

SOLUBILIZACION INICIAL DE LA ROCA FOSFORICA EN ULTISOLES DE COSTA RICA¹

Luis E. Brenes *
Elemer Bornemisza **

ABSTRACT

Initial solubilization of phosphate rock in Ultisols of Costa Rica. Simple and rapid laboratory methods are needed to study the process and classify the soils in relation to the use of phosphate rock (PR). This soil incubation experiment examined in which forms the P from applied PR remains in an Ultisol. The importance of some soil properties in this process was explored. Four Ultisols from Costa Rica (air dried and passed through a 2 mm sieve) were incubated with increasing rates (0 to 1200 mg P/kg) of North Carolina PR (0.18 mm) for 15 days at 25% soil humidity. Samples were extracted, dried at 40°C, ground to pass a 0.18 mm sieve, and their inorganic P fractions were determined in accordance to Olsen and Sommers. The fractions determined were Fe-P and Al-P, sorbed P, P occluded in Fe oxides and Ca-P (non dissolved PR). Separately, organic P was determined with Bowman's method. A high dissolution of the PR (44-91%) was observed, which decreased linearly with increasing P rate. This dissolution represents approximately one half to almost all of the applied P and few experiments report so high rates of dissolution in such short a time. This dissolved P from the PR increased all P fractions in the soil, particularly the Fe-P and Al-P fraction, which increased from 21.5 to 55% of inorganic P. PR applications in excess of 600 mg P/kg did not result in important increases in this form from applied P. Organic P decreased on incubation with PR (on the average from 9 to 30 mg P/kg). The tendency was somewhat erratic and it is believed that additional work is needed on this problem. The Bowman method needs calibration under tropical conditions. The studied soils were significantly different, but no soil property was identified as having a significant effect on solubilization, considering pH, Ca, Al, solution P content or exchangeable acidity. It is believed that the incubation method is adequate for preliminary studies in PR transformations considering its practical use. It is suggested to study a larger group of Costa Rican soils to identify and preclassify soils adequate for longer period studies on PR use. A fraction of 11.4% (probably Al-P) wasn't extracted by the method. It's discussed along with its implications.

INTRODUCCION

Gran parte de los suelos de Costa Rica son deficientes en P; un 74% de los mismos contienen menos de 10 ug/ml en solución (Bertsch, 1986) y requieren altas inversiones en aplicaciones de fertilizantes. El uso de la roca fosfórica (RF) como fuente más barata, aunque de uso más restringido

1/ Recibido para publicación el 18 de febrero de 1991.
* Parte de la tesis de Ing. Agr. presentada por Luis E. Brenes Ingianna ante la Escuela de Fitotecnia, Facultad de Agronomía, Universidad de Costa Rica.
** Centro de Investigaciones Agronómicas, Facultad de Agronomía, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

y menos efectivo a corto plazo, es una alternativa de importancia que ha sido estudiada desde hace mucho. Sin embargo, los resultados obtenidos hasta el momento son insuficientes y muy variables: son muchos los factores propios del suelo y del cultivo que aún no se comprenden bien y afectan las respuestas a las aplicaciones de RF.

En Costa Rica, Ramírez (1980) demostró en invernadero la alta Efectividad Agronómica Relativa (EAR) de varias RF en 4 suelos ácidos del país al compararlas con el triple superfosfato (TSF).

Algunas de las propiedades del suelo que más afectan la respuesta de los cultivos a aplicaciones de RF son el pH, el P en solución, los contenidos de Ca, Fe y Al, la capacidad de fijación de P, y las fracciones sólidas de P. Todos estos factores afectan la respuesta dado que de ellos depende la solubilización -factor clave y esencial al considerar la aplicación directa de RF-, fijación y liberación del P presente en la roca (Hammond, 1978; Reinhorn y Hagin, 1978; Stangel, 1978). Es claro que estas propiedades varían con los tipos de suelo y se podría intentar clasificar los mismos de acuerdo a sus posibilidades de ser considerados como aptos para la aplicación de RF.

Fenster y León (1978) consideran que los suelos altamente ácidos y con deficiencias de P, típicos de la mayoría de las tierras que han sufrido procesos de prolongada meteorización, son los más necesitados de enmiendas fosfóricas y son los que presentan mejores condiciones para la solubilización de la RF y un buen potencial para su uso agronómico en cultivos perennes.

Se ha sugerido que la aplicación de RF tiene más posibilidades en agricultura no intensiva donde no se obtienen rendimientos máximos. Los cultivos perennes de suelos tropicales ácidos y bajos en P son los que mejor provecho podrían obtener de la aplicación directa de RF.

Con base en las observaciones anteriores se estimó que los Ultisoles son los suelos del país

que podrían ser más aptos para los estudios iniciales con RF. Su pH bajo facilita la disolución de la RF (Fenster y León, 1978), sus bajos contenidos de Ca disminuyen el efecto del ión común (Chien, 1978), la reducida concentración del P en solución facilita la liberación del P de la RF (Kasawneh y Sample, 1978) y su capacidad de fijación de P no es tan alta como en los Andisoles. Además, su potencial agrícola cobra importancia como suelos aptos para cultivos extensivos dadas sus excelentes características físicas y topográficas (Stangel, 1978).

Dada la alta inversión en tiempo, recursos humanos y económicos, así como la necesidad de respuesta a corto plazo por los costos cada día más altos de las fuentes de P de alta solubilidad, es necesario dirigir la investigación del uso de la RF a objetivos muy específicos centrándose sólo en aquellos aspectos que muestran potencial. A nivel de laboratorio se pueden realizar incubaciones de suelo con dosis crecientes de RF y luego fraccionar el P. Esto permitiría observar las transformaciones que sufre la RF así como la influencia de ciertos parámetros edafológicos en el mismo.

Por lo tanto, los objetivos que este trabajo persigue con la incubación de Ultisoles con roca fosfórica en laboratorio son: estudiar las posibles formas en que se convierte la RF al ser aplicada al suelo y relacionar las formas anteriores con algunas propiedades edafológicas del suelo para determinar su interacción.

MATERIALES Y METODOS

Suelos y tratamientos

Se utilizaron 4 Ultisoles de Costa Rica cuyas características fisicoquímicas se presentan en los Cuadros 1 y 2. Los suelos fueron secados al aire, molidos y pasados por una malla de 2 mm.

Cuadro 1. Características físicas de los suelos estudiados.

Localidad	Clasificación*	Textura**			Nombre textural
		% Arena	% Limo	% Arcilla	
Buenos Aires, La Piñera	Ustoxic Haplumult	17,0	20,75	62,25	arcilloso
Los Chiles, Pérez Zeledón	Typic Haplustult	63,5	19,25	17,25	franco arenoso
Bri-Brí (carretera de acceso)	Rhodic Paleudult	12,2	34,5	53,3	arcilloso
San Rafael Norte, Pérez Zeledón	Typic Rhodudult	12,7	21,2	66,1	arcilloso

* Colectados y clasificados por Cabalceta y Molina.

** Método de Bouyoucos (Briceño y Pacheco, 1984).

Cuadro 2. Características químicas de los suelos estudiados¹.

Localidad	pH ² H ₂ O	P Olsen P Bray I		Ca	Mg	K	Acidez	Fe	Mn	Zn	Cu	M.O. %
		mg/kg										
Buenos Aires	5,6	11	5	1,1	0,15	0,09	0,1	39	9	2	2	2,96
Los Chiles	5,0	18	14	1,4	0,45	0,18	0,7	220	9	11	11	7,63
Bri-Brí	4,8	20	40	5,8	1,40	0,88	4,1	1160	18	12	7	9,11
San Rafael Norte	5,4	10	9	2,3	1,20	0,31	1,3	221	62	8	23	7,47

1. Briceño y Pacheco (1984).
2. 1:10.
3. KCl 1 N.
4. Olsen modificado (incluido K).

La roca utilizada fue la de Carolina del Norte, proporcionada por el IFDC con un 29,6% de P₂O₅ y 49,5% de CaO. El material fue pasado por malla de 0,18 mm.

En beakers de 250 ml se mezclaron 150 g de suelo con 0, 300, 600, 900, y 1200 mg/kg de P. Las muestras fueron humedecidas con 50 ml de H₂O, y bien homogenizadas para permitir la formación de agregados y una buena aireación. Los beakers se taparon con papel parafilm, se introdujeron en bolsas plásticas transparentes y se dejaron incubando a temperatura ambiente por 15 días.

Las muestras ya incubadas se secaron en estufa a 40°C por 48 horas. Luego, 10 g fueron molidos y pasados por una malla de 0,18 mm (80 mesh) para practicarles los siguientes análisis: P total en HClO₄, P orgánico según Bowman (1989); y un fraccionamiento del P mineral, según la metodología de Olsen y Sommers (1982) para determinar las fracciones inorgánicas: P-Fe+Al, P-Ca, P ocluido y P sorbido por carbonatos libres.

Análisis estadístico

Además del análisis de variancia, se efectuó una prueba de Tukey para separar el efecto de los suelos. En los casos necesarios, las diferencias debidas a la aplicación de RF se evaluaron por correlación y regresión.

RESULTADOS Y DISCUSION

El Cuadro 3 muestra los valores promedio de las 4 fracciones minerales y las 2 orgánicas de P. El P disuelto es aquel liberado por la RF, que se calculó restando al P aplicado como RF el cambio observado en la fracción de P-Ca.

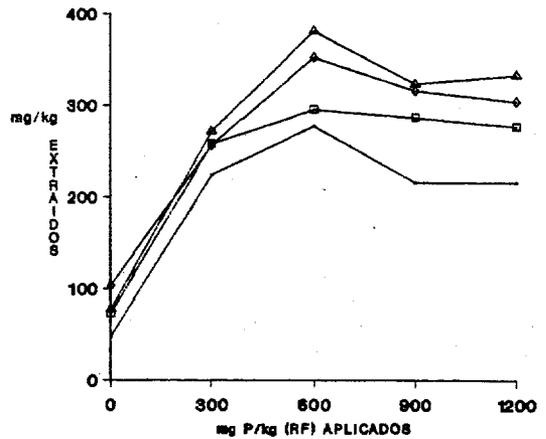
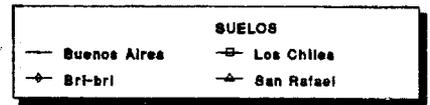


Fig. 1. Fe - P + Al - P en cuatro Ultisoles incubados con roca fosfórica.

Fosfatos de hierro y aluminio

En la Figura 1 se muestra el comportamiento de la fracción extraída con NaOH + NaCl (0,1M + 1M) representante de los P-Fe+Al. Hasta 600 mg P/kg aplicados el aumento fue considerable (más del triple); luego, la cantidad se mantuvo muy constante. Los 4 suelos mostraron comportamientos aparentemente similares pero en distinta magnitud, siendo Buenos Aires el de menor aumento. Este suelo presentaba los menores niveles iniciales de P-Fe+Al, la acidez intercambiable y el nivel de hierro más bajo, y el mayor pH (Cuadro 2), condiciones de las que depende la fracción de P-Fe+Al.

Cuadro 3. Fracciones de P en cuatro Ultisoles de Costa Rica incubados por 15 días con dosis crecientes de roca fosfórica de Carolina del Norte. (promedio de cuatro repeticiones).

Suelo dosis mgP/kg	Fraccionamiento				Total Mineral mgP/kg suelo	Orgánico		Total Org.	Total Min+Org	Total HClO ₄	Disolución ¹
	A	B	C	D		Acido	Básico				
Buenos Aires											
0	47 c ²	10 bc	47 c	16 d	120 e	53 a	44 a	97 a	216 e	479 e	0 d
300	224 b	6 c	131 bc	50 d	411 d	96 a	30 ab	126 a	537 d	745 d	267 c
600	277 a	20 abc	128 bc	206 c	631 c	86 a	15 bc	101 a	731 c	1087 c	410 b
900	216 bc	26 ab	138 b	358 b	739 b	64 a	30 ab	94 a	832 b	1285 b	558 a
1200	216 bc	37 a	162 a	687 a	1103 a	85 a	9 c	94 a	1196 a	1528 a	529 a
Los Chiles											
0	72 c	27 b	35 d	9 d	143 e	145 a	67 a	212 a	356 e	619 e	0 e
300	257 b	29 b	99 c	40 d	425 d	153 a	33 c	186 a	611 d	811 d	270 d
600	295 a	34 b	139 b	151 c	618 c	135 a	30 c	165 a	783 c	1245 c	459 b
900	286 ab	63 a	146 b	500 b	994 b	171 a	49 b	221 a	1215 b	1702 b	409 c
1200	276 ab	64 a	165 a	614 a	1119 a	185 a	22 c	206 a	1325 a	1734 b	596 a
Bri-Brí											
0	103 d	38 d	30 c	21 e	191 e	107 b	96 a	203 ab	393 e	499 e	0 e
300	256 c	60 c	115 d	83 d	514 d	96 b	50 c	146 b	660 d	745 d	237 d
600	352 a	52 cd	140 c	222 c	765 c	136 ab	57 bc	193 ab	958 c	1145 c	399 c
900	316 b	95 b	166 b	454 b	1031 b	113 b	69 b	182 ab	1212 b	1394 b	467 b
1200	304 b	115 a	208 a	672 a	1300 a	191 a	46 c	237 a	1537 a	1567 a	548 a
San Rafael											
0	77 d	46 bc	113 e	37 d	272 e	176 ab	122 a	298 a	570 e	794 e	0 d
300	271 c	25 d	226 d	65 d	587 d	90 b	46 c	136 c	723 d	1056 d	272 c
600	381 a	35 cd	256 c	177 c	849 c	44 b	56 c	101 c	950 c	1396 c	459 b
900	323 b	58 ab	277 b	364 b	1022 b	165 ab	95 b	260 ab	1282 b	1755 b	572 a
1200	333 b	69 a	307 a	640 a	1349 a	190 a	46 c	236 b	1584 a	1742 b	597 a

A= P-Fe+Al

B= P sorbido

C= P ocluido por óxidos de Fe

D= P-Ca

¹ RF aplicada - (P-Ca tratamiento - P-Ca testigo)² las letras agrupan en el sentido del factor "RF aplicada" según el ANAVA y la prueba de Tukey

Se podría pensar que esta fracción crecerá en la medida en que existan cationes reactivo suficientes para remover los productos de la disolución (Hughes y Gilkes, 1986; Barnes y Kamprath, 1975). A pesar de no haberse medido el pH ni el Ca intercambiable después de la incubación, es muy probable que ambos hayan aumentado (dado el alto % de disolución), y esto afectara negativamente la fracción de Fe y Al. De hecho, el suelo más alto en Fe (Bri-Brí) es el segundo más alto en esta fracción. Su alto contenido de materia orgánica (9,11%) y bajo pH (4,8) lo hacen ideal para disolver la RF y transformarla en P-Fe+Al (Novais y Ribeiro, 1982).

Debe considerarse que el procedimiento empleado no incluye el NH₄F por lo que la extracción de P-Al podría no haber sido completa.

P sorbido

La Figura 2 representa la fracción sorbida durante la primera extracción con citrato, bicarbonato y cloruro de sodio. Se observa una tendencia a aumentar 2 ó 3 veces el valor inicial. Los suelos de Los Chiles y San Rafael mostraron valores similares; mientras que los de Buenos Aires y Bri-Brí presentaron los valores menores y mayores, respectivamente. Es poco probable que esta fracción represente el P sorbido por carbonatos (como

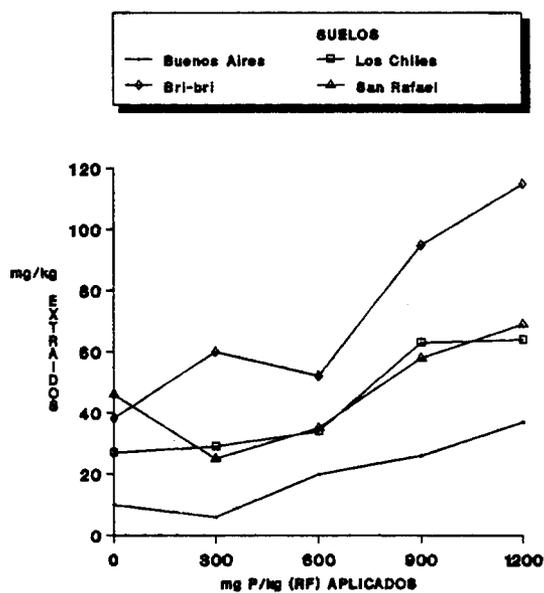


Fig. 2. P sorbido en cuatro Ultisoles incubados con roca fosfórica.

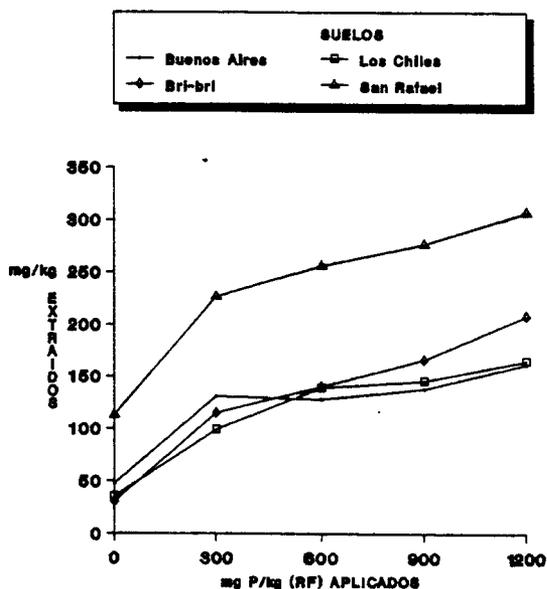


Fig. 3. P occluido en cuatro Ultisoles incubados con roca fosfórica.

lo propone la metodología) ya que los Ultisoles carecen de los mismos. Sin embargo, el suelo de Bri-brí presenta los valores menos bajos de Ca intercambiable y de P sorbido inicial, lo que hace pensar que el Ca reacciona con el NaOH durante la primera extracción para formar $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Según Mackay *et al.* (1986), este hidróxido de Ca sorbe P liberado por la RF.

En el suelo de Buenos Aires, donde la fracción fue muy pequeña, el contenido de Ca y el P extraído con NaOH y NaCl inicialmente fueron los más bajos de los 4 suelos.

Es interesante observar que esta fracción aumenta con la dosis; lo lógico es suponer que esta fracción es P liberado por la RF, extraído con NaOH y sorbido por $\text{Ca}(\text{OH})_2$, por lo tanto, su cantidad dependería de la primera fracción y debería mostrar su mismo comportamiento, el cual fue, disminuir su crecimiento con las dosis mayores. Quizás la razón de este comportamiento sea simple: si realmente esta fracción es P sorbido por $\text{Ca}(\text{OH})_2$, dependerá del Ca intercambiable. Al aumentar la dosis de RF, a pesar que la eficacia de la RF baja, los contenidos totales de Ca y P liberado aumentan, suponiendo una disolución que mantiene la relación estequiométrica P:Ca (Kanabo y Gilkes, 1987), por lo tanto, se dispone

de más Ca para reaccionar con el NaOH y sorber el P.

Es interesante anotar que el suelo de Buenos Aires, con más del 80% de arcilla y limo, fue el que menos P sorbió durante la extracción. Pareciera que en esta investigación la textura del suelo no tuvo el efecto que se podría haber supuesto. La explicación probable es que este suelo es caolínítico y, por lo tanto, caracterizado por una adsorción moderada. A pesar de lo anterior, ese suelo contenía la menor cantidad de limo (21%); que en algunos casos ha sido la fracción que mejor ha correlacionado con la disolución de RF (Novelino *et al.*, 1985; Hughes y Gilkes, 1986).

P occluido

El P occluido en óxidos de hierro (extraído con ditionito de sodio) mostró un comportamiento creciente, que aumenta casi 4 veces en forma lineal, lo que es aparentemente muy similar para todos los suelos y con un mayor incremento con la menor dosis de aplicación (300 mg P/kg). Esta fracción de P fue muy superior en magnitud en el suelo San Rafael (Figura 3). Sin embargo, a pesar de ser P occluido y/o precipitado por Fe, no mostró una relación con el Fe extraído en Olsen: el suelo

de Bri-brí presenta 5 veces más Fe que el suelo de San Rafael pero la fracción de P ocluida es la mitad de la de ese suelo (Cuadro 3).

Se podría pensar que los contenidos de arcilla son importantes en esta fracción. Sin embargo, el suelo Los Chiles es el único realmente diferente en contenidos de arcilla y su fracción de P ocluido no es muy diferente a la de los suelos de Buenos Aires y Bri-brí. Por el contrario, el suelo de San Rafael, con textura similar a la de Buenos Aires y Bri-brí, es muy superior en contenidos de P ocluido al compararse con esos suelos.

Tampoco es útil analizarlo en términos de formación de suelo y mineralización: el suelo de Bri-brí es el más desarrollado (Paleudult) pero un Rhodudult (San Rafael) mostró mayores contenidos de P ocluido.

En cuanto a procedimiento, la presencia de cantidades altas de Fe obligó a utilizar la menor alícuota posible en la determinación colorimétrica para obtener un buen desarrollo del color y minimizar la interferencia en la lectura. Se observó que alícuotas mayores de 10 ml daban una lectura menor. Williams *et al.* (1967) sugieren formas de corregir esta dificultad.

Fosfatos de calcio

La RF no disuelta se extrajo como P-Ca (en HCl 1N). Los 4 suelos mostraron valores muy similares con un aumento en la pendiente de la curva al incrementar la dosis de RF aplicada (Figura 4).

Estos resultados eran esperables; el P-Ca debía aumentar y cada vez debería aumentar más, ya que la eficacia en la disolución disminuye (Wilson y Ellis, 1984; Bolland y Barrow, 1988). Sin embargo, al observar los valores, se nota como no aumentó todo lo esperado debido a que el % de disolución fue muy alto.

A pesar de las diferencias en características químicas, los 4 suelos se comportaron en forma muy semejante.

La prueba de Tukey mostró diferencias significativas entre los suelos, sin embargo, es probable que esto se deba a la poca desviación entre las repeticiones (alta precisión), más que a comportamientos realmente diferentes, desde un punto de vista de manejo agronómico.

Fracciones orgánicas

En la Figura 5 se muestra el comportamiento del P orgánico soluble en ácido. El suelo

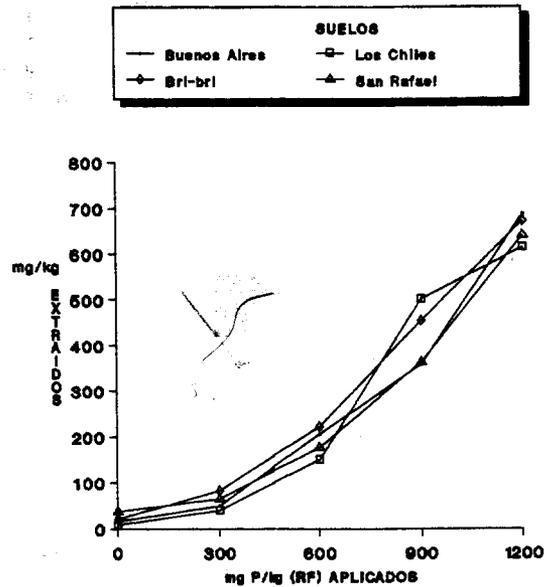


Fig. 4. Ca -P en cuatro Ultisoles incubados con roca fosfórica.

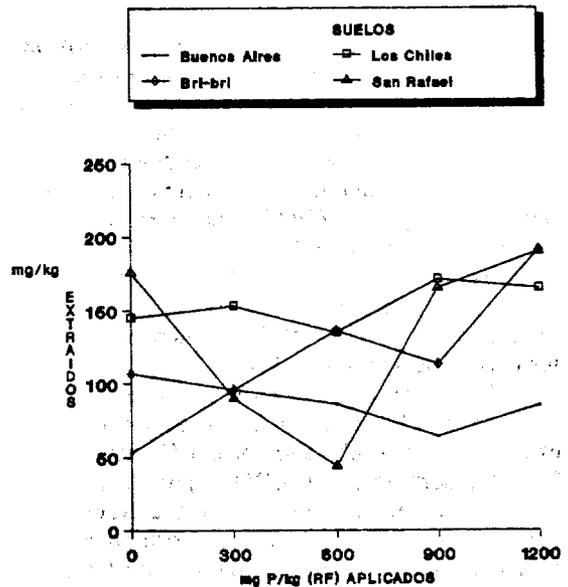


Fig. 5. P orgánico extraído en ácido en cuatro Ultisoles incubados con roca fosfórica.

Buenos Aires, el más bajo en materia orgánica (Cuadro 2), presenta los valores más bajos y el suelo Los Chiles los más altos (este es el segundo más alto en materia orgánica). Sin embargo, los comportamientos son poco definidos.

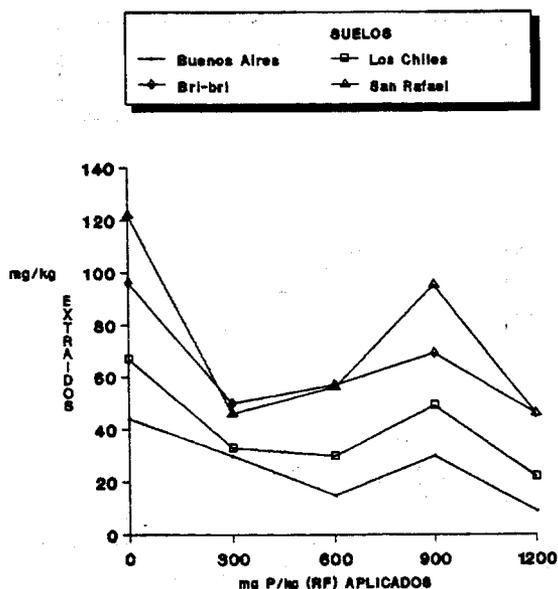


Fig. 6. P orgánico soluble en base en cuatro Ultisoles incubados con roca fosfórica.

El P orgánico soluble en base se mostró más estable en su comportamiento, ya que tendió a disminuir, en promedio, 2 ó 3 veces con la aplicación de RF (de 82 a 30 mg P/kg). Nuevamente el suelo de Buenos Aires presenta los valores más bajos (Figura 6); y es claro que posee los contenidos más bajos de materia orgánica (2,96%). Los demás suelos se consideran altos en sus contenidos. Debe recordarse que los contenidos altos de materia orgánica favorecen la disolución al proveer hidronios para protonar la RF y quelatar el Ca liberado (Hammond *et al.*, 1986; Hughes y Gilkes, 1986).

Podría esperarse un aumento del P orgánico debido a que la liberación de P mineral en Ultisoles bajos en P debería promover la inmovilización biológica del mismo (Lee *et al.*, 1987). Sin embargo, también podría sugerirse una disminución del P orgánico al ser mineralizada la materia orgánica por la actividad microbial que, al estar limitada por los bajos niveles de P, aumenta con el aporte de más P disponible producto de la disolución de la RF. Para que el P orgánico disminuya, la tasa de inmovilización del P mineral deberá ser menor a la tasa de mineralización del P orgánico (Vargas, R. 1991. Comunicación personal, CIA-UCR).

En realidad se requiere de más investigación para aclarar este asunto. Lo que sí es importante para efectos de la presente investigación, es tener en cuenta que el P orgánico se convirtió en una fuente más de P que hizo aumentar las fracciones minerales. Lo anterior complica un poco el análisis que se hizo para averiguar en que formas se transformó el P liberado por la RF, ya que hubo otra entrada al sistema. Afortunadamente, los cambios en el P orgánico soluble en base, no fueron mayores a 50 mg P/kg, que, comparado con las fracciones minerales, resulta bajo (Igue Fuentes y Bornemisza, 1971).

La metodología de Bowman incluye agregar H_2SO_4 al suelo contenido en un balón de 50 ml. La mezcla y homogenización no fueron sencillas y el tiempo de agitación para lograr un buen contacto del ácido con todo el suelo varió mucho. Esto debe ser revisado porque pudo influir en la extracción.

Disolución

El P liberado por la RF (RF disuelta), se puede calcular restando el cambio en el P-Ca del P-Ca aplicado (RF) (Chien *et al.*, 1987). En otras palabras, lo que no aparece como P-Ca es porque se disolvió y está presente en otras fracciones. La Figura 7 muestra esa disolución y se observa que no fue lineal: más pareciera seguir un comportamiento logarítmico, con una tendencia a disminuir en las dosis mayores, lo que concuerda con lo encontrado por otros autores. Anderson *et al.* (1985) observaron que el % de disolución disminuye al aumentar la dosis de 50 a 500 mg P/kg. Barnes y Kamprath (1975), al aumentar la dosis de 56 a 222 mg P/kg, observaron un decrecimiento gradual pero consistente en la eficacia de la RF.

Esto implica que el porcentaje de disolución disminuye con la dosis de RF aplicada. En la Figura 8, al correlacionar el % de disolución ante las diferentes dosis de RF aplicadas se observa claramente este comportamiento: el porcentaje de disolución disminuye linealmente con la dosis aplicada. La disolución de RF lograda en esos 14 días fue sorprendente: más del 90% para la dosis más baja y menos de 50% con 1200 mg P/kg aplicados, que aún se considera muy alto. Kanabo y Gilkes (1988) lograron sólo 15%, determinado por el dCa en solución, con 800 mg P/kg de RFCN. Novelino *et al.* (1985) del 6 al 17% con 218 mg P/kg de fosfato de Araxa incubados en

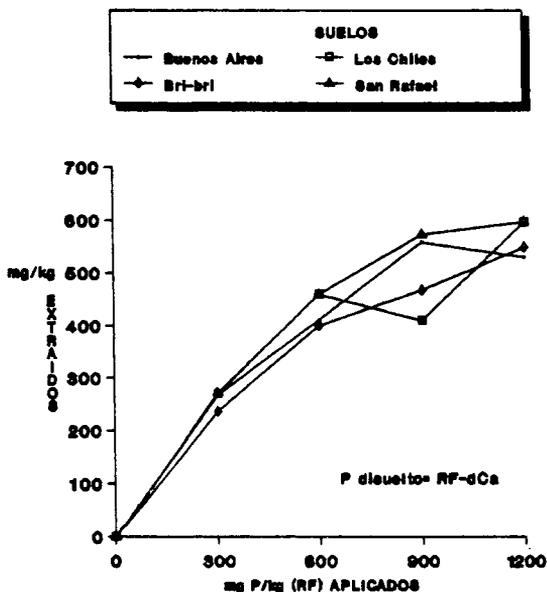


Fig. 7. P liberado por la RF en cuatro Ultisoles incubados con dosis crecientes.

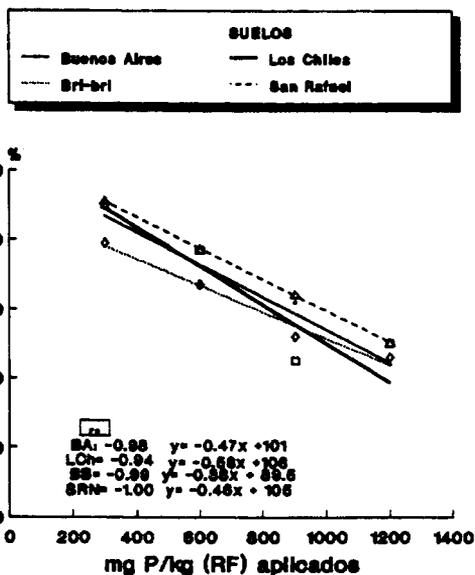


Fig. 8. Disolución de la RF (%) en cuatro Ultisoles incubados con dosis crecientes.

tubos de centrifuga en latosoles brasileños de muy bajo potencial agronómico.

Es evidente que los suelos utilizados favorecen esa disolución: presentan contenidos bajos de pH, P y Ca; y altos o medios de Fe, % de materia orgánica, acidez intercambiable y % saturación de acidez. También, la RFCN es una de las rocas más reactivas y que mejores resultados han dado en las investigaciones. Además, sólo se utilizó RF y suelo que pasaran por una malla de 80 mesh; y ambas fueron muy bien mezcladas e incubadas con una cantidad óptima de humedad. De cualquier manera, la disolución fue mayor que todo lo esperado y superior a muchos de los resultados de otros investigadores.

Los estudios de Kanabo y Gilkes (1987; 1988) muestran como la liberación de P empieza a decrecer hasta hacerse asintótica. En el presente trabajo no se llegó a ese punto: la curva de P liberado muestra una forma exponencial, más no se llega a la asintota. El % de disolución disminuye en forma lineal pero no llegó a hacerse 0. Para obtener una disolución 0, sería necesario, para cada suelo, las dosis (por extrapolación) de 2149, 1892, 2355 y 2272 mg P/kg, respectivamente. Sin embargo, eso sería disolución 0 para las 2 semanas de incubación, sabiendo

que con más tiempo se llegará a disolver gran parte de la RF.

Hay otros métodos de calcular el porcentaje de RF disuelta. Uno es el utilizado por Kanabo y Gilkes (1987; 1988) que determina el aumento en el Ca^{+2} , en solución y asume una disolución estequiométrica de la RF. Otra forma que se podría pensar, al tener disponible los valores del fraccionamiento del P, sería simplemente sumar los cambios en todas las fracciones menos la de P-Ca (P-Fe+Al, P-sorbido, P-ocluído, P-orgánico) asumiendo como única entrada de P al sistema el P-Ca proveniente de la RF. En este caso esto sería posible si la cantidad de RF aplicada fuese igual al aumento en el P extraído con HClO_4 (y al aumento en las fracciones minerales y orgánicas) respecto al suelo no tratado. Sin embargo, esto no es así. La suma de los cambios en las fracciones ($dP_{\text{min}} + dP_{\text{org}}$) es menor al aumento en el P- HClO_4 o total (dP_{t}) y aún menor a la RF aplicada. A esa diferencia se le llamará Fracción "X". Los datos calculados de esta manera se presentan en el Cuadro 4. Como se observa, si bien no es posible obtener conclusiones de tendencias de la Fracción "X" por suelo, o por dosis de RF, sí es posible decir que, en general, el método de digestión nítrico-perclórica

Cuadro 4. Fracción "X" en los cuatro Ultisoles incubados con roca fosfórica

Dosis	Suelo	RF - d (P _{HClO4}) mg/kg	d (P _{HClO4}) - d (P _{min + org}) mg/kg	RF - d (P _{min + org}) mg/kg
300	1	34	- 54	- 21
	2	109	- 64	45
	3	54	- 21	33
	4	38	109	147
600	1	- 8	93	85
	2	- 26	- 198	- 172
	3	- 46	81	- 35
	4	- 3	222	220
900	1	94	190	284
	2	- 182	223	43
	3	5	76	81
	4	- 61	- 249	188
1200	1	151	69	220
	2	85	146	231
	3	132	- 75	57
	4	252	- 67	185
promedio (mg/kg)		39.0	86.0	125.0
promedio (%)		- 5,2	- 11,4	- 16,6

extrajo un 94,8% del P teórico esperado, y el fraccionamiento un 89,6%.

En otras palabras, se puede estar en presencia de:

- una fracción X correspondiente al 11,4%
- un error en el fraccionamiento del 16,6%
- una combinación de ambas: errores normales en el fraccionamiento y una clara tendencia a no extraer muy bien una de las fracciones (muy probablemente P-Al). Por lo tanto, al ser muy posible que la fracción X no determinada corresponda a P producto de la disolución, no sería conveniente determinar la RF disuelta sumando las fracciones de P-Fe+Al, P-sorbido y P-ocluido porque la Fracción "X" engrosaría, con el P-Ca, el porcentaje de RF no disuelta. Parece más conveniente en este experimento considerar el aumento en la fracción de P-Ca como RF no disuelta (Chien *et al.*, 1987) y, de esta forma, incluir la Fracción "X" no determinada como producto de la disolución. El valor real estará entre los valores de estas 2 maneras de cálculo.

La forma en que esa disolución afecta la distribución del P en las distintas fracciones se analiza en la Figura 9. Se obtuvieron los porcentajes de cada fracción respecto a la suma de todas ellas (sin tomar en cuenta el P-Ca por ser la fuente) para observar la forma en que se distribuyó el P liberado. En los suelos sin tratar con RF, la fracción orgánica representa, en promedio, el 55%; lo

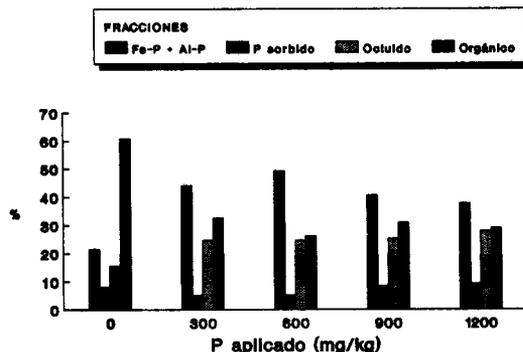


Fig. 9. Distribución del P en Ultisoles incubados con RF.

que se espera de acuerdo con lo encontrado por otros autores (Weaver *et al.*, 1975).

Al aplicar RF, es claro que las fracciones minerales serán las más afectadas. Dentro de ellas, la de P-Fe+Al es la que predomina (21,5%, en promedio) aumentando hasta llegar a ser más del 50% del total. El P orgánico disminuye a alrededor del 20% y las demás fracciones minerales aumentan un poco. Es importante recordar que estos valores son porcentajes y, por lo tanto, valores relativos que no expresan cantidades sino solamente su relación.

Un resultado metodológico importante fue que se presentaron 5 beakers malolientes, lo que podría sugerir anaerobiosis. Si así fuese, se debería utilizar un frasco de mayor volumen.

En términos generales se considera que la metodología utilizada permite obtener información valiosa, rápida y confiable sobre la disolución de la RF y las transformaciones del P liberado. Se considera como muy recomendable realizar estos análisis con el fin de preclasificar los suelos de acuerdo con su potencial de liberar, al menos en el corto plazo, el P de la RF; y así poder descartar aquellos con menores posibilidades de éxito y concentrar los esfuerzos y recursos de investigación en los que prometen mejores resultados.

RESUMEN

En esta investigación se presenta un experimento de incubación de suelo con Roca Fosfórica (RF) que estudia las formas en que ésta se transforma al ser aplicada al suelo, y la importancia de algunos factores propios del suelo en este proceso.

Se utiliza un método de laboratorio sencillo y rápido que permite estudiar este proceso y clasificar los suelos de acuerdo con su potencial para utilizar la RF.

Se incubaron en beakers cerrados 4 ultisoles de Costa Rica (molidos a 2 mm y secos al aire) con dosis crecientes (0 a 1200 mg P/kg) de RF de Carolina del Norte (0,18 mm) durante 14 días a 25% de humedad. Luego, a las muestras previamente secadas a 40°C y nuevamente molidas a 0,18 mm, se les fraccionó el P mineral por el método de Olsen y Sommers (1982) para determinar P-Fe+Al, P sorbido, P ocluido en óxidos de Fe, y P-Ca (RF no disuelta). También se analizó el P orgánico por el método de Bowman (1989).

En esos 14 días, se encontraron porcentajes de disolución de la RF muy altos, entre un 44% y un 91%, los cuales disminuyen en forma lineal al ser mayor la dosis de aplicación.

El P liberado por la RF disuelta incrementó todas las fracciones, pero en especial la que contenía P-Fe+Al que pasó de un 21,5% a un 55% del P mineral. Sin embargo, su crecimiento no fue lineal, como con las fracciones de P sorbido y ocluido, sino que tendió a una asíntota con dosis superiores a los 600 ug P/g aplicados.

Las fracciones orgánicas mostraron una aparente mineralización al ser incubadas con la RF (bajaron en promedio de 82 a 30 mg P/kg), pero el comportamiento es muy variable y no se pueden dar explicaciones muy sólidas sin más investigación. Es necesario calibrar el método de Bowman con suelos de Costa Rica.

Si bien el efecto de los suelos fue estadísticamente significativo, no se pudo separar ningún efecto claro de factores tales como pH, niveles de Ca, Al y P en solución, acidez intercambiable, etc. en la disolución de la RF, aunque sí se presentaron diferencias cuantitativas entre las fracciones de P de diferentes suelos.

El método se considera apropiado para estudiar en forma preliminar las transformaciones que sufre la RF al ser aplicada al suelo con miras a determinar su potencial para uso agronómico. Se recomienda ampliar el presente estudio a un mayor número de suelos para preclasificarlos e incluir ensayos a más largo plazo.

El fraccionamiento no extrajo una fracción de 11.4% del P aplicado. Se discute si la fracción de Al-P no es completamente extraída.

LITERATURA CITADA

- ANDERSON, P.L.; KUSSOW, W.R.; COREY, R.B. 1985. Phosphate rock dissolution in soil: indicators from plant growth studies. *Soil Science Soc. Am. J.* 49:918-925.
- BARNES, J.S.; KAMPRATH, E.J. 1975. Availability of North Carolina Phosphate Rock applied to soils. North Carolina Agricultural Experiment Station. Technical Bulletin no. 229. 23 p.
- BERTSCH, F. 1986. Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica. San José, Programa de Comunicación Agrícola, Oficina de Publicaciones, Universidad de Costa Rica. 75 p.
- BOLLAND, M.D.A.; BARROW, N.J. 1988. Effect of level of application on the relative effectiveness of rock phosphate. *Fertilizer Research* 15:181-192.
- BOWMAN, R.A. 1989. A sequential extraction procedure with concentrated sulfuric acid and dilute base for soil organic phosphorus. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 53:362-366.
- BRICEÑO, J.; PACHECO, R. 1984. Métodos analíticos para el estudio de suelos y plantas. San José, Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Agronómicas. 135 p.
- CHIEN, SH. 1978. Dissolution of phosphate rocks in solutions and soils. *In Seminar on Phosphate Rock for Direct Application.* Haifa, Israel, IFDC, March 20-23, 1978. p. 97-130.
- CHIEN, S.H.; HAMMOND, L.L.; LEON, L.A. 1987. Long-term reactions of phosphate rocks with an oxisol in Colombia. *Soil Science* 14(4):257-265
- FENSTER, W.; LEON, L. 1978. Utilization of phosphate rock in tropical soils of Latin America. *In Seminar on Phosphate Rock for Direct Application.* Haifa, Israel, IFDC, March 20-23, 1978. p. 174-211.
- HAMMOND, L. 1978. Agronomic measurements of phosphate rock effectiveness. *In Seminar on Phosphate Rock for Direct Application.* Haifa, Israel, IFDC, March 20-23, 1978. p. 147-174.
- HAMMOND, L.L.; CHIEN, S.H.; MOKWUNYE, A.U. 1986. Agronomic value of unacidulated and partially acidulated phosphate rocks indigenous to the tropics. *Advances in Agronomy* 40:89-140.
- HUGHES, J.C.; GILKES, R.J. 1986. The effect of soil properties and level of fertilizer application on the dissolution of Sechura rock phosphate in some soils from Brazil, Colombia, Australia and Nigeria. *Australian Journal of Soil Research* 24:219-227.
- IGUE, K.; FUENTES, R.; BORNEMISZA, E. 1971. Mineralización de P orgánico en suelos ácidos de Costa Rica. *Turrialba* 21:47-52.

- KANABO, I.A.K.; GILKES, R.J. 1988. The effects of moisture regime and incubation period on the dissolution of North Carolina phosphate rock in soil. *Australian Journal of Soil Research* 26:153-163.
- KANABO, I.A.K.; GILKES, R.J. 1987. The role of soil pH in the dissolution of phosphate rock fertilizers. *Fertilizer Research* 12:165-174.
- KHASAWNEH, F.; SAMPLE, E. 1978. Phosphorus concentration in soil solution as a factor affecting phosphate rock effectiveness. *In Seminar on Phosphate Rock for Direct Application*. Haifa, Israel, IFDC, March 20-23, 1978. p. 130-147.
- LEE, A. *et al.* 1987. Factors influencing dissolution of phosphate rock and oxidation of elemental sulphur in some New Zealand soils. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 30(3):373-385.
- MACKAY, A.D.; SYERS, J.K.; TILLMAN, R.W.; GREGG, P.E.H. 1986. A simple model to describe the dissolution of phosphate rock in soils. *Soil Science Society of America Journal* 50:291-296
- NOVAIS, R.F.; RIBEIRO, A.C. 1982. Efeito do pH e da concentração de alumínio em solução sobre a solubilização de apatita de Araxá. *Rev. Bras. Ciencia do Solo* 6:66-68.
- NOVELINO, J.O.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L.; COSTA, L.M.; BARROS, N.F. 1985. Solubilização de fosfato de Araxá em diferentes tempos de incubação, com amostras de cinco latossolos na presença e na ausência de calagem. *Rev. Bras. Ciencia do Solo* 9:13-22
- OLSEN, S.R.; SOMMERS, L.E. 1982. Phosphorus. *In Methods of Soil Analysis*. Ed. by A.L. Page. Agronomy no. 9. American Society of Agriculture.
- RAMIREZ, G. 1980. Uso de rocas fosfóricas como fuente de fósforo en algunos suelos ácidos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 4(1):33-39.
- REINHORN, T.; HAGIN, J. 1978. Reactions of a phosphate rock with soil. *In Seminar on Phosphate Rock for Direct Application*. Haifa, Israel, IFDC, March 20-23, 1978. p. 211-222.
- STANGEL, P. 1978. The IFDC phosphate program. *In Seminar on Phosphate Rock for Direct Application*. Haifa, Israel, IFDC, March 20-23, 1978. p. 3-36.
- WEAVER, R.M.; FOX, R.H.; DROSDOFF, M. 1975. Inorganic and organic phosphorus occurrence in some highly weathered soils of Puerto Rico. *Tropical Agriculture (Trinidad)* 52:119-129.
- WILLIAMS, J. D.H.; SYERS, J.K.; WALKER, T.W. 1967. Fractionation of soil inorganic phosphate by a modification of Chag and Jackson's procedure. *Soil Science Society of America Proceedings* 31:736-739.
- WILSON, M.; ELLIS, B.G. 1984. Influence of Ca solution activity and surface area on the solubility of selected rock phosphates. *Soil Science* 138:354-359.