REVISTA
SOCIEDAD CIENTÍFICA DEL PARAGUAY

ISSN 0379-9123 • e-ISSN 2617-4731
Rev. Soc. cient. Parag. 2026;31: e3130
Doi: https://doi.org/10.32480/rscp.2026.e3130
Recibido: 03/02/2026 • Aceptado: 14/10/2026
Editor: Luis Dávalos Dávalos

Artículo Original
Original Article

FERTILIZACIÓN FOSFÓRICA Y SOLUBILIZADOR DE FÓSFORO (*Penicillium janthinellum* Biourge) EN EL CULTIVO DE SOJA (*Glycine max* (L.) Merr.)

PHOSPHORUS FERTILIZATION AND PHOSPHORUS-SOLUBILIZING FUNGUS (*Penicillium janthinellum* Biourge) IN SOYBEAN (*Glycine max* (L.) Merr.) CULTIVATION

Fabian Concepción Vázquez Ramirez
Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias. San Lorenzo, Paraguay
Orcid: https://orcid.org/0009-0008-0823-5433
María Del Pilar Galeano Samaniego
Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias. San Lorenzo, Paraguay
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-0621-8639
Paula Alexia Recalde Agüero
Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias. San Lorenzo, Paraguay
Orcid: https://orcid.org/0009-0002-7980-3326
Anahi Ferreira Gómez
Universidad Federal de Rio Grande del Sur, Facultad de Agronomía. Porto Alegre, Brasil
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-5494-1696
Jimmy Walter Rasche Alvarez
Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias. San Lorenzo, Paraguay
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-2517-6868
Autor corresponsal: Jimmy W. Rasche: jwrasche@agr.una.py

Cómo citar este artículo:
Vázquez Ramirez FC, Galeano Samaniego MP, Recalde Agüero PA, Ferreira Gómez A, Rasche Alvarez JW. Fertilización fosfórica y solubilizador de fósforo (*Penicillium janthinellum Biourge*) en el cultivo de soja (*Glycine max* (L.) Merr.). Rev. Soc. cient. Parag. 2026;31:e3130.

RESUMEN
Para evaluar el efecto de la fertilización fosfórica y *P. janthinellum* sobre el cultivo de soja se realizó un experimento en un ultisol, bajo un diseño bifactorial con un testigo absoluto. El factor 1: dosis de P_2O_5 (0, 100 y 200 kg.ha^{-1}) y el factor 2: forma de aplicación de *P. janthinellum;* en semilla (1 g.kg^{-1}) y en surco de siembra (500 g.ha^{-1}). El P en tejido fue afectado por la fertilización. El peso hectolítrico y concentración de P en el grano no fue afectado por los tratamientos. La fertilización fosfatada y la inoculación con *P. janthinellum* influyeron en peso de 1000 semillas y en el rendimiento. La aplicación de 100 kg.ha^{-1} de P_2O_5 con inoculación de *P. janthinellum* en surco registraron el mejor rendimiento, habiendo interacción entre estos factores. La aplicación de fertilizante fosfatado aumentó la disponibilidad de P en el suelo sin ser influenciado por el hongo. La aplicación de P_2O_5 (100 kg.ha^{-1}) e inoculación optimiza la absorción de fósforo y el rendimiento de la soja.
Palabras clave: fósforo; inoculación; solubilización; promotor de crecimiento vegetal.

ABSTRACT
To evaluate the effect of phosphorus fertilization and *P. janthinellum* on soybean cultivation, an experiment was conducted in an Ultisol, using a two-factor design with an absolute control. Factor 1: P_2O_5 application rate (0, 100, and 200 kg.ha^{-1}) and Factor 2: *P. janthinellum* application method: seed (1 g.kg^{-1}) and in planting furrow (500 g.ha^{-1}). Tissue phosphorus was affected by fertilization. Hectoliter weight and P concentration in the grain were not affected by the treatments. Phosphate fertilization and *P. janthinellum* inoculation influenced 1000-seed weight and yield. The application of 100 kg.ha^{-1} of P_2O_5 with *P. janthinellum* inoculation in the furrow resulted in the best yield, with an interaction observed between these factors. The application of phosphate fertilizer increased the availability of P in the soil without being affected by the fungus. The application of P_2O_5 (100 kg.ha^{-1}) and inoculation optimizes phosphorus uptake and soybean yield.
Keywords: phosphorus; inoculation; solubilization; plant growth promoter.

Artículo publicado en acceso abierto bajo una Licencia Creative Commons

INTRODUCCIÓN

La expansión agrícola sin el manejo adecuado de los cultivos trae consigo la degradación de los recursos naturales, principalmente los recursos suelo-agua[1]. El cultivo de soja es el rubro de mayor importancia a nivel nacional, ocupando un área superior a 3.600.000 ha[2]. La producción de soja, está estrechamente vinculada a la calidad del suelo, el aumento del área sembrada del cultivo de soja ha traído una necesaria tecnificación en cuanto a la aplicación de insumos como los fertilizantes, que son utilizados para suplir deficiencias propias de la baja fertilidad del suelo, en este caso, con relación al fósforo (P), que se encuentra naturalmente en niveles por debajo del óptimo, limitando el rendimiento de los cultivos en la región Oriental de Paraguay[3].

El fósforo en el suelo se encuentra dividido en dos grandes compartimentos; el fósforo orgánico (Po) y el fósforo inorgánico (Pi)[4, 5]. La composición entre estos dos compartimientos varía ampliamente, encontrándose valores entre 200 y 3000 mg kg^{-1} de P en el suelo, sin embargo, el P lábil, que corresponde a la fracción disponible en la solución y el P moderadamente lábil, que corresponde a los fosfatos con baja energía de ligación ocupa solo una pequeña proporción del P total del suelo[6, 7] y su disponibilidad y dinámica en el suelo son complejas[8]. Considerando que los suelos de la región Oriental del Paraguay, son bastante intemperizados, formado por Ultisoles y Oxisoles[9] y ácidos, con predominancia de arcillo-minerales 1:1 y de óxidos de hierro y aluminio, en consecuencia, con alta capacidad de adsorción de P y consecuentemente requerimiento de dosis elevadas de P para suplir la demanda por la planta[10], siendo este uno de los elementos más limitantes en la producción de cultivos agrícolas en la región Oriental.

Una opción para la liberación del P quimisorbido en la arcilla del suelo en un ambiente ácido es el uso de hongos solubilizadores de fosfato (HSF), estos microorganismos juegan un rol fundamental en el reciclado de P en los suelos; gracias a su actividad, las plantas pueden aprovechar las reservas de P insoluble, retenido por quimisorción en la arcilla, contribuyendo a que disminuya la aplicación de P en los suelos[11].

Los hongos tienen una capacidad inferior de colonizar las raíces de plantas, en comparación con las bacterias, pero son más tolerantes a suelos ácidos; por esta razón tienen un mejor potencial para ser usados como agentes que convierten fósforo inorgánico e insoluble a formas solubles a través de la acidificación y la quelación, así como por reacciones de intercambio de iones y producción de ácidos orgánicos de bajo peso molecular, como glucónico, cítrico y oxálico[12, 13], principalmente en suelos ácidos, como los que predominan en la región Oriental[11]. La inoculación con este tipo de microorganismos puede liberar P fijado en formas insolubles, aumentando su disponibilidad para las plantas y favoreciendo un mejor crecimiento y rendimiento del cultivo. Desde un enfoque ecológico, en una agricultura sostenible, los HSF reducen la aplicación de P permitiendo satisfacer las demandas de nutrientes de los cultivos y disminuyendo la contaminación ambiental[14].

El hongo *Penicillium janthinellum* es un solubilizador de P, capaz de liberar entre 0,2 y 2,0 mg.mL^{-1} de P dada su capacidad de producción de ácidos orgánicos y enzimas fosfatasas que le confiere eficiencia en ambientes con baja disponibilidad de P, favoreciendo la liberación continua de P para que esta sea aprovechable por las plantas[15]. Las aplicaciones del hongo *P. janthinellum* han permitido aumentar el rendimiento de varios cultivos, en ensayos de campo como en maíz, soja[16]; y cultivo de papa[17, 18]. Sin embargo, aún son escasos o inexistentes los experimentos en Paraguay usando este hongo. En base a lo expuesto anteriormente, el objetivo general del trabajo fue evaluar la aplicación combinada de *P. janthinellum* y la fertilización fosfatada sobre el desarrollo y producción del cultivo de soja.

METODOLOGÍA

El experimento se realizó en el distrito de San Pedro del Ycuamandyju, del departamento de San Pedro, ubicado entre las coordenadas geográficas 23°42’17,87’’ sur y 56°58’16,25’’ oeste. El experimento se llevó a cabo entre febrero y julio del 2025. El suelo predominante del lugar es Ultisol[8]. El suelo inicialmente poseía pH ligeramente ácido (5,5) con bajo nivel de materia orgánica (1,1%), fósforo bajo (10,0 mg.kg^{-1}), con baja CIC (5,80 $cmol_c.kg^{-1}$), nivel medio de calcio (1,65 $cmol_c.kg^{-1}$) y de magnesio (0,70 $cmol_c.kg^{-1}$) y valor alto de potasio (0,25 $cmol_c.kg^{-1}$), sin presencia de aluminio, de clase textural arenosa. El clima predominante según Köppen es Cfa[19].

El experimento fue bifactorial con un tratamiento adicional o testigo absoluto (sin aplicación de *P. janthinellum*, sin fertilizante fosfatado). El factor 1: aplicación de 3 dosis de P_2O_5 (0, 100 y 200 kg.ha^{-1}) y el factor 2: aplicación de *P. janthinellum* en tratamiento de semilla y por aspersión en surco, dispuesto en el campo en bloques completos al azar, con 4 repeticiones, totalizando 28 unidades experimentales.

Las unidades experimentales consistieron en 6 hileras de soja a 0,45 metros entre estas y 0,06 metros entre plantas, con población equivalente aproximadamente de 300.000 plantas.ha^{-1}. Cada unidad experimental presentó dimensiones de 3 metros de ancho y 5 metros de largo, abarcando un espacio de 15 m^2, separadas unas de otras por 1 m de cada lado, con una superficie total de las parcelas experimentales de 960 m^2.
El P fue aplicado en el surco de siembra en forma de superfosfato triple (00-46-00). El hongo *P. janthinellum*, fue aplicado de acuerdo con las recomendaciones dadas por el fabricante, en tratamiento de semillas antes de la siembra con una dosis de 1 g.kg^{-1} de semillas y en aplicación directa al suelo con una dosis de 500 g.ha^{-1}, respectivamente. Posterior a la emergencia, fue realizado el control de malezas en forma mecánica para evitar competencia con el cultivo. Mientras, el control de plagas y enfermedades se realizó según su aparición.

A continuación, se menciona el proceso llevado a cabo para la evaluación de las variables:

- **Concentración de P en tejido (mg.kg^{-1})**: En plena floración de la soja, se colectaron al azar 10 trifolios completamente expandido desde el ápice. El material se lavó inicialmente en el campo con agua destilada para eliminar polvo, se secó inicialmente en el campo y luego se llevó al laboratorio y se secó en estufa a 65 ± 5 °C hasta peso constante. Posteriormente se extrajo el P por la metodología de digestión sulfúrica[20].
- **Concentración de P en el grano (mg.kg^{-1})**: Una vez pesada las muestras se tomó una parte de los granos y se molturó en molino, posteriormente se extrajo el P por la metodología de digestión sulfúrica[20].
- **Rendimiento de granos de soja (kg.ha^{-1})**: la cosecha se realizó de forma manual segando las plantas de un área de 2 m^2 equivalente a las 3 hileras centrales por 4,5 m lineal de cada unidad experimental, cuando su madurez fisiológica estaba en la etapa R8, luego se procedió a la trilla de granos y posterior pesaje con una balanza de precisión de 1 g para determinar su rendimiento.
- **Peso de mil semillas (g)**: para evaluar el peso de mil semillas (PMS), fueron seleccionadas en forma aleatoria de cada unidad experimental 100 granos en 5 repeticiones, que fueron pesados con una balanza de precisión de 0,1 g y posteriormente promediados. Finalmente, del resultado de cada medición, se realizó la determinación del peso de mil granos por regla de tres simple, la humedad fue ajustada al 12 %.
- **Peso hectolítrico (g)**: para realizar esta medición se utilizó una probeta de 100 ml, se pesó la masa de granos de soja ocupada en un volumen conocido, para el pesaje se utilizó una balanza de precisión de 0,1 g.
- **Concentración de P en el suelo (mg.kg^{-1})**: Fueron colectadas muestras compuestas de suelo en la camada de 0-10 cm en cada unidad experimental, llevada al laboratorio, secado y tamizado en tamiz de 2 mm, posteriormente determinado el fósforo disponible por la metodología de Mehlich 1[20].
- Los datos obtenidos de las variables estudiadas fueron inicialmente ordenado, utilizando planillas electrónicas del programa Excel, luego los datos fueron sometidos a test de normalidad y homogeneidad aceptándose los supuestos y fueron analizados mediante un análisis de varianza (ANAVA), y cuando verificado que existieran diferencias significativas en los parámetros estudiados fueron sometidos a la comparación de medias por el Test de Tukey al 5% de probabilidad de error con la ayuda del software estadístico Infostat.

RESULTADOS y DISCUSIÓN

La aplicación de *P. janthinellum* no afectó la absorción de P en el tejido, sin embargo, al aplicarse la mayor dosis de P hubo menor concentración de P (13,1 mg.kg^{-1}) comparado con la dosis intermedia (100 kg.ha^{-1} de P_2O_5), que presentó 14,5 mg.kg^{-1}, ya en los granos no hubo efecto de la fertilización o de la aplicación de *P. janthinellum* en la concentración de P (Tabla 1). El P en el tejido de los tratamientos factoriales (13,9 mg.kg^{-1}) fue 23% superior al tratamiento adicional (10,7 mg.kg^{-1}), lo cual finalmente no se reflejó en el P en el grano donde no hubo diferencia significativa entre estos.

Los incrementos en la concentración foliar de P en soja se estabilizan a dosis altas de fertilización, debido al efecto de dilución y a la menor actividad microbiana[21, 22]. Asimismo, Ma Yang et al.[23] demostraron que la aplicación de *Penicillium* sp. en surco mejora la disponibilidad de P en condiciones de dosis moderadas (150 kg.ha^{-1}), pero su eficiencia disminuye cuando la concentración de fósforo en el suelo es elevada ya que los mecanismos de solubilización microbiana dependen de la producción de ácidos orgánicos, los cuales se reducen cuando el medio ya cuenta con suficiente fósforo disponible.

Tabla 1. *Concentración de fósforo en el tejido y en el grano, peso de 1000 semillas (PMS) y peso hectolítrico por efecto de la aplicación de fertilizante fosfatado y del hongo Penicillium janthinellum. San Pedro del Ycuamandyju, San Pedro 2025.*

Dosis de P_2O_5 (kg.ha^{-1})	**P en el tejido**	**P en el grano**	**Peso de 1000 semillas**	**Peso hectolítrico**
	(mg.kg^{-1})		**g**	
0	14,0 ab	7,9 a	146,8 b	74,7 a
100	14,5 a	6,4 a	151,0 a	75,3 a
200	13,1 b	9,4 a	151,3 a	75,2 a
DMS	1,21	3,70	0,85	0,85
Forma de aplicación de *P. janthinellum*				
Semilla	13,9 a	7,1 a	149,1 b	75,0 a
Suelo	13,8 a	8,9 a	150,3 a	75,2 a
DMS	0,81	2,48	0,56	0,57
Comparación con testigo absoluto				
Factorial	13,9 a	8,0 a	149,5 a	75,1 a
Adicional	10,7 b	9,3 a	145,5 b	75,4 a
CV (%)	7,1	34,7	0,44	0,89

Medias seguidas por la misma letra minúscula en las columnas no difieren estadísticamente (Tukey, p≤0,05).

El PMS aumentó con la aplicación del fertilizante fosfatado, así como con la aplicación de *P. janthinellum* en el suelo, lo cual sugiere un mejor aprovechamiento del P y una mayor estabilidad fisiológica del llenado de semillas en comparación con la inoculación en semillas. También se observa que el PMS en los tratamientos factoriales (149,5 g) fue superior al tratamiento adicional (145,5 g) (Tabla 1).

Aunque el PMS es considerado un componente del rendimiento con baja plasticidad fisiológica, el incremento del PMS observado en este experimento puede considerarse como una respuesta positiva al manejo combinado de fósforo y microorganismos solubilizadores[24]. De manera similar, Silvestrini et al.[22] observaron incrementos en el peso de semillas de soja al aplicar microorganismos solubilizadores de fósforo junto con dosis moderadas de P. Asimismo, Ma Yang et al.[23] demostraron que las especies del género *Penicillium*, al ser aplicadas en surco, aumentan la eficiencia de uso del P al mejorar la proximidad del inoculante con el sistema radicular y el fertilizante.

El aumento del PMS con dosis intermedias de fósforo se asocia a una mayor disponibilidad de P para la síntesis de compuestos energéticos como ATP y ADP, y para la formación de fosfolípidos esenciales durante el llenado de grano. Este efecto puede verse acentuado en suelos arenosos, caracterizados por baja capacidad de retención de P y escaso contenido de arcilla. En ese contexto, el P aplicado es rápidamente aprovechado por el cultivo, generando respuestas inmediatas en la productividad, ya que la adecuada nutrición fosfatada en etapas tempranas del desarrollo de la soja favorece la translocación de fotoasimilados hacia los órganos reproductivos y mejora el llenado de granos[25, 26].

El peso hectolítrico del grano de soja no presentó diferencias significativas entre los factores evaluados ni en su interacción, tampoco al comparar los tratamientos factoriales con el tratamiento adicional (Tabla 1), reflejando una baja sensibilidad de esta variable al manejo nutricional, ya que el peso hectolítrico es una característica principalmente determinada por factores genéticos[26].

El rendimiento de granos de soja presentó interacción entre los dos factores (Tabla 2). En ausencia de fertilización fosfatada, la eficiencia del hongo *P. janthinellum* fue mayor cuando aplicado al suelo. No obstante, con la aplicación de P, la forma de aplicación del hongo no posee influencia sobre la producción de soja, en cambio, la aplicación de al menos 100 kg.ha^{-1} de P_2O_5 permitió aumentar el rendimiento de la soja en un 16,5% cuando fue acompañado a la aplicación de *P. janthinellum* en la semilla. En contraste, cuando el hongo fue aplicado en el suelo, no hubo diferencia en la producción. Si se considera cada factor en forma independiente, se observa que la aplicación de 100 kg.ha^{-1} de P_2O_5 permitió aumentar el rendimiento promedio de la soja (1.854 kg.ha^{-1}) comparado al testigo (1.710 kg.ha^{-1}). Asimismo, la aplicación de *P. janthinellum* al suelo (1.832 kg.ha^{-1}) resultó en mayores rendimientos que su aplicación en la semilla (1.735 kg.ha^{-1}). Contrastando con el tratamiento adicional se observa que el rendimiento de los tratamientos factoriales fue 17% superior (1.783 kg.ha^{-1}) al tratamiento adicional (1.480 kg.ha^{-1}).

Tabla 2. *Rendimiento de granos de soja por efecto de la aplicación de fertilizante fosfatado y del hongo Penicillium janthinellum. San Pedro del Ycuamandyju, San Pedro 2025.*

Dosis de P_2O_5 (kg.ha^{-1})	**Forma de aplicación de *P. janthinellum***		**Promedio**
	Semilla	Suelo	
	Rendimiento de soja (kg.ha^{-1})		
0	1.550 bB	1.870 aA	1.710 b
100	1.856 aA	1.852 aA	1.854 a
200	1.800 aA	1.775 aA	1.788 ab
Promedio	1.735 B	1.832 A	
Comparación con testigo absoluto			
Factorial			1.783 a
Adicional			1.480 b

CV (%) 5,2. Medias seguidas por la misma letra minúscula en las columnas, y mayúscula en las líneas no difieren estadísticamente (Tukey, p≤0,05).

Diversos estudios han demostrado que la soja presenta mayor respuesta productiva a dosis intermedias de P. En este sentido, Corrêa y Rosolem[27] observaron incrementos significativos en el rendimiento de soja hasta dosis intermedias de 100 kg.ha^{-1} de P_2O_5, seguidos de una estabilización o incluso un leve descenso a dosis más elevadas. Silvestrini et al.[22], destacan que la eficiencia de respuesta de la soja es mayor a dosis intermedias de P, mientras que a dosis más altas la respuesta tiende a estabilizarse. Autores[28] señalaron que la respuesta al P depende de la capacidad del suelo para liberar P lábil y del balance entre la oferta del nutriente y la demanda del cultivo. Asimismo, Rheinheimer et al.[7] destacan que, en suelos tropicales con alta capacidad de fijación de P, las respuestas más pronunciadas se obtienen con dosis intermedias, cuando la disponibilidad de P coincide con el máximo requerimiento del cultivo en las etapas reproductivas.

En suelos arenosos, en el cual la capacidad de retención y fijación de P es limitada, el efecto de *P. janthinellum* se asocia principalmente a la mineralización del fósforo orgánico (Po) y a la movilización de formas poco lábiles presentes en el entorno radicular. Según Chen et al.[29], en suelos con bajo contenido de arcilla, la soja depende fuertemente de la mineralización del Po mediada por microorganismos rizosféricos para sostener su crecimiento bajo condiciones de baja disponibilidad de P. En este sentido, el *Penicillium* spp. contribuye mediante la secreción de ácidos orgánicos (oxálico, cítrico y gluconato) que acidifican microzonas de la rizosfera y liberan P de compuestos orgánicos o débilmente ligados al suelo[30]. Además, el *P. janthinellum* produce fosfatasas y fitasas, enzimas que hidrolizan ésteres orgánicos de fósforo, transformándolos en ortofosfatos disponibles para la absorción vegetal[31]. Este mecanismo es fundamental en suelos de baja materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico como son los suelos más arenosos, en los cuales la acción biológica del hongo puede compensar la limitada disponibilidad natural del nutriente.

Hao et al.[32], demostraron que las hifas de *Penicillium* crean microambientes con alta expresión de genes relacionados al ciclaje del P y mayor mineralización del Po, ya que los microorganismos solubilizadores de P aumentan la eficiencia de uso del fertilizante y aceleran la mineralización del Po, mejorando su absorción por las plantas[33].

La concentración de P disponible en el suelo presentó interacción entre los dos factores (Tabla 3). En ausencia de fertilización hubo mayor concentración de P cuando el hongo *P. janthinellum* fue aplicado al suelo. Sin embargo, con la aplicación de P hubo aumento de la concentración de P disponible en el suelo y en ese caso la aplicación del hongo, no tuvo influencia en la concentración de P. Si se considera cada factor en forma independiente, se observa que con la aplicación de 100 kg.ha^{-1} de P_2O_5 permitió aumentar la concentración de P en el suelo (9,2 mg.kg^{-1}) comparado al testigo (7,3 mg.kg^{-1}). Por otro lado, la aplicación del hongo *P. janthinellum* en la semilla (8,6 mg.kg^{-1}) resultó tener el mismo efecto que su aplicación en el suelo (8,5 mg.kg^{-1}). Por su parte el tratamiento adicional presentó 31,7% menos concentración de P (5,8 mg.kg^{-1}) que los tratamientos factoriales (8,5 mg.kg^{-1}).

Tabla 3. *Concentración de fósforo disponible en la camada de 0-10 cm de suelo por efecto de la aplicación de fertilizante fosfatado y del hongo P. janthinellum. San Pedro del Ycuamandyju, San Pedro 2025.*

Dosis de P_2O_5 (kg.ha^{-1})	**Forma de aplicación de *P. janthinellum***		**Promedio**
	Semilla	Suelo	
	Tenor de P en el suelo (mg.kg^{-1})		
0	6,5 bB	8,1 bA	7,3 b
100	9,7 aA	8,7 aA	9,2 a
200	9,5 aA	8,6 aA	9,1 a
Promedio	8,6 A	8,5 A	
Comparación con testigo absoluto			
Factorial			8,5 a
Adicional			5,8 b

CV (%) 10,80. Medias seguidas por la misma letra minúscula en las columnas, y mayúscula en las líneas no difieren estadísticamente (Tukey, p≤0,05).

La aplicación *Penicillum*, participa en la solubilización del fosfato[31], principalmente cuando aplicado directamente en el suelo, principalmente en ausencia de fertilización fosfatada disponibilizandolo a las plantas, sin embargo, al fertilizar con fósforo el hongo produce menor efecto en la disponibilización de P[34].

CONCLUSIÓN

La aplicación de dosis intermedia de fertilizante fosfatado en conjunto con la aplicación de *Penicillium janthinellum* en el suelo, permite el aumento de la producción de soja, así como en la calidad de granos.

Declaración de financiamiento:	Programa de Becas para la Investigación Andrés Borgognon Montero (PUBIAM)
Declaración de conflicto de intereses:	Los autores declaran no tener conflictos de interés.
Declaración de autores:	Los autores aprueban la versión final del artículo.
Contribución de autores:	Conceptualización: MPGS, FCVR, JWRA, Curación de datos: FCVR, PARA, Análisis formal: FCVR, JWRA, Adquisición de fondos: FCVR, Investigación: FCVR, AFG, PARA, Metodología: MPGS, FCVR, JWRA, Administración del proyecto: FCVR, Recursos: FCVR, Software: FCVR, AFG, Supervisión: FCVR, JWRA, MPGS, Validación: JWRA, Visualización: FCVR, Redacción - borrador original: FCVR, PARA, JWRA, Redacción - revisión y edición: JWRA, MPGS, AFG
Agradecimientos:	A la familia Vázquez Ramírez por la concesión del lugar y los equipos necesarios para la realización del experimento.
Revisión por pares:	Este artículo fue evaluado mediante un proceso de revisión por pares anónimos, conforme al procedimiento de transparencia editorial de la revista. Las observaciones y sugerencias de los revisores fueron consideradas por los

	autores hasta alcanzar la versión final publicada, garantizando la integridad científica del trabajo y la confidencialidad de los evaluadores.
Disponibilidad de datos:	Los datos están disponibles previa solicitud al autor corresponsal.

REFERENCIAS

1. FAO. Planning for sustainable use of land resources: towards a new approach. Land and Water Bulletin No. 2. Roma; 1995. Disponible en: https://www.fao.org/4/v8047e/v8047e00.htm
2. Cámara Paraguaya de Exportadores y Comercializadores de Cereales y Oleaginosas. Área de siembra, producción y rendimiento de maíz; 2025. Disponible en: https://capeco.org.py/area-de-siembra-produccion-y-rendimiento/
3. Arce Barrios AC. Diagnóstico de la fertilidad de los suelos de la región oriental del Paraguay [Tesis de grado]. San Lorenzo: Universidad Nacional de Asunción; 2017. Disponible en: https://core.ac.uk/download/578294165.pdf
4. Candia DAB, Rasche AJW, Escobar DNC, Fatecha FDA. Disponibilidad de fósforo en suelos del Chaco Central extraído por distintas metodologías. Rev. Soc. cient. Py. 2023;28(2):329-51. Disponible en: https://sociedadcientifica.org.py/ojs/index.php/rscpy/article/view/300
5. Candia-Díaz AB, Rasche-Álvarez JW, Decoud NCE, Fois DAF, Brenes EC. Phosphorus fractionation in soils of the Paraguayan Chaco under pristine and anthropogenic conditions. Revista Brasileira de Ciência do Solo. 2025;49(spe1):e0240119. Disponible en: https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20240119
6. Pavinato PS, Cherubin MR, Soltangheisi A, Rocha GC, Chadwick DR, Jones DL. Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. Sci. Rep. 2020;1–11. Disponible en: https://doi.org/10.1038/s41598-020-72302-1
7. Rheinheimer DS, Gatiboni LC, Kaminski J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. Ciência Rural. 2008;38(2):576-586. Disponible en: https://doi.org/10.1590/S0103-84782008000200049
8. Menezes-Blackburn D, Paredes C, Zhang H, Giles CD, Gerge TS, Shand C, Lumsdon D, Cooper P, Wender R, Brown L, Blakwell M, Wearing C, Haygaryn PM. Organic acids regulation of chemical–microbial phosphorus transformations in soils. Environmental Science & Technology. 2016;50(21):11521-11531. Disponible en: https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03017
9. López GLG, Lesme BJA. Grandes grupos de suelos de la región Oriental del Paraguay. 1º ed. San Lorenzo: Sociedad Paraguaya de Ciencia del Suelo; 2024.
10. Quiñonez VLR. Dinámica de fósforo bajo diferentes sistemas de manejo de suelo [Tesis de posgrado]. San Lorenzo: Universidad Nacional de Asunción; 2019. Disponible en: http://repositorio.conacyt.gov.py/handle/20.500.14066/3535
11. Beltrán PME. Hongos solubilizadores de fosfato en suelo de páramo cultivado con papa (*Solanum tuberosum*). Revista Ciencia en Desarrollo. 2023;5(2):145-154. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0121-74882014000200009&script=sci_abstract&tlng=es
12. Velázquez MS, Cabello MN, Elíades L, Russo, ML, Allegrucci, N. Combinación de hongos movilizadores y solubilizadores de fósforo con rocas fosfóricas y materiales volcánicos para la promoción del crecimiento de plantas de lechuga (*Lactuca sativa* L.). Revista Argentina de Microbiología. 2017;49(4):347-355. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.ram.2016.07.005
13. Arias MRM, Hernández MND, Perea RYdelC, De la Cruz EY. Estudio in vitro sobre hongos solubilizadores de fósforo bajo diferentes fuentes de carbono y nitrógeno. Alianzas y Tendencias BUAP. 2021;6(23):1-19. Disponible en: https://doi.org/10.5281/zenodo.5112009
14. Castillo C, Hormazábal N, Solano J, Morales A, Castillo C, Hormazábal N, Solano J, Morales A. Co-inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus solubilizing fungi in Andisol cultivated with potato variety «Desirée». Idesia. 2023;41(1):27-33. Disponible en: https://doi.org/10.4067/S0718-34292023000100027.
15. Suraby EJ, Agisha, VN, Dhandapani S, Sng YH, Lim SH, Naqvi NI, Sarojam R, Yin Z, Park, BS. Plant growth promotion under phosphate deficiency and improved phosphate acquisition by new fungal strain, *Penicillium olsonii* TLL1. Frontiers In Microbiology. 2023;14:1664-302X. Disponible en: https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1285574
16. Leite RC, Pereira YC, Oliveira-Paiva CA, Moraes AJG, Silva GB. Increase in yield, leaf nutrient, and profitability of soybean co-inoculated with Bacillus strains and arbuscular mycorrhizal fungi. Revista Brasileira de Ciência do Solo. 2022;46:e0220007. Disponible en: https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220007
17. Núñez A, García LA, Sawchik, J. Manejo en la fertilización en el cultivo de soja. INIA. 2014;(33):21-24. Disponible en: http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/7922/1/ad-748-cap-6-p.21-24.pdf
18. Zambrano JF. *Penicillium janthinellum*, alternativa biológica para mejorar la solubilidad del fósforo en fertilización agrícola - articulo de revisión. Revista de Investigaciones UNAD. 2023.
19. Pastén M, González V, Espínola C. Clasificación climática del Paraguay utilizando los métodos de Köeppen y Thornthwaite. San Lorenzo: Paraguay; 2011. Disponible en: http://sdi.cnc.una.py/catbib/documentos/525.pdf

20. Tedesco MJ, Gianello C, Bissani CA, Bohnen H, Volkweiss SJ. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2º ed. Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS; 1995. Disponible en: https://rolas.cnpt.embrapa.br/publico/pManual
21. Almeida JA, Ernani PR, Santos FC. Nutrição mineral de plantas e diagnose foliar. Fertilidade do Solo para Plantas Cultivadas. 2º ed. Viçosa: SBCS; 2019.
22. Silvestrini GR, Romero M, da Rosa EJ, Corrêa HC, Dal Magro T, Silvestre WP, Pauletti GF, Conte ED. Potential Use of Phosphate-Solubilizing Bacteria in Soybean Culture. AgriEngineering. 2023;5(3):1544-1554. Disponible en: https://doi.org/10.3390/agriengineering5030095
23. Ma Y, Chen S, Liu S, Guo L, Zhang C, Ye X, Tian D. Phosphate-solubilizing fungi enhance insoluble phosphate dissolution via organic acid production: mechanisms and applications. Frontiers in Microbiology. 2025;16:1600231. Disponible en: https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1600231
24. Taliman NA, Dong Q, Echigo K, Raboy V, Saneoka H. Effect of Phosphorus Fertilization on the Growth, Photosynthesis, Nitrogen Fixation, Mineral Accumulation, Seed Yield, and Seed Quality of a Soybean Low-Phytate Line. Plants. 2019;8(5):119. Disponible en: https://doi.org/10.3390/plants8050119
25. Grant CA, Flaten DN, Tomasiewicz DJ, Sheppard SC. The importance of early season phosphorus nutrition. Canadian Journal of Plant Science. 2001;81(2):211–224. Disponible en: https://doi.org/10.4141/P00-093
26. Fageria NK, Santos AB, Barbosa Filho MP. The role of phosphorus in grain filling and productivity of leguminous crops. Journal of Plant Nutrition. 2017;40(10):1406–1415. Disponible en: https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1262412
27. Corrêa JC, Mauad M, Rosolem CA. Fósforo no solo e desenvolvimento de soja influenciados pela adubação fosfatada e cobertura vegetal. Pesquisa Agropecuária Brasileira. 2004;39(12):1231-1237. Disponible en: https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004001200010
28. Chanu LJ, Kadu PP, Basanta ST. Integrated effect of phosphate-solubilizing microorganisms and FYM levels on soil fertility, yield and nutrient uptake of soybean. Indian Journal of Hill Farming. 2023;36(01):185-195. Disponible en: https://ijhfonline.org/index.php/ijhf/article/view/146/111
29. Chen Q, Zhao Q, Xie B, Lu X, Guo Q, Liu G, Zhou M, Tian J, Lu W, Chen K, Tian J, Liang C. Soybean (*Glycine max*) rhizosphere organic phosphorus recycling relies on acid phosphatase activity and specific phosphorus-mineralizing-related bacteria in phosphate deficient acidic soils. Journal Of Integrative Agriculture. 2023;23(5):1685-1702. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.jia.2023.09.002
30. Li Z, Bai T, Dai L, Chen Y, Zhang X, Wang B. Organic acid production by *Penicillium oxalicum* and its role in phosphorus mobilization. Applied Microbiology and Biotechnology. 2016;100(13):5731–5740. Disponible en: https://doi.org/10.1038/srep25313
31. Alori ET, Glick BR, Babalola OO. Microbial Phosphorus Solubilization and Its Potential for Use in Sustainable Agriculture. Frontiers In Microbiology. 2017;8:1664-302X. Disponible en: https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00971.
32. Hao X, Zhu YG, Nybroe O, Nicolaisen MH. The composition and phosphorus cycling potential of bacterial communities associated with hyphae of Penicillium in soil are strongly affected by soil origin. Applied Soil Ecology. 2020;154:103593. Disponible en: https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02951
33. Raymond NS, Gómez-Muñoz B, Van Der Bom FJT, Nybroe O, Jensen LS, Müller-Stöver DS, Oberson A, Richardson AE. Phosphate-solubilising microorganisms for improved crop productivity: a critical assessment. New Phytologist. 2020;229(3):1268-1277. Disponible en: https://doi.org/10.1111/nph.16924
34. Singh H. Effect of inoculation with phosphate solubilizing fungus on growth and nutrient uptake of wheat and maize plants fertilized with rock phosphate in alkaline soils. Eur J soil Biol. 2011;47(1):30–34. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2010.10.005