

Potencial agronómico y eficiencia agronómica de tres rocas fosfóricas de diferente composición mineralógica

M. J. Pérez¹ y T. J. Smyth²

¹Recursos Agroecológicos, INIA-CENIAP, Apdo. Postal 4669, Maracay 2101-A, Aragua, Venezuela.

²Department of Soil Science, North Carolina State University, Raleigh, NC 27695-7619.

Resumen

Los objetivos de este trabajo fueron: (a) comparar el potencial agronómico (PA) de tres rocas fosfóricas (RFs) de diferente composición mineralógica usando tres extractantes químicos: citrato de amonio neutro (CAN), ácido fórmico (2%) (AF) y ácido cítrico (2%) (AC) y (b) estimar la eficiencia agronómica relativa (EAR) de estas tres RFs en un Ultisol deficiente en P y Ca. El experimento se llevo a cabo en cámara de crecimiento controlada a 30/26°C día/noche, 12/12 horas día/noche y 30% de humedad relativa, utilizando dos especies forrajeras (*Brachiaria decumbens* y *Stylosanthes guianensis*), dos niveles de pH del suelo (pH 4,9 original y encalado hasta pH 5,8 con MgCO₃) y cinco tratamiento de P, en combinación factorial, dispuestos en un diseño experimental de parcelas divididas con tres repeticiones. Los tratamientos de P consistieron en aplicar 50 mg.kg⁻¹ de P soluble en citrato de amonio neutro, de las rocas fosfóricas Monte Fresco (RFMF), Riecito (RFR) y Carolina del Norte (RFCN), fosfato monocalcico [Ca(H₂PO₄)₂] grado reactivo (SFT) como referencia de una fuente de P soluble y un testigo sin P. Se determinó peso seco aéreo y contenido de P en planta y pH, P-Olsen y Ca intercambiable en suelo. Los valores en porcentaje de P soluble en AC y AF permitieron clasificar a RFCN, RFR y RFMF como

rocas fosfóricas de alto (7,1% en AC y 8,7 en AF), medianamente alto (5,0% en AC y 5,2% en AF) y muy bajo PA (0,71% en AC y 1,0% en AF) respectivamente. Mientras que la solubilidad determinada en CAN colocaron a RFCN y RFR como rocas fosfóricas de alto PA (3,8 y 3,7% respectivamente) y a RFMF como de bajo PA (0,68%). La EAR de la RFR y RFCN fueron mayores con la leguminosa (*Stylosanthes*) que con la gramínea (*Brachiaria*). No hubo diferencia significativa en la EAR entre RFR (83,5% con *Brachiaria* y 95,2% con *Stylosanthes*) y RFCN (79,2 % con *Brachiaria* y 91,7% con *Stylosanthes*) en el suelo sin encalar. En el suelo encalado, la EAR de RFR disminuyó en 29,2% con *Brachiaria* (de 83,5 a 59,1%) y en 13,6% con *Stylosanthes* (de 95,2 a 82,3%), mientras que la EAR de la RFCN no fue significativamente afectada por el encalado. Estos resultados indican la necesidad de considerar el PA de las RFs para el cálculo de las dosis de P, el grado de acidez del suelo y la capacidad de extracción de P del cultivo.

Palabras clave: Potencial agronómico, eficiencia agronómica, rocas fosfóricas, especies forrajeras, P disponible.

Introducción

La calidad de las rocas fosfóricas (RFs) como fuente de P depende no sólo del contenido total de P, sino también de su reactividad o capacidad inherente a la misma para suplir P disponible para la planta en condiciones específicas establecidas y esta se determina principalmente por la solubilidad química de la RF, la cual será referida en este trabajo como el potencial agronómico (PA) de la RF. El PA de las RFs depende principalmente de las sustituciones isomórficas de carbonatos por fosfatos en el cristal del apatito. Un aumento en la sustitución isomórfica de carbonatos aumenta la disolución de los carbonato-fluorapatitas, al reducir el tamaño del cristal y aumentar el área superficial del mineral (1). Convencionalmente, el PA de las RFs se estima por la cantidad de P liberada en solución, usando diferentes soluciones extractantes, pues la determinación de sustitucio-

nes isomórficas de carbonatos en RFs es difícil de llevar a cabo en análisis de rutina. Entre los extractantes químicos más utilizados para determinar el PA de las RFs están: citrato de amonio neutro, ácido fórmico al 2% y ácido cítrico al 2% (2).

Por otro lado, la eficiencia agronómica relativa (EAR) se refiere al comportamiento real de una determinada RF bajo la influencia de su PA y las condiciones externas bajo la cual esta es usada, es decir que depende de sus características químicas y mineralógicas, así como de los factores de suelo, cultivo, clima y manejo (3). Con base a los resultados obtenidos en el Proyecto IFDC/CIAT sobre la evaluación agronómica de RFs de diferentes regiones del mundo (1, 4), Hammond *et al.* (1) propusieron un sistema de clasificación las RFs por su PAR en diferentes extractos químicos y EAR (1). En este trabajo, se

utilizó este sistema para clasificar el PA de las RFs en estudio.

En Venezuela existen varias reservas de RFs que pudieran ser utilizadas directamente en la agricultura ó en la producción de fertilizantes de P soluble. En este sentido, se han realizado numerosos estudios del PA (5, 6, 7) y la EAR de algunas de estas RFs en diferentes condiciones de suelo y cultivos (8, 9, 10, 11, 12, 13), sin embargo, en la mayoría de estos trabajos, no se tomó en cuenta el PA de las RFs para calcular las dosis de P a utilizar, por lo cual, las cantidades de P

soluble en los tratamientos fueron diferentes, colocando a las RFs en desventaja con respecto a las fuentes de P soluble, subestimando así la EAR de las RFs evaluadas. Los objetivos de este trabajo fueron: (a) determinar y comparar el PA de tres RFs de diferente composición mineralógica, usando tres extractantes químicos: citrato de amonio neutro, ácido fórmico (2%) y ácido cítrico (2%) y (b) estimar la EAR de estas tres RFs en un Ultisol deficiente en P y Ca, utilizando dos especies diferentes de pastos y dos niveles de pH del suelo.

Materiales y métodos

Caracterización de las rocas fosfóricas

Se utilizaron tres rocas fosfóricas (RF) de diferente composición mineralógica: Monte Fresco (RFMF) y Riecito (RFR) localizadas al Nor-Oeste de Venezuela (14) y Carolina del Norte (RFCN) localizada al Centro-Este de Estados Unidos, esta última conocida como una RF de alta reactividad (15). Se utilizaron muestras de RFs grado comercial, en las cuales más del 80% del material presentó tamaño de partículas entre 0,075 y 0,5 mm de diámetro. La extracción del P y Ca total en las RFs se realizó por incineración de 1g de RF a 500°C por mas de 8 horas, luego las cenizas fueron disueltas en 5mL de HCl concentrado y diluidas en agua destilada. El P soluble en citrato de amonio neutro de las RFs fue extraído siguiendo el protocolo de la AOAC (16). La extracción del P soluble en ácido fórmico (2%) y en ácido cítrico (2%) se realizó

mediante extracción por separado de 500 mg de RF con 50 mL de cada una de las soluciones y durante una hora de agitación. El P total y soluble en las RFs se determinó por espectrofotometría usando el método del complejo azul de molibdato (17) y el Ca se determinó por absorción atómica. Las características mineralógicas de las RFs (cuadro 1) fueron tomadas de la literatura (5, 18). La clasificación del PA de las RFs estudiadas, se realizó tomando en cuenta los rangos en porcentaje de P soluble en CAN, AF (2%) y AC (2%) y EAR, propuestos por Hammond *et al.* (1).

Tratamientos y Diseño Experimental

El experimento se realizó en una cámara de crecimiento controlada a 30/26°C día /noche, 12/12 horas luz / oscuridad y 30% humedad relativa. El experimento consistió en una combinación factorial de tratamientos de P, encalado y especies forrajeras, dis-

Cuadro 1. Composición química y mineralógica de las rocas fosfóricas (RF) usadas.

	Roca Fosfórica		
	Monte Fresco	Riecito	Carolina del Norte
P total (%)	9,3	12,8	13,2
Ca total (%)	29,1	24,8	30,1
% P Soluble en la roca fosfórica:			
Citrato de Amonio Neutro	0,68	3,7	3,8
Ácido cítrico (2%)	0,71	5,0	7,1
Ácido fórmico (2%)	1,0	5,2	8,7
Composición Mineralógica:			
Apatito (%)	64 [¶]	75 [¶]	91 [§]
CaCO ₃ (%)	29 [¶]	1 [¶]	3 [§]

[¶]Fayard and Truong (1990)

[§]McClellan and Gremillion (1980)

puestos en un diseño de parcelas divididas con tres repeticiones. Las especies forrajeras *Brachiaria decumbens* (gramínea) y *Stylosanthes guianensis* (leguminosa) representaron las parcelas principales y la combinación de cinco tratamientos de P y dos niveles de pH del suelo (pH 4,9 y pH 5,8) representaron las parcelas secundarias. Los tratamientos de P consistieron en aplicar 50 mg kg⁻¹ de P soluble en citrato de amonio neutro de la RFMF, RFR y RFCN, fosfato monocalcico [Ca(H₂PO₄)₂] grado reactivo (SFT) como referencia de una fuente de P completamente soluble, mas un control sin P. Los dos niveles de pH del suelo fueron: el pH original del suelo, 4,9 y encalado hasta pH 5,8 utilizando 0,15 cmol.kg⁻¹ de Mg como MgCO₃. Se utilizó un suelo arenoso clasificado como *Arenic Paleudults*, deficiente en P y Ca (4 mg.kg⁻¹ de P-Olsen y 0,14 cmol.kg⁻¹ de Ca intercam-

biale). Las semillas de *Stylosanthes* fueron inoculadas usando 4 mL/pote de una suspensión de inóculo específico para *Stylosanthes* (15g de inóculo para *Stylosanthes*/150 mL de agua destilada). Se aplicó fertilización básica a través de soluciones nutritivas tres veces a la semana. En las macetas con *Brachiaria*, la cantidad total de macronutrientes aplicados por pote durante el experimento, expresados en mg.kg⁻¹ de suelo fueron los siguientes: 160 de N, 330 de K, 88 de Mg y 150 de S como Mg(NO₃)₂, KNO₃, MgSO₄ y K₂SO₄; y la cantidad total de micronutrientes aplicados, expresados como µg kg⁻¹ de suelo fueron los siguientes: 54 de Mn como MnSO₄.H₂O, 4.0 de Cu como CuSO₄.5H₂O, 6.7 de B como H₃BO₃, 2.1 de Mo como NaMoO₄.2H₂O, 0.36 de Co como CoCl₂.6H₂O, 364 de Fe como FeCl₃.6H₂O, 197 de Na como Na₂H₂ EDTA y NaCl. Mientras que

en *Stylosanthes* se aplicaron: 250 de K, 52 de Mg y 170 de S como $MgSO_4$ y K_2SO_4 , y la cantidad total de micronutrientes aplicados, expresados como $\mu g\ kg^{-1}$ de suelo fueron los siguientes: 55.6 de Mn como $MnSO_4 \cdot H_2O$, 3.8 de Cu como $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, 6.9 de B como H_3BO_3 , 2.2 de Mo como $NaMoO_4 \cdot 2H_2O$, 0.37 de Co como $CoCl_2 \cdot 6H_2O$, 374.8 de Fe como $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ y 216 de Na como Na_2H_2EDTA y NaCl.

Las plantas fueron cosechadas a las ocho semanas después de la siembra y se determinó materia seca aérea y contenido de P y Ca en tejido, estos se determinaron luego de incinerar 1g de material vegetal seco y molido a 500°C por más de 8 horas, las cenizas fueron disueltas en solución de HNO_3 concentrado, 33% H_2O_2 y HCL 6N y diluidas en agua destilada para determinar P por espectrofotometría y Ca por plasma inductivamente acoplado (ICP). En suelo se determinó pH en una relación 1:2,5 suelo-agua, P disponible extraído con $NaHCO_3$ 0,5M (método Olsen) en una relación 1:20 suelo-so-

lución extractante y determinado por espectrofotometría utilizando el método del complejo azul de molibdato (17) y Ca intercambiable extraído con KCl 1M en una relación 1:10 suelo-solución extractante, con un periodo de agitación de 10 minutos y determinado por absorción atómica. La efectividad agronómica relativa (EAR) para cada RF se determinó como el porcentaje en rendimiento (peso seco aéreo) y P absorbido por la planta en los tratamientos con RF con relación al rendimiento o P absorbido por la planta en los tratamientos con P soluble (SFT) bajo las mismas condiciones de crecimiento, para los cálculos se utilizó la siguiente fórmula:

$$EAR = \frac{(\text{Rendimiento RF} - \text{Rendimiento Control})}{(\text{Rendimiento SFT} - \text{Rendimiento Control})} \times 100$$

Se realizó el análisis de varianza de los datos usando el programa para diseño de parcelas divididas del Sistema de Análisis Estadístico (19) y se realizaron pruebas de medias por la mínima diferencia significativa (MDS) cuando los valores de F resultaron significativos.

Resultados y discusión

Características y potencial agronómico de las rocas fosfóricas

En el cuadro 1, se muestran las principales características químicas, mineralógicas y solubilidad química de las RFs usadas en el experimento. Para clasificar las RFs estudiadas por su PA, se tomó en cuenta los rangos en porcentaje de P soluble en CAN, AF (2%) y AC (2%) y EAR, propues-

tos por Hammond *et al.* (1). Los valores en porcentaje de P soluble (% en peso de RF) en AC y AF permitieron clasificar a la RFCN como de alto PA (7,1% en AC y 8,7 en AF), RFR de medianamente alto PA (5,0% en AC y 5,2% en AF) y a la RFMF de muy bajo PA (0,71% en AC y 1,0% en AF). Mientras que cuando se determinó el porcentaje de P soluble en CAN, la RFCN y RFR clasificaron como rocas

fosfóricas de alto PA (3,8 y 3,7% respectivamente) y a la RFMF como de bajo PA (0,68%). En este sentido, Fayard y Truong (5) reportaron para la RFMF un contenido 10,3% de P total y 0,91% de P soluble en AF y para la RFR 12,7% de P total y 4,5% de P soluble en AF. Mientras que Truong y Zapata (2) reportaron para la RFR, 12,9% de P total, 1,6% de P soluble en CAN y 4,2% de P soluble en AC y en AF, donde los valores de P soluble en CAN, AC y AF resultaron ser menores que los reportados en el presente trabajo (cuadro 1).

Dado que la dosis de P utilizada en el experimento fue calculada con base al porcentaje de P soluble en CAN de cada RF (cuadro 1) y a que no hubo diferencias significativas en los valores promedios de peso seco aéreo y P absorbido entre los tratamientos con RFR y RFCN (cuadro 2), se puede decir que la RFR y RFCN presentan similar PA bajo las condiciones del presente trabajo.

Los valores en porcentaje del peso de apatito y CaCO_3 en las RFs estudiadas (cuadro 1) han sido reportados como: 64,0 y 29,0 respectivamente para la RFMF, 75,0 y 1,0 para la RFR (5) y 90,7 y 2,9 para la RFCN (18). Se puede observar, que la RFMF presenta los más altos valores de CaCO_3 y los más bajos valores de P soluble en cualquiera de los extractantes químicos utilizados, lo cual indica que a medida que aumenta el contenido de CaCO_3 en las RFs, disminuye su solubilidad. Esto se explica por el hecho que el CaCO_3 es más soluble que el apatito y su disolución aumenta la concentración de Ca y pH en la super-

ficie del apatito (20), disminuyendo así la disolución de la RF (21).

Producción de materia seca y absorción de P

Hubo diferencias significativas ($P < 0,05$) en materia seca aérea entre especies forrajeras, tratamientos de P y la interacción especies forrajeras y tratamientos de P. Los valores promedios de materia seca aérea de *B. decumbens* fueron el doble al de *S. guianensis*. En ambas especies, el peso seco aéreo promediado por tratamiento de encalado, aumentó con la solubilidad de la fuente de P, especialmente en *B. decumbens*, donde los mayores rendimientos se obtuvieron con el SFT. No hubo diferencias significativas en peso seco aéreo del *S. guianensis* entre los tratamientos con RFR, RFCN y SFT, mientras que el tratamiento con RFMF presentó valores de peso seco aéreo menores que el tratamiento control sin P en ambas especies forrajeras.

El encalado no tuvo efecto sobre el peso seco aéreo de las especies (cuadro 2). Sin embargo, hubo una reducción significativa (30%) en el peso seco aéreo de la *Brachiaria* (gramínea) con el tratamiento de encalado y la RFR (cuadro 2), mientras que éste mismo tratamiento redujo sólo en 6,5% del peso seco aéreo del *Stylosanthes* (leguminosa).

Estos resultados no se corresponden con los reportados en la literatura (1, 3, 22), donde se generaliza al señalar que el encalado disminuye la efectividad de las RFs como fertilizante directo. En el cuadro 2, se puede observar, que no hubo diferencia significativa en peso seco aéreo de la

Cuadro 2. Efecto de tratamientos de P y encalado sobre los valores promedios de materia seca aérea y P absorbido en *Brachiaria* y *Stylosanthes* y sobre el pH, P disponible y Ca intercambiable en suelo.

Tratamiento								
Especie	pH	P	Peso seco aéreo g/pote	P absorbido mg/pote	pH en H ₂ O 1:2,5	P disponible mg.kg ⁻¹	Ca interc. cmol.kg ⁻¹	
Brachiaria	4,9	Control	2,4	1,4	5,5	3,0	0,26	
		RFMF	1,7	0,8	7,4	2,3	1,47	
		RFR	21,0	20,7	5,5	10,2	0,64	
		RFCN	20,1	18,9	5,8	8,3	0,50	
		SFT	24,7	29,5	5,3	25,4	0,48	
	5,8	Control	1,6	0,8	6,1	2,1	0,27	
		RFMF	1,6	0,7	7,6	2,1	1,47	
		RFR	14,7	11,5	6,6	5,0	0,39	
		RFCN	19,5	15,5	6,3	4,6	0,62	
		SFT	23,7	31,7	5,7	24,2	0,51	
		Promedio	13,1	13,1	6,2	8,7	0,66	
Stylosanthes	4,9	Control	2,3	2,0	4,7	3,5	0,31	
		RFMF	1,0	0,8	7,3	2,4	1,32	
		RFR	9,2	19,7	4,4	17,2	0,90	
		RFCN	8,9	19,3	4,8	15,8	0,98	
		SFT	9,5	18,6	4,0	29,1	0,36	
	5,8	Control	3,1	2,8	4,7	3,3	0,25	
		RFMF	1,7	1,4	7,3	2,4	1,32	
		RFR	8,6	17,1	4,6	11,8	0,73	
		RFCN	9,4	20,3	4,7	14,8	0,78	
		SFT	9,8	20,7	4,1	32,7	0,49	
			Promedio	6,4	12,3	5,1	13,3	0,74
	Promedios por pH							
		4,9		10,1	13,2	5,5	11,7	0,72
		5,8		9,4	12,3	5,8	10,3	0,68
Promedio por Tratamientos de P								
Control	2,3	1,8	5,3	2,9	0,27			
		RFMF	1,5	0,9	7,4	2,30	1,40	
		RFR	13,4	17,2	5,3	11,10	0,66	
		RFCN	14,5	18,5	5,4	10,90	0,72	
		SFT	16,9	25,1	4,8	27,80	0,46	
MDS 0,05:								
Especie			0,8	NS [†]	0,1	0,97	NS	
pH			NS	NS	0,1	0,97	NS	
Especie x pH			NS	NS	0,1	NS	NS	
P			1,3	2,8	0,1	1,53	0,14	
P x Especie			1,9	4,0	0,2	2,30	0,19	
P x pH			1,9	NS	0,2	2,30	NS	
Especie x pH x P			NS	NS	NS	NS	NS	

[†]NS= Valores de F para efectos no significativos a P≤0,05

Brachiaria entre los tratamientos con RFR y RFCN en el suelo sin encalar (0,9 g/maceta), mientras que en el suelo encalado, la diferencia entre estas dos RFs fue altamente significativa (4,8 g/maceta). Con el *Stylosanthes*, no hubo diferencias significativas en peso seco aéreo entre la RFR y RFCN en el suelo con o sin encalar, lo cual está relacionado con los menores valores de pH del suelo con *Stylosanthes* en relación con *Brachiaria*, independientemente del tratamiento de encalado (cuadro 2). Esto indica que la RFR es más dependiente de la acidez del suelo que la RFCN y que la acidificación del suelo por efecto del *Stylosanthes* (leguminosa) contribuyó significativamente con la disolución y eficiencia de estas dos RFs.

El P absorbido por los cultivos fue significativamente afectado por los tratamientos de P (cuadro 2). El P absorbido por ambas especies, en los tratamientos con la RFMF (la RF de menor PA) fue similar al tratamiento control sin fósforo, e inferior que con las demás fuentes de P. No hubo diferencias significativas en el P absorbido por el *Stylosanthes* en los tratamientos con RFR, RFCN y SFT, mientras que en *Brachiaria*, la absorción de P fue mayor en los tratamientos con SFT que con las RFs. Esto indica que el *Stylosanthes* es mucho más eficiente en utilizar P de RFs que la *Brachiaria*, lo cual corresponde con los resultados reportados por Van Diest *et al.* (23) y Khasawneh y Sample (24) quienes señalan que las leguminosas tienen mayor capacidad para utilizar P de RFs que las gramíneas. En este

sentido, Marschner (25) señala que las leguminosas tienen mayor capacidad para utilizar RFs que las especies dependientes de N mineral, debido a que las primeras presentan mayor relación catión/anión, lo cual puede inducir a la planta a liberar H^+ a través de las raíces hacia la rizosfera y consecuentemente, promover la disolución de las RFs.

Eficiencia agronómica relativa de las rocas fosfóricas

La eficiencia agronómica relativa (EAR) provee un índice del rendimiento o la absorción de P del cultivo con las RFs evaluadas en relación con el SFT. Los valores de EAR calculados sobre la base del rendimiento ó a la absorción de P, se incrementaron con la solubilidad de las RFs para ambos cultivos (figuras 1 y 2). Los valores negativos de EAR en los tratamientos con RFMF reflejan que los rendimientos y la absorción de P con esta RF fueron menores que los obtenidos con el tratamiento control sin P.

Aunque el valor promedio total de materia seca aérea por tratamientos de P y encalado (cuadro 2) en *Brachiaria* fue el doble (13,1 g/maceta) del obtenido en *Stylosanthes* (6,4 g/maceta), no hubo diferencia significativa en los promedios totales del P absorbido entre especies (13,1 y 12,3 g/maceta en *Brachiaria* y *Stylosanthes* respectivamente). La EAR calculada con base al peso seco aéreo (figura 1a y 1b), disminuyó en 29,2% con el encalado para la RFR con *Brachiaria* y 13,6% con *Stylosanthes*, mientras que el encalado no afectó la EAR de la RFCN. La EAR calculada con base al P absorbido, disminu-

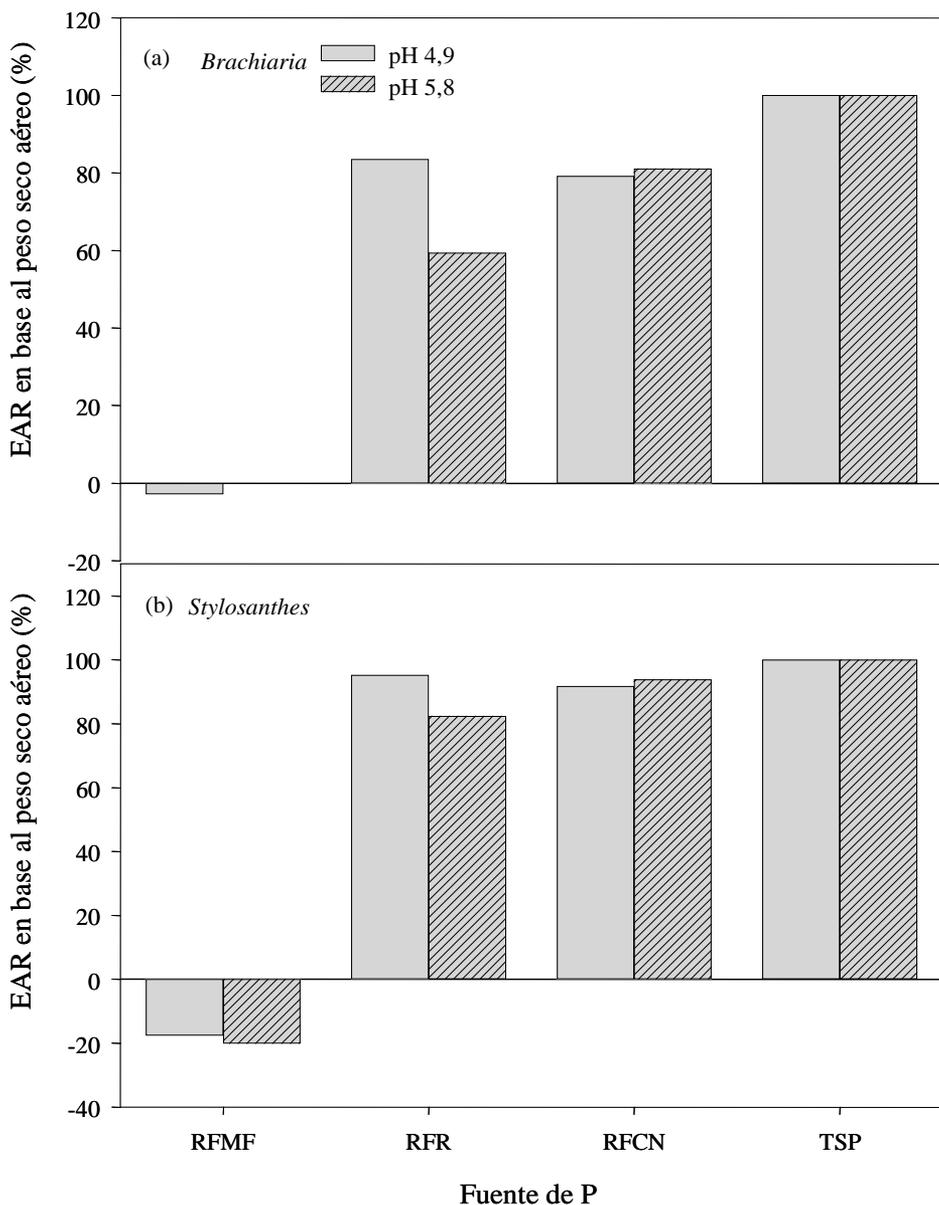


Figura 1. Efectividad agronómica relativa (EAR) de las rocas fosfóricas evaluadas en suelo encalado y sin encalar, calculada en base al peso seco aéreo de *Brachiaria* (a) y *Stylosanthes* (b). $EAR = [(RF - Control) / (SFT - Control)] \times 100$.

yó en 49,6% con el encalado para la RFR con *Brachiaria* y 25% con *Stylosanthes* (figuras 2a y 2b) y en 23,6 y 6,2% con *Brachiaria* y *Stylosanthes* respectivamente para la RFCN. Esto indica que la EAR de la RFR y RFCN es mayor con la leguminosa que con la gramínea y que aumentos del pH del suelo disminuyen drásticamente la efectividad de la RFR. Es importante notar, que la EAR calculada con base al P absorbido por la planta, parece detectar en mayor cuantía las diferencias en EAR de las RFs, que cuando ésta es calculada con base al peso seco aéreo.

Efecto de tratamientos sobre el pH, P disponible y Ca intercambiable en suelo

Hubo diferencias altamente significativas ($P < 0,05$) en el pH del suelo por efecto de la especie forrajera, encalado, tratamiento de P y sus interacciones (cuadro 2). Con la RFMF, los valores de pH del suelo aumentaron a 7,4 y 7,3 para *Brachiaria* y *Stylosanthes* respectivamente en tratamientos con encalado y a 7,6 - 7,3 respectivamente en tratamientos sin encalar. Los valores de pH de suelo en los tratamientos controles sin P para ambas especies con o sin encalar indican que el *Stylosanthes* acidificó el suelo, mientras que la *Brachiaria* lo aumentó. La razón del efecto de la planta sobre el pH del suelo, será discutida en mayor detalle en otra publicación.

La disponibilidad de P en suelo fue afectada por la especie forrajera, tratamientos de P, encalado y las interacciones de tratamiento de P con la especie y con el encalado (cuadro

2). Los tratamientos con RFMF presentaron los menores valores de P disponible en suelo para ambas especies, lo cual se corresponde con el bajo PA y EAR de esta RF, mientras que los valores mas altos en P disponible para ambas especies correspondió con la fuente de P soluble (SFT). Los valores promedios totales de P disponible en suelo en función de la fuente de P, indican que no hubo diferencia significativa entre RFR y RFCN, sin embargo la disponibilidad de P en suelo no encalado fue mayor para la RFR que para la RFCN con ambos cultivos. Esto corrobora que la EAR de la RFR es mayor que la RFCN en condiciones de suelos ácidos.

El Ca intercambiable en suelo fue influenciado por la fuente de P y la especie forrajera (cuadro 2). Debe mencionarse que no se aplicó Ca al suelo mas que aquel aportado por las fuentes de P utilizadas. Debido a que las fuentes de P utilizadas presentan diferentes contenidos de Ca (cuadro 1), las cantidades Ca aportadas (en mg.kg^{-1}) con la dosis de P aplicada (50 mg.kg^{-1} de P soluble) para cada fuente de P, fueron las siguientes: 1870 con la RFMF, 336 con la RFR, 408 con la RFCN y 32 con el SFT. Los valores relativamente altos de Ca intercambiable en suelo en los tratamientos con la RFMF para ambos cultivos, corresponden con el aumento en pH ($> 7,0$) y la baja disponibilidad de P en suelo en los tratamientos con esta RF. Esto se corresponde con lo señalado por Rajan et al. (20) y Bolan y Hedley (21) quienes indican que a medida que aumenta el contenido de CaCO_3 en la RF, disminuye su solubilidad, debido

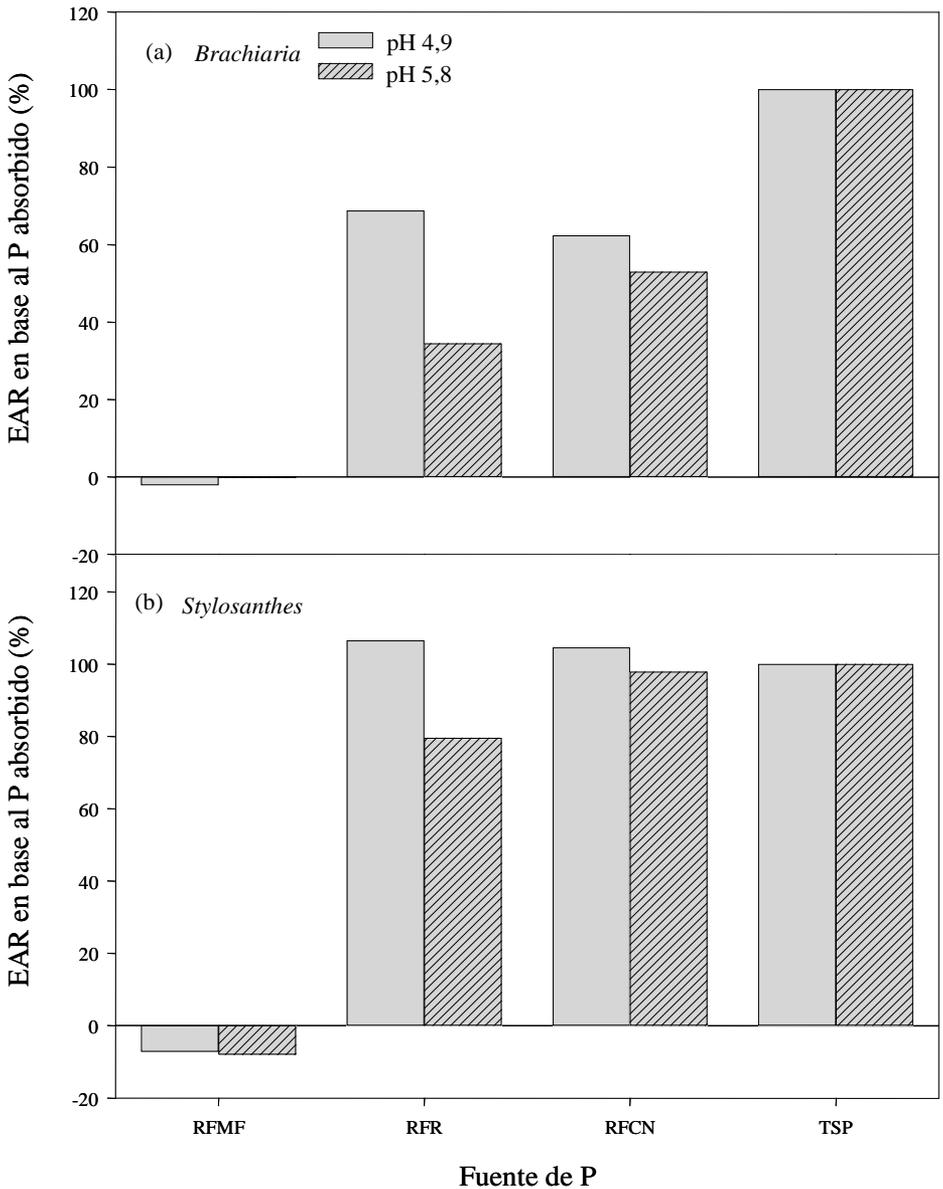


Figura 2. Eficiencia agronómica relativa (EAR) de las rocas fosfóricas evaluadas en suelo encalado y sin encalar, calculada en base al P absorbido en *Brachiaria* (a) y en *Stylosanthes* (b). $EAR = [(RF-Control)/(SFT-Control)] \times 100$.

a que por ser el CaCO_3 más soluble que el apatito, su disolución aumenta la concentración de Ca y pH en la superficie del apatito, disminuyendo así la disolución de la RF.

Tomando en cuenta que para encalar se utilizó MgCO_3 en vez de CaCO_3 , los incrementos en Ca disponible en suelo en los tratamientos con RFs con relación a los tratamientos controles sin P, deben provenir de la disolución de las RFs. Sin embargo,

esta diferencia en Ca disponible proveniente de la RF, no es un buen indicador de la tasa de disolución de la RF, de ser así, la RFMF sería la más soluble en este grupo de RFs, lo cual no es cierto. Esta evidencia no respalda lo señalado por Kanabo y Gilkes (26) quienes reportan que la diferencia en Ca intercambiable en suelo entre los tratamientos con RF y el control (DCa) es un índice de la cantidad de la RF disuelta en suelo.

Conclusiones

Los valores de P soluble en ácido cítrico (2%) y en ácido fórmico (2%), permitieron clasificar a la RFCN, RFR y RFMF como rocas fosfóricas de alto (7,1% en AC y 8,7% en AF), medianamente alto (5,0% en AC y 4,3% en AF) y muy bajo PA (0,71% en AC y 1,0% en AF) respectivamente. Mientras que los valores de P soluble en CAN colocaron a la RFCN y RFR como rocas fosfóricas de alto PA (3,8 y 3,7% respectivamente) y a la RFMF como de bajo PA (0,68%). No hubo diferencia significativa en la EAR entre la RFR y la RFCN en el suelo sin encalar. Sin embargo, la EAR de la

RFR disminuyó considerablemente con el encalado. La RFR y RFCN presentaron mayor EAR con la leguminosa (*Stylosanthes*) que con la gramínea (*Brachiaria*). La RFMF (RFs de bajo PA) aumentó los niveles de pH (> 7,0) y Ca intercambiable en suelo, lo cual se correspondió con la baja EAR y relativamente altos contenidos de CaCO_3 en esta RF. Estos resultados indican la necesidad de considerar el PA de las RFs para el cálculo de las dosis de P, así como el grado de acidez del suelo y la eficiencia del cultivo en disolver y utilizar P de las RFs.

Literatura citada

1. Hammond, L. L., S. H. Chien y A. U. Mokwunye. 1986. Agronomic value of unacidulated and partially acidulated phosphate rocks indigenous to the tropics. *Adv. Agron.* 40: 89-140.
2. Truong B. y F. Zapata. 2002. Standard characterization of phosphate rock samples from the FAO/AIEA phosphate project. In: *Assessment of soil phosphorus status and management of phosphatic fertilizers to optimize crop production.* IAEA-TECDOC-1272. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria. pp. 9-23.
3. Khasawneh, F.E y E.C. Doll. 1978. The use of phosphate rock for direct application to soil. *Adv. in Agron.* 30: 159-204.
4. Leon L.A., W.E. Fenster y L. L. Hammond. 1986. Agronomic potential of eleven phosphate

- rocks from Brazil, Colombia, Peru, and Venezuela. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 798-802.
5. Fayard, Ch. y B. Truong. 1990. Caracterisation des phosphates naturels du Venezuela. Mise au point des engrains pour essais agronomiques. CIRAT-IRAT-TECHNIFERT S.A. 168p.
 6. Zapata, R. y A.M. Sala. 1991. Uso de la termodinámica para evaluar la reactividad de las rocas fosfóricas venezolanas. *Rev. Fac. Agron.(Maracay)* 17: 409-418.
 7. Pérez, M.J., B. Troung y J.C. Fardeau. 1995. Solubilidad y eficiencia agronómica de algunas rocas fosfóricas venezolanas (naturales y modificadas) mediante el uso de técnicas isotópicas. *Agronomía Trop.* 45(4): 483-505.
 8. Casanova, E., A.M. Salas y M. Toro. 2002a. The use of nuclear and related techniques for evaluating the agronomic effectiveness of phosphate fertilizers, in particular rock phosphate, in Venezuela. I. Phosphorus uptake, utilization and agronomic effectiveness. In: Assessment of soil phosphorus status and management of phosphatic fertilizers to optimize crop production. IAEA-TECDOC-1272. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria. pp.93-100.
 9. Casanova, E., A.M. Salas y M. Toro. 2002b. The use of nuclear and related techniques for evaluating the agronomic effectiveness of phosphate fertilizers, in particular rock phosphate, in Venezuela. II. Monitoring mycorrhizas and phosphate solubilizing microorganisms. In: Assessment of soil phosphorus status and management of phosphatic fertilizers to optimize crop production. IAEA-TECDOC-1272. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria. pp.101-106.
 10. Casanova, E., M.J. Pérez y M. Flores. 1993. Agronomic evaluation of phosphate rock and slag on an Upata acid soil in Bolivar State, Venezuela. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 24:5733-587.
 11. Pérez López, A., E. Casanova, L.A. Cachón, M. Paz y J.R. Guerrero. 1991. Efectividad de rocas fosfóricas del Estado Táchira usando maíz (*Zea mays* L.). *Rev. Fac. Agron.(Maracay)* 17: 333-340.
 12. Kadi, N., M. Sánchez, J. Hurtado y R. González. 1991. Evaluación agronómica de la roca fosfórica parcialmente acidulada en suelos ácidos. *Rev. Fac. Agron. (Maracay)* 17: 449-459.
 13. Gamboa, J. y M Gamboa. 1991. Efecto residual de tres fuentes de fósforo en suelos del Estado Táchira, Venezuela. *Rev. Fac. Agron. (Maracay)* 17: 419-432.
 14. Casanova, E. 1993. Las Rocas Fosfóricas y su Uso Agroindustrial en Venezuela. Apuntes Técnicos PALMAVEN. Caracas.
 15. Lehr, J.R y G. H. McClellan. 1972. A revised laboratory reactivity scale for evaluating phosphate rocks for direct application. *TVA Bull.* Y-43, TVA, Muscle Shoals ALA, 36p.
 16. Association of Official Agricultural Chemists. 1990. Official Methods of Analysis. AOAC. Washington, DC. Pp. 11-17.
 17. Murphy, J. y J. P. Riley. 1962. A modified single extraction solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytical Chimica Act.* 27: 31-36.
 18. McClellan, G.H. y L.R. Gremillion. 1980. Evaluation of phosphatic raw materials. In: *The Role of Phosphorus in Agriculture* (F.E. Khasawneh, E.C. Sample, and E.J. Kamprath, Eds.), Chapter 3. *Soil Sci. Soc. Am.*, Madison, WI.
 19. SAS PRIMER. 1992. Guide to use SAS System. Statistical Instructional Computing Laboratory. Department of Statistics, NCSU, Raleigh, NC. 64p.

20. Rajan, S.S.S., J.H. Watkinson y A.G. Sinclair. 1996. Phosphate rocks for direct application to soils. Adv. In Agronomy 57: 77-159.
21. Bolan, N.S. y M.J. Hedley. 1990. Dissolution of phosphate rocks in soils. 2. Effect of pH on dissolution and plant availability of phosphate rock in soil with pH dependent charge. Fert. Res. 24: 125-134
22. Barnes, J.S. y E.J. Kamprath. 1975. Availability of North Carolina rock phosphate applied to soils. North Carolina Experimental Station. Bull. No. 229. 23p.
23. Van Raij, B. y A. Van Diest. 1979. Utilization of phosphate from different sources by six plant species. Plant and Soil 51: 577-589.
24. Khasawneh, F.E y E.C. Sample. 1979. Phosphorus concentration in soil solution as a factor affecting phosphate rock effectiveness. In: Seminar on phosphate rock for direct application. IFDC-SP-1, International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, AL, pp. 130-146.
25. Marschner, H. 1995. The soil-root interface (Rhizosphere) in relationship to mineral nutrition. In: Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, London, Second Edition.
26. Kanabo I. y R. J. Gilkes. 1987. The role of soil pH in the dissolution of phosphate rock fertilizers. Fert. Res. 12: 165-174.