

ROCA FOSFÓRICA ACIDULADA CON ÁCIDO SULFÚRICO Y TIOSULFATO DE AMONIO COMO FUENTE DE FÓSFORO PARA FRIJOL EN DOS TIPOS DE SUELO

Omaira Sequera¹ y Ricardo Ramírez²

RESUMEN

La deficiencia de fósforo en los suelos tropicales es común. Una fuente natural de este nutriente es la roca fosfórica acidulada (RFA) con ácido sulfúrico (AS), aunque una alternativa más económica es la acidulación sustituyendo el 30 % del AS por tiosulfato de amonio (R30T). Para probar la eficiencia de esta última forma se trabajó con dos experimentos usando un suelo ácido y otro neutro. Se aplicó P en forma de superfosfato triple (SFT), RFA y R30T en dosis de 0, 70, 140 y 210 mg·kg⁻¹. Se usó un diseño completamente aleatorizado con cuatro repeticiones, y se sembró frijol (*Vigna sinensis*) el cual se cosechó a los 35 días para determinar materia seca (MS), longitud radical (LR), P absorbido, y Ca y P residual en el suelo. La MS y el P absorbido en promedio fueron parecidos donde se aplicó SFT, RFA y R30T. La MS dependió altamente de la concentración de P y Ca en ambos suelos, así como de la concentración del P en la planta. La LR mostró un mayor crecimiento con el incremento del P disponible en el suelo ácido, no así en el suelo neutro. Se concluye que la acidulación parcial de la roca fosfórica con tiosulfato de amonio y ácido sulfúrico permite producir un fertilizante tan eficiente como la RFA para el crecimiento del sistema radical tanto en suelo ácido como neutro, y se ratificó su eficiencia en la producción de materia seca y absorción de fósforo por la planta.

Palabras clave adicionales: Longitud radical, fósforo residual, calcio residual, *Vigna sinensis*

ABSTRACT

Phosphate rock acidulated with sulfuric acid and ammonium thiosulfate as sources of phosphorus for cowpea in two soils

Phosphorus deficiency in tropical soils is a common constrain. Acidulated phosphate rock with sulfuric acid (RFA) is a natural source of P, but a cheaper alternative is the acidification of phosphate rock by replacing 30% of sulfuric acid with ammonium thiosulfate (R30T). To test the efficiency of those fertilizers and superphosphate two experiments were conducted using an acidic soil and a neutral one. The doses of P applied were 0, 70, 140 and 210 mg·kg⁻¹. A completely randomized design was used with four replications, and cowpea plants were grown. Plants were harvested at 35 days old and dry matter (DM), P uptake, residual P and Ca in soil, and root length (RL) were determined. When RFA was applied, DM and P uptake were similar to those in R30T and SFT. DM was highly related to soil P and Ca contents as well as to P concentration in the plant. RL increased as available P was higher in the acidic soil, but not in neutral soil. It is concluded that partial acidulation of phosphate rock with ammonium thiosulfate and sulfuric acid produces a fertilizer as efficient as the RFA for growth of the root system in both acid and neutral soil, and confirmed its efficiency in the production of dry matter and phosphorus uptake by the plant.

Additional key words: Root length, residual phosphorus, residual calcium, *Vigna sinensis*

INTRODUCCIÓN

En los suelos ácidos del trópico el fósforo es uno de los nutrientes más limitantes para la producción agrícola. En estos suelos es frecuente encontrar síntomas visuales de deficiencia de P y N, haciéndose necesario aplicar fertilizantes fosfatados y nitrogenados, así como también corregir la acidez con enmiendas. Los fertilizantes

para corregir estas deficiencias son costosos, por lo que existe interés en identificar o producir fertilizantes fosfatados de menor costo.

La roca fosfórica (RF) además de ser una fuente natural y económica de P tiene la ventaja de proveer también Ca a los suelos deficientes en este nutriente (Ramírez et al., 2001). El inconveniente de la RF es su baja solubilidad y, por consiguiente, la lenta liberación de P

Recibido: Marzo 16, 2012

Aceptado: Enero 15, 2013

¹ Dpto. Química y Suelos, Decanato de Agronomía, Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Apdo. 400. Barquisimeto. Venezuela.

² Postgrado de Suelos, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Apdo. 319, Maracay. Venezuela. e-mail: osequera@ucla.edu.ve; abisam28@gmail.com

disponible para la planta, dificultando su uso como fertilizante fosfatado en cultivos de ciclo corto, razón por la que la RF ha sido recomendada como fuente de P en cultivos de ciclo largo (Pérez et al., 1995). Las rocas fosfóricas naturales aplicadas a los suelos pueden ser iguales o más eficientes que los fosfatos solubles después de varios años de permanecer en el suelo, debido a su mayor efecto residual (Resende et al., 2006).

Entre los varios intentos para mejorar la eficiencia de la RF está la acidulación parcial con ácido sulfúrico (AS), preferido por su menor costo (Panda y Misra, 1970). Otra alternativa es la sustitución parcial del AS por tiosulfato de amonio (TSA) en el proceso de acidulación en una proporción de 30 % (Castillo et al., 1992). La eficiencia de RF acidulada con AS y TSA para la producción de biomasa, absorción de P y Ca por el maíz y frijol y el efecto residual del P y Ca ha sido comparable al de la RF acidulada con sólo AS (Sequera y Ramírez, 2003; Morillo et al., 2007).

La absorción de P por la planta puede ser explicada, en parte, por las características morfológicas de la raíz (Gahoonia et al., 1997). Las variaciones en longitud, superficie y radio radical pueden jugar un papel muy importante en los suelos pobres en P (Zoysa et al., 1998).

El objetivo de este trabajo fue probar el comportamiento de la RF acidulada con ácido sulfúrico y tiosulfato de amonio en diferentes dosis en dos suelos de diferente pH, así como el comportamiento del sistema radical de *Vigna sinensis* var. Tuy en relación con el P y Ca disponibles en el suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para evaluar la eficiencia de tres fuentes de fósforo se usaron dos suelos con pH diferentes. El primero es un Tropohumults arcilloso, pH 4,7; con un contenido de P de 14 mg·kg⁻¹ de suelo y Ca de 158 mg·kg⁻¹, 5 cmol·kg⁻¹ de Al y 4 % de materia orgánica. El muestreo se realizó a una profundidad de 0 a 25 cm en la finca La Ramonera, localidad Villa Nueva, municipio Morán, estado Lara. En adelante este suelo se llamará “suelo ácido”. El segundo suelo correspondió a un Oxic Haplustalfs arcillo-arenoso, pH 7,4; con P de 7 mg·kg⁻¹, Ca 1287 mg·kg⁻¹, Al 0,32 cmol·kg⁻¹ y materia orgánica 1,6 %, procedente de la Estación Experimental del INIA en el municipio Yaritagua, estado Yaracuy. En adelante este suelo será

referido como “suelo neutro”

Las fuentes de fósforo usadas fueron superfosfato triple (46 % P₂O₅ y 21 % CaO), roca fosfórica de Riecito acidulada al 50 % con ácido sulfúrico (RFA) y roca fosfórica de Riecito acidulada (50 % de P en forma disponible) con tiosulfato de amonio 30 % y ácido sulfúrico 70 % (R30T). El proceso de acidulación fue realizado por el Instituto Tecnológico Venezolano de Petróleo (INTEVEP) (Castillo et al., 1992). Las dosis de P aplicadas al suelo fueron 0, 70, 140 y 210 mg·kg⁻¹, valores superiores a los normalmente requeridos por la planta, con el objeto de inducir respuestas claras de acuerdo con experiencia previa de los autores.

Se utilizó un diseño completamente aleatorizado con arreglo factorial de 3 x 4, donde el primer factor correspondió a las fuentes de fósforo y el segundo a las cuatro dosis de P; todos los tratamientos fueron repetidos cuatro veces. Cada suelo constituyó un experimento diferente pero simultáneo, en las mismas condiciones ambientales, en un invernadero enfriado con cortina de agua donde la temperatura máxima fue de 34 °C y la mínima de 18 °C.

Todos los tratamientos recibieron una fertilización básica, en mg·kg⁻¹ de suelo, de 150 de N como urea y 70 de K en forma de cloruro.

Los suelos muestreados fueron secados al aire y tamizados con una malla de 3 mm. Para cada tratamiento se pesaron 4 kg de suelo en pots plásticos con capacidad para 5 L. El fertilizante de cada tratamiento se mezcló con el suelo del pote respectivo igual que el N y K. Para realizar la siembra del frijol, los pots se humedecieron con agua desmineralizada y en cada pote sembraron tres semillas. La humedad de los suelos se mantuvo, durante el período experimental, entre 35 y 85 % de la capacidad de campo pesando los pots cada dos días y agregando agua desmineralizada cuando fue necesario.

Al cumplir 35 días de siembra las plantas se extrajeron y fueron lavadas con agua desmineralizada, secadas en una estufa de ventilación forzada a 70° C por 24 horas y pesadas para determinar la materia seca. El follaje fue molido, tamizado en malla de 1 mm y digerido con una mezcla de ácido sulfúrico concentrado y peróxido de hidrógeno al 30 % en un bloque de digestión de aluminio. En el extracto se determinó P por colorimetría y el Ca por absorción atómica.

Al momento de la cosecha se tomaron

muestras de suelo en cada pote, desde la superficie hasta la base del mismo utilizando un tubo de 2,5 cm de diámetro. En cada muestra se separaron las raíces del suelo con agua corriente y se conservaron en una solución de alcohol al 70 % hasta el momento de determinar la longitud radical (LR) por el método de la cuadrícula (Marsh, 1971). En otra muestra de suelo se analizó fósforo y calcio.

Los resultados fueron comparados mediante análisis de varianza y prueba de medias de Tukey

usando el programa InfoStat versión 1.1. Asimismo, se realizaron análisis de regresión entre las diversas variables de la planta y el suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación de P al suelo, en cualquiera de las tres formas, dio lugar a una respuesta significativa de la MS del frijol tanto en el suelo ácido como en el neutro (Cuadro 1), evidencia de que ambos suelos eran deficientes en P disponible.

Cuadro 1. Materia seca del follaje del frijol (g por planta), fertilizado con superfosfato triple (SFT), roca fosfórica acidulada (RFA) y roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico y tiosulfato de amonio (R30T)

Dosis g·kg ⁻¹	Suelo neutro				Suelo ácido			
	Fuentes de Fósforo				Fuentes de Fósforo			
	SFT	RFA	R30T	Media	SFT	RFA	R30T	Media
0	0,97 d	0,97 c	0,97 c	0,97	0,44 d	0,44 d	0,44 d	0,44
70	1,52 c	1,34 b	1,51 b	1,45	1,56 c	0,91 c	1,10 c	1,20
140	1,75 b	1,40 b	1,58 b	1,58	1,76 b	1,72 b	1,24 b	1,57
210	2,36 a	1,77 a	1,99 a	2,04	2,56 a	1,85 a	1,98 a	2,13
Media	1,65	1,37	1,51		1,58	1,23	1,19	

Valores en las columnas con letras distintas son significativamente diferentes según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$)

Incrementos sucesivos de las dosis de P de las tres fuentes usadas, produjeron aumentos significativos de la MS en el suelo ácido (Cuadro 1). Igual comportamiento se encontró con el SFT en el suelo neutro; sin embargo, en este suelo no se encontraron diferencias en MS entre las dosis de 70 y 140 g·kg⁻¹ donde se aplicó RFA o R30T, pero la dosis más alta de P, de 210 g·kg⁻¹, dio lugar a un aumento significativo de la MS respecto a las anteriores donde se usó RFA. La respuesta de la planta a la RFA y R30T puede atribuirse a la liberación del P disponible de estas rocas por el efecto de la acidulación (Menon y Chein, 1990).

El comportamiento de la R30T en ambos suelos fue comparable al de la RFA, evidencia de que la acidulación de la RF con sustitución del 30 % del AS por TSA da lugar a un fertilizante tan eficiente como la RFA. Asimismo, el P disponible de las rocas (P₂O₅ hidrosoluble más P₂O₅ soluble en citrato de amonio) fue de 12,03 % para el tratamiento RFA y 12,92 % para R30T, lo que corrobora que dicha sustitución no afectó el contenido de P disponible del producto final. Resultados parecidos han sido encontrados en otras investigaciones (Sequera y Ramírez, 2003; Morillo et al., 2007).

La materia seca de las raíces (MSR) respondió

en forma diferente en los dos suelos; en el neutro la interacción dosis x fuente no fue significativa, en cambio en el ácido sí lo fue (Cuadro 2). Los aumentos de los promedios de la MSR en el suelo neutro resultaron significativos para cada incremento de la dosis. En el suelo ácido también se registraron aumentos significativos de la MSR con cada incremento de la dosis de P donde se aplicó SFT o RFA; en cambio, con la aplicación de R30T el rendimiento máximo se alcanzó con la dosis intermedia de 140 g·kg⁻¹ de P.

La concentración de P en la planta respondió en forma significativa a la aplicación de P en ambos suelos (Cuadro 3). Donde no se aplicó P los niveles del elemento en el tejido foliar estuvieron entre 0,12 y 0,13 %, valores considerados bajos para el frijol (Jones et al., 1991), lo que evidencia la deficiencia del nutriente en el suelo.

Incrementos sucesivos de las dosis de SFT dieron lugar a aumentos significativos de la concentración de P en la planta. En el suelo neutro con la primera dosis de P, en forma de SFT, la concentración del nutriente se incrementó en algo más de una vez y en dos veces o más con la RFA y R30T (Cuadro 3); donde se usó R30T el comportamiento del P en la planta fue parecido al encontrado con SFT. En cambio, el incremento de

las dosis de RFA no se tradujo en aumentos de los niveles de P en la planta.

En el suelo ácido, el P en la planta se incrementó con las aplicaciones de las diferentes dosis de los tres fertilizantes (Cuadro 3). La

máxima concentración de P en la planta con el uso de SFT se encontró con el segundo incremento de la dosis de P; en cambio, con las rocas el máximo de P en la planta se registró con el nivel más alto de fertilización.

Cuadro 2. Materia seca de raíces del frijol (g por planta) fertilizado con superfosfato triple (SFT), roca fosfórica acidulada (RFA) y roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico y tiosulfato de amonio (R30T)

Dosis g·kg ⁻¹	Suelo neutro				Suelo ácido			
	Fuentes de Fósforo				Fuentes de Fósforo			
	SFT	RFA	R30T	Media	SFT	RFA	R30T	Media
0	0,13	0,13	0,13	0,13 c	0,08d	0,08 d	0,08 c	0,08
70	0,15	0,13	0,13	0,14 b	0,17 c	0,13 c	0,18 b	0,16
140	0,14	0,13	0,12	0,13 c	0,21 b	0,32 b	0,22 a	0,25
210	0,19	0,17	0,15	0,17 a	0,24 a	0,37 a	0,22 a	0,28
Media	0,15	0,14	0,13		0,18	0,23	0,18	

Valores en las columnas con letras distintas son significativamente diferentes según la prueba de Tukey (P≤0,05)

Cuadro 3. Porcentaje de fósforo en el follaje del frijol fertilizado con superfosfato triple (SFT), roca fosfórica acidulada (RFA) y roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico y tiosulfato de amonio (R30T)

Dosis g·kg ⁻¹	Suelo neutro				Suelo ácido			
	Fuentes de Fósforo				Fuentes de Fósforo			
	SFT	RFA	R30T	Media	SFT	RFA	R30T	Media
0	0,12 c	0,12 b	0,12 c	0,12	0,13 c	0,13 c	0,13 c	0,13
70	0,28 c	0,38 a	0,37 b	0,34	0,17 b	0,13 c	0,23 b	0,17
140	0,33 b	0,38 a	0,38 b	0,36	0,29 a	0,22 b	0,22 b	0,24
210	0,55 a	0,38 a	0,44 a	0,46	0,30 a	0,25 a	0,31 a	0,28
Media	0,32	0,32	0,33		0,22	0,18	0,22	

Valores en las columnas con letras distintas son significativamente diferentes según la prueba de Tukey (P≤0,05)

La producción de MS del follaje y de las raíces, en el suelo ácido, estuvo altamente relacionada con la concentración de P en el follaje; la dependencia de la MS de la concentración de P fue de carácter lineal (Figura 1A), con un coeficiente de determinación de 0,78 para el follaje y 0,49 para las raíces, lo que indica que la formación de MS del follaje y raíces puede ser atribuida en 78 y 49 % a la concentración de P.

En el suelo neutro no se encontró relación entre la concentración de P en el follaje y la formación de materia seca por la raíz; en cambio, la MS del follaje mostró una relación de forma lineal con el P de la planta (Figura 1B). El coeficiente de determinación de la ecuación calculada fue alto (0,83). La relación de la producción de biomasa por la planta con la absorción de P ha sido señalada por ecuaciones de tipo exponencial (Sequera y Ramírez, 2003; Ramírez y Lizaso, 2006).

Las relaciones encontradas entre la producción de biomasa por el frijol y la concentración de P en

el follaje evidencian la importancia de la nutrición fosfatada temprana para el frijol, especialmente en los primeros 35 días de su ciclo. Grant et al. (2001) y Parra et al. (2011) señalaron la importancia de la nutrición temprana de los cultivos para lograr buenos rendimientos.

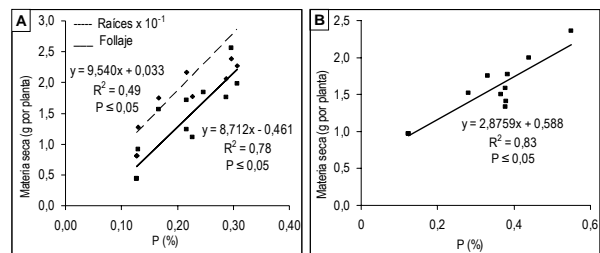


Figura 1. Efecto de la concentración de P en la planta sobre la biomasa del follaje y raíz del frijol en suelo ácido (A) y neutro (B)

Donde no se aplicó fosfato (0P) los niveles de P disponible fueron los nativos del suelo, muy bajos en ambos (6 mg·kg⁻¹ en el suelo neutro y 8 mg·kg⁻¹ en el ácido). El P residual se incrementó

significativamente en ambos suelos con la aplicación de cualquiera de las fuentes usadas. Los niveles de P donde se aplicó $70 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de P variaron de 10 a $17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, valores considerados bajos para la producción de frijol. El nivel de P disponible se incrementó por encima de

$25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ con la dosis de $140 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en los dos suelos con SFT y en el suelo neutro con R30T, pero con la RFA fue necesario aplicar $210 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de P para conseguir más de 20 mg de P residual (Cuadro 4), es decir, en este suelo el efecto de la RFA fue menor que el de los otros fertilizantes.

Cuadro 4. Fósforo residual ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en los suelos sembrados con frijol y fertilizados con superfosfato triple (SFT), roca fosfórica acidulada (RFA) y roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico y tiosulfato de amonio (R30T)

Dosis $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	Suelo neutro				Suelo ácido			
	Fuentes de Fósforo				Fuentes de Fósforo			
	SFT	RFA	R30T	Media	SFT	RFA	R30T	Media
0	6 d	6 c	6 d	6	8 d	8 d	8 d	8
70	17 c	13 b	12 c	14	17 c	10 c	11 c	13
140	46 b	16 b	27 b	30	29 b	16 b	18 b	21
210	83 a	26 a	56 a	55	54 a	23 a	27 a	35
Media	38	16	26		27	14	18	

Valores en las columnas con letras distintas son significativamente diferentes según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$)

Los niveles de P disponible fueron, en términos absolutos, más bajos donde se usaron las rocas fosfóricas en comparación con el SFT, especialmente en los tratamientos más altos. Este comportamiento puede explicarse porque la disolución de la roca fosfórica y la liberación de P disponible, en el suelo, es más lenta que la de las formas solubles como el SFT (Pérez et al., 1995).

El P residual en el suelo ácido no mostró relación con la formación de MS en las raíces, pero sí con la MS del follaje; los datos se ajustaron mejor a una ecuación de forma logarítmica (Figura 2A). El coeficiente R^2 fue muy alto (0,91) lo que significa que la formación de la MS podría ser explicada en un 91 % como producto del efecto del P disponible en el suelo.

En el suelo neutro, el P residual se relacionó en forma lineal con la MS del follaje y raíz del frijol (Figura 2B). El coeficiente R^2 para follaje fue alto (0,85), lo que explica una alta dependencia de la MS del P disponible en el suelo; en cambio, para la ecuación que relaciona el P disponible en el suelo con la MS de la raíz, el coeficiente fue más bajo (0,54).

El calcio disponible en el suelo se incrementó significativamente con la aplicación de las fuentes de fósforo, todas ellas ricas en contenido de Ca (Cuadro 5). Cada incremento de las dosis de fertilizante dio lugar a un aumento significativo del Ca residual en los dos suelos.

La relación del Ca disponible en el suelo con la materia seca producida por el follaje fue de carácter lineal en ambos suelos. En el suelo ácido

(Figura 3A) el coeficiente de determinación para la ecuación correspondiente a las raíces fue de 0,67, más alto que en el suelo neutro (Figura 3B) donde el R^2 fue de 0,47. En cambio, el R^2 para la ecuación que relaciona el Ca disponible en el suelo ácido con la materia seca del follaje fue de 0,81, y en el suelo neutro de 0,78. Estos datos dejan ver que existe una alta dependencia de la producción de biomasa del frijol de la disponibilidad de calcio en el suelo.

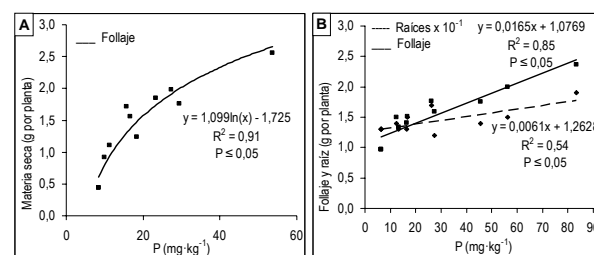


Figura 2. Efecto de la concentración de P en el suelo sobre la biomasa del follaje y raíz del frijol en suelo ácido (A) y neutro (B)

El crecimiento de las raíces fue pobre donde no se aplicó fertilizante fosfatado, pero con la aplicación de la dosis más baja de P ($70 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) se encontró un aumento significativo de la LR en los dos suelos con los tres fertilizantes (Cuadro 6). Este comportamiento podría atribuirse en parte, a que el contenido de P disponible en suelo ácido fue bajo ($14 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y muy bajo ($4,7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en el neutro. En este último la LR promedio se incrementó en 56,3 % con la primera dosis de P y

en 84,7 % en el suelo ácido. En otros estudios con diferentes especies y medios de enraizamiento, se ha encontrado que la mayor disponibilidad de P ha dado lugar a incrementos de la LR (Ramírez, 2006; Lugo et al., 2009).

Aplicaciones de dosis crecientes de P en el suelo neutro dieron lugar a reducciones significativas de la LR, con los tres fertilizantes usados. Este comportamiento es una indicación de que la LR se estimula hasta cierto punto con el incremento del P en el suelo, en este tipo de suelo.

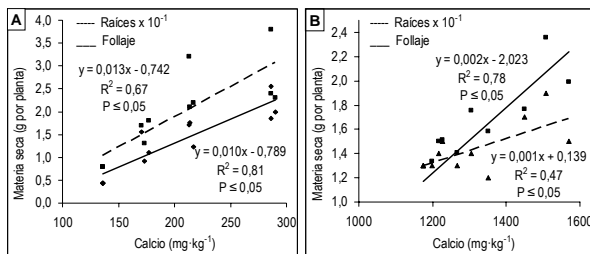


Figura 3. Efecto de la concentración de Ca en el suelo sobre la biomasa del follaje y raíz del frijol en suelo ácido (A) y neutro (B)

Cuadro 5. Calcio residual (mg·kg⁻¹) en los suelos sembrados con frijol y fertilizados con superfosfato triple (SFT), roca fosfórica acidulada (RFA) y roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico y tiosulfato de amonio (R30T)

Dosis g·kg ⁻¹	Suelo neutro				Suelo ácido			
	Fuentes de Fósforo				Fuentes de Fósforo			
	SFT	RFA	R30T	Media	SFT	RFA	R30T	Media
0	1175 d	1175 d	1175 d	1175	136 d	136 d	136 d	136
70	1227 c	1118 c	1316 c	1214	170 c	173 c	177 c	173
140	1305 b	1266 b	1352 b	1308	214 b	213 b	217 b	214
210	1508 a	1450 a	1569 a	1509	286 a	286 a	290 a	188
Media	1304	1272	1328		202	202	205	

Valores en las columnas con letras distintas son significativamente diferentes según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$)

Cuadro 6. Longitud radical (m) del frijol fertilizado con superfosfato triple (SFT), roca fosfórica acidulada (RFA) y roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico y tiosulfato de amonio (R30T)

Dosis g·kg ⁻¹	Suelo neutro				Suelo ácido			
	Fuentes de Fósforo				Fuentes de Fósforo			
	SFT	RFA	R30T	Media	SFT	RFA	R30T	Media
0	2,52 c	2,52 c	2,52 c	2,52	3,35 b	3,35 d	3,35 d	3,35
70	3,45 a	3,52 a	4,36 a	3,94	7,86 a	4,72 c	5,98 c	6,19
140	3,16 b	3,19 b	3,49 b	3,28	7,52 a	5,98 b	6,99 b	7,89
210	2,52 c	3,14 b	3,06 c	3,00	8,19 a	8,58 a	7,70 a	8,13
Media	2,91	3,16	3,48		6,73	6,45	6,01	

Valores en las columnas con letras distintas son significativamente diferentes según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$)

En el suelo ácido la LR mostró estar estrechamente asociada con la biomasa del frijol y la absorción de P y Ca. Las ecuaciones calculadas

La LR del frijol en el suelo ácido no mostró respuesta a la aplicación de incrementos sucesivos de las dosis de P en forma de SFT (Cuadro 6). Donde se aplicó RFA o R30T el comportamiento de la LR fue diferente, y ésta se incrementó significativamente con cada dosis de P aplicadas al suelo. Por otra parte, Ramírez y López (2000) encontraron que la LR de tres variedades de maíz se incrementó con la aplicación de P en un suelo con baja saturación de Al, mientras que en un suelo con un nivel mayor de saturación con Al la LR no respondió a la aplicación de P. Aparentemente, el comportamiento de la LR con respecto a la concentración del P en el medio de enraizamiento está influenciado por otras variables además de los niveles de disponibilidad de fósforo.

Moller y Pellegrin (1999) indican que la respuesta de la LR, a la disponibilidad de P, en términos de crecimiento depende de la duración de los experimentos, mientras que en el presente trabajo el comportamiento de la LR estuvo asociada al nivel de P en el suelo pero modificado, aparentemente, por otras características del suelo.

resultaron ser de carácter lineal con coeficientes de determinación altos de 0,83 y 0,71 para la biomasa de follaje y raíz, respectivamente (Figura

4A), 0,65 para el P absorbido (Figura 4B) y 0,81 para el Ca absorbido (Figura 4C). Esto indica que la producción de biomasa y absorción de P y Ca por el frijol está relacionada con la proliferación de un mayor sistema radical que permitió explorar un mayor volumen de suelo, lo que a su vez pudo tener un alto impacto en la rizósfera y mejorar la

absorción del P y Ca. Igualmente, Ramírez et al. (2001) encontraron una estrecha relación entre el P absorbido y la longitud radical del maíz en un suelo ácido. El incremento de la absorción de P por la planta puede ser atribuido al mayor crecimiento radical que le permitió tomar P de un mayor volumen de suelo (Kranmitz et al., 1991).

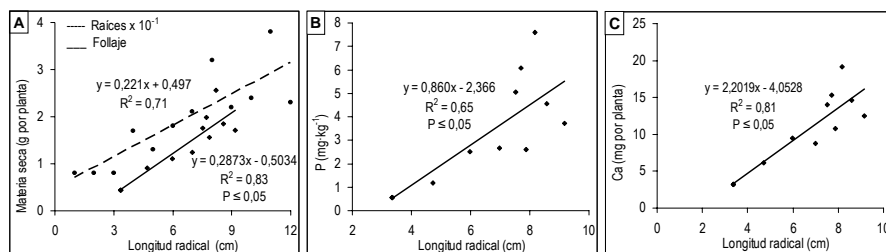


Figura 4. Efecto de la longitud radical del frijol en suelo ácido sobre la biomasa del follaje y raíz (A), fósforo absorbido (B) y calcio absorbido (C)

En el suelo neutro no se encontró asociación entre la LR con la biomasa y el P y Ca absorbidos. Estos resultados indican que el crecimiento radical en el suelo neutro no está asociado con una mayor exploración del suelo por parte de las raíces para tomar P, lo que contradice lo encontrado en el suelo ácido y lo hallado en otros trabajos (Ramírez, 2006). Gahoonia et al. (1997) mostraron que la correlación LR-P absorbido fue menor en el suelo con alto nivel de P disponible que en el suelo con bajo contenido de P. En nuestro experimento el P nativo del suelo neutro fue mayor que el del suelo ácido, por lo que se podría especular que la falta de correlación LR-P absorbido se debe a esa diferencia en el P original del suelo.

La aplicación de los fertilizantes fosfatados al suelo dio lugar a un incremento de diferente magnitud del P y Ca disponibles, de acuerdo con la naturaleza del fertilizante usado. El P residual disponible en el suelo fue más alto donde se aplicó SFT (Cuadro 4) por ser una forma más soluble que las rocas aciduladas.

El P y Ca residuales en el suelo ácido mostraron estar asociados con la LR. Los datos se ajustaron mejor a una ecuación de forma logarítmica (Figura 5 A, B), la LR creció en la medida que el contenido de estos nutrientes en el suelo fue aumentando, sin llegar a un punto de saturación. Los coeficientes de determinación fueron significativos: 0,65 para P-LR y 0,71 para Ca-LR. Ramírez y López (2000) encontraron resultados parecidos a los obtenidos en un suelo ácido con alto contenido de aluminio. La información obtenida no concuerda con lo

señalado por otros autores como Foehse y Jungk (1983) y Mackay y Barber (1984) quienes indican que el incremento de P en la solución nutritiva produce un menor crecimiento de la longitud y densidad radical de la planta, contradicción que podría atribuirse a las diferencias en el medio de crecimiento radical de los distintos experimentos.

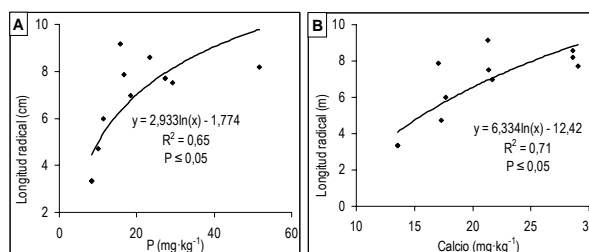


Figura 5. Efecto de la concentración de P (A) y de Ca (B) residuales en suelo ácido sobre la longitud radical del frijol

CONCLUSIONES

Se encontró que la roca fosfórica acidulada con sustitución parcial del ácido sulfúrico por tiosulfato de amonio es tan eficiente como la roca acidulada con sólo ácido sulfúrico para el crecimiento del sistema radical del frijol tanto en suelo ácido como neutro, y se ratificó su eficiencia en la producción de materia seca y absorción de fósforo por la planta.

AGRADECIMIENTO

Al CDCHT de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado por la subvención otorgada.

LITERATURA CITADA

1. Castillo, J.R., R. Ramírez, E. Soto y E. Bohorquez. 1992. Use of riecito phosphate rock in NPK fertilizer production. *In*: J.J. Schultz (ed.). Phosphate Fertilizers and the Environment. IFDC. Tampa, FL. pp. 311-318.
2. Fohse, D. y A. Jungk. 1983. Influence of phosphate and nitrate supply to root hair formation of rape, spinach and tomato plants. *Plant Soil* 74: 354-368.
3. Gahoonia, T.S., D. Cara y N.E. Nielsen. 1997. Root hair and phosphorus acquisition of wheat and barley cultivars. *Plant Soil* 191: 181-188.
4. Grant, C.A, D.N. Flaten, D.J. Tamasiewicz y S.C. Sheppard. 2001. The importance of early season phosphorus nutrition. *Can. J. Plant Sci.* 81: 211-224.
5. Jones, J.B. Jr., B. Wolf y H.A. Mills. 1991. *Plant Analysis Handbook*. Micro-Macro Publishing. Athens, GA. 213 p.
6. Kranmitz, P., L. Aersen y D. Lefevre. 1991. Correlation for non linear relationship between root size and short term P uptake in genotype comparison. *Plant Soil* 133: 157-167.
7. Lugo, M.S., R. Ramírez y I. Entrena. 2009. Roca fosfórica y superfosfato triple como fuentes de fósforo para *Centrosema* en un suelo ácido. *Zootecnia Tropical* 27: 443-456.
8. Mackay, A.D. y S.A. Barber. 1984. Comparison of root and root hair growth in solution and soil culture. *J. Plant Nutr.* 7: 1745-1757.
9. Marsh, B. 1971. Measurement of length in random arrangements of lines. *J. Applied Ecol.* 8: 265-267.
10. Menon, R.G. y S.H. Chein. 1990. Phosphorus availability to maize from partially acidulated phosphate rocks and phosphate rock compacted with triple superphosphate. *Plant Soil.* 127: 123-128.
11. Moller, A. y S. Pellegrin. 1999. Maize root system growth and development as influenced by phosphorus deficiency. *J. Exp. Bot.* 50: 487-497.
12. Morillo, A., O. Sequera y R. Ramírez. 2007. Roca fosfórica acidulada como fuente de fósforo en un suelo ácido con o sin encalado. *Bioagro* 19: 161-168.
13. Panda, N. y U.K. Misra. 1970. Use of partially acidulated rock phosphate as possible mean of minimizing phosphate fixation in acid soils. *Plant and Soil* 33: 252-234.
14. Parra, J.B., R. Ramírez, D. Lobo, N. Subero y O. Sequera. 2011. Respuesta del maíz (*Zea mays* L.) en la etapa temprana a las formas de aplicación de fósforo. *Rev. Fac. Agron. (UCV)* 37: 86-92.
15. Pérez, M.J., B. Troung y J.C. Fardeau. 1995. Solubilidad y eficiencia de algunas rocas fosfóricas venezolanas (naturales y modificadas) mediante el uso de técnicas isotópicas. *Agron. Trop.* 45: 483-505.
16. Ramírez, R. 2006. Eficiencia del uso del fósforo de la roca fosfórica por cultivares de maíz. *Interciencia* 31: 45-49.
17. Ramírez, R. y M. López. 2000. Agronomic effectiveness of phosphate rock and superphosphate for aluminum-tolerant and non tolerant sorghum cultivars. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 31: 1169-1178.
18. Ramírez, R., S.M. Fernández y J.I. Lizaso. 2001. Changes in phosphorus and calcium in rhizosphere of aluminum-tolerant maize germplasm fertilized with phosphate rock. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 32: 1551-1565.
19. Ramírez, R. y J.I. Lizaso. 2006. Maize inbreds response to Riecito phosphate rock and triple superphosphate on an acidic soil. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 37: 1917-1931.
20. Resende, A.V., A.E. Furtini Neto, V.M.C. Alves, J. A. Muniz, N. Curi, V. Faquin, D. L. Kimpara, I.Z.L. Santos y L.F. Carneiro. 2006. Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do Cerrado. *R. Bras. Ci. Solo.* 30: 453-466.
21. Sequera, O. y R. Ramírez. 2003. Fósforo, calcio y azufre disponibles de la roca fosfórica acidulada con ácidos sulfúrico y tiosulfato de amonio. *Interciencia* 28: 604-610.
22. Zoysa, A.K.N., P. Loganatan y M.J. Hedley. 1998. Phosphate rock dissolution and transformation in the rhizosphere of tea (*Camelia sinensis*) compared with other plants species. *European Journal of Soil Science* 49: 477-486.