

# Fuentes alternativas de fósforo en suelos del “cerrado” cultivados con maíz (*Zea mays*)

*Alternative sources of phosphorus in “savannah” soil cultivated with maize (Zea mays)*

Bruno Nicchio<sup>1\*</sup>, Gaspar Henrique Korndörfer<sup>2</sup>, Hamilton Seron Pereira<sup>2</sup>, Rafael Gomez Arrieta<sup>3</sup>, Izabela Rocha do Nascimento<sup>2</sup>, Gustavo Alves Santos<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós-graduação em Agronomia (PPGA), Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Campus do Glória, Rodovia BR 050, KM 78, CEP 38410-337, Uberlândia, MG, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, MG, Brasil

<sup>3</sup>Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba, SP, Brasil

<sup>4</sup>KP Consultoria, Uberlândia, MG, Brasil

\*autor correspondente

✉ [bruno\\_nicchio@hotmail.com](mailto:bruno_nicchio@hotmail.com)

<sup>1</sup>Este trabalho é parte da dissertação de mestrado do autor Bruno Nicchio.

**RESUMEN:** Debido a la baja calidad de los minerales empleados en la producción de fuentes de fósforo (P) y por los bajos contenidos de P en suelos de cerrado, se hace necesario el uso de fuentes alternativas de P para esas condiciones visando aumento de producción y eficiencia agronómica, tales como los fosfatos de menor solubilidad y los residuos fosfatados. El objetivo del presente estudio fue evaluar la eficiencia agronómica de seis fertilizantes fosfatados en maíz (*Zea mays*) en suelo arcilloso (Typic Acrustox) y arenoso (Typic Quartzipsamment). El diseño experimental fue de bloques completos al azar con arreglo factorial  $6 \times 2 + 1$ . Las fuentes de P fueron: superfosfato triple (SFT), fosfato valle 1, fosfato valle 2, fosfato parcialmente calcinado cernido y granulado, y fosfato natural alborada. Las dosis de  $P_2O_5$  fueron de 100 y 200 mg kg<sup>-1</sup> y el tratamiento adicional correspondió a la no aplicación de P. Se evaluó el contenido de P en el solo y el contenido y concentración de P en las plantas y la producción de masa seca. Lo Fosfato Valle 2 con solubilidad parcial fue más eficiente en aumenta el contenido de P en el suelo, el contenido y concentración de P en la planta, bien como la producción de masa seca de maíz. El FAPC tuvo resultados intermedios mientras que SFT y FNA bajas respuestas. Los fosfatos de modo general presentaron mejores resultados en suelo de textura arenosa.

**PALABRAS CLAVE:** Fertilización fosfatada, *Zea mays* L. y efecto residual.

**ABSTRACT:** The low quality of the minerals used in the production of phosphorus sources (P) and the low P contents of savannah soils lead to the need of alternative sources of phosphorus, such as phosphates of lower solubility and phosphate residues, in order to increase production and agronomic efficiency. The present study aimed to evaluate the agronomic efficiency of six phosphate fertilizers in maize (*Zea mays*), in a clayey (Typic Acrustox), and sandy soil (Typic Quartz). The experimental design was completely randomized using blocks with factorial arrangement  $6 \times 2 + 1$ . The sources of phosphorus were: triple superphosphate (TSP), valley phosphate 1, valley phosphate 2, phosphate partially calcined (PPC) sifted and granulated, and natural phosphate alborada (NPA). The rates of  $P_2O_5$  were 100 and 200 mg kg<sup>-1</sup>, and the additional treatment corresponded to the non-application of phosphorus (check). We evaluated the phosphorus content in the soil, plant content and uptake, and the production of dry matter. The Valle Phosphate 2 with partial solubility was more efficient in increasing the P content in the soil, P content and uptake in the plant, as well as the dry matter production of corn. The PPC had intermediate results while TSP and NPA had low responses. Phosphates in general showed better results in soil with a sandy texture.

**KEYWORDS:** Phosphate fertilization, *Zea mays* L. and residual effect.

## Introducción

La roca fosfórica es el principal material en el mundo para producir fertilizantes fosfatados y por lo cual en la agricultura es de gran importancia causando una creciente demanda de este recurso finito (MOWO et al., 2014; MEW, 2016). Además, el fósforo (P) es uno de los macronutrientes más importantes requerido para el crecimiento de la planta, el rendimiento y la

semilla formación (KAUR; REDDY, 2015; MHALLA et al., 2017).

La importación de fertilizantes en Brasil aumentó 14.0% de 2015 a 2017 y en los estados de Minas Gerais, São Paulo e Goiás, que se encuentran las mayores reservas de rocas fosfóricas del país (LOPES, 2004; ASOCIACIÓN..., 2018). Pero su origen ígneo y metamórfico hace que los fosfatos naturales sean de baja calidad lo que hace necesaria acidular las rocas para aumentar la solubilización del elemento, proceso de alto costo (HOROWITZ; MEURER, 2003; MEW, 2016). Esto ha provocado la búsqueda de fuentes alternativas como los fosfatos de hierro y aluminio, fuentes parcialmente aciduladas y desechos de concentrados fosfáticos (PROCHNOW et al., 2006; PRADO et al., 2011; TRUJILLO, 2014; RAFAEL et al., 2018).

Estas fuentes pueden reducir la adsorción o fijación de P, como resultado de su disolución lenta en la solución del suelo y el potencial efecto residual (HOROWITZ; MEURER, 2003). Los fertilizantes minerales fosfatados son esenciales en los suelos del bioma Cerrado Brasileño para mantener y aumentar la productividad de los cultivos (HOROWITZ; MEURER, 2003; LOPES, 2004).

El maíz (*Zea mays* L.) presenta alto potencial productivo donde el uso de fertilizantes constituye uno de los factores de mayor influencia en la relación suelo-planta-fertilizante (KARUNANITHI et al., 2015). Al respecto, Horowitz y Meurer (2003) evaluaron la eficiencia de fosfatos de diferente granulometría en maíz, en el primer ciclo observaron que a medida que aumentaba el tamaño de las partículas, disminuía la eficiencia de los fosfatos. Sin embargo, a partir del segundo ciclo los fosfatos de partículas más gruesas aumentaron su eficiencia al encontrarse disponible P. Por su parte, Ono et al. (2009) al estudiar la aplicación de fertilizantes fosfatados en condiciones controladas en soya y maíz, observaron que los cultivos respondieron a la fertilización fosfatada independientemente de la fuente de P (superfosfato triple y fosfato natural de Arad).

Según la hipótesis, los fosfatos de baja solubilidad o parcialmente acidulados pueden ser tan eficientes o hasta superiores a las fuentes solubles convencionales en disponibilizar el P en los suelos más ácidos, pobres en P y más propensos a la fijación. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de los fertilizantes fosfatados sobre el cultivo del maíz en dos tipos de suelo en condiciones controladas.

## Materiales y Métodos

El trabajo fue desarrollado en los invernaderos del Instituto de Ciencias Agrarias de la Universidad Federal de Uberlândia (ICIAG/UFU), Uberlândia, Brasil, donde se utilizaron dos suelos que representan gran importancia para la región, por tratarse de suelos encontrados en la mayor parte del cerrado brasileño. Las muestras de suelo recogidas presentan clases texturales contrastantes (arcilla y arena), Typic Acrustox (TA) y Typic Quartzipsamment (TQ), clasificados según Soil Survey Staff (2014); colectados de 0 a 20 cm de profundidad en el municipio de Uberlândia (Cuadro 1).

El pH del suelo se determinó en una solución 0.01 M de  $\text{CaCl}_2$ , en una relación de suelo: solución de 1:2,5. Calcio y magnesio intercambiables se extrajeron con una solución tampón de  $\text{mol L}^{-1}$  KCl. La acidez potencial ( $\text{H}+\text{Al}^{3+}$ ) fue extraída con acetato de calcio 1N a pH 7,0. La disponibilidad de potasio y fósforo fue determinada por extracción con una solución de  $\text{HCl } 0,05 \text{ mol L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 0,025 \text{ mol L}^{-1}$  (EMBRAPA, 2009). Los resultados de los análisis químicos se utilizaron para la determinación de la suma de bases o valor S ( $\text{S cmol}_c \text{ kg}^{-1} = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+$ ). La capacidad de intercambio catiónico (T) se calculó a partir de la fórmula  $T (\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}) = \text{S} + \text{Acidez Potencial}$ . La saturación de bases (V) se calculó a partir de  $V (\%) = ((\text{S} \cdot \text{T}^{-1}) \cdot 100)$ . La determinación de la composición granulométrica de los suelos se realizó mediante el método de la pipeta (EMBRAPA, 2009).

A pesar de presentar diferentes clases de textura de los suelos recogidos para el experimento presentan bajos niveles de P (fósforo) y bajo pH, por tratarse de suelos con ácida elevada. Para evaluar el efecto residual de las fuentes de P en el suelo, fueron sembrados dos ciclos consecutivos de maíz en macetas con capacidad de 5 kg, donde se ajustó el pH de 5.5, considerado ideal para la disponibilidad y la evaluación de los nutrientes (RAIJ, 2011). El maíz que se utilizó fue el híbrido DKB 390, precoz que presenta alto potencial productivo y estabilidad con amplia adaptación en el verano. Un total de 10 Semillas de este híbrido se sembraron en las macetas con los dos suelos, a una profundidad 3-5 cm con el objetivo de la cobertura de las semillas. Al momento de la siembra se aplicaron  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  de N (sulfato de amonio),  $83 \text{ mg kg}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  (cloruro de potasio) e  $25 \text{ mg kg}^{-1}$  de micronutrientes (FTE BR12) uniformemente en todas las parcelas para la disponibilidad de nutrientes las plantas. Asimismo, en la siembra del primer ciclo se aplicaron los fertilizantes fosfatados como se comentará más adelante.

**Cuadro 1.** Caracterización química y física de los suelos utilizados en el experimento.

Suelo	pH $\text{CaCl}_2$	P	S	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V
		mg $\text{dm}^{-3}$		cmol <sub>c</sub> $\text{dm}^{-3}$						%
TA	4.3	3.4	2.0	4.2	0.05	0.2	0.1	0.2	7.3	4
TQ	4.1	3.6	2.0	3.8	0.02	0.2	0.1	0.3	5.2	7
		Arena Gruesa		Arena Fina		Limo		Arcilla		
		%								
TA		9.0		4.3		3.3		83.4		
TQ		62.6		21.8		0.1		15.5		

TA = Typic Acrustox; TQ = Typic Quartzipsamment; SB = Suma de Bases; V= Saturación por bases; CTC = Capacidad de intercambio catiónico.

Al tiempo indicado (10 días) se realizó el raleo donde se dejaron cuatro plantas por maceta para establecer un stand de crecimiento uniforme de acuerdo con las capacidades de los vasos. Durante el periodo experimental la humedad se mantuvo en 70% de la capacidad máxima de retención de agua del suelo, reponiendo el agua evapotraspirada por la diferencia de peso diario de las macetas por el cálculo de la densidad de flujo del agua en los respectivos vasos (HARGER et al., 2007).

A los 40 días después de emergencia (DDE) en ambos ciclos fueron colectadas las plantas, para determinar la masa seca, contenida y concentración de P en toda la parte aérea. Posteriormente se determinó P a través de la digestión vía húmeda de las muestras de planta con solubilización nítrica perclórica, donde las muestras fueron solubilizadas con ácidos nítricos (65%) y perclórico (70%) como se describe EMBRAPA (2009).

A los 50 e 100 días de la aplicación de los tratamientos (DDA), después de la cosecha de cada cultivo de maíz, se tomaron muestras de suelo se recogieron en cada uno de los vasos (5 puntos en cada vaso) con ayuda de un pequeño trado y se sometieron las muestras a ser secas y la preparación para análisis de P en el suelo. Los análisis de P fueron determinados por el método de extracción por Resina, que consiste en la extracción del P por la resina intercambiadora de aniones. La resina usada fue la Amberlite IRA-400, aniónica base fuerte, con 2,5 cm<sup>3</sup> en bolsitas de malla de poliéster (EMBRAPA, 2009). La resina fue pre condicionada con solución de KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 0,5N y lavados con agua e HCl 0,5N. Para la extracción, se colocaron en frasco erlenmeyer 5 cm<sup>3</sup> de tierra, 50 ml de agua destilada y una bolsa de resina saturada con bicarbonato, sacudiéndose por dos horas y lavándose la bolsa de resina con agua destilada. Para la extracción del P de la resina, la bolsa se colocó en 50 ml de HCl 0,5N (EMBRAPA, 2009). Después de treinta minutos de contacto y más treinta de agitación, se separó la bolsa de la resina, retirando el extracto para la determinación de P por el método colorimétrico con una solución de acción ácida de molibdato de amonio (NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>·4H<sub>2</sub>O (EMBRAPA, 2009).

Con el fin de evaluar el efecto de los fertilizantes fosfatados en los dos ciclos consecutivos, se implementó un diseño de experimentos completamente aleatorizado (DCA) en esquema factorial 6 × 2 + 1 (fuente x dosis + testigo), donde se utilizaron seis fuentes fosfatadas y dos dosis de P (100 y 200 mg kg<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>),

más el tratamiento testigo (sin adición de P), 13 tratamientos y cuatro repeticiones, totalizando 52 parcelas.

Los fertilizantes utilizados en este experimento son fuentes de P que presentan diferentes características de acuerdo con su material de origen y fueron elegidas porque son producidas en yacimientos nacionales (fuentes registradas y no registradas hasta el momento de la conducción del experimento). Se utilizó el superfosfato triple que es uno fertilizante comúnmente utilizado en todo el mundo como fuente de fósforo por ser una fuente totalmente soluble. Los fosfatos llamados fosfato valle 1 y el fosfato valle 2 son fuentes residuales de la producción de ácido fósforo (fuente de fertilizante fosfatado) brasileño aún no registrados (suministradas por la empresa Agronelli Insumos Agrícolas). Los Fosfatos Acidulados Parcialmente Calcinados (FAPC) cernido y granulado, son fuentes provenientes de rocas fosfáticas extraídas en el municipio de Registro (São Paulo, Brasil) tratadas parcialmente con ácido fósforo dando la característica de fuente parcialmente acidulada (comunicación personal según el fabricante/Multifós Fertilizantes). Fosfato Natural Alborada (FNA) procedentes yacimiento de origen ígnea-residual (comunicación personal según el fabricante/Multifós Fertilizantes), ubicada en el principio de Registro (São Paulo, Brasil) (Cuadro 2).

Las dosis de P en ambos experimentos se calcularon en función de los contenidos totales de cada fosfato. Todas las fuentes de P se homogenizaron con el suelo en cada maceta (5 kg de suelo) antes de sembrar el primer ciclo (KORNDÖRFER, 2004).

En relación al análisis estadístico se realizó el análisis de varianza usando el programa estadístico ASSISTAT 7.6, donde al encontrar diferencias significativas de la prueba de F se compararon las medias por las pruebas de Scott-Knott y Dunnett para comparar con el tratamiento testigo a 0.05 de significancia (SILVA; AZEVEDO, 2016).

## Resultados y Discusión

Los contenidos de P en el suelo fueron influenciados por las fuentes fosfatadas y las dosis de P aplicadas (Cuadro 3 y 4).

Después de 50 días de la aplicación (DDA) de los tratamientos, el Fosfato Valle 2, presentaron niveles más altos de P pero después de 100 dda el fosfato natural Alborada (FNA) presentó mejores resultados en muestras de suelo de un Typic

**Cuadro 2.** Caracterización de los fertilizantes fosfatados, contenidos de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total, en H<sub>2</sub>O, en CAN+H<sub>2</sub>O y en ÁC 1:100 y Ca, Mg y S.

Fuente de P	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>				Ca	Mg	S
	H <sub>2</sub> O	CAN+H <sub>2</sub> O	ÁC <sup>2</sup> 1:100	Total	Total		
	----- % -----						
SFT <sup>3</sup>	37	41	-	45	13	-	-
Fosfato Valle 2	2.4	12	-	14	12	-	-
Fosfato Valle 1	1.2	3	-	7	20	-	-
FAPC Cernido <sup>4</sup>	-	16	-	28	14	1	8
FAPC Granulado <sup>4</sup>	-	16	-	28	14	1	8
FNA <sup>5</sup>	-	3	5.5	25	20	-	-

<sup>1</sup>CAN = citrato de amonio neutro; <sup>2</sup>ÁC = ácido cítrico a 2%; <sup>3</sup>Superfosfato triple; <sup>4</sup>fosfato acidulado parcialmente calcinado; <sup>5</sup>Fosfato Natural Alborada; Segundo ABNT n° 18<sup>3</sup> e 36<sup>4</sup>.

**Cuadro 3.** Contenidos de fósforo (P) en muestras de suelo de un Typic Acrustox-TA (arcilloso) a los 50 e 100 días después de la aplicación (DDA) de diferentes fuentes y dosis de P.

TA – P en el suelo	1° ciclo (50 dda)				2° ciclo (100 dda)			
	Dosis de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )				Dosis de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )			
Tratamientos	0	100	200	Media	0	100	200	Media
	----- mg dm <sup>-3</sup> -----							
Testigo	2.9	-	-	2.9	1.8	-	-	1.8
SFT <sup>1</sup>	-	6.7 b	14.3 c	10.5	-	1.4 b	3.0 c	2.2
F. Valle 1	-	12.6 b	30.3 b*	21.4	-	1.9 b	1.7 c	1.8
F. Valle 2	-	19.3 a*	43.4 a*	31.3	-	4.2 b	1.7 c	2.9
FAPC <sup>2</sup> granulado	-	6.2 b	16.6 c*	11.4	-	3.4 b	12.7 b*	8.0
FAPC <sup>2</sup> cernido	-	16.6 c*	20.1 c*	18.3	-	2.8 b	2.2 c	2.5
FNA <sup>3</sup>	-	10.0 c	10.0 c	10.0	-	10.9 a*	27.6 a*	19.2
CV (%)	39.85				68.86			
DMS	12.51				9.0			

TA = Typic Acrustox; CV = Coeficiente de Variación; DMS = Diferencia Mínima Significativa; <sup>1</sup>Superfosfato triple; <sup>2</sup>fosfato acidulado parcialmente calcinado; <sup>3</sup>Fosfato Natural Alborada; (-) Indica que no presenta ningún resultado para esta cerda; medias seguidas por letras distintas en la columna para cada cultivo son diferentes entre sí por la prueba de Scott-Knott a 0.05 de significancia; \*significativo por la prueba de Dunnett a 0.05 de significancia.

**Cuadro 4.** Contenidos de fósforo (P) en muestras de suelo de un Typic Quartzipsammet-TQ (arenoso) a los 50 e 100 días después de la aplicación (DDA) de diferentes fuentes y dosis de P.

TQ – P en el suelo	1° ciclo (50 dda)				2° ciclo (100 dda)			
	Dosis de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )				Dosis de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )			
Tratamientos	0	100	200	Media	0	100	200	Media
	----- mg dm <sup>-3</sup> -----							
Testigo	2.7	-	-	2.7	2.6	-	-	2.6
SFT <sup>1</sup>	-	5.8 b	10.9 c	8.3	-	7.3 c	14.1 b	10.7
F. Valle 1	-	18.3 a*	37.4 a*	27.8	-	24.9 a*	32.9 a*	31.4
F. Valle 2	-	18.5 a*	32.2 a*	25.3	-	20.5 a*	34.8 a*	27.6
FAPC <sup>2</sup> granulado	-	4.0 b	7.1 c	5.5	-	7.0 c	13.1 b	10.0
FAPC <sup>2</sup> cernido	-	20.1 a*	20.7 b*	20.4	-	15.6 b	37.8 a*	26.7
FNA <sup>3</sup>	-	8.9 b	9.2 c	8.6	-	14.8 b	18.9 b*	16.8
CV (%)	29.41				25.68			
DMS	8.79				10.03			

TQ = Typic Quartzipsammet; CV = coeficiente de variación; DMS = diferencia mínima significativa; <sup>1</sup>Superfosfato triple; <sup>2</sup>fosfato acidulado parcialmente calcinado; <sup>3</sup>Fosfato Natural Alborada; (-) Indica que no presenta ningún resultado para esta cerda; medias seguidas por letras distintas en la columna para cada cultivo son diferentes entre sí por la prueba de Scott-Knott a 0.05 de significancia; \*significativo por la prueba de Dunnett a 0.05 de significancia.

Acrustox-TA, arcilloso (Cuadro 3). Esta ocurrencia se dio posiblemente porque el fosfato natural e insoluble en agua se disuelve lentamente en la solución del suelo y tiende a aumentar la disponibilidad de P en el tiempo (DODOR, 2016). Fosfatos con menor solubilidad mostraron resultados similares a los del superfosfato triple (SFT), justificado por la probable ajuste de la P proporcionada por el fosfato soluble sobre el 50 y el 100 dda, además de la extracción de plantas de maíz (RAIJ, 2011).

Los tratamientos con fosfato Valle 1 y 2 presentaron mayores concentraciones de P en el suelo de textura arenosa (TQ) para ambas dosis de P después de 50 y 100 días de la aplicación (dda), al compararse con el tratamiento testigo y demás fertilizantes (Cuadro 4).

SFT, FAPC granulado y FNA presentaron menores concentraciones de P después del primero y segundo ciclo

(50 y 100 dda). El FAPC cernido presentó mayor incremento en la concentración de P en el suelo 100 dda en relación con el granulado (Cuadro 4), lo cual difirió de los resultados de Stefanutti et al. (1995) quienes encontraron que los granulados en la mayor dosis (0, 50, 100 y 150 mg kg<sup>-1</sup> de P) presentaron mayores contenidos de P al evaluar fuentes de diferente granulometría (superfosfato simples granulado, termofosfato magnesiano en cernido, grueso y granulado) después de siete cultivos consecutivos de maíz en macetas. Trujillo (2014), al evaluar la aplicación de diferentes fosfatos (DAP, Fosforita, Fosfato parcialmente acidulado y fosfato calcinado) en la producción de maíz en un suelo arenoso, verificó mayores niveles de P en el suelo cuando se aplicó fosfato calcinado.

La concentración de P en maíz no mostró grandes variaciones, pero en el primer ciclo, esta aumentó con el tratamiento FAPC

cernido en comparación con el testigo, mientras que F. Valle 2 (dosis de 200 mg kg<sup>-1</sup>) mostró mejores resultados en el segundo ciclo (Cuadro 5).

Para el suelo de textura arenosa se evidenció que en el primer ciclo, en la media de ambas dosis el tejido de las plantas con FNA (4.1 g vaso<sup>-1</sup>) presentó mayor concentración de P que los demás tratamientos (Cuadro 6). Pero que los resultados en el segundo ciclo demostraron que el tratamiento F. Valle 2 en ambas dosis de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> evidenció mayores concentraciones de P en comparación con FNA, y FAPC. Los resultados de Ono et al. (2009) difieren con los encontrados, ya que dichos autores no presentaron diferencias significativas para concentraciones de P foliar en maíz. Pero Trujillo (2014), verificó que el DAP seguido del fosfato calcinado presentaron mayores contenidos de P absorbidos.

Por otra parte, al evaluar la producción de masa seca en el suelo arcilloso, se verificó mayor masa (1° ciclo) en los tratamientos con F. Valle 2 y FAPC granulado en ambas dosis y menor producción en el tratamiento con FNA (Cuadro 7). En el segundo cultivo, se encontró la mayor masa seca media con la aplicación de los fosfatos Valle 1 (5.3 g por vaso) y Valle 2 (6.6 g por vaso) (Cuadro 7).

Para el suelo de textura arenosa se evidenció que en el primer ciclo, en la media de ambas dosis, la fertilización con F. Valle 1 y F. Valle 2 generó una producción media de 14.5 y 16.0 g vaso<sup>-1</sup> en la producción de masa seca de la parte aérea para el primer ciclo en relación a las demás fuentes fosfatadas (Cuadro 8). En segundo ciclo de maíz los tratamientos F. Valle (en la dosis 100 mg kg<sup>-1</sup>) y F. Valle 2 (en la dosis 200 mg kg<sup>-1</sup>) presentan mayores incrementos de masa seca (Cuadro 8).

**Cuadro 5.** Contenidos de fósforo (P) en plantas de maíz sembradas en los suelos Typic Acrustox-TA (Arcilloso) a los 50 e 100 días después de la aplicación (DDA) de diferentes fuentes y dosis de P.

TA – P parte aérea	1° ciclo (50 dda)				2° ciclo (100 dda)			
	Dosis de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )				Dosis de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )			
Tratamientos	0	100	200	Media	0	100	200	Media
	----- g kg <sup>-1</sup> -----							
Testigo	2.1	-	-	2.1	1.0	-	-	1.0
SFT <sup>1</sup>	-	3.0	3.3	3.1 a	-	0.9	1.1	1.0 b
F. Valle 1	-	3.0	3.5	3.3 a	-	1.2	1.2	1.2 a
F. Valle 2	-	3.2	3.5	3.2 a	-	1.1	1.4 *	1.3 a
FAPC <sup>2</sup> granulado	-	3.1	3.1	2.9 a	-	1.1	1.2	1.2 a
FAPC <sup>2</sup> Cernido	-	3.8 *	3.6 *	3.7 a	-	1.0	1.0	1.0 b
FNA <sup>3</sup>	-	2.6	2.8	2.6 a	-	1.0	1.1	1.1 b
CV (%)	22.28				8.72			
DMS	1.40				0.35			

TA = Typic Acrustox; <sup>1</sup>Superfosfato triple; <sup>2</sup>fosfato acidulado parcialmente calcinado; <sup>3</sup>Fosfato Natural Alborada; CV = coeficiente de variación; DMS = diferencia mínima significativa; (-) Indica que no presenta ningún resultado para esta cerda; medias seguidas por letras distintas en la columna para cada cultivo son diferentes entre sí por la prueba de Scott-Knott a 0.05 de significancia; \*significativo por la prueba de Dunnett a 0.05 de significancia.

**Cuadro 6.** Contenidos de fósforo (P) en plantas de maíz sembradas en los suelos Typic Quartzipsamment-TQ (Arenoso) a los 50 e 100 días después de la aplicación (DDA) de diferentes fuentes y dosis de P.

TQ – P parte aérea	1° ciclo (50 dda)				2° ciclo (100 dda)			
	Dosis de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )				Dosis de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )			
Tratamientos	0	100	200	Media	0	100	200	Media
	----- g kg <sup>-1</sup> -----							
Testigo	2.5	-	-	2.5	-	-	-	1.0
SFT <sup>1</sup>	-	3.6 *	2.8	3.2 b	-	1.3 a*	1.4 c*	1.3
F. Valle 1	-	3.3	2.8	3.0 b	-	1.4 a*	1.6 b*	1.5
F. Valle 2	-	3.6 *	3.2	3.4 b	-	1.4 a*	2.2 a*	1.8
FAPC <sup>2</sup> granulado	-	3.0	2.5	2.7 b	-	1.2 b	1.5 c*	1.3
FAPC <sup>2</sup> Cernido	-	3.1	2.7	2.9 b	-	1.2 b	1.4 c*	1.4
FNA <sup>3</sup>	-	3.9 *	4.3 *	4.1 a	-	1.0 c	1.4 c*	1.2
CV (%)	16.47				8.34			
DMS	1.07				0.24			

TQ = Typic Quartzipsamment; CV = coeficiente de variación; DMS = diferencia mínima significativa; <sup>1</sup>Superfosfato triple; <sup>2</sup>fosfato acidulado parcialmente calcinado; <sup>3</sup>Fosfato Natural Alborada; (-) Indica que no presenta ningún resultado para esta cerda; medias seguidas por letras distintas en la columna para cada cultivo son diferentes entre sí por la prueba de Scott-Knott a 0.05 de significancia; \*significativo por la prueba de Dunnett a 0.05 de significancia.

**Cuadro 7.** Producción de masa seca (MS) de la parte aérea de plantas de maíz sembradas en los suelos Typic Acrustox-TA (Arcilloso) a los 50 e 100 días después de la aplicación (DDA) de diferentes fuentes y dosis de P.

TA – MS parte aérea	1° ciclo (50 dda)				2° ciclo (100 dda)			
	Dosis de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )				Dosis de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )			
Tratamientos	0	100	200	Media	0	100	200	Media
	-----g <sup>-1</sup> -----							
Testigo	3.3	-	-	3.3	2.2	-	-	2.2
SFT <sup>1</sup>	-	5.4 b*	8.2 b*	6.8	-	2.5	3.4	2.9 b
F. Valle 1	-	5.8 b*	8.8 b*	7.3	-	4.9	5.7	5.3 a
F. Valle 2	-	6.8 a*	10.7 a*	8.7	-	6.2	7.0	6.6 a
FAPC <sup>2</sup> granulado	-	6.9 a*	9.8 a*	8.4	-	3.3	4.5	4.3 b
FAPC <sup>2</sup> Cernido	-	5.7 b*	8.6 b*	7.1	-	2.9	5.7	3.9 b
FNA <sup>3</sup>	-	3.6 c	3.9 c	3.8	-	2.9	2.5	2.7 b
CV (%)	13.70				43.21			
DMS	1.82				3.66			

TA = Typic Acrustox; CV = coeficiente de variación; DMS = diferencia mínima significativa; <sup>1</sup>Superfosfato triple; <sup>2</sup>fosfato acidulado parcialmente calcinado; <sup>3</sup>Fosfato Natural Alborada; (-) Indica que no presenta ningún resultado para esta cerda; medias seguidas por letras distintas en la columna para cada cultivo son diferentes entre sí por la prueba de Scott-Knott a 0.05 de significancia; \*significativo por la prueba de Dunnett a 0.05 de significancia.

**Cuadro 8.** Producción de masa seca (MS) de la parte aérea de plantas de maíz sembradas en los suelos Typic Quartzipsammet-TQ (Arenoso) a los 50 e 100 días después de la aplicación (DDA) de diferentes fuentes y dosis de P.

TQ – MS parte aérea	1° ciclo (50 dda)				2° ciclo (100 dda)			
	Dosis de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )				Dosis de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )			
Tratamientos	0	100	200	Media	0	100	200	Media
	-----g <sup>-1</sup> -----							
Testigo	4.5	-	-	4.5	2.5	-	-	2.5
SFT <sup>1</sup>	-	8.6	12.3 *	10.4 c	-	3.6 b	4.3 b	4.0
F. Valle 1	-	11.4 *	17.6 *	14.5 a	-	7.0 a*	8.9 b*	7.9
F. Valle 2	-	13.5 *	18.6 *	16.0 a	-	4.3 b	10.8 a*	7.5
FAPC <sup>2</sup> granulado	-	11.6 *	14.0 *	12.8 b	-	3.6 b	6.0 b*	4.8
FAPC <sup>2</sup> Cernido	-	11.2 *	14.4 *	12.8 b	-	4.2 b	4.4 b	4.3
FNA <sup>3</sup>	-	8.7	10.3 *	9.5 c	-	3.5 b	4.2 b	3.8
CV (%)	24.30				28.25			
DMS	4.41				3.00			

TQ = Typic Quartzipsammet; CV = coeficiente de variación; DMS = diferencia mínima significativa; <sup>1</sup>Superfosfato triple; <sup>2</sup>fosfato acidulado parcialmente calcinado; <sup>3</sup>Fosfato Natural Alborada; (-) Indica que no presenta ningún resultado para esta cerda; medias seguidas por letras distintas en la columna para cada cultivo son diferentes entre sí por la prueba de Scott-Knott a 0.05 de significancia; \*significativo por la prueba de Dunnett a 0.05 de significancia.

Los resultados observados demostraron que en el suelo arcilloso se presentó menor producción de masa seca en relación al suelo arenoso, lo que puede ocurrir por la mayor absorción de P que dificulta el desarrollo y así la producción de masa seca (RAIJ, 2011; KARUNANITHI et al., 2015). En el suelo arenoso las plantas presentaron mayores producciones de masa seca, lo cual demuestra una mejor respuesta de los tratamientos en el desenvolvimiento agronómico de las plantas de maíz en suelos con menores contenidos de arcilla.

También, en los tratamientos con SFT en ambos suelos se encontraron menor masa seca, lo cual difiere de los resultados de Miola et al. (1999) quienes observaron que al aumento de las dosis de SFT se presentó mayor masa seca en maíz bajo invernadero, al evaluar la disponibilidad de P utilizando en seis suelos. Pero Sandim (2016) al evaluar la aplicación de fosfatos

con diferentes solubilidades en el cultivo del maíz, observó que la aplicación de SFT y fosfato precipitado presentaron mayor producción de masa seca de maíz en suelo de textura arcillosa.

Harger et al. (2007) constataron que con el incremento de dosis de P, hubo aumento en la producción de masa seca de la parte aérea de plantas de maíz cultivadas en invernadero, independientemente de la fuente de P (SFT y fosfato de Arad). Esos resultados indican que la aplicación de fuentes solubles en el área total puede presentar una menor eficiencia para fuentes más solubles. Esta baja respuesta de la planta al uso del FAPC granulado, FAPC Cernido y FNA posiblemente ocurrió porque los suelos recibieron calado para corrección del pH resultando en menor eficiencia de las fuentes debido a la menor solubilización de fosfato de calcinados en esta condición (SANDIM, 2016). Aunque los fosfatos pueden tener un mayor efecto residual

que las fuentes más solubles, estos tratamientos fueron menos eficientes que el F. Valle 1 y 2 en el aumento de producción de masa seca y en el suministro de P para plantas de maíz. Pero Trujillo (2014) verificó mejores características morfológicas y desarrollo vegetativo en maíz con aplicación de fosforita y fosfato parcialmente acidulado, con mayores rendimientos de producción para fosfato parcialmente acidulado y DAP y bajos rendimientos con fosforita y testigo.

Con relación a la concentración de fósforo en la parte aérea para el suelo arcilloso, no se evidenció influencia de las fuentes y diferentes dosis de P. Pero todos los tratamientos en el 1° ciclo diferían del testigo en la dosis de 200 mg kg<sup>-1</sup>. En el 2° ciclo los F. Valle 1 y 2 presentaron una mayor concentración media de P en la parte aérea de maíz mientras

que con aplicación de FNA se encontró menor concentración medio de P (Cuadro 9).

El concentración medio de P en la parte aérea de plantas de maíz de 1° ciclo sembradas en suelo TQ varió de 11.4 a 53.5 mg vaso<sup>-1</sup> en el suelo arenoso (Cuadro 10). El F. Valle 2 presentó una mayor concentración media de P y todos los tratamientos en ambas dosis diferían significativamente del testigo. En el 2° ciclo los F. Valle 1 mostró una mayor concentración de P en la dosis de 100 mg kg<sup>-1</sup> en comparación con otras fuentes, pero en comparación con los SFT la acumulación fue mayor en ambas dosis (Cuadro 10).

En general, el tratamiento F. Valle 2 en los dos suelos presentó mayor concentración media de P en relación con las demás fuentes fosfatadas y el testigo en el primer ciclo. En el segundo ciclo el mayor concentración de P observado fue en las

**Cuadro 9.** Concentración de fósforo (P) en la parte aérea de plantas de maíz sembradas en suelo Typic Acrustox-TA (arcilloso) después de 50 y 100 días de la aplicación (DDA) de diferentes fuentes y dosis de P.

TA – P Concentración	1° ciclo (50 dda)				2° ciclo (100 dda)			
	Dosis de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )				Dosis de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )			
Tratamientos	0	100	200	Media	0	100	200	Media
	-----mg vaso <sup>-1</sup> -----							
Testigo	7.1	-	-	7.1	2.1	-	-	2.1
SFT <sup>1</sup>	-	16.3	26.8 *	21.5 a	-	2.4	3.7	3.1 b
F. Valle 1	-	17.6	31.0 *	24.3 a	-	6.2	7.1	6.6 a
F. Valle 2	-	22.1 *	34.5 *	28.3 a	-	7.0	10.6 *	8.4 a
FAPC <sup>2</sup> granulado	-	19.0	31.3 *	25.1 a	-	3.8	5.5	4.5 b
FAPC <sup>2</sup> cernido	-	22.5 *	31.3 *	26.9 a	-	2.9	5.4	4.1 b
FNA <sup>3</sup>	-	9.1	11.0	10.0 b	-	2.8	2.6	2.6 b
CV (%)		29.22				53.79		
DMS		12.90				5.28		

TA = Typic Acrustox; CV = coeficiente de variación; DMS = diferencia mínima significativa; <sup>1</sup>Superfosfato triple; <sup>2</sup>fosfato acidulado parcialmente calcinado; <sup>3</sup>Fosfato Natural Alborada; (-) Indica que no presenta ningún resultado para esta cerda; medias seguidas por letras distintas en la columna para cada cultivo son diferentes entre sí por la prueba de Scott-Knott a 0.05 de significancia; \*significativo por la prueba de Dunnett a 0.05 de significancia.

**Cuadro 10.** Concentración de fósforo (P) en la parte aérea de plantas de maíz sembradas en suelo Typic Quartzipsamment-TQ (arenoso) después de 50 y 100 días de la aplicación (DDA) de diferentes fuentes y dosis de P.

TQ – P Concentración	1° ciclo (50 dda)				2° ciclo (100 dda)			
	Dosis de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )				Dosis de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )			
Tratamientos	0	100	200	Media	0	100	200	Media
	-----mg vaso <sup>-1</sup> -----							
Testigo	11.4	-	-	11.4	2.7	-	-	2.7
SFT <sup>1</sup>	-	30.9 *	33.9 *	32.4 b	-	4.8 b	6.5 c	5.7
F. Valle 1	-	37.0*	49.8 *	43.4 b	-	10.1 a*	14.8 b*	12.5
F. Valle 2	-	48.1 *	58.9 *	53.5 a	-	6.5 b	23.4 a*	14.9
FAPC <sup>2</sup> granulado	-	34.6 *	35.2 *	34.9 b	-	4.5 b	9.2 c*	6.8
FAPC <sup>2</sup> cernido	-	37.0 *	39.0*	36.3 b	-	5.0 b	6.3 c	5.7
FNA <sup>3</sup>	-	34.6 *	44.0 *	39.3 b	-	3.6 b	5.9 c	4.7
CV (%)		21.37				17.91		
DMS		16.57				16.80		

TQ = Typic Quartzipsamment; CV = coeficiente de variación; DMS = diferencia mínima significativa; <sup>1</sup>Superfosfato triple; <sup>2</sup>fosfato acidulado parcialmente calcinado; <sup>3</sup>Fosfato Natural Alborada; (-) Indica que no presenta ningún resultado para esta cerda; medias seguidas por letras distintas en la columna para cada cultivo son diferentes entre sí por la prueba de Scott-Knott a 0.05 de significancia; \*significativo por la prueba de Dunnett a 0.05 de significancia.

plantas que crecieron en los suelos fertilizados con F. Valle 2 en la dosis de 200 mg kg<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Cuadros 9 y 10). Estos resultados se asemejan a los observados por Sandim (2016), que verificó mayores acumulaciones de P por plantas de maíz cuando se aplicó fosfato precipitado, fuente esta que presenta características similares al F. Valle 1 y 2.

Los tratamientos que presentaron mayor extracción de P por planta fueron aquellos donde se observaron mayores concentraciones de P en la parte aérea y producción de masa seca, lo cual posiblemente ocurrió por el alto efecto residual de los fertilizantes de solubilidad parcial, lo que promueve la liberación gradual y eficiente del P (SOUSA et al., 2015). Los resultados con tratamiento SFT puede estar asociado su alta solubilidad, que libera rápidamente gran parte del P aplicado, coincidiendo con el periodo de mayor absorción y concentración del elemento por la planta, lo que propicia mayor incremento de biomasa e inmovilización del P (HOROWITZ; MEURER, 2003; ONO et al., 2009).

El presente estudio indica que las fuentes de P con solubilidad parcial pueden ser más eficientes en la disponibilidad de P en suelos ácidos y pobres en este nutriente en comparación con fuentes de elevada solubilidad que presentan una eficiencia reducida debido al alto poder de fijación de P en los suelos. Esta ocurrencia de mayor eficiencia en estos tipos de suelo puede ser justificada por la reacción de solubilización del fosfato con los iones de H<sup>+</sup>, por efecto de acidez del suelo (HOROWITZ; MEURER, 2003; MOWO et al., 2014; DODOR, 2016). En este caso, las fuentes con mayor superficie específica de contacto con el suelo (más cernidos), pueden ser más eficientes que las fuentes granuladas como se muestra en el trabajo (HOROWITZ; MEURER, 2003).

Con todo, se sugieren nuevos estudios en invernadero y campo, considerando experimentos de larga duración o cultivos sucesivos. Es posible que en el largo plazo las fuentes alternativas de P presenten mejores resultados en suelos de alto contenido de arcilla, pues los diferentes fosfatos deben aplicarse teniendo en cuenta los atributos químicos y físicos propios de cada suelo (PROCHNOW et al., 2006; KARUNANITHI et al., 2015; DODOR, 2016).

## Conclusiones

Lo Fosfato Valle 2 con solubilidad parcial fue más eficiente en aumenta el contenido de P en el suelo, el contenido y concentración de P en la planta, bien como la producción de masa seca de maíz. El FAPC tuvo resultados intermedios mientras que SFT y FNA bajas respuestas. Los fosfatos de modo general presentaron mejores resultados en suelo de textura arenosa.

## Agradecimientos

A la Coordinación de Perfeccionamiento de Personal de Nivel Superior (CAPES) por el apoyo en la investigación y por la concesión de beca de maestría al autor correspondiente.

## Referencias

- ASOCIACIÓN NACIONAL PARA LA PROMOCIÓN DE FERTILIZANTES – ANDA. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes in Brasil**, 2018. Disponible en: <www.anda.org.br>. Acceso: 29 jan. 2016.
- DODOR, D. E. Relative Agronomic Effectiveness of Some African Rock Phosphate Fertilizers in an Ultisol of Okinawa, Japan. **West African Journal of Applied Ecology**, Ghana, v. 24, n. 2, p. 45-55, 2016.
- EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2nd ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 628 p.
- HARGER, N. et al. Avaliação de fontes e doses de fósforo no crescimento inicial do milho. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 28, p. 39-44, 2007.
- HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. Eficiência de dois fosfatos naturais de cerrado em função do tamanho da partícula. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, p. 41-47, 2003.
- KARUNANITHI, R. et al. Phosphorus recovery and reuse from waste streams. **Advances in Agronomy**, Adelaide, v. 1, p. 173-250, 2015.
- KAUR, G.; REDDY, M. S. Effects of Phosphate-Solubilizing Bacteria, Rock Phosphate and Chemical Fertilizers on Maize-Wheat Cropping Cycle and Economics. **Pedosphere**, Patiala, v. 25, n. 3, p. 428-437, 2015.
- KORNDÖRFER, G. H. Fósforo na cultura da cana-de-açúcar. In: Yamada, T., Abdalla, S. R. S (Eds.). **Fósforo na Agricultura Brasileira**. São Paulo: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2004. p. 291-305.
- LOPES, A. S. Reservas de fosfatos e produção de fertilizantes fosfatados no Brasil e no mundo. In: YAMADA, T.; ABDALA A, S. R. S. (Org.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2004. p.11-34.
- MEW, M. C. Phosphate rock costs, prices and resources interaction. **The Science of the Total Environment**, Londres, v. 542, p. 1008-1012, 2016.
- MHALLA, B. et al. Partially Acidulation as an Alternative Means of Utilizing Phosphate Rocks of Different Origins in an Alkaline Calcareous Soil of Haryana, India. **Journal of the Indian Society of Soil Science**, New Delhi, v. 65, n. 3, p. 290-299, 2017.
- MIOLA, G. R. et al. Avaliação da disponibilidade de fósforo no solo para a cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 5, p. 813-819, 1999.
- MOWO, J. G. et al. The importance of proton supply in phosphate rock dissolution: Comparative study of three phosphate rocks from sub-Saharan Africa. **Journal of Science and Environmental Management**, Nigeria, v. 5, n. 4, p. 44-51, 2014.
- ONO, F. B. et al. Eficiência agrônômica de superfosfato triplo e fosfato natural de arad em cultivos sucessivos de soja e milho. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, p. 727-734, 2009.
- PROCHNOW, L. I. et al. Effectiveness of phosphate fertilizers of different water solubilities in relation to soil phosphorus adsorption. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 63, p. 333-340, 2006.
- RAFAEL, R. B. A. et al. CORTI, G. Assessment of potential nutrient release from phosphate rock and dolostone for application in acid soils. **Pedosphere**, Maputo, v. 28, n. 1, p. 44-58, 2018.
- RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. 1nd ed. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.

- SANDIM, A. S. **Solubilidade, efeito residual e eficiência agrônômica de fontes alternativas de fosfatos**. 2016. 150 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2016.
- SILVA, F. A. S.; AZEVEDO, C. A. V. The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. **African Journal of Agricultural Research**, Lavras, v. 11, p. 3733-3740, 2016.
- SOUSA, R. T. X. et al. Phosphate fertilizers for sugarcane used at pre-planting (phosphorus fertilizer application). **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 38, p. 1444-1455, 2015.
- STEFANUTTI, R.; MALAVOLTA, E.; MURAOKAET, T. Recuperação do fósforo residual do solo derivado de um termofosfato magnesiano com diferentes granulometrias e do superfosfato simples granulado. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 52, p. 233-238, 1995.
- TRUJILLO, A. T. Efecto de la roca fosfórica parcialmente acidulada y calcinada en la producción de maíz. **Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales**, Colombia, v. 1, p. 55-62, 2014.

---

Recibido: 14 aug. 2018  
Aceptado: 03 Dez. 2018