

FERTILIZACIÓN FOSFATADA Y FRACCIONES DE FÓSFORO EN ALFISOLES, ULTISOLES Y OXISOLES

SARA VÁZQUEZ; LUIS ALBERTO MORALES; CAROLINA FERNÁNDEZ LÓPEZ & HUMBERTO CARLOS DALURZO

Recibido: 12-02-11

Recibido con revisiones: 22-06-11

Aceptado: 26-06-11

PHOSPHORUS FERTILIZATION AND PHOSPHORUS FRACTIONS IN ALFISOLS, ULTISOLS AND OXISOLS

ABSTRACT

Phosphorus (P) is the main limiting factor in highly weathered tropical soils. Therefore, it is important to know the P fertilizer fate in the short and long term. The aim of this work was to evaluate the changes that take place in the inorganic and organic forms of the soil-applied P. The hypothesis of this study is that P fertilizer is first incorporated into the most labile soil fractions and later it undergoes transformations to more resistant fractions. Soil samples were collected from the surface horizons Alfisols, Ultisols and Oxisols in Misiones (Argentina) and a greenhouse experiment was conducted with three P levels and three repetitions. After a period of stabilization, samples were taken periodically for a year and were analyzed for P fractions by the Hedley method modified by Sattell and Morris. The moisture content fluctuated during incubation, causing increases in the Pi-NaHCO₃, Pi-NaOH and Po-NaOHus fractions for the three orders, corresponding to decreases mainly of Po-NaHCO₃ and of the residual fractions. The fertilizer added in the first 120 days increased labile and moderately labile inorganic fractions (NaHCO₃-Pi and NaOH-Pi). From incubation day 60, Sonicate-Pi fractions began to show the P rate effects, reaching the maximum value at day 120 and becoming from that moment a source of the added P. P from fertilizer, which was found in the most labile fractions at the start of the experiment, was converted to more resistant forms through time, reaching the highest values after 360 days of incubation.

Key words. Nutrient cycling, phosphorus, acid soils.

RESUMEN

El fósforo (P) es el principal limitante en suelos ácidos tropicales por lo que es importante conocer el destino del P del fertilizante en el corto y largo plazo. El objetivo de este trabajo fue evaluar los cambios que se producen en las formas inorgánicas y orgánicas del P por el agregado de este elemento. Se planteó como hipótesis que en condiciones de suelos altamente meteorizados el P agregado se incorpora en el corto plazo a las formas inorgánicas y orgánicas lábiles; luego de un año pasa a los reservorios más resistentes. Se seleccionaron Alfisoles, Ultisoles y Oxisoles de la provincia de Misiones donde se obtuvieron muestras de los horizontes superficiales para el establecimiento de un ensayo en invernáculo. Se aplicaron tres tratamientos de P con tres repeticiones. Luego de un período de estabilización, se tomaron muestras periódicamente hasta el año, para el análisis de las fracciones de P por el método de Hedley modificado por Sattell y Morris. Las condiciones de incubación, con fluctuaciones en las condiciones de humedad, provocaron incrementos en las fracciones Pi-NaHCO₃, Pi-NaOH y Po-NaOHus para los tres órdenes, a partir de la disminución, principalmente, del Po-NaHCO₃ y de las fracciones residuales. El fertilizante agregado en los primeros 120 días incrementó las fracciones inorgánicas lábiles y moderadamente lábiles (Pi- NaHCO₃ y Pi-NaOH). A partir de los 60 días, el Pi-NaOHus comenzó a manifestar el efecto de las distintas dosis de P, alcanzando su máximo valor a los 120 días, pasando a partir de ese momento a ser fuente del elemento agregado. El P proveniente del fertilizante, que al principio de la experiencia se ubicaba en las fracciones más lábiles, con el correr del tiempo pasó a formas más resistentes, alcanzando los valores máximos a los 360 días.

Palabras clave. Ciclo de nutriente, fósforo, suelos tropicales.

INTRODUCCIÓN

El fósforo (P) es un nutriente esencial para las plantas y a menudo el primer limitante en suelos ácidos tropicales (Sánchez, 1981). La comprensión profunda de su dinámica en el sistema suelo-planta y especialmente en el destino del P del fertilizante, en el corto y largo plazo en relación a las diferentes prácticas de manejo, es esencial para el manejo sostenible de los agro-ecosistemas tropicales (Friesen *et al.*, 1997).

La dinámica del P en suelos tropicales está gobernada, en mayor medida que en los ambientes templados, por los procesos biológicos (Walbridge, 1991). La alta capacidad de fijación del P de los suelos meteorizados, ricos en sesquióxidos, incrementa la importancia de los reservorios (Bedford *et al.*, 1999) y las transformaciones orgánicas y biológicas representando hasta un 80% del P total en algunas áreas (Tiessen *et al.*, 1994; Kellogg & Bridgham, 2003), ya que las formas inorgánicas son rápidamente removidas de las fracciones activas. Esto hace aún más importante, en regiones tropicales, las transformaciones del P orgánico (Po) que las del P inorgánico (Pi) (Tiessen, 2003). El incremento de la actividad biológica provoca la mineralización del Po, en mayor medida de lo que es inmovilizado (Walbridge, 1991). El principal componente del Po es el PO_4 diéster lo que actúa como una fuente del Po lábil en los suelos siendo altamente susceptible a la mineralización durante la incubación (Trasar Cepeda & Carballas, 1991).

Hedley *et al.* (1982), basándose en procedimientos de extracción propusieron un esquema de fraccionamiento del P que permite caracterizar tanto las formas inorgánicas como las orgánicas. El uso de este análisis puede no ser adecuado para establecer diferencias inducidas a través de un corto período de tiempo (dentro de los 10 años). Sin embargo, esta metodología permite mostrar diferencias en las fracciones de P bajo sistemas en los que se agregan residuos o fertilizantes (Daroub *et al.*, 2001). El fraccionamiento químico del Po es más útil en el examen de cambios netos que ocurren en períodos largos, en respuesta a las alteraciones en el uso o en el manejo del suelo (Zhang & Mackenzie, 1997).

Varios estudios han relacionado las diferentes fracciones de P en suelos tropicales con las dosis de fertilizantes obteniéndose resultados contrastantes (Linquist *et al.*, 1997a; Lilienfein *et al.*, 1999). El P agregado tendría poco impacto sobre las fracciones orgánicas pero influirían principalmente sobre las fracciones solubles de Pi (Linquist *et al.*, 1997b;). El Pi-NaOH es considerado el reservorio más

importante del P agregado y fuente del Pi-NaHCO₃ (Buehler *et al.*, 2002; Zheng *et al.*, 2004).

La provincia de Misiones se localiza en el sector sudoccidental de la Gran Cuenca Sedimentaria del Paraná, y corresponde al Planalto Meridional del Brasil, región Alto Paraná-Alto Uruguay. Desde el punto de vista fitogeográfico, se ubica el Dominio Amazónico y forma parte de las Selvas subtropicales (SAGyP & INTA, 1990). El elemento dominante de la litología son las coladas de basalto y la alteración dominante es del tipo laterítico. Desde el punto de vista taxonómico predominan los Alfisoles (31,6%), los Ultisoles (24,8%) y los Oxisoles (3,1%) (SAGyP & INTA, 1990).

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar los cambios que se producen en las formas inorgánicas y orgánicas del P por el agregado de este elemento en Alfisoles, Ultisoles y Oxisoles. La aplicación de fertilizante: i) afecta las fracciones más lábiles en el corto plazo, ii) a través del tiempo el fósforo pasa a formas más recalcitrantes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestras de suelo y tratamientos de fósforo

Se tomaron muestras de suelo de epipedones de tres órdenes representativos de la provincia de Misiones correspondientes a los órdenes: Se ubicaron tres Kandiualfes Ródicos y un Kandiualf Mólico, tres Kandihumultes Típicos, dos Eutrudoxes Ródicos y un Hapludox Húmico de la provincia de Misiones, entre los 27°-28° S y 55°-58° O. En todos los casos se encontraban bajo vegetación herbácea, y se realizaron los análisis correspondientes de caracterización comprendiendo: textura, método de Bouyoucos (Fortsythe, 1975), carbono orgánico, método de Walkley-Black (Jackson, 1964); pH en extracto acuoso relación 1:2,5; acidez y aluminio intercambiables con CLK, cationes intercambiables, con acetato de amonio (Page *et al.*, 1982), características presentadas en la Tabla 1.

Las muestras una vez secadas y tamizadas por tamiz de 2 mm se uniformizaron para obtener así cantidades suficientes de cada subgrupo de suelo que se sometió al ensayo de agregado de P (6 en total).

Para cada muestra se realizaron tres tratamientos de P con tres repeticiones: 1) sin agregado de P (**P0**), 2) Con el agregado de P suficiente para alcanzar una concentración equivalente a la mitad de la concentración máxima (**P1**) y 3) la concentración máxima (**P2**) determinada a partir de las isothermas de sorción, mediante el método de Fox y Kamprath (Kuo, 1996), calculando la cantidad de P necesaria para alcan-

Tabla 1. Características de los suelos en estudio.
Table 1. Main characteristics of the studied soils.

	pH	Ca	Mg	H	Al	CO	Arena	Limo	Arcilla
		cmol kg ⁻¹					%		
ALFISOLES	4,82	4,37	0,94	3,93	2,95	0,91	16,2	12,3	71,5
ULTISOLES	4,61	3,00	0,58	6,33	5,35	1,44	12,7	16,0	71,3
OXISOLES	4,81	4,56	0,71	3,69	2,91	1,13	10,4	12,9	76,8

zar una concentración de 0,2 ug de P en la solución del suelo. Las dosis agregadas fueron:

Gran grupo suelo	P0	P1	P2
	mg P L ⁻¹ solución		
Kandiudalf Ródico	0	205,5	501,0
Kandiudalf Mólico	0	48,5	97,0
Kandiumult Típico	0	55,0	110,0
Kadiumult Típico	0	55,0	110,0
Eutrudox Ródico	0	99,0	198,0
Hapludox Húmico	0	139,0	278,0

El P fue agregado como KH₂PO₄ disuelto en la cantidad de agua necesaria para llevar las muestras de suelo a una humedad equivalente a la capacidad de campo (Montenegro González *et al.*, 1990) calculada por el método de la centrífuga y gravimetría, siguiendo el control de la humedad según variaciones de peso.

Se tomaron muestras de los P0 para determinar las fracciones en estado original (Or) y luego junto a las dosis P1 y P2 se procedió a incubar a temperaturas de 28-30 °C, manteniéndose la humedad inicial y aireándolos ocasionalmente por un período de 21 días, a fin de estabilizar las muestras (Es).

Análisis de laboratorio

En ese momento (inicial, 0 días) y a partir de allí a los 30, 60, 90, 120, 240 y 360 días se extrajeron muestras para el análisis de fracciones de P siguiendo el método de Hedley (1982) modificado por Sattell & Morris (1992). Los análisis se realizaron por duplicado (0,5 g con suelo tamizado por malla de 0,25 mm) según se detalla en la Tabla 2.

Los extractos de NaHCO₃ 0,5M, NaOH 0,1M y NaOH 0,1M+ultrasonido fueron analizados para P total (cada fracción fue digerida con persulfato de amonio en medio ácido, U.S. Environmental Protection Agency, 1986) en los cuales previamente se hicieron las determinaciones de Pi. El P orgánico fue calculado como diferencia entre el Pt y el Pi.

El contenido de P en todos los extractos fue determinado por el método de Murphy-Riley (Kuo, 1996).

Método estadístico

Los datos fueron sometidos al análisis de variancia de medidas repetidas. Las mediciones realizadas a través del tiempo sobre una misma unidad experimental (parcela), tienden a estar correlacionadas. El análisis de medidas repetidas a través del tiempo es un análisis de tipo multivariado (considerando múltiple a una misma variable medida en varias fechas).

Table 2. Procedimiento y fracciones de P según la extracción secuencial de Hedley modificado por Sattell & Morris (1992).

Table 2. Hedley modified by Sattell & Morris (1992) sequential P fraction procedure and P fraction designations.

Reactivos	Procedimiento	Denominación	Fracción determinada
30 mL NaHCO ₃ 0,5 M pH 8,5	Agitar 16 hs	Pi-NaHCO ₃ Po-NaHCO ₃	P lábil inorgánico P lábil orgánico
30 mL NaOH 0,1 M	Agitar 16 hs	Pi-NaOH Po-NaOH	Pi ligado al Fe y Po ligado a la MO
20mL NaOH 0,1 M, ultrasonido y agregar 10mL NaOH 0,1M	2 min ultrasonido a 75 W, agitar 16 hs	Pi-NaOHus Po-NaOHus	Pi en microagregados Po en microagregados
30 mL HCl 1,0 M	Agitar 16hs, calentar 5 min a 70 °C	Pi-HCl	P ligado al Ca
5mL HCl conc., add 10 mL HCl conc. agregar 5mL H ₂ O después de 1h	Calentar 5 min	Pi-res	P inorgánico residual
10 mL HCl conc. + 5 mL H ₂ O ₂ 30%	Calentar a 70 °C por 4hs	Po-res	P orgánico residual

El modelo propuesto incluye los siguientes factores: suelos (3 niveles: Alfisol, Ultisol, Oxisol), tratamientos (3 niveles: P0, P1, P2), tiempo (7 fechas: 0, 30, 60, 90, 120, 240, 360 días); con las interacciones dobles y el error experimental para todas las variables.

Se pueden distinguir entonces, diferentes pruebas de hipótesis, las referidas a una misma unidad analizada a través del tiempo (dentro de sujetos), otras se analizan entre unidades (entre sujetos) y otras pruebas sobre las interacciones entre factores (SAS, 1994).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

P - NaHCO₃

Luego del mantenimiento de los suelos a humedad equivalente durante 21 días, se pudo observar que en el tratamiento sin agregado de P (P0) hubo un incremento en la fracción Pi-NaHCO₃, Pi-NaOH y Po-NaOHus para los tres órdenes, como consecuencia de la activación de la mineralización de la fracción Po-NaHCO₃, y posiblemente a disoluciones de formas más resistentes por la alternancia de secado-humedecimiento (Fig. 1). La mayor disminución se produjo a partir del Po-NaHCO₃ y en las fracciones residuales. Es reconocido que la biomasa microbiana puede tomar P como resultado de la adición de MO, o en respuesta a cambios fisiológicos causados por las fluctuaciones de humedad u otras perturbancias (Zoysa *et al.*, 1999). Hedley *et al.* (1982) observaron que los niveles de P cambiaban significativamente durante la incubación de los suelos, independientemente del agregado de C o P. Oberson *et al.*

(2001) sugirieron que la mineralización del Po contribuiría significativamente al P agregado (PA) en sistemas pastoriles de bajos insumos en Oxisoles.

El efecto del P agregado tuvo efecto positivo para la nutrición a través del tiempo ya que al aumentar las dosis se incrementaron los contenidos extractados para el Pi-NaHCO₃ (Fig. 2a). Estos resultados fueron corroborados por la prueba de criterios del análisis de la varianza para la variable Pi-NaHCO₃ (Tabla 3), que muestra la existencia de efecto significativo del factor tiempo sobre la unidad experimental (Pr < 0,001), como así también para la interacción de éste con los suelos (Pr = 0,005) y con los tratamientos (Pr = 0,001).

Esta diferencia fue mayor en los Alfisoles donde con el agregado de 250 mg P kg⁻¹ de suelo (P1) se pasó de 12 a 317 mg P kg⁻¹ y con 501 mg P kg⁻¹ (P2) a 522 mg P kg⁻¹. En los Ultisoles el incremento fue menos acentuado, pasándose de 13 a 25 y 166 mg P kg⁻¹ con la incorporación de 55 y 110 mg P kg⁻¹, mientras que en los Oxisoles, con el agregado promedio de 119 y 238 mg P kg⁻¹ la variación fue de 13 a 60 y 170 mg P kg⁻¹ para los tratamientos P0, P1 y P2, respectivamente.

Friesen *et al.* (1997) analizando distintos sistemas de uso de un Oxisol, concluyeron que las fracciones Pi-NaHCO₃ y Pi-NaOH eran las más sensitivas al agregado de fertilizante. Resultados similares fueron registrados por Lilienfein *et al.* (1999) y Linquist *et al.* (1997a).

En los tres órdenes, las concentraciones alcanzadas en esta fracción, luego de un pequeño descenso a los 30 días, se mantuvieron hasta los 120 días, en que se inició una

Tabla 3. Análisis multivariado de varianza de medias repetidas.

Table 3. Multivariate Analysis of Variance (MANOVA) for repeated measures.

Efectos Variables	Entre Sujetos			Dentro de Sujetos				
	Tiempo	Tiempo* Suelo	Tiempo* Trat.	Suelo	Trat	Tiempo	Tiempo* Suelo	Tiempo* Trat.
Pi-NaHCO ₃	***	**	**	***	***			
Po-NaHCO ₃	***	ns	**	**	***	***	ns	**
Pi-NaHO	***	**	ns	***	***	***	***	ns
Po-NaHO	**	ns	ns	***	*	***	ns	ns
Pi-NaHOus	***	***	**	*	***	***	**	*
Po-NaHOus	***	***	*	**	ns	***	**	ns
Pi-HCl	***	***	**	***	***	***	**	**
Pi-residual	***	***	ns	***	*	***	**	ns
Po-residual	***	ns	ns	**	ns	***	***	ns

*, **, *** Prob ≤ 0,05; 0,01; 0,001

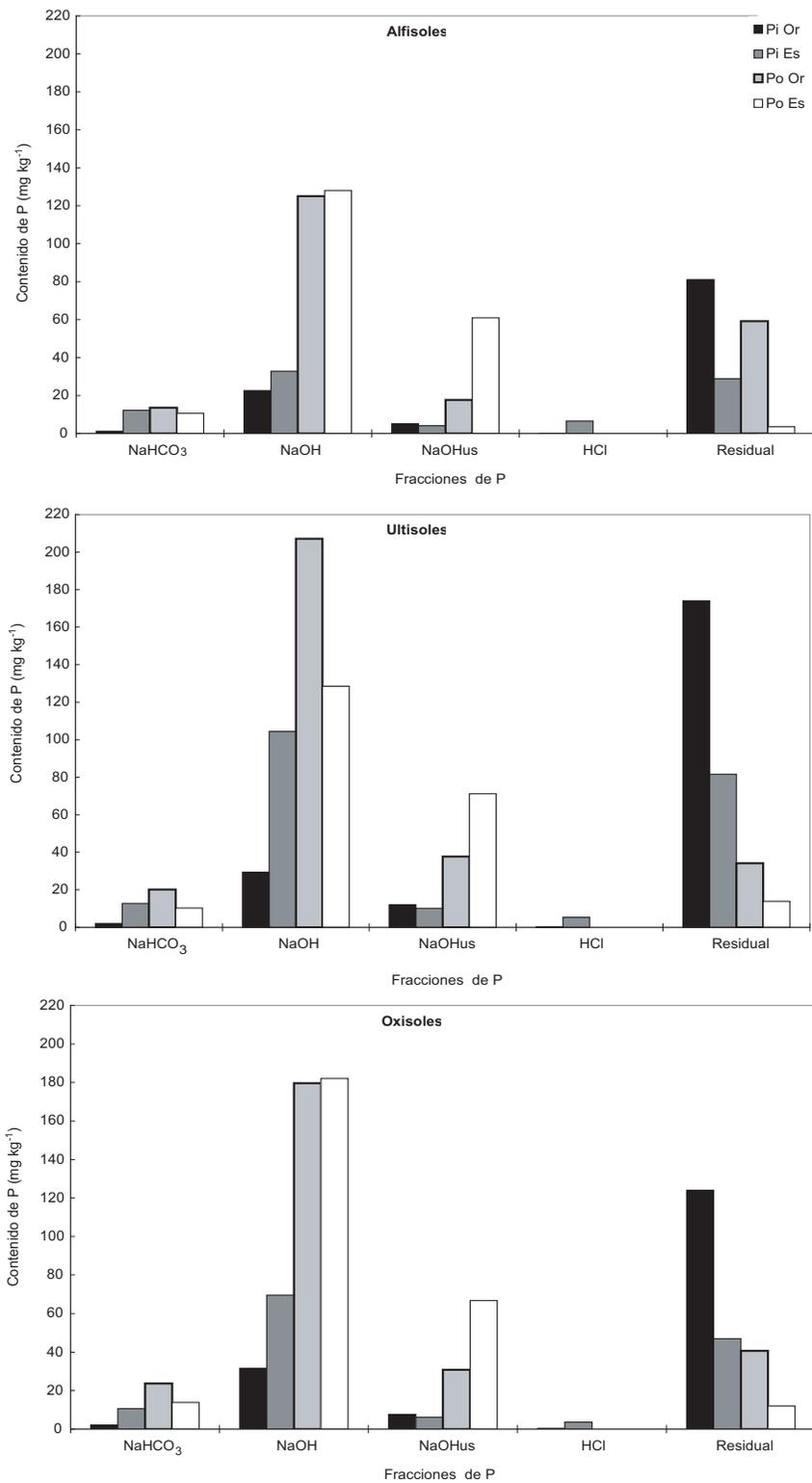


Figura 1. Contenido de P en cada fracción de muestras pre-incubadas (Or) y luego de Estabilizadas (Es) en el tratamiento testigo, valores medios (n=4).

Figure 1. Initial phosphorus (Or) and Stabilized (Es) phosphorus means concentration (n=4) in each fraction of the control treatment.

tendencia decreciente, pero con niveles de biodisponibilidad superiores a los iniciales (Fig. 2a). De esta manera se puede corroborar gráficamente que el P2 en todos los casos es significativamente superior, lo que complementa el análisis estadístico que presentaba la interacción significativa entre tratamiento por tiempo.

La fracción orgánica del NaHCO_3 disminuyó como consecuencia de la incubación (Fig. 2b). El aumento de la actividad biológica produce la mineralización del Po, la mayoría del cual es inmovilizado. Linnquist *et al.* (1997a) encontraron también disminución en el Po- NaHCO_3 en Ultisoles fertilizados en forma conjunta con el C orgánico y el N total.

En la Tabla 3 se puede observar que para el Po- NaHCO_3 existe efecto del tiempo sobre la experiencia con un $P > F < 0,001$, la interacción tiempo por suelo no fue significativa, sí en cambio, sobre los tratamientos al nivel de 0,001.

Se presentaron valores muy similares para los distintos tratamientos (Fig. 2b), manteniéndose constante hasta los 120 días en que comenzó a aumentar hasta el final de la experiencia, coincidiendo con el momento en que se iniciaba la disminución del Pi- NaHCO_3 (Fig. 2a). En esta fracción se observó una estabilidad relativa, sugiriendo que el Pi- NaOH actuó como «pools» transitorios más que como reservorio o fuente (Zheng *et al.*, 2002).

P -NaOH

Luego del período de estabilización de las muestras se produjo un aumento del Pi- NaOH con respecto al original (Fig. 1), al igual que ocurriera con el Pi- NaHCO_3 . La función de la fracción Pi- NaOH puede ser explicada por la adsorción de Pi a través del intercambio de ligando con grupos hidroxilos, localizados sobre la superficie de los oxihidróxidos de Fe y Al, y por la desorción de P a partir de las superficies de (oxi) hidróxidos en la presencia de NaOH (Oberson *et al.*, 2001).

Hubo efecto de dosis presentándose, en los tres casos, los mayores valores en el tratamiento P2 (Fig. 2c). Como ocurriera en el Pi- NaHCO_3 los Alfisoles tuvieron la respuesta más acentuada. Sin embargo, en los Ultisoles y Oxisoles hubo un incremento mayor de P para P2 en relación al que se dio en Pi- NaHCO_3 . Esto quedó manifestado en las diferencias significativas que se presentaron entre los tratamientos (Tabla 3). El P proveniente del fertilizante iría principalmente a esta fracción a través de la formación de fosfatos amorfos de Fe y Al (Zheng *et al.*, 2002). Conclu-

siones similares fueron registradas por otros autores (Friesen *et al.*, 1997; Oberson *et al.*, 2001; Doberman *et al.*, 2002).

La prueba de criterios del análisis de la varianza para la variable Pi- NaOH (Tabla 3), muestra que existe efecto significativo del factor tiempo sobre la unidad experimental ($Pr < 0,001$), como así también efectos significativos para la interacción de éste con los suelos ($Pr = 0,06$).

Los cambios en el Pi- NaOH a través del tiempo fueron similares a los del Pi- NaHCO_3 (Fig. 2c) con una tendencia creciente hasta alrededor de los 120 días en que comenzó a disminuir, con valores a los 360 días iguales o inferiores a los iniciales. Schmidt *et al.* (1997) encontraron una relación estrecha entre el Pi- NaHCO_3 y el Pi- NaOH , cuando disminuía uno lo hacía el otro, pareciendo estar inherentemente conectados, tendiendo juntos a un equilibrio. Esto implicaría que la disminución del P de la solución debido a la absorción por la planta, sería compensada primero por el Pi- NaHCO_3 y posteriormente por la disminución del Pi- NaOH .

Luego del período de estabilización, no se observaron cambios significativos en la fracción orgánica en los Alfisoles y Oxisoles para el tratamiento P0. En los Ultisoles hubo una liberación de P a partir de esta fracción (Fig. 1). A los 30 días, sin embargo, las condiciones de incubación provocaron un aumento en el Po- NaOH en los tres órdenes, coincidiendo con lo encontrado por Hedley *et al.* (1982). No hubo efecto de las dosis aplicadas, encontrándose las concentraciones menores de Po- NaOH en P2 (Fig. 2d). Este exceso de P pudo haber suprimido la actividad de la fosforilasa y consecuentemente la mineralización del Po- NaOH .

En la Tabla 3 se puede observar que existe, para el Po- NaOH , efecto del tiempo sobre la experiencia con un $P > F < 0,003$, no siendo significativo sobre los suelos ni sobre los tratamientos.

En todos los casos se llegó a un mínimo a los 120 días, en que se inició un paulatino aumento retornando a valores similares a los iniciales al final de la experiencia (Fig. 2d). Oberson *et al.* (2001) usando P marcado en un Oxisol no obtuvieron disminución significativa en ninguna fracción de Po aunque el Po total tendía a disminuir. La ausencia de diferencias la atribuyeron a la alta variabilidad de los resultados donde el coeficiente de variación para el Po- NaHCO_3 promediaba entre el 13 y el 70% y para el Po- NaOH del 7 al 45%. Debido a que el Po es determinado por diferencia entre el P_T y el Pi (Satell & Morris, 1992).

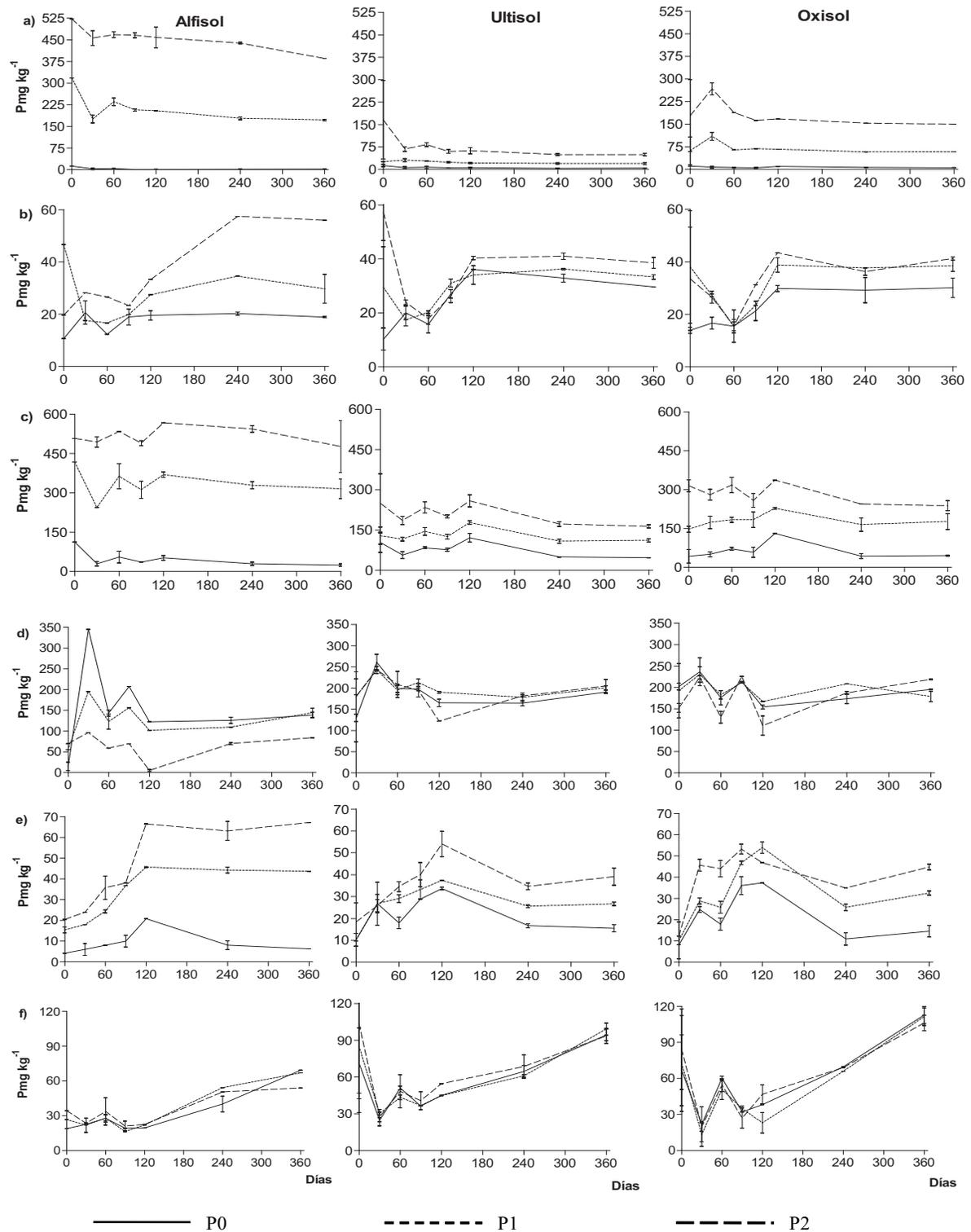


Figura 2. Fracciones de fósforo en suelos incubados con distintas dosis de fertilizante: a) Pi-NaHCO, b) Po-NaHCO, c) Pi-NaOH, d) Po-NaOH, e) Pi-NaOHus, f) Po-NaOHus (las barras indican desvío estándar).

Figure 2. Soil phosphorus fractions incubated with different fertilizer rates: a) NaHCO₃-Pi, b) NaHCO₃-Po, c) NaOH-Pi, d) NaOH-Po, e) Sonicate-Pi, f) Sonicate-Po (bars indicate one standard deviation from the mean).

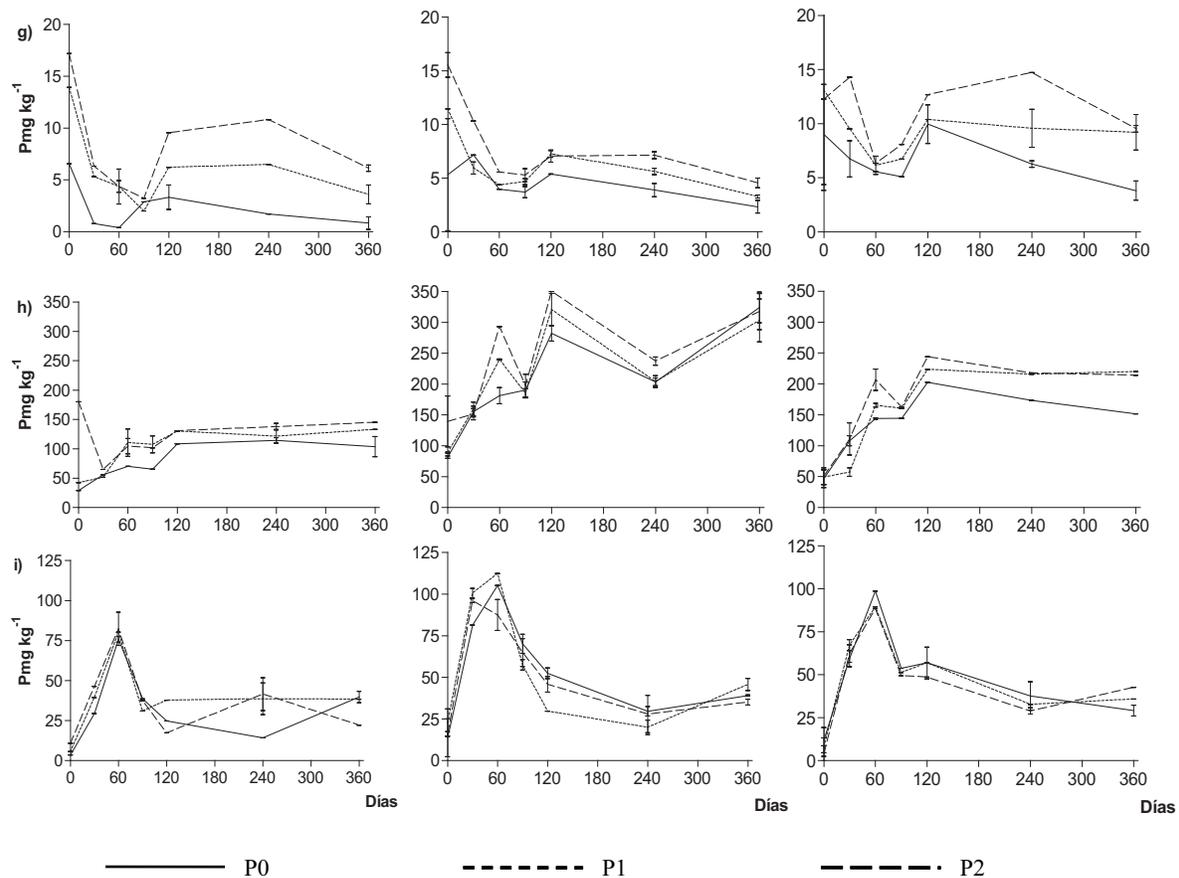


Figura 2. Fracciones de fósforo en suelos incubados con distintas dosis de fertilizante (Cont): g) Pi-HCl, h) Pi-residual, i) Po-residual.
Figure 2. Soil phosphorus fractions incubated with different fertilizer rates (Cont): g) HCl-Pi, h) Residual-Pi, i) Residual-Po.

P-NaOH ultrasonido

El Pi ocluido en los microagregados no presentó efecto del período de estabilización como puede observarse en la Figura 1.

La prueba de criterios del análisis de la varianza para la variable Pi-NaOHus (Tabla 3) muestra que existe efecto significativo del factor tiempo sobre la unidad experimental ($Pr < 0,001$), como así también efectos significativos para la interacción de éste con los suelos ($Pr = 0,001$) y con los tratamientos ($Pr < 0,06$). La respuesta a las dosis se comienza a manifestar, en forma más evidente, a partir de los 60 días (Fig. 2e) y con tendencia creciente hasta los 120 días en que alcanza su concentración máxima, comenzando a partir de ese momento, un paulatino descenso. A los 360 días, el contenido en P era superior al inicial en los tratamientos fertilizados.

Contrariamente al Pi-NaOHus, la fracción orgánica luego del período de estabilización, presentó un pico máximo en el momento inicial de la experiencia, como resultado de las condiciones de humedecimiento y secado al que fueron sometidas las muestras (Fig. 1). Hedley *et al.* (1982) atribuyeron la redistribución del P en los distintos reservorios a cambios químicos durante el humedecimiento en la incubación, y a partir del P del suelo a P microbiano, el que luego sería liberado por la muerte celular.

A los 30 días se produjo un brusco descenso del Po-NaOHus manteniéndose en valores similares hasta los 120 días, en que comenzó una tendencia creciente marcada alcanzando el máximo contenido a los 360 días de incubación (Fig. 2f). Estos cambios en la concentración de P coinciden con los cambios en las formas más lábiles, pero en sentido contrario, indicando el flujo de P desde estas frac-

ciones a las menos lábiles y resistentes. No hubo diferencias por el agregado de fertilizante por lo que se deduce que existe un efecto de incubación y que este aumento se da a partir del P presente en otras fracciones. Existe efecto del tiempo sobre la experiencia con un $P > F < 0,001$, sobre los suelos $P > F < 0,001$ y sobre los tratamientos $P > F < 0,02$ (Tabla 1).

P-ClH

El P-ClH es la fracción minoritaria en estos suelos de alto grado de meteorización, siendo la forma orgánica inexistente (Zoysa *et al.*, 1999). Los cambios en las concentraciones fueron pequeños, comparados con las que se dieron en las otras formas. Se produjo un pequeño aumento por la incubación y parte del P agregado fue determinado como P-ClH. A los 30 días hubo un descenso a los valores originales, principalmente en el Oxisol con poca diferencia entre los tratamientos (Fig. 2g).

En la Tabla 3 se puede observar que existe efecto del tiempo sobre la experiencia con un $P > F < 0,001$, sobre los suelos $P > F < 0,001$ y sobre los tratamientos $P > F = 0,05$. El efecto de las dosis comenzó a hacerse más evidentes a partir de los 90 días, con una tendencia creciente hasta los 120 días para Ultisoles y Oxisoles y 240 días para los Alfisoles. Buehler *et al.* (2002) encontraron que la proporción de P marcado hallado en HCl aumentaba significativamente con el tiempo de incubación, distinto a lo manifestado por otros autores (Guo & Yost, 1998; Neufeld *et al.*, 2000). Al final de la experiencia las concentraciones de P-HCl tendían a la situación original.

Pi-residual

Esta fracción es originalmente la más abundante en los suelos en estudio; suelos muy meteorizados incrementan las fracciones residuales y principalmente la de Pi (Fernández López *et al.*, 2002, Boschetti *et al.*, 2003). Luego del período de estabilización se produjo un marcado descenso del Pi-residual (Fig. 1). El aumento que presentaron las otras fracciones ocurrió principalmente a partir de la disolución de las formas inorgánicas resistentes. A través del tiempo se da una tendencia creciente, alcanzando los valores máximos a los 360 días (Fig. 2h). Los valores mayores corresponden a la dosis máxima aplicada.

El P proveniente del fertilizante, que al principio de la experiencia se ubicaba en las fracciones más lábiles, con el correr del tiempo pasó a formas más resistentes por

procesos biológicos y geoquímicos corroborando lo encontrado por otros autores (Zhang & Mackenzie, 1997; Zheng *et al.*, 2002). Linqvist *et al.* (1997a) recuperaron casi el 40% del fertilizante agregado en las fracciones residuales, un año después de la aplicación. Lilienfein *et al.* (2000) hallaron concentraciones más elevadas de P-residual en sistemas fertilizados comparadas con las condiciones naturales, en Oxisoles del Cerrado brasileño. Solomon *et al.* (2002) observaron aumentos en el Pi-residual debido a aplicaciones de fertilizantes en años anteriores, atribuyéndolos a las reacciones de fijación de P a través del tiempo. Las transformaciones del P-fertilizante en P-residual son dependientes de las condiciones climáticas, de las propiedades del suelo y de la historia de fertilización (Zhang *et al.*, 2004). De la aplicación de las pruebas de criterio del MANOVA para el Pi-residual se puede observar que existe efecto del tiempo sobre la experiencia con un $P > F < 0,001$, sobre los suelos $P > F < 0,001$ pero no sobre los tratamientos (Tabla 3).

Po-residual

De la misma manera que ocurriera con la fracción residual inorgánica el Po residual disminuyó en la etapa de estabilización (Fig. 2i), a pesar de ser considerado parte del humus y ácido húmico. La disminución del mismo sugeriría que el Po de esta fracción es menos estable y sujeto a la mineralización.

En los tres suelos la concentración de P aumentaba llegando a contenidos máximos a los 60 días (Fig. 2i), sin manifestar diferencias por dosis (Tabla 3). La estimulación de la actividad bacteriana produciría una lenta acumulación del P residual (Hedley *et al.*, 1982). A partir de ese momento en los tres suelos se produjo un brusco descenso, llegando después de los 360 días a valores similares a los originales. En la Tabla 1 se puede observar que sólo existe efecto del tiempo sobre la experiencia con un $P > F < 0,001$.

CONCLUSIONES

Las condiciones de incubación, con fluctuaciones en las condiciones de humedad, provocan cambios en la actividad microbiana y en los procesos físico-químicos del suelo. Como consecuencia de los mismos hubo un incremento en las fracciones Pi-NaHCO₃, Pi-NaOH y Po-NaOH_{us} para los tres órdenes, a partir de la disminución, principalmente del Po-NaHCO₃ y de las fracciones

residuales. Estos resultados enfatizan la importancia de fracción orgánica de renovación rápida como fuente de P para las plantas, y la necesidad de considerarla dentro del índice de disponibilidad en suelos ácidos de trópicos y subtropicos.

El fertilizante agregado en los primeros 120 días, incrementa las fracciones inorgánicas lábiles y moderadamente lábiles (Pi-NaHCO₃ y Pi-NaOH). A partir de los 60 días el Pi-NaOH comienza a manifestar el efecto de las distintas dosis de P, alcanzando su máximo valor a los 120 días, pasando a partir de ese momento a ser fuente del elemento agregado. El P proveniente del fertilizante, que al principio de la experiencia se ubica en las fracciones más lábiles, con el correr del tiempo pasa a formas más resistentes, alcanzando los valores máximos a los 360 días.

AGRADECIMIENTO

A la SGCyT Universidad Nacional del Nordeste, PI N° 710.

BIBLIOGRAFÍA

- Bedford, BL; MR Walbridge & A. Aldous. 1999. Patterns in nutrient availability and plant diversity of temperate North American wetlands. *Ecology* 80: 2151-2169.
- Boschetti, NG; M CE Quintero; RA Benavidez & L Giuffre. 2003. Cuantificación de las fracciones orgánicas e inorgánicas de fósforo en suelos de la Mesopotamia Argentina. *Ciencia del Suelo* 21: 1-8.
- Buehler, S; A Oberson; IM Rao; DK Friesen & E Frossard. 2002. Sequential phosphorus extraction of a ³³P-labeled Oxisol under contrasting agricultural systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 868-877.
- Daroub, SH; BG Ellis & GP Robertson. 2001. Effect of cropping and low-chemical input systems on soil phosphorus fractions. *Soil Sci.* 166: 281-291.
- Dobermann, A; T George & N Thevs. 2002. Phosphorus fertilizer effects on soil phosphorus pools in acid upland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 652-660.
- Fernández López, C; S Vázquez & HC Dalurzo. 2002. Formas de fósforo en suelos altamente meteorizados del sur de la provincia de Misiones. *Ciencia del Suelo* 20: 81-87.
- Forsythe, W. 1975. Física de Suelos. Manual de Laboratorio. Editorial IICA. San José, Costa Rica. 212 pp.
- Friesen, DK; IM Rao; RJ Thomas; A Oberson & JI Sanz. 1997. Phosphorus acquisition and cycling in crop and pasture systems in low fertility tropical soils. *Plant and Soil* 196: 289-294.
- Guo, F & RS Yost. 1998. Partitioning soil phosphorus into three discrete pools of differing availability. *Soil Sci.* 163: 822-833.
- Hedley, MJ; TJWB Stewart & B Chauhan. 1982. Changes in inorganic and organic phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 970-976.
- Jackson, ML. 1964. Análisis químicos de los suelos. 2° Edición. Ed. Omega S.A., Barcelona. 666 p.
- Kellogg, LE & SD Bridgham. 2003. Phosphorus retention and movement across an ombrotrophic-minerotrophic peatland gradient. *Biogeochemistry* 63: 299-315.
- Kuo, S. 1996. Phosphorus. In: Sparks DL *et al.* (ed.) *Methods of soil Analysis. Part 3 Chemical methods*, Book Series N° 5, ASA and SSSA, Madison, WI. : 869-919.
- Lilienfein, J; W Wilcke; H Neufeldt; MAM Ayarza & W Zech. 1999. Sustainable land management for the Oxisols of the Latin American savannas. Chapter 14. Series: CIAT publications, 312 pág.
- Lilienfein, J; W Wilcke; MAM Ayarza; L Vilela; SM Lima & W Zech. 2000. Chemical fractionation of phosphorus, sulphur, and molybdenum in Brazilian savannah Oxisols under different land use. *Geoderma* 96: 31-46.
- Linquist, BA; PW Singleton & KG Cassman. 1997a. Inorganic and organic phosphorus dynamics during a build-up and decline of available phosphorus in a Ultisol. *Soil Sci.* 162: 254-264.
- Linquis, TBA; PW Singleton; RS Yost & KG Cassman. 1997b. Aggregate size effects on sorption and release of phosphorus in a Ultisol. *Soil Sci Soc. Am. J.* 61: 160-166.
- Montenegro González, H; D Malagón Castro & L Guerrero. 1990. Propiedades Físicas de los Suelos. Subdirección Agrológica. I.G.A.C. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). Bogotá, Colombia. 813 p.
- Neufeldt, H; JE Da Silva; MA Ayarza & W Zech. 2000. Land-use effects on phosphorus fractions in Cerrado Oxisols. *Biol. Fertil. Soils* 31: 30-37.
- Oberson, A; DK Friesen; IM Rao; S Bühler & E Frossard. 2001. Phosphorus transformation in an Oxisol under contrasting land-use. Phosphorus systems: the role of the soil microbial biomass. *Plant Soil* 237: 197-210.
- Page, AL; RH Miller & DR Keeney. 1982. Methods of soil analysis. Part 2, Chemical and microbiological properties. Second edition. Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wisconsin, USA.
- SAGyP and INTA. 1990. Proyecto PNUD ARG. 85/019. Atlas de Suelos de la República Argentina. Tomo II., 677 p.
- Sánchez, PA. 1981. Suelos del trópico. Características y manejo. 634 p. Traducido al español: Edilberto Camacho. IICA, San José, Costa Rica.
- SAS Institute. 1994. SAS STAT user's guide. Version 6, 1686p 4th ed. Vol. 1 SAS Inst., Cary, North Carolina, USA.
- Sattell, R & R Morris. 1992. Phosphorus Fractions and Availability in Sri Lankan Alfisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1510-1515.
- Schmidt, JP; SW Buol & EJ Kamprath. 1997. Soil phosphorus dynamics during seventeen years of continuous cultivation: a method to estimate long-term P availability. *Geoderma* 78: 59-70.

- Solomon, D; J Lehmann; T Mamo; F Fritzsche & W Zech. 2002. Phosphorus forms and dynamics as influenced by land use changes in the sub-humid Ethiopian highlands. *Geoderma* 105:21-48.
- Tiessen, H. 2003. Ciclado y disponibilidad de fósforo: manejando procesos y cantidades. Simposio «El fósforo en la Agricultura Argentina». Rosario. Argentina.
- Tiessen, H; P Chacon & E Cuevas. 1994. Phosphorus and nitrogen status in soils and vegetation along a toposequence of dystrophic rainforests on the upper Rio Negro. *Oecologia* 99: 145-150.
- Trasar Cepeda, MC & T Carballas. 1991. Liming and the phosphatase activity and mineralization of phosphorus in acid soil. *Soil Biol. Biochem.* 23: 209-215.
- Walbridge, MR. 1991. Phosphorus availability in acid organic soils of the lower North Carolina coastal plain. *Ecology* 72: 2083-2100.
- Zhang, TQ & AF Mackenzie. 1997. Changes of soil phosphorus fractions under long-term corn monoculture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 485-493.
- Zhang, TQ; AF Mackenzie; BC Liang & CF Drury. 2004. Soil test phosphorus fractions with long-term phosphorus addition and depletion. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 519-528.
- Zheng, Z; RR Simard; J Lafond & LE Parent. 2002. Pathways of soil phosphorus transformation after 8 years of cultivation under contrasting cropping practices. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 999-1007.
- Zheng, Z; JA Macleod; JB Sanderson & J Lafond. 2004. Soil phosphorus dynamics after ten annual applications of mineral fertilizers and liquid dairy manure: fractionation and path analyses. *Soil Sci.* 169: 449-456.
- Zoysa, AKN; P Loganathan & MJ Hedley. 1999. Phosphorus utilisation efficiency and depletion of phosphate fractions in the rhizosphere of three tea (*Camellia sinensis* L.) clones. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 53: 189-201