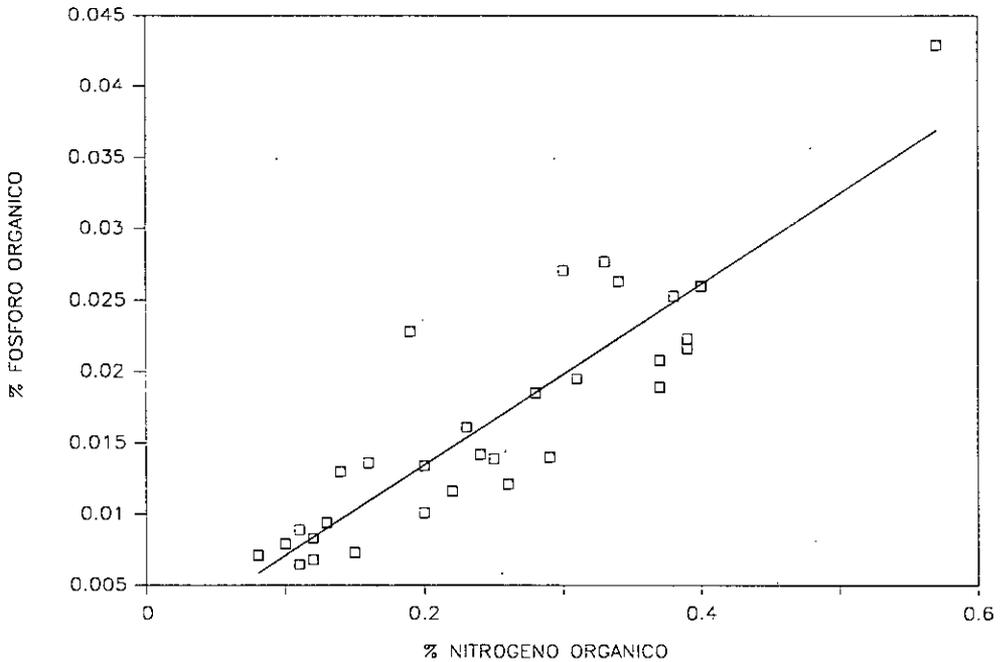
**figura N°2** Relación entre el contenido de arcilla y la relación C/P de la fracción orgánica de los suelos.

La relación N/P de la fracción orgánica de los suelos osciló entre 8:1 y 22:1, con un promedio de 16:1. El análisis de correlación para las relaciones C/P y N/P dio como resultado similares valores del coeficiente r (0.9013 y 0.8915, respectivamente). En la figura 3a. y 3b. se indican estas relaciones. Las relaciones N/P no mostraron estar relacionadas con otras características de suelo, dentro de las estudiadas.

De acuerdo con los resultados obtenidos, las relaciones C/N/P de los suelos estudiados, osciló entre 84:8:1 y 253:22:1 con un promedio de 170:16:1.



**figura 3.a** Relación entre los contenidos de C y P de la fracción orgánica de los suelos.



**figura 3.b** Relación entre los contenidos de N y P de la fracción orgánica de los suelos.

## CONCLUSIONES

La caracterización del contenido de P de los diferentes suelos analizados permite corroborar contenidos medios a bajos de P total, comparados con suelos similares de otros países. No obstante, se observa una variación importante en dichos contenidos, en función del material madre que dio origen a los suelos, y condiciones de meteorización. En tal sentido, materiales madre de granulometría más fina dan origen a suelos con mayores contenidos de P total, en tanto que a partir de materiales madre de tipo areniscas se desarrollan suelos con contenidos más bajos de P total. Particularmente, los suelos derivados de la alteración de basalto presentan los mayores contenidos de P total. En otros casos, una gran intensidad de los procesos de meteorización determina suelos con niveles muy bajos de P total, como es el caso de suelos desarrollados a partir de la alteración de Basamento Cristalino.

No se encontró relación entre los contenidos totales de P de los suelos y los contenidos en forma disponible (P asimilable). Los contenidos de P asimilable son bajos en todos los suelos, mostrando por otra parte un escaso rango de variación.

El análisis de las diferentes fracciones del P inorgánico indica una predominancia

de la fracción de P ligada al Fe (47% de la suma de fracciones P-Al, P-Fe y P-Ca). Dicha fracción es particularmente importante en suelos desarrollados sobre materiales derivados de la alteración de basalto y del Basamento Cristalino, con altos contenidos de óxidos de Fe. La fracción P-Al pasa a ser relevante en suelos ácidos desarrollados a partir de areniscas de la Formación Tacuarembó y de formaciones cretácicas. Por otra parte, en suelos desarrollados a partir de materiales con altos contenidos de Ca (formaciones Fray Bentos, Libertad y Yaguará), es cuantitativamente importante la fracción P-Ca.

En relación con los mayores contenidos totales de P bajo condiciones de meteorización menos intensas, se encontró alta correlación entre las diferentes fracciones de P inorgánico y los contenidos de arcilla y Ca intercambiable. Las fracciones P-Fe y P "ocluído" mostraron altas correlaciones con el porcentaje de óxidos de Fe.

Los contenidos de P en formas orgánicas representan el 51% del contenido total, lo cual está explicado por las condiciones de formación de los suelos, bajo vegetación de pradera, lo cual permite una acumulación importante de materia orgánica en el horizonte de mayor desarrollo y actividad radicular. La importancia de estos altos contenidos de P en forma orgánica radica en la posibilidad de mineralización posterior frente a condiciones favorables, y aumento en los contenidos de P disponible de los suelos.

El estudio de las relaciones C/N/P de la materia orgánica dio valores promedio de 170:16:1, y la estimación del contenido de P de la materia orgánica dio un valor promedio de 0.36%.

El objetivo de caracterizar las diferentes formas de P de los suelos surge de su importancia en la interpretación de los diferentes procesos que operan en la dinámica del P bajo pasturas. Estudios posteriores deberán enfocar la evolución de las diferentes formas de P de los suelos luego de su roturación y comienzo del uso de fertilizantes fosfatados, y su relación con la disponibilidad del nutriente en el ciclo de la pastura.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen especialmente la colaboración de J. Gutiérrez en el análisis de formas de P de algunos suelos incluidos en el presente trabajo, y a técnicos de la Dirección de Suelos y Fertilizantes (M.G.A.P.) en algunos parámetros de caracterización de los suelos estudiados.

**BIBLIOGRAFIA**

- AL-ABBAS, A.H. and S.A. BARBER, 1964. A soil test for phosphorus based upon fractionation of soil phosphorus: I. Correlation of soil phosphorus fractions with plant-available phosphorus. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 28:218-221.
- ALEXANDER, T.G. and J.A. ROBERTSON. 1968. Inorganic phosphorus forms in some Alberta soils as related to soil development, parent material and available phosphorus. *Can. J. Soil Sci.* 48:289-295.
- BALERDI, F., L. MULLER and FASSBENDER, H.W. 1968. Estudios del fósforo en suelos de América Central. III. Comparación de cinco métodos químicos de análisis de fósforo disponible. *Turrialba* 18:348-360.
- BARROW, N.J. 1961. Phosphorus in soil organic matter. *Soils and Fertilizers* 24:169-173.
- BLACK, C.A. 1965. *Methods of soil analysis*. Madison, Wis., American Society of Agronomy. v2.
- BLACK, C.A. 1975. *Relaciones suelo planta*. Trad. por A. Rabuffetti y S. Darré. Buenos Aires, Hemisferio Sur, V.2. p. 613-716.
- BORNEMISZA, E. and I. KOZEN, 1967. Comparison of three methods for determining organic phosphorus in Costa Rica soils. *Soil Sci.* 103:347-353.
- BOWMAN, R.A. and C.V. COLE. 1978. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils. *Soil Sci.* 125:95-101.
- BROOKES, P.C., D.S. POWLSON and D.S. JENKINSON. 1982. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. *Soil Biol. Biochem.* 14:319-329.
- BROOKES, P.C., D.S. POWLSON and D.S. JENKINSON. 1984. Phosphorus in the soil microbial biomass. *Soil Biol. Biochem.* 16:169-175.
- CHANG, S.C. and M.L. JACKSON. 1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci.* 84:133-144.
- CHAUHAN, B.S.; J.W.B. STEWARD and E.A. PAUL. 1979. Effect of carbon additions on soil labile inorganic, organic and microbially held phosphate. *Can. J. Soil Sci.* 59:387-396.
- CONDON, L.M., E. FROSSARD, H. TIESSEN, R.H. NEWMAN and J.W.B. STEWARD. 1990a. Chemical nature of organic phosphorus in cultivated and uncultivated soils under different environmental conditions. *J. Soil Sci.* 41:41-50.
- CONDON, L.M., J.O. MOIR, H. TIESSEN and J.W.B. STEWARD. 1990b. Critical evaluation of methods for determining total organic phosphorus in tropical soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:1261-1266.

- DAHNIKE, W.C., J.L. MALCOLM and M.E. MENENDEZ. 1964. Phosphorus fractions in selected soil profiles of El Salvador as related to their development. *Soil Sci.* 98:33-38.
- DOORMAR, J.F. 1972. Seasonal pattern of soil organic phosphorus. *Can. J. Soil Sci.* 52:107-112.
- DURAN, A. 1985. *Los suelos del Uruguay*. Montevideo. Hemisferio Sur. Uruguay. 398 p.
- ESCUADERO, J. y A. MORON. 1978. Caracterización de la capacidad de fijación de fósforo de distintos suelos del Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo. Uruguay. Facultad de Agronomía.
- FASSBENDER, H.W., L. MULLER y F. BALERDI. 1968. Estudio del fósforo en suelos de América Central. II. Formas y relación con las plantas. *Turrialba* 18:333-347.
- FASSBENDER, H.W. y N. DIAZ. 1970. Contenido y formas de fósforo de algunos suelos de la región amazónica del Estado de Maranhao, Brasil. *Turrialba* 20:372-374.
- FASSBENDER, H.W. y E. BORNEMISZA. 1987. Química de suelos, con énfasis en suelos de América Latina. San José, Costa Rica. IICA. 420 p.
- HALSTEAD, R.L. 1967. Chemical availability of native and applied phosphorus in soils and their textural fractions. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 31:414-419.
- HAWKINS, R.H. and G.W. KUNZE. 1965. Phosphate fractions in some Texas Grumusols and their relation to soil weathering and available phosphorus. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 29:650-656.
- HEDLEY, M.J. and J.W.B. STEWARD. 1982. Method to measure microbial phosphate in soils. *Soil Biol. Biochem.* 14:377-385.
- HEDLEY, M.J., J.W.B. STEWARD and B.S. CHAUGHAM. 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:970-976.
- JACKMAN, R.H. 1964. Accumulation of organic matter in some New Zealand soils under permanent pasture. II. Rates of mineralization of organic matter and the supply of available nutrients. *N.Z.J. Agric. Res.* 7:472-479.
- KOHN, G.D., G.J. OSBORNE, G.D. BATTEN, A.N. SMITH and W.J. LILL. 1977. The effect of topdressed Superphosphate on changes in Nitrogen: Carbon: Sulphur: Phosphorus and pH on a Red Earth soil during a long term grazing experiment. *Aust. J. Soil Res.* 15:147-158.
- MARUMOTO, T., J.P.E. ANDERSON and K.H. DOMSCH. 1982. Mineralization of nutrients from soil microbial biomass. *Soil Biol. Biochem.*

14:469-475.

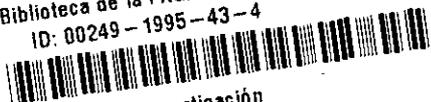
- MURPHY, J. and J.P. RILEY. 1962. A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta* 27:31-36.
- NELSON, D.W. and L.E. SOMMERS. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. In Page, A.L. ed. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiologic Properties*. Madison, Wis. American Society of Agronomy, pp 539-579. *Agronomy Monograph No. 9*.
- OLSEN, S.R. and F.E. KHASAWNEH. 1980. Use and limitations of physical - chemical criteria for assessing the status of phosphorus in soils. In Stelly, M. ed. *The role of phosphorus in agriculture*. Madison, Wis. American Society of Agronomy. pp 361-410.
- OLSEN, S.R. and L.E. SOMMERS. 1982. Phosphorus. In Page, A.L. ed. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. Madison, Wis. American Society of Agronomy. pp 403-430. *Agronomy Monograph No. 9*.
- PARTON, W.J., J.W.B. STEWARD and C.V. COLE. 1988. Dynamics of C,N,P and S in grassland soils: a model. *Biogeochemistry* 5:109-131.
- PAYNE, H. and W.J. HANNA. 1965. Correlations among soil phosphorus fractions, extractable phosphorus and plant content of phosphorus. *J. Agric. Food Chem.* 13:322-326.
- PETERSEN, G.W. and R.B. COREY. 1966. A modified Chang and Jackson procedure for routine fractionation of inorganic soil phosphates. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 30:563-565.
- SAUNDERS, W.M.H. and A.J. METSON. 1971. Seasonal variation of phosphorus in soil and pasture. *N.Z.J. Agric. Res.* 14:307-328.
- SCHROEDER, J. 1910. Informe sobre varios viajes de estudio por los Dptos. de San José, Colonia, Soriano, Lavalleja, Tacuarembó, Rivera y Flores. *Revista del Instituto de Agronomía (Uruguay) No. VII:15-64*.
- SHARPLEY, A.N. and S.J. SMITH. 1983. The distribution of phosphorus forms in virgin and cultivated soils and potencial erosion losses. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 47:581-586.
- SHARPLEY, A.N. and S.J. SMITH. 1985. Fractionation of inorganic and organic phosphorus in virgin and cultivated soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 49:127-130.
- SHARPLEY, A.N. 1985. Phosphorus cycling in unfertilized and fertilized agricultural soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 49:905-911.
- SHARPLEY, A.N., H. TIESSEN and C.V. COLE. 1987. Soil phosphorus forms extracted by soil tests as a function of pedogenesis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51:362-365.

- SONEIRA, A. y J.M. GUERRA. 1929. Contribución al estudio de la determinación de las zonas y tierras más aptas para fomentar la producción citrícola en el Uruguay. *Revista de la Facultad de Agronomía (Uruguay)* 2:133-174.
- SPANGENBERG, J. 1931. Contribución al estudio del problema de los abonos en el Uruguay. *Revista de la Facultad de Agronomía (Uruguay)* 5:131-202.
- SPANGENBERG, G. y T. HENRY. 1938. Informe sobre un viaje de estudio a los bañados del norte de Rocha. *Revista de la Facultad de Agronomía (Uruguay)* 16:13-35.
- SPANGENBERG, G. 1944a. Importancia de las deficiencias minerales en nuestras praderas naturales. *Revista de la Facultad de Agronomía (Uruguay)* 36:9-32.
- SPANGENBERG, G. 1944b. Tierras y pasturas del Dpto. de Cerro Largo. El problema que plantea la persistente sequía. Recuperación de pastoreos. *Revista de la Facultad de Agronomía (Uruguay)* 37:53-81.
- SPANGENBERG, G. 1945. Calidad de campos y producciones pecuarias; tierras y pasturas del Dpto. de Lavalleja. *Revista de la Facultad de Agronomía (Uruguay)* 40:49-65.
- SPARLING, G.P., K.N. WHALE and A.J. RAMSAY. 1985. Quantifying the contribution from the soil microbial biomass to the extractable P levels of fresh and air-dried soils. *Austr. J. Soil Res.* 23:613-621.
- STEWART, J.W.B. and H. TIESSEN. 1987. Dynamics of soil organic phosphorus. *Biogeochemistry* 4:41-60.
- SUSUKI, A., K. LAWTON and E.C. DOLL. 1963. Phosphorus uptake and soil tests as related to forms of phosphorus in some Michigan soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 27:401-403.
- TISDALE, S.L., W.L. NELSON and J.D. BEATON. 1985. *Soil fertility and fertilizers*. 4th. ed. N. York. Macmillan. 754 p.
- THOMAS, G.W. 1982. Exchangeable cations. In Page, A.L. ed. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. Madison, Wis. American Society of Agronomy. pp 159-165. Agronomy Monograph No. 9.
- TRACY, P.W., D.G. WESTFALL, E.T. ELLIOT, G.A. PETERSON and C.V. COLE. 1990. Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulphur mineralization in plow and no-till cultivation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:457-461.
- TRIPATHI, B.R., H.L.S. TANDOM and E.H. TYNER. 1970. Native inorganic phosphorus forms and their relation to some chemical indexes of

- phosphate availability for soils of Agra District, India. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 28:23-26.
- VIEIRA, L.S. y E. BORNEMISZA. 1968. Categorías de fósforo en los principales grandes grupos de suelos de la Amazonia de Brasil, Turrialba 18:242-248.
- WALKER, T.W. and A.F.R. ADAMS. 1958. Studies on soil organic matter: I. Influence of phosphorus content of parent materials and accumulation of carbon, nitrogen, sulfur and organic phosphorus in grassland soils. Soil Sci. 85:307-318.
- WESTIN, F.C. and G.J. BUNTLEY. 1966. Soil phosphorus in South Dakota: II. Comparisons of two availability tests with inorganic phosphorus fractions among soil series. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 30:248-253.
- WESTIN, F.C. and G.J. BUNTLEY. 1967. Soil phosphorus in South Dakota: III. Phosphorus fractions of some Borolls and Ustolls. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 31:521-528.
- WILLIAMS, B.L. and G.P. SPARLING. 1984. Extractable N and P in relation to microbial biomass in UK acid organic soils. Plant and Soil 76:139-148.
- WILLIAMS, J.D.H., J.K. SYERS and T.W. WALKER. 1967. Fractionation of soil inorganic phosphate by a modification of Chang and Jackson's procedure. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 31:736-739.
- ZAMALVIDE, J.P., A.P. MALLARINO, O.N. CASANOVA y H. GENTA. 1975. Evaluación del comportamiento de cinco métodos para estimar fósforo disponible en suelos del Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 55p.

Biblioteca de la FAGRO

ID: 00249-1995-43-4



Boletín de investigación  
1995. no.43. ej. 4