

Evaluación del uso de *Penicillium janthinellum* Biourge sobre la eficiencia de la fertilización fosfórica en el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L. var. Diacol Capiro)

Evaluating using *Penicillium janthinellum* Biourge on the efficiency of phosphoric fertilisation of potato crops (*Solanum tuberosum* L. var. Diacol Capiro)

Carlos Eduardo Nústez¹ y Julio César Acevedo²

Resumen: El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto del hongo *Penicillium janthinellum* B. (reportado como microorganismo solubilizador de fósforo en el suelo) sobre la eficiencia de la fertilización fosfórica edáfica en el cultivo de papa variedad 'Diacol Capiro'. Se realizaron cuatro experimentos en tres departamentos: Cundinamarca, Boyacá y Antioquia, donde se evaluaron siete tratamientos, que corresponden a cinco niveles de P_2O_5 edáfico (0, 100, 200, 300 y 400 kg · ha⁻¹) combinados con la aplicación del biofertilizante Fosfosol®, que contiene el hongo *Penicillium janthinellum* B. (2 L · ha⁻¹), y dos tratamientos testigo (absoluto y comercial). Las variables analizadas fueron: concentración de P en tejido foliar en prefloración; materia seca de hojas, tallos y tubérculos en floración; gravedad específica y rendimiento de tubérculo. Los resultados demostraron que no hubo respuesta a la aplicación de *Penicillium janthinellum* B., y en algunas de las localidades se observaron respuestas a los niveles de P edáfico. El P en tejido foliar varió entre 0,14% y 0,34%, sin diferencia entre los tratamientos, y el rendimiento promedio estuvo entre 29,7 y 35,7 t · ha⁻¹.

Palabras claves adicionales: microorganismos solubilizadores de fosfatos, fósforo, ácidos orgánicos

Abstract: This work was aimed at evaluating the effect of *Penicillium janthinellum* B. (reported as phosphorus solubilising microorganism in the soil) on the efficiency of phosphoric fertilisation of soil for the potato crop ('Diacol Capiro' variety). Seven treatments were evaluated in four experiments carried out in the Colombian departments of Cundinamarca, Boyacá and Antioquia. These treatments corresponded to five levels of P_2O_5 applied to the soil (0, 100, 200, 300 and 400 kg · ha⁻¹) combined with applying Fosfosol® biofertiliser (2 L · ha⁻¹) containing *Penicillium janthinellum* B. fungus, compared to two witness treatments (absolute and commercial). The variables analysed were P concentration in foliar tissue, dry leaf matter of leaves, stems and tubers in flowering, specific gravity and tuber yield. The results revealed that there was no response to applying *Penicillium janthinellum* B. and responses to edaphic phosphorous levels were observed in some localities. The P in foliar tissue ranged from 0.14% to 0.34%, no difference being observed amongst treatments. Average yield varied between 29.7 and 35.7 t · ha⁻¹.

Additional key words: phosphate solubilizing microorganisms, phosphorus, organic acids

Introducción

EL FÓSFORO ES UN NUTRIENTE ESENCIAL para las plantas. Participa en la estructura de moléculas tan importantes como los ácidos nucleicos y los fosfolípidos en las membranas celulares; forma parte de las moléculas ATP, ADP, AMP y pirofosfato para la transferencia de energía en procesos de síntesis y degradación y,

además, es parte esencial de glucofosfatos que participan en los procesos de fotosíntesis y respiración (Marschner, 1998).

El P se encuentra en la naturaleza en diversas formas químicas; sin embargo, solamente es absorbido por las plantas como anión fosfato monovalente ($H_2PO_4^-$) y anión bivalente (HPO_4^{2-}). Con las constantes aplicaciones de fer-

Fecha de recepción: 18 de abril de 2005

Aceptado para publicación: 21 de noviembre de 2005

¹ Profesor asociado, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. e-mail: cenuztezl@unal.edu.co

² Ingeniero agrónomo, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. e-mail: julioacevedoc@yahoo.com

tilizantes fosfatados al suelo se incrementa la reserva de P total en él, aunque la disponibilidad de este elemento para las plantas es reducida por causa de diversos procesos químicos que fijan o inmovilizan el P soluble en formas insolubles no disponibles para las plantas (Espinoza, 1998).

En general, el P puede fijarse por diversas reacciones químicas de acuerdo al tipo de suelo: en suelos con valores de pH alto, los iones fosfato reaccionan con el calcio, formando compuestos insolubles (Inpofos, 1997), mientras que en los suelos con pH ácido (<5,5) se forman compuestos insolubles con elementos como hierro y aluminio; los suelos derivados de cenizas volcánicas o andisoles, que se encuentran en gran parte de Colombia, incluyendo las zonas de cultivo de especies importantes como la papa, fijan el P en la superficie de los minerales amorfos, como las alofanas, y con los complejos humus-aluminio (Pumisacho y Sherwood, 2002).

Por la condición que presenta el P en el suelo, se hace necesario diseñar estrategias de manejo que permitan aumentar la disponibilidad de este elemento nutriente para los cultivos y, de esta forma, reducir las limitaciones que se presentan en la producción vegetal relacionadas con el área de nutrición. La acumulación de materia orgánica es mayor en suelos volcánicos localizados a mayor altitud (> 2.000 msnm). Evidencia indirecta obtenida en andisoles de Ecuador y Colombia permite concluir que la fijación de P está estrechamente relacionada con el contenido de carbono en el suelo (complejos humus-aluminio) (Espinoza, 1998).

El costo de la fertilización fosfórica en el cultivo de la papa en Colombia corresponde prácticamente a 60% de los costos de fertilización, y su eficiencia se considera del 20%; por tanto, el impacto económico de la fertilización fosfórica es considerable en el escenario productivo (Barrera, 2003).

Las investigaciones que se han realizado en el área de microbiología agrícola en el mundo reportan que algunos microorganismos de la rizósfera de las plantas pueden facilitar la absorción del P por la planta, ya que por medio de sus procesos metabólicos son capaces de solubilizar el P que se encuentra fijado o inmovilizado en el suelo y dejarlo en formas químicas que pueden ser absorbidas por las plantas. A estos microorganismos se les ha denominado microorganismos solubilizadores de fosfatos (MSF) (Rashid *et al.*, 2004).

En múltiples investigaciones se ha observado que los microorganismos solubilizadores de P inorgánico están

más concentrados en la rizósfera de las plantas que en el resto del suelo (Vásquez *et al.*, 2000). Dentro de los MSF se pueden encontrar hongos y bacterias que, gracias a la excreción de ácidos orgánicos, como los ácidos fórmico, acético, propiónico, láctico, glicólico, fumárico y succínico, o de enzimas hidrolíticas, como las fosfatasas, fitasas, nucleasas y fosfonatasas, liberan los aniones fosfato presentes en los complejos químicos mencionados arriba. Los ácidos orgánicos solubilizan los fosfatos inorgánicos, mientras que las enzimas hidrolíticas liberan el P que se encuentra en la materia orgánica del suelo (Rashid *et al.*, 2004).

En los últimos años se han desarrollado biofertilizantes que contienen diferentes cepas de especies de bacterias y hongos con capacidad para fijar nitrógeno atmosférico y/o solubilizar P que se encuentra fijado o inmovilizado en el suelo. Algunas de estas especies corresponden a los géneros *Aspergillus* y *Penicillium*, en el caso de los hongos, y a los géneros *Bacillus*, *Pseudomonas* y *Rhizobium*, en el caso de las bacterias (Rashid *et al.*, 2004).

El papel de los ácidos orgánicos producidos por los MSF en la solubilización del P insoluble puede deberse a la disminución del pH, la quelación de cationes y la competencia con el P por sitios de absorción en el suelo. También se ha reportado que los ácidos orgánicos pueden formar complejos solubles con iones metálicos asociados con P insoluble (Ca, Al, Fe) y así, el P es liberado (Rashid *et al.*, 2004). En estudios realizados por Mehana y Wahid (2002) en un suelo arenoso en Egipto, se encontró que, luego de realizar un ciclo de haba (*Vicia faba* L.) en el suelo inoculado con MSF (*Aspergillus niger*, *A. fumigatus*, *Penicillium pinophilum* y *Rhizobium leguminosarum* biovar *viciae*), el nivel de P disponible y de N en el suelo se incrementó significativamente con respecto al suelo no inoculado; además, los rendimientos de semilla de las plantas cultivadas en el suelo inoculado fueron significativamente mayores con respecto a las cultivadas en suelo no tratado.

Estudios realizados por Rashid *et al.* (2004) muestran que los ácidos orgánicos producidos *in vitro* en mayor cantidad por cepas de bacterias aisladas de la rizósfera de plantas de arroz y por cepas de las especies de hongos *Aspergillus flavus*, *A. niger* y *Penicillium canescens*, son los ácidos oxálico y cítrico; mientras que estudios realizados con *Penicillium radicum* (Whitelaw *et al.*, 1999) muestran que el principal ácido orgánico liberado en el medio de cultivo por este hongo fue el ácido glucónico y, a través de estudios abióticos con HCl, que la quelación de Al⁺³ por este ácido puede ser el factor determinante para la solubilización del fosfato de aluminio coloidal.

Narloch *et al.* (2002) encontraron diferencias entre los aislamientos de *Penicillium sp.* y *Aspergillus sp.* en cuanto a la capacidad de promover la producción de materia seca y la absorción de P en plantas de rábano, dependiendo del nivel de P aplicado, ya que el primero es más eficiente en presencia de las dosis más bajas de P y el segundo, con las dosis más altas. En estudios realizados por Kucey (1987) en trigo y frijol con *Penicillium bilaji* y una micorriza vesicular-arbuscular, se confirmó que las micorrizas y los MSF tienen un efecto sinérgico, de modo que el sistema solubilizador de P requiere de ambos para ser más efectivo; además, en este estudio se pudo observar que la aplicación de MSF con roca fosfórica generó un incremento en la toma del P por el frijol en invernadero y por el trigo en invernadero y en campo.

El hongo *Penicillium janthinellum* B. fue aislado de la rizósfera de cultivos de arroz en Villanueva (Casanare) por el Instituto de Biotecnología de la Universidad Nacional de Colombia y producido como biofertilizante concentrado líquido para uso agrícola bajo el nombre de Fosfosol®. Este producto ha sido probado en Colombia en cultivos de arroz, obteniendo resultados positivos tales como: mayor desarrollo radicular y aéreo, mayor sanidad en el cultivo, menor volcamiento y aumento de la producción hasta en 38% (Moreno, 2005).

El objetivo del presente trabajo fue evaluar, en diferentes tipos de suelo y condiciones agroecológicas, el efecto del uso de *Penicillium janthinellum* B. (microorganismo solubilizador de P) bajo diferentes dosis de P edáfico sobre el rendimiento de papa variedad 'Diacol Capiro'.

Materiales y métodos

Ubicación

El estudio se realizó durante el segundo semestre de 2003 en cuatro localidades: finca *Opalito* (Villapinzón, Cundinamarca), altitud 2.715 msnm; finca *La Ircania* (Toca, Boyacá), 2.770 msnm; finca *El Chayné* (Soracá, Boyacá), 2.971 msnm, y finca *San Esteban* (San Pedro, Antioquia), 2.565 msnm. Las características de los suelos en los que se realizaron los experimentos están consignados en la tabla 1.

Diseño experimental

Los cultivos experimentales en las diferentes localidades se sembraron bajo el diseño de bloques completos al azar, con tres repeticiones y parcelas de 40 m² (cinco surcos espaciados a 1 m por 8 m de longitud). Los tratamientos evaluados corresponden a la combinación de Fosfosol® (*Penicillium janthinellum* B., en concentración de $1 \cdot 10^7$ conidias/mL) con diferentes niveles de P (P₂O₅) aplicado al suelo en forma de superfosfato triple (0-46-0), con dosis de 0, 100, 2,00, 300 y 400 kg · ha⁻¹ de P₂O₅, (T1, T2, T3, T4 y T5, respectivamente). Adicionalmente, se sembraron dos tratamientos testigos: uno con dosis comercial de P edáfico (520 kg · ha⁻¹), en fuente fertilizante de mezcla física grado 12-34-12 (T6), y un testigo absoluto (T7) que no incluyó P edáfico ni Fosfosol®. El Fosfosol® fue aplicado en solución y localizado en el sitio de siembra, en dosis de 2 L · ha⁻¹, de acuerdo con las recomendaciones dadas por el fabricante para el

Tabla 1. Análisis de suelos de las cuatro localidades del experimento.

Localidad	Finca	pH	COrg (%)	P (ppm)	K	Ca	Mg	Na	Al	CIC
Villapinzón	Opalito	5,01	3,53	28,7	0,77	5,74	2,39	0,06	0,27	20,3
Toca	La Ircania	5,90	2,40	21,5	0,28	12,30	1,12	0,22	0,00	15,6
Soracá	El Chayné	4,98	2,96	142,2	0,92	6,48	0,83	0,10	0,22	18,1
San Pedro	San Esteban	4,26	18,22	68,9	0,76	5,78	1,95	0,16	1,80	51,6

Localidad	Finca	Mn	Zn	Fe	Cu	B	Textura
Villapinzón	Opalito	13,98	1,9	398	1,18	0,4	Franco arcillo-arenoso
Toca	La Ircania	36,2	3,9	136	2,3	0,29	Franco
Soracá	El Chayné	23	3,4	234	2,3	0,57	Franco
San Pedro	San Esteban	1,5	2,8	350	<0,7	0,75	Franco arenoso

COrg: carbono orgánico, CIC: capacidad de intercambio catiónico.

cultivo. La densidad de plantas fue de 25.000 sitios/ha, utilizando un tubérculo-semilla por sitio de siembra para todos los tratamientos.

Variables evaluadas

Materia seca: En cada localidad se realizaron muestreos destructivos por tratamiento en plena floración (época de máxima acumulación de materia seca en órganos fuente), tomando una planta por cada tratamiento en dos de los tres bloques de los experimentos. Las muestras vegetales se llevaron al laboratorio para la disección de hojas, tallos y tubérculos, para luego ingresar las muestras a la estufa de secado a 70 °C durante 72 h. Los pesos secos resultantes [hojas (PSH), tallos (PST) y tubérculos (PSTub)] se determinaron con balanzas digitales.

Concentración de P en tejido foliar: En la etapa de prefloración o primeras flores abiertas, se tomaron muestras de pecíolos de la tercera o cuarta hoja del tercio superior de la planta, de acuerdo con las recomendaciones de muestreo para la subespecie *tuberosum*, en dos repeticiones del experimento en todas las localidades. Estas muestras se secaron y analizaron en el laboratorio de Agua y Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, para determinar la concentración de elementos nutrientes en este tejido vegetal.

Rendimiento de tubérculo: En la cosecha se evaluó el peso de los tubérculos de cada unidad experimental, clasificados en las categorías primera, segunda y tercera, realizando las conversiones correspondientes a toneladas por hectárea para su análisis e interpretación de los resultados.

Gravedad específica (GE): Se tomaron muestras al azar de cinco tubérculos/tratamiento en el momento de cosecha para determinar en laboratorio la GE mediante el método de peso en agua y peso en aire [$GE = P_{\text{aire}} / (P_{\text{aire}} - P_{\text{agua}})$].

El análisis estadístico de todas las variables se realizó utilizando el paquete estadístico SAS versión 8.2., utilizando Anova, pruebas de Tukey (comparación múltiple) y análisis combinado. Para este último análisis se consideró la fuente 'localidad' como efecto aleatorio, teniendo en cuenta que todas las localidades de evaluación son parte representativa de la oferta agroecológica para el cultivo en las regiones productoras de los departamentos donde se desarrolló el proyecto y son contrastantes en cuanto a los contenidos de P, materia orgánica y otras propiedades fisicoquímicas (tabla 1).

Resultados y discusión

Soracá (Boyacá)

En esta localidad se encontraron diferencias en las variables de rendimiento de tubérculos de segunda (PT2), tercera (PT3) y total (PTT). Adicionalmente, se encontró diferencias en la variable peso seco de hojas (PSH). En las restantes variables no se presentaron diferencias significativas (tabla 2). En las variables de rendimiento anotadas, el tratamiento de menor rendimiento fue el que sólo incluyó la aplicación de Fosfosol® (T1), que fue igual al testigo absoluto (T6) y al tratamiento con 100 kg · ha⁻¹ de P₂O₅ (T2). Según la tabla 1, el nivel de P en los suelos de esta localidad fue alto, lo que indica que no hubo respuesta de la variedad 'Diacol Capiro' a la aplicación del Fosfosol® en la dosis evaluada. Los tratamientos con 200, 300 y 400 kg · ha⁻¹ de P₂O₅ y el testigo comercial (T3, T4, T5 y T7, respectivamente) fueron estadísticamente iguales entre sí, indicando que la variedad presentó respuesta a la aplicación de P edáfico hasta el nivel de 200 kg · ha⁻¹ de P₂O₅ (figura 1). En la variable peso seco de hojas (PSH) se encontró que el T7 (testigo comercial) fue igual a los tratamientos T2, T3, T4 y T5. Las menores respuestas de la variable se presentaron en los tratamientos T6 y T1, lo que muestra la reducción en la acumulación de materia seca de las plantas evaluadas en floración provenientes de estos tratamientos y corrobora lo dicho arriba respecto al efecto del MSF (figura 2).

Tabla 2. Probabilidad de 'F' de los análisis de varianza de las variables evaluadas en cultivos de papa 'Diacol Capiro' en cuatro localidades con el producto Fosfosol®.

Variable	Soracá	Toca	Villapinzón	San Pedro
PT1	0,16859385	0,08483837	0,1993657	0,65195544
PT2	0,0503091*	0,58612813	0,47291332	0,0339311*
PT3	0,04542002*	0,81166288	0,38290311	0,29402048
PT total	0,03092971*	0,05735345*	0,69428305	0,15538413
PS hojas	0,0028812*	0,03261323*	0,5609024	0,30358281
PS tallos	0,66359063	0,47921156	0,03234161*	0,04220306*
PS tubérculos	0,17647908	0,28877181	0,02764328*	0,00126966*
Gravedad específica	0,35278887	0,63888598	0,74110711	0,31276807
Fósforo foliar	0,21344367	0,13807926	0,61205433	0,49869516

* Diferencia estadística ($\alpha=0,05$).
PT: peso de tubérculo; PS: peso seco.

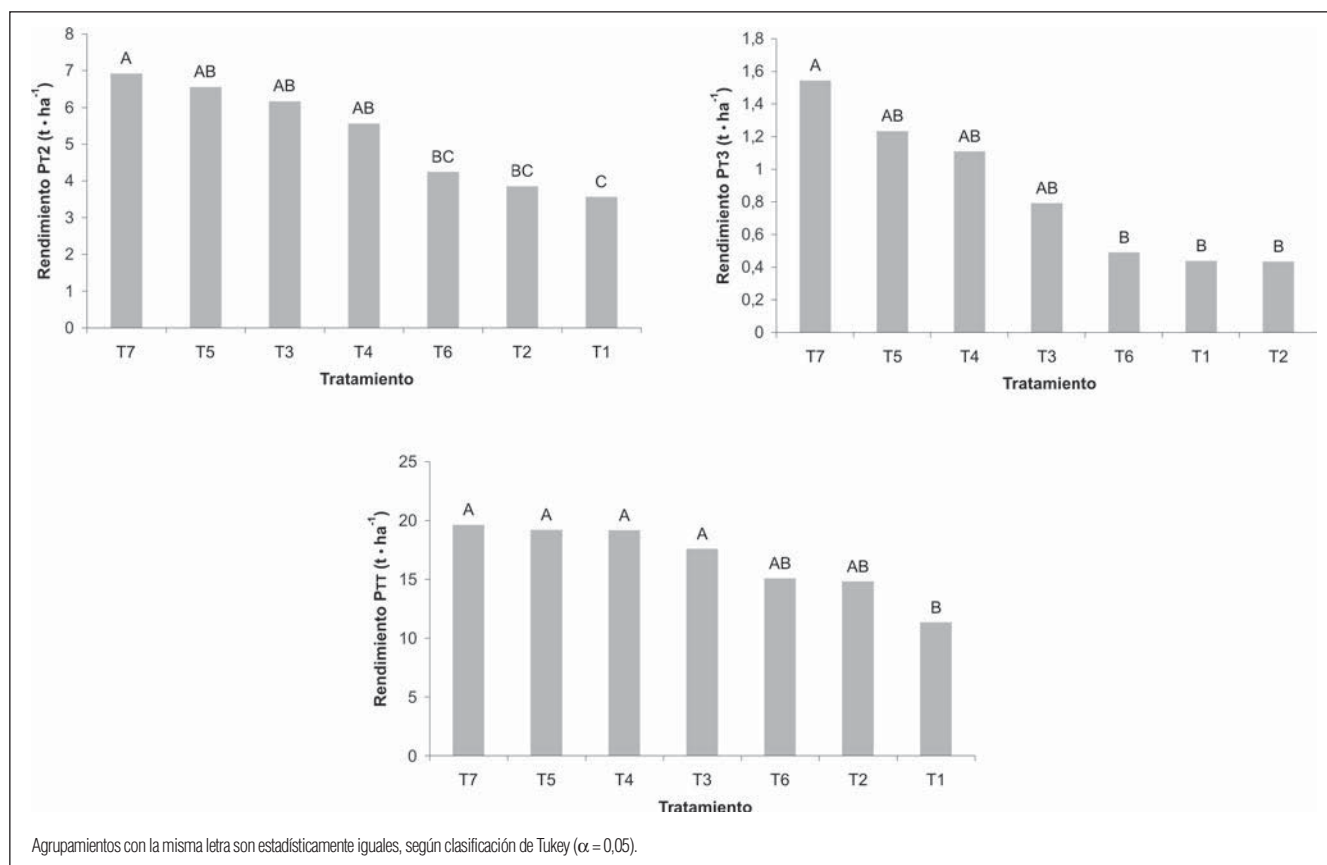


Figura 1. Rendimiento de la variable peso de tubérculos categoría 2, 3 y total (Pr2, Pr3 y PTT), en tratamientos con Fosfosol® y diferentes niveles de P edáfico, en cultivos de papa ‘Diacol Capiro’ en Soracá (Boyacá).

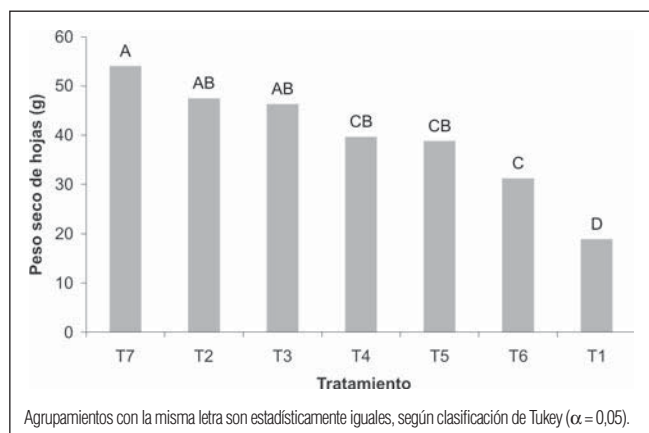


Figura 2. Peso seco de hojas en tratamientos con Fosfosol® y diferentes niveles de P edáfico, en cultivos de papa ‘Diacol Capiro’ en Soracá (Boyacá).

Toca (Boyacá)

Se encontraron diferencias significativas en las variables rendimiento de tubérculo total (PTT) y peso seco de hojas (PSH) (tabla 2). Para la variable PTT se observó que

los tratamientos T6 (testigo absoluto) y T1 fueron los de menor rendimiento y estadísticamente iguales entre sí, indicando que, al igual que en el caso de la localidad anterior, no se encontró respuesta al MSF evaluado. Los tratamientos T2, T3, T4, T5 y T7 fueron estadísticamente iguales entre sí, evidenciando que en esta localidad la respuesta a la fertilización edáfica de P ocurrió hasta los $100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de P_2O_5 (figura 3). En el PSH, la diferencia se explica por la mayor respuesta del testigo comercial (T7), estadísticamente igual a la del T4 y superior a la de los tratamientos restantes, aunque, como ya se anotó, esta diferencia no se reflejó en los rendimientos (figura 4).

En esta localidad el nivel de P en el suelo fue medio, a diferencia del de Soracá, donde el nivel de P fue muy alto (tabla 1). Esta situación experimental planteó la posibilidad de una mayor respuesta a la fertilización fosfórica en esta localidad, pero que no se observó, ya que los potenciales de rendimiento y la respuesta a los tratamientos fueron similares. En ambas localidades boyacencas el C orgánico (% COrg) fue bajo, por lo que, de acuerdo con

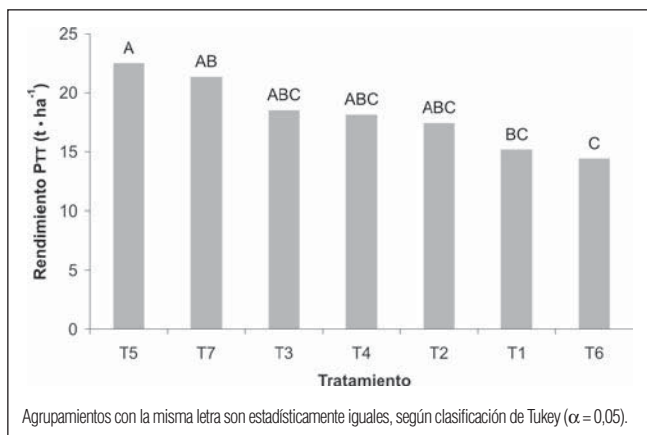


Figura 3. Rendimiento de la variable peso tubérculo total (PTT) en tratamientos con Fosfol® y diferentes niveles de P edáfico, en cultivos de papa ‘Diacol Capiro’ en Toca (Boyacá).

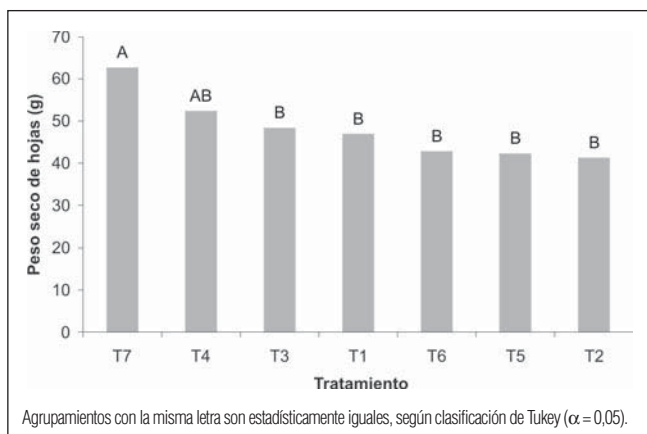


Figura 4. Peso seco de hojas en tratamientos con Fosfol® y diferentes niveles de P edáfico, en cultivos de papa ‘Diacol Capiro’ en Toca (Boyacá).

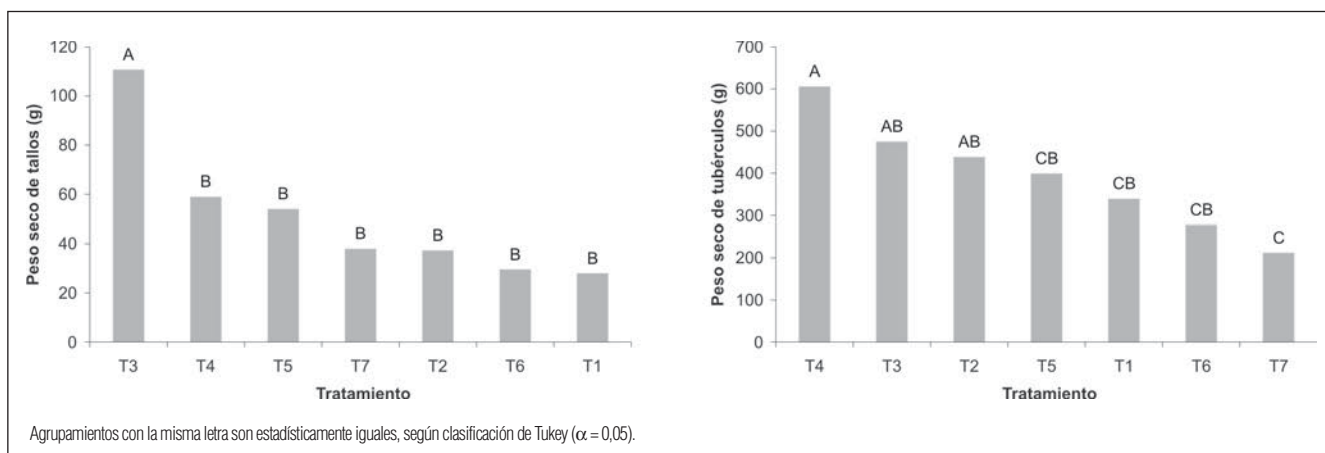


Figura 5. Peso seco de tallos y tubérculos en tratamientos con Fosfol® y diferentes niveles de P edáfico, en cultivos de papa ‘Diacol Capiro’ en Villapinzón (Cundinamarca).

lo planteado por Espinoza (1998), la fijación de P esperada también fue baja, aspecto que favorece la disponibilidad del elemento para las plantas. Este resultado apoya la hipótesis de que ‘Diacol Capiro’ es una variedad de papa que crece adecuadamente con niveles intermedios de P, tal vez porque su demanda del elemento es baja o su eficiencia fisiológica es adecuada.

Villapinzón (Cundinamarca)

En esta localidad sólo se presentaron diferencias significativas en las variables peso seco de tallos (PST) y de tubérculos (Pstub). No se encontraron diferencias en las variables rendimiento de tubérculo ni P en tejido foliar (tabla 2). En la variable PST, el T3 fue superior a los restantes tratamientos, pero esta diferencia no se reflejó en el rendimiento. En el caso de Pstub, la mejor respuesta se obtuvo en el tratamiento T4, estadísticamente igual a los tratamientos T2 y T3, y superior a los tratamientos restantes, lo que evidencia que hasta el momento del muestreo las diferencias en peso de tubérculo se daban con el testigo absoluto (T6), el testigo comercial (T7) y el T1; esta diferencia no se mantuvo hasta la cosecha (figura 5).

El rendimiento total de tubérculo en esta localidad varió entre 45,1 y 56,1 t · ha⁻¹, considerado alto para la variedad, y evidencia claramente que no hubo respuesta a los niveles crecientes de fertilización fosfórica edáfica. Se corrobora así, de acuerdo con lo dicho más arriba, que, por una parte, la variedad muestra demanda baja de P y, por otra, que en un suelo con % COrg bajo o medio la disponibilidad del elemento no es limitante para la planta y, a pesar de que el nivel de P en el suelo no sea alto (28,7 ppm para esta localidad), según lo descrito por Barrera

(1998), resulta suficiente para el normal desarrollo de la variedad evaluada. De esta manera se orienta el tema de la fertilización del elemento hacia lo que se denomina mantenimiento de la fertilidad.

San Pedro (Antioquia)

En esta localidad se encontraron diferencias en las variables: rendimiento de tubérculo de segunda (P_{T2}), peso seco de tallos (P_{ST}) y peso seco de tubérculos (P_{STub}) (tabla 2). En la variable P_{T2} , el testigo absoluto (T6) se comportó igual a los tratamientos T1 y T2, siendo éstos los de rendimientos menores. Los tratamientos restantes (T3, T4 y T5) fueron iguales entre sí y con respecto al testigo comercial (T7) (figura 6). El PTT experimental en esta localidad varió entre 44,1 y 56,7 t · ha⁻¹, considerado adecuado para la variedad en el departamento de Antioquia. Es importante resaltar el hecho de que en esta localidad, aunque el nivel de P fue alto (68,9 ppm),

el % COorg también lo fue (18,2%), a diferencia de las tres localidades anteriores; por lo tanto, se trataba de un ambiente con alta probabilidad de fijación de P y era de esperarse una respuesta favorable a la aplicación del hongo en evaluación; sin embargo, los resultados fueron similares a los de las demás localidades.

En cuanto a la variable P_{ST} , se encontró en T1 la respuesta estadísticamente igual a las del testigo absoluto (T6), del testigo comercial (T7) y del T3, pero inferior a las respuestas de los tratamientos T2, T4 y T5. En la variable P_{STub} , la respuesta de T1 fue superior a la del testigo absoluto e inferior a la del T5. Con los restantes niveles la respuesta fue igual (figura 7). Como se puede apreciar, en esta localidad las diferencias observadas en los resultados del muestreo destructivo y en los resultados de las variables de rendimiento no reflejaron una tendencia clara con respecto a los niveles de fertilización edáfica, según se anotó arriba.

Porcentaje de P en tejido foliar

Para esta variable no se encontraron diferencias en ninguna de las localidades evaluadas (tabla 2). Los rangos observados estuvieron entre: 0,24% y 0,34% en Soracá, 0,15% y 0,21% en Toca, 0,14% y 0,18% en Villapinzón y 0,15% y 0,20% en San Pedro. Como se puede apreciar, en las últimas tres localidades el rango observado es muy similar y en Soracá, ligeramente superior. Este resultado se puede explicar por el hecho de que en esta localidad boyacense el suelo donde se realizó el experimento tenía un nivel de P muy alto (142,2 ppm) y un porcentaje bajo de COorg (2,96%) y, en consecuencia, la limitación para la absorción era menor, según lo que plantea Espinoza (1998) respecto a que la fijación de P es proporcional al porcentaje de COorg que tiene el suelo.

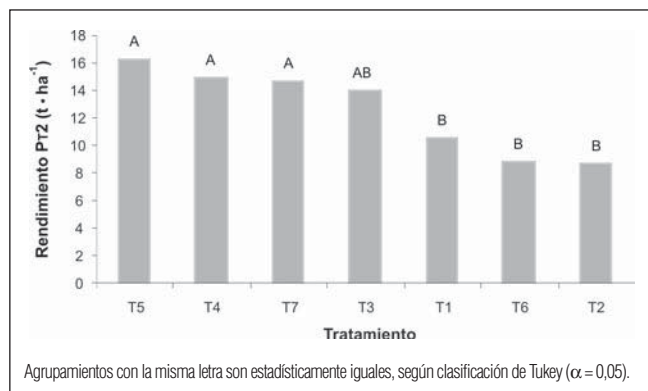


Figura 6. Rendimiento de la variable peso de tubérculos categoría 2 (P_{T2}) en tratamientos con Fosfol® y diferentes niveles de P edáfico, en cultivos de papa ‘Diacol Capiro’ en San Pedro (Antioquia).

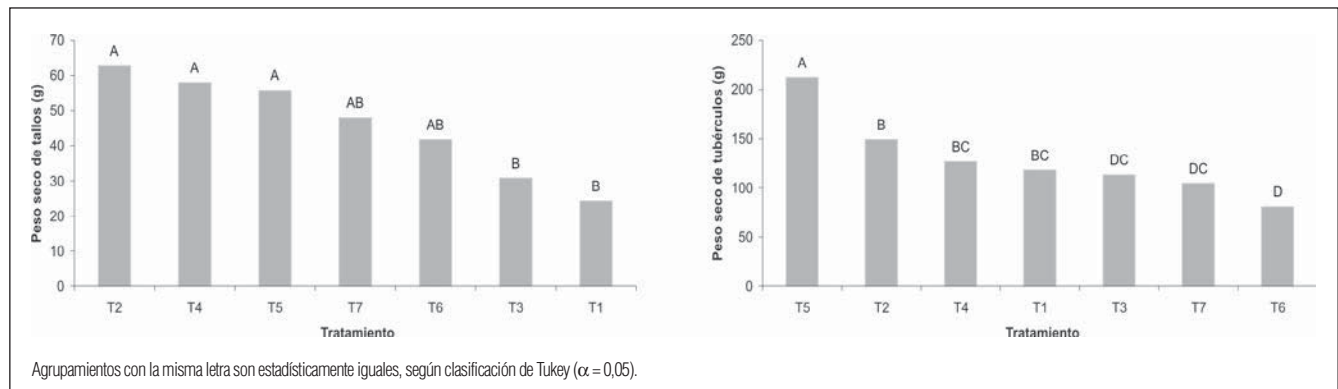


Figura 7. Peso seco de tallos y tubérculos en tratamientos con Fosfol® y diferentes niveles de P edáfico, en cultivos de papa ‘Diacol Capiro’ en San Pedro (Antioquia).

Análisis combinado

En todas las variables, excepto gravedad específica, se encontraron diferencias entre localidades, lo que es explicable teniendo en cuenta que el trabajo cubrió diversidad de ambientes con diversidad de suelos (Cundinamarca, Boyacá y Antioquia). En ninguna de las variables se encontró diferencias entre tratamientos (tabla 3), lo que significa que las respuestas fueron iguales; por lo tanto, el hongo evaluado (*Penicillium janthinellum* B.) no tuvo efecto sobre el rendimiento de tubérculo en la variedad 'Diacol Capiro' y no influyó favorablemente sobre la eficiencia en la fertilización fosfórica.

Tabla 3. Probabilidad de 'F' del análisis de varianza combinado de las variables evaluadas en papa 'Diacol Capiro' en el ensayo con Fosfosol®.

Variable	Localidad	Tratamiento*
PT1	0,000026726**	0,62920003
PT2	0,009679951**	0,14779717
PT3	0,000513525**	0,89521737
PTT	0,000029206**	0,11906123
PS hojas	0,010316211**	0,2343294
PS tallos	0,006264047**	0,32102087
PS tubérculos	0,008861002**	0,42235899
Gravedad específica	0,716364446	0,15099714
Fósforo foliar	0,000001444**	0,56327678

Ps: peso seco; PT: peso de tubérculo; PTT: peso de tubérculo total.

*Por ser modelo mixto, sólo se presenta la fuente de efecto fijo.

**Diferencia estadística ($\alpha = 0,05$).

El promedio del rendimiento de tubérculo total en las cuatro localidades varió entre 29,7 y 35,7 t · ha⁻¹, lo que representa un potencial de rendimiento adecuado para la variedad. En el promedio de las cuatro localidades evaluadas, con la variedad 'Diacol Capiro' no se encontró respuesta a los diferentes niveles de P aplicados, lo que sí se observó por localidad, como se discutió arriba en cada una de ellas. Esto fortalece lo inferido en cada localidad sobre la baja demanda del elemento por la variedad y muestra la importancia de contar con un análisis de suelo para tomar decisiones técnicas de fertilización con P en el cultivo, implicando la disminución de costos para el sistema productivo en uno de sus rubros más importantes.

Contrario a este resultado es lo reportado por Emana y Wadith (2002), quienes con la inoculación de *Penicillium pinophilum* encontraron respuesta en el ren-

dimiento del cultivo de haba (*Vicia faba* L.) y, en Colombia, lo obtenido por Moreno (2005), quien tuvo resultados significativos en el rendimiento de cultivo de grano con inoculación de esta misma cepa de *Penicillium janthinellum* B. El P hallado en el tejido foliar de la variedad 'Diacol Capiro' estuvo en promedio entre 0,18% y 0,22%, valores que, al compararlos con lo reportado en variedades de la *ssp. tuberosum* por Deutche, citado por Walworth y Muniz (1993), son bajos, pero, de acuerdo con las observaciones de campo, son adecuados para la variedad 'Diacol Capiro' ya que no evidenciaron deficiencias en el desarrollo y, en promedio, no presentó respuesta a los niveles crecientes de aplicación del elemento al suelo.

Con los resultados de este trabajo se demuestra claramente que en el cultivo de papa el uso de esta cepa no se puede considerar una estrategia promisoriosa para mejorar la eficiencia de la fertilización fosfórica, lo que puede explicarse por el hecho de que la cepa evaluada se aisló de condiciones ambientales muy diferentes a las condiciones normales de las zonas productoras de la especie. Ello plantea la necesidad de realizar en suelos de las regiones colombianas productoras de papa la prospección y la evaluación de la diversidad de microorganismos que tienen reportada la característica de solubilizar P, con lo cual se aumentaría la probabilidad de éxito en el beneficio que se busca.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural por la financiación dada para este proyecto a través de Cevipapa (contrato CV-05-002-03). También, a los agricultores Carlos y Paulo Casallas, Celestino y Miguel Corrales, Gonzalo Castro y Francisco Jaramillo, quienes brindaron su apoyo en los campos de cultivo, y a Nubia Moreno, investigadora del Instituto de Biotecnología de la Universidad Nacional de Colombia, quien facilitó el producto comercial Fosfosol® para su evaluación.

Literatura citada

- Barrera, L. 1998. Fertilización del cultivo de la papa en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá. En: Guerrero, R. (ed.). Fertilización de cultivos de clima frío. Segunda edición. Monómeros Colombo Venezolanos S.A, Bogotá. 423 p.
- Barrera, L. 2003. Consideraciones agronómicas y económicas con la fijación de fosfatos en suelos paperos. En: IV Taller "Papas colombianas". Documentos técnicos. Bogotá.
- Espinoza, J. 1998. Fijación de fósforo en suelos derivados de ceniza volcánica y fertilización fosfórica del cultivo de la papa.

- En: Guerrero, R. (ed.). Fertilización de cultivos de clima frío. Segunda edición. Monómeros Colombo-Venezolanos S.A., Bogotá. 423 p.
- Guerrero, R. 1998. Fertilidad de los suelos de clima frío en Colombia. En: Guerrero, R. (ed.). Fertilización de cultivos de clima frío. Segunda edición. Monómeros Colombo-Venezolanos S.A., Bogotá. 423 p.
- Kucey, R. 1987. Increased phosphorus uptake by wheat and field beans inoculated with a phosphorus-solubilizing *Penicillium bilaji* strain and with vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *Appl. Environ. Microbiol.* 53(12), 2699-2703.
- Marschner, H. 1998. Mineral nutrition of higher plants. Academy Press, London. pp. 116-130, 265-276, 463-482.
- Mehana, T.A. y A. Wahid. 2002. Associative effect of phosphate dissolving fungi, *Rhizobium* and phosphate fertilizer on some soil properties, yield components and the phosphorus and nitrogen concentration and uptake by *Vicia faba* L. under field conditions. *Pakistan Journal of Biological Sciences* 5(11), 1226-1231.
- Moreno, N. 2005. Comunicación personal. Instituto de Biotecnología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Narloch, C., V. Lopes, J. Ternes y G. Nuñez. 2002. Respostas da cultura do rabanete à inoculação de fungos solubilizadores de fosfatos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 37(6), 841-845.
- Taiz, L. y E. Zeiger. 1998. *Plant physiology*. Second edition. Sinauer Associates Inc., Massachusetts. 792 pp.
- Pumisacho, M. y S. Sherwood. 2002. El cultivo de la papa en Ecuador. Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (Iniap) y Centro Internacional de la Papa (CIP), Quito. 231 pp.
- Rashid, M., S. Khalil, N. Ayub, S. Alam y F. Latif. 2004. Organic acids production and phosphate solubilization by phosphate solubilizing microorganisms (PSM) under *in vitro* conditions. *Pakistan J. Biol. Sci.* 7(2), 187-196.
- Vásquez, P., G. Holguín, M.E Puente, A. López y Y. Bashan. 2000. Phosphate solubilizing microorganisms associated with the rhizosphere of mangroves in a semi-arid coastal lagoon. *Biol. Fert. Soils* 30, 460-468.
- Walworth, J.L. y J.E. Muniz. 1993. A compendium of tissue nutrient concentrations for field-grown potatoes. *Amer. Potato J.* 70(8), 579-597.
- Whitelaw, M.A., T.J. Hardena y K.R. Helyar. 1999. Phosphate solubilisation in solution culture by the soil fungus *Penicillium radicum*. *Soil Biol. Biochem.* 31, 655-665.