



USO EFICIENTE DEL FÓSFORO EN TRIGO MEDIANTE HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES

EFFICIENT USE OF PHOSPHORUS IN WHEAT THROUGH ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI

Oscar Arath Grageda-Cabrera^{1*}, Sarahyt Santamaría González-Figueroa¹, José Antonio Vera-Núñez² y Juan Francisco Aguirre-Medina³

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato, México. ²Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Biotecnología y Bioquímica, Irapuato, Guanajuato, México. ³Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad de Ciencias Agrícolas, Campus IV, Huehuetán, Chiapas, México.

*Autor de correspondencia (grageda.oscar@inifap.gob.mx)

RESUMEN

La eficiencia en el uso del fósforo (P) en trigo (*Triticum aestivum* L.) es clave para reducir la dependencia de fertilizantes fosfatados y mejorar la sostenibilidad agrícola. El objetivo de esta investigación fue estudiar el efecto de la inoculación con hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en la absorción y movilización del P en trigo, empleando fertilización con ³²P para cuantificar su asimilación. Un total de 10 tratamientos de inoculación con diferentes especies de HMA y dos testigos (100 % y 50 % de la fertilización fosfatada recomendada) fueron establecidos en condiciones de invernadero mediante un diseño completamente al azar. Las variables evaluadas fueron acumulación de P en grano (rendimiento), paja y total, asimilación del P derivado del fertilizante (Pddf) y su eficiencia de uso (EUP). Los resultados mostraron que la inoculación con *Rhizophagus intraradices* QR00-30082 y *Scutellospora* sp. QR00-5 permitió una acumulación total de P de 7.21 mg y 7.32 mg, respectivamente, superando al testigo con 100 % de fertilización (5.30 mg). Además, los resultados indican que hay diferencias estadísticamente significativas en la asimilación y eficiencia del P entre los tratamientos. Por ejemplo, *R. intraradices* INIFAP^{MR} alcanzó un EUP de 33.06 %, estadísticamente similar al testigo fertilizado con 100 % de P (37.384 %), demostrando que ciertos HMA pueden compensar parcialmente la reducción del fertilizante fosfatado. Las especies de HMA influyeron en la cantidad de P absorbido y su distribución dentro de la planta, reflejándose en diferencias en la acumulación de P en grano y paja. La inoculación con HMA optimizó la absorción de P y, en algunos casos, igualó o superó la acumulación lograda con la fertilización completa, lo que demuestra su capacidad para mejorar la eficiencia del P en trigo y reducir la necesidad de fertilizantes sin afectar el rendimiento.

Palabras clave: *Triticum aestivum* L., absorción, fertilización, nutrientes, ³²P, simbiosis.

SUMMARY

Efficient phosphorus (P) use in wheat (*Triticum aestivum* L.) is key to reducing dependence on phosphate fertilizers and improving agricultural sustainability. The objective of this study was to investigate the effect of inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on P uptake and mobilization in wheat, using ³²P fertilization to quantify P assimilation. A total of 10 inoculation treatments with different AMF species and two controls (100 % and 50 % of the recommended phosphate fertilization) were established under greenhouse conditions using a completely randomized design. The variables evaluated were P accumulation in grain (yield), straw, and total plant,

P assimilation derived from fertilizer (Pddf), and its use efficiency (EUP). The results showed that inoculation with *Rhizophagus intraradices* QR00-30082 and *Scutellospora* sp. QR00-5 resulted in total P accumulation of 7.21 mg and 7.32 mg, respectively, exceeding the control with 100 % fertilization (5.30 mg). Furthermore, the results indicate that there are statistically significant differences in P uptake and efficiency among the treatments. For example, *R. intraradices* INIFAP^{MR} achieved a PUE of 33.06 %, statistically similar to the control fertilized with 100 % P (37.384 %), demonstrating that certain AMF can partially compensate for the reduction in phosphate fertilizer. The AMF species influenced the amount of P absorbed and its distribution within the plant, reflected in differences in P accumulation in grain and straw. Inoculation with AMF optimized P uptake and, in some cases, equaled or exceeded the accumulation achieved with full fertilization, demonstrating their ability to improve P use efficiency in wheat and reduce the need for fertilizers without affecting yield.

Keywords: *Triticum aestivum* L., fertilization, nutrients, ³²P, symbiosis, uptake.

INTRODUCCIÓN

El incremento en la demanda global de alimentos y la presión sobre los sistemas agrícolas han impulsado la investigación de estrategias sostenibles para mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes en cultivos de alto valor, como el trigo (*Triticum aestivum* L.), una de las principales fuentes de calorías y proteínas en la dieta humana (OMS y UNICEF, 2021). En particular, el fósforo (P) es un nutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que desempeña un papel fundamental en procesos bioquímicos y metabólicos, como la fotosíntesis y la transferencia de energía. Sin embargo, la baja disponibilidad de P en los suelos agrícolas limita el rendimiento de los cultivos, obligando a un uso intensivo de fertilizantes fosfatados (Cordell *et al.*, 2009; van de Wiele *et al.*, 2016). Este modelo tradicional, además de costoso, presenta riesgos ambientales significativos, como la contaminación de cuerpos de agua por eutrofización y la reducción de la biodiversidad microbiana (El Attar *et al.*, 2022; Ughamba *et al.*, 2025).

Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) son una herramienta prometedora para mejorar la eficiencia en la asimilación de P y otros nutrimentos en los cultivos (Smith *et al.*, 2011). Las asociaciones simbióticas entre HMA y raíces de plantas incrementan la capacidad de absorción de agua y nutrimentos, mediante la expansión de hifas extraradicales (Smith *et al.*, 2011). Estas estructuras pueden extenderse desde pocos centímetros hasta varios metros desde la base del tallo. Se ha reportado que el micelio extraradical puede alcanzar hasta 22 m g⁻¹ de suelo, lo que incrementa significativamente la superficie de contacto y permite a las plantas acceder a nutrimentos inaccesibles en condiciones normales (Finlay, 2008). Además, las micorrizas pueden mejorar la resistencia de las plantas a diversos factores de estrés abiótico, contribuyendo a una mayor estabilidad en la producción (Chaudhary *et al.*, 2025).

La inoculación de HMA en trigo ha demostrado ser una estrategia efectiva para optimizar la eficiencia en el uso del P (Zhang *et al.*, 2018). Distintos aislados de HMA pueden influir en la eficiencia de asimilación de P en función de la compatibilidad entre la planta y el hongo, así como de las condiciones específicas del suelo (Mbotho *et al.*, 2021). El uso del isótopo radioactivo ³²P permite medir con precisión la capacidad de los HMA para mejorar la asimilación de P, proporcionando datos cuantitativos sobre la efectividad de estas asociaciones simbióticas en el ámbito agrícola (Frossard *et al.*, 2011). Esto destaca la importancia de seleccionar especies de HMA que maximicen la absorción de P y, a la vez, incrementen el rendimiento. La asimilación eficiente de P en trigo es clave para reducir la dependencia de fertilizantes, por lo que el objetivo de este estudio fue evaluar la eficiencia de distintas especies de HMA en la asimilación de P en trigo para desarrollar estrategias agronómicas sostenibles.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localidad del estudio

El estudio se realizó en condiciones de invernadero durante el ciclo otoño-invierno (O-I) del año 2023 en el Campo Experimental Bajío (CEBAJ, INIFAP), ubicado en Celaya, Guanajuato, México (20° 35' 06.59" LN, 100° 49' 46.84" LO y 1769 metros sobre el nivel del mar).

Diseño experimental, tratamientos y unidad experimental

El diseño experimental fue un completamente al azar con 12 tratamientos y tres repeticiones. Los tratamientos correspondieron a 10 especies de HMA y dos testigos: uno

con el 100 % y otro con el 50 % de la fertilización fosfatada recomendada por el INIFAP para trigo en condiciones de riego en la región de El Bajío, conforme a sus paquetes tecnológicos (Cuadro 1). Cada inoculante presentaba una concentración aproximada de 60 esporas por gramo y fue aplicado junto con la semilla a razón de un gramo por maceta, garantizando una dosis uniforme entre tratamientos. Los inoculantes provienen de la colección del INIFAP y fueron seleccionados con base en su efectividad comprobada en estudios previos de evaluación biológica. Cada unidad experimental consistió en una maceta de 4 kg con sustrato compuesto de tierra lama (suelo mineral de textura fina, proveniente de suelos aluviales, caracterizado por un contenido bajo en fósforo disponible) y arena (3:1 p/p), una densidad de siembra de siete plantas y una fertilización de 240-80-00 (NPK) en el testigo con 100 % de P y de 240-40-00 (NPK) en el testigo con 50 % de P y los tratamientos con HMA. La fuente de N fue sulfato de amonio y la de P ácido fosfórico. El fertilizante fosfatado se enriqueció con ³²P (ARC™) en forma de fosfato monopotásico libre de portador (³²P sin fósforo estable añadido), con una actividad específica de 15 mCi mL⁻¹. La aplicación se realizó directamente al sustrato, considerando la constante de decaimiento de isótopo T1/2 (vida media) equivalentes a 14.28 días (Kessler, 1988).

La variedad utilizada fue Luminaria F2012, seleccionada por su alto rendimiento y ciclo precoz. El riego se aplicó cada tres días durante el ciclo del cultivo, exclusivamente con agua, hasta alcanzar la capacidad de campo, asegurando una distribución homogénea en el sustrato. La fertilización se aplicó una sola vez al momento de la siembra. La cosecha se realizó a madurez fisiológica, entre los 55 a 63 días después de la aplicación del ³²P, periodo durante el cual se aplicó un factor de corrección para la actividad radiactiva con base en el modelo de decaimiento exponencial.

Variables evaluadas

Los parámetros evaluados fueron: peso seco de grano (PSG), paja (PSP) y total (PST), fósforo (P) en grano (PG), paja (PP) y total (PT), P derivado del fertilizante en grano (Pddfg), paja (Pddfp) y total (Pddft) y eficiencia de uso de P (EUP). Todos los datos de peso seco y acumulación de fósforo fueron expresados en promedio por planta, con base en la biomasa total de las siete plantas por maceta.

La actividad radiactiva del ³²P fue cuantificada mediante el método Cerenkov (Kessler, 1988). En tubos de digestión de 50 mL se colocaron 150 mg de muestra, añadiendo 10 mL de una mezcla de ácido nítrico y ácido perclórico (5:1 v/v). Las determinaciones se realizaron en muestras

Cuadro 1. Especies de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y dosis de fertilización evaluadas en la variedad Luminaria F2012 en el ciclo otoño-invierno-2023.

Tratamiento	Descripción del inoculante
1	Testigo 100 % P
2	Testigo 50 % P
3	Micorriza INIFAP ^{MR} <i>Rhizophagus intraradices</i>
4	<i>R. intraradices</i> QR00-30082
5	<i>Funneliformis mosseae</i> 004 CSDGO-3 GM
6	<i>Claroideoglossum etunicatum</i> CSDGO-3 C0F
7	<i>R. intraradices</i> C-10 Morelos
8	<i>Scutellospora</i> sp. QR00-5
9	<i>R. intraradices</i> C-15 Mich 0034
10	Las Joyas <i>Glomus macrocarpum</i>
11	Multicepa Pin <i>Acaulospora denticulata</i> + <i>R. intraradices</i>
12	Multicepa Dan <i>Gigaspora gigantea</i> + <i>Glomus macrocarpum</i>

de paja y grano por separado, considerando ambas fracciones en el análisis. La digestión se realizó a 120 °C durante 2 h, evaporando el contenido hasta obtener 1 mL. Posteriormente, las muestras se transfirieron a viales de plástico de 20 mL y se añadieron 19 mL de agua desionizada como centellador. La lectura se realizó durante 1 minuto, utilizando un estándar de ³²P con actividad de 2.22 × 10 dpm y eficiencia de conteo del 54 %, corregido mediante una curva de calibración de *quenching* químico (Sebastianelli, 1990). La eficiencia de asimilación de P se evaluó mediante la técnica de dilución isotópica de ³²P (Di et al., 2000; Zapata, 2000), que permite determinar la proporción de P absorbido del fertilizante aplicado con relación al disponible en el suelo. Las proporciones isotópicas y los niveles de actividad radiactiva se utilizaron para calcular la eficiencia de uso del P en cada tratamiento.

Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó mediante un análisis de varianza (ANOVA) estándar. Cuando la prueba de F resultó significativa se aplicó la prueba de comparación de medias de la Diferencia Mínima Significativa (DMS) con un nivel de significancia de $P \leq 0.05$, utilizando el software SAS 9.3 (SAS Institute, 2022).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados mostraron diferencias significativas ($P \leq 0.01$) entre tratamientos, aunque no todos los inoculantes presentaron el mismo efecto. La interacción entre la fertilización fosfatada y la inoculación con HMA favoreció, en la mayoría de los casos, la absorción y aprovechamiento del P en trigo, lo que se reflejó en un mejor rendimiento comparado con el testigo sin inoculación.

Peso seco

La comparación entre diferentes tratamientos mostró diferencias significativas en PSP, PSG y PST (Cuadro 2). Los resultados obtenidos indican que la respuesta de la inoculación con HMA en la acumulación de biomasa en trigo, con una reducción del 50 % de la fertilización fosfatada, fue dependiente de la especie. La comparación con los testigos fertilizados al 100 % y 50 % de P demuestra que *Rhizophagus intraradices* QR00-30082 y *Scutellospora* sp. QR00-5, no solo compensaron la reducción de fertilización fosfatada, sino que, en algunos casos, superaron el rendimiento de los tratamientos convencionales. Otros inoculantes, particularmente los consorcios Pin y Dan, presentaron valores de PSP, PSG y PST significativamente menores, incluso en comparación con el testigo al 50 % de P.

Cuadro 2. Efecto de los tratamientos sobre el peso seco de paja (PSP), peso seco del grano (PSG) y peso seco total (PST) en la variedad Luminaria F2012 en el ciclo otoño-invierno-2023.

Tratamientos	PSP (g)	PSG (g)	PST (g)
Testigo 100 % P	0.8983 a	0.6574 b	1.5557 a
Testigo 50 % P	0.8322 c	0.5214 f	1.3537 f
Micorriza INIFAP ^{MR} <i>Rhizophagus intraradices</i>	0.8629 a	0.5751 e	1.4381 d
<i>R. intraradices</i> QR00-30082	0.8740 a	0.6929 a	1.5670 a
<i>F. mosseae</i> 004 CSDGO-3 GM	0.8500 b	0.5000 f	1.3500 f
<i>C. etunicatum</i> CSDGO-3 C0F	0.8751 a	0.6333 c	1.5085 b
<i>R. intraradices</i> C-10 Morelos	0.8359 b	0.6214 d	1.4574 c
<i>Scutellospora</i> sp. QR00-5	0.8778 a	0.6251 d	1.5029 b
<i>R. intraradices</i> C-15 Mich 0034	0.8370 b	0.6500 b	1.4870 b
Las Joyas <i>G. macrocarpum</i>	0.8252 d	0.6703 a	1.4963 b
Multicepa Pin <i>A. denticulata</i> + <i>R. intraradices</i>	0.6322 f	0.5714 e	1.2037 g
Multicepa Dan <i>G. gigantea</i> + <i>G. macrocarpum</i>	0.7500 e	0.6429 b	1.3929 e
DMS	0.0432	0.03030	0.0462

Medias con letras iguales en cada columna no son significativamente diferentes (DMS, $P \leq 0.05$); PSP: peso seco de paja, PSG: peso seco de grano y PST: peso seco total.

El mayor PST se registró en el tratamiento con *Rhizophagus intraradices* QR00-30082 (1.5670 g), estadísticamente similar al testigo 100 % P (1.5557 g), aunque, numéricamente mayor. Este resultado es relevante, ya que se obtuvo con solo el 50 % del P recomendado, lo que sugiere que esta cepa optimiza la absorción y movilización del P en la planta. Estos resultados demuestran la contribución de los HMA en la expansión de la zona de absorción radicular, permitiendo la captación de P más allá de la zona de agotamiento alrededor de la raíz (Kuila y Ghosh, 2022). Adicionalmente, otros tratamientos inoculados, como *Scutellospora* sp. y *R. intraradices* C-15 Mich 0034, mostraron valores de PST significativamente superiores al testigo, con 50 % P, aunque estadísticamente inferiores al testigo 100 % P, lo que demuestra que la reducción de fertilización fosfatada sin inoculación limita la acumulación de biomasa, mientras que la simbiosis micorrízica compensa este efecto negativo (Berruti *et al.*, 2016).

En contraste, el testigo 50 % P presentó uno de los valores más bajos de PST (1.3537 g), solo por encima del tratamiento con la multicepa *Acaulospora denticulata* + *R. intraradices* (1.2037 g), lo que indica que la reducción de fertilización fosfatada sin el apoyo de HMA afecta significativamente la productividad del trigo. Estos resultados confirman que

la efectividad de los HMA para promover la absorción de P, el crecimiento y la nutrición vegetal es dependiente de la especie o cepa y de su interacción con el cultivo hospedero. Algunas especies mostraron mayor capacidad para incrementar la acumulación y el uso del P, lo que podría contribuir a una mayor recuperación del P aplicado. No obstante, la magnitud de la respuesta varía entre especies, así como en función del cultivo y del ambiente de origen (Thirkell *et al.*, 2017). El peso seco de grano (PSG), determinante del rendimiento, fue mayor en la inoculación con *R. intraradices* QR00-30082 (0.6929 g), superando al testigo 100 % N + 100 % P (0.6574 g) y a todos los demás tratamientos. Este resultado es relevante, ya que indica que la inoculación con esta cepa no solo favorece la biomasa total, sino que también potencia la partición de asimilados hacia los órganos reproductivos. Se ha reportado que los HMA facilitan la translocación de fósforo y nitrógeno hacia las semillas, mejorando la eficiencia en la producción de grano y la calidad del mismo (Begum *et al.*, 2019).

Por otro lado, el PSG más bajo se observó en *Funnelformis mosseae* (0.5000 g) y en el testigo 100 % N + 50 % P (0.5214 g), lo que confirma que la reducción de fertilización fosfatada sin inoculación disminuye la capacidad de llenado de grano, disminución que algunas especies de HMA pueden compensar. La variabilidad en

la respuesta entre especies de HMA puede explicarse por diferencias en su capacidad de colonización, exploración del suelo y producción de exudados que movilizan P hacia la planta (Berruti et al., 2016).

En términos de eficiencia, la comparación entre los testigos fertilizados y los tratamientos inoculados con micorriza revela un patrón claro; esto es, mientras que el 100 % N + 100 % P logra altos valores de PST y PSG, la inoculación con *R. intraradices* QR00-30082 iguala o supera este rendimiento con la mitad de la fertilización fosfatada. Por el contrario, el testigo 100 % N + 50 % P, sin inoculación, mostró una reducción significativa en biomasa y rendimiento de grano, destacando la importancia de los HMA en la compensación de fertilización reducida. La inoculación con ciertas cepas de *R. intraradices*, no solo permite sustituir hasta el 50 % de la fertilización fosfatada sin comprometer el rendimiento, sino que en algunos casos, mejora la asimilación de fósforo y la producción de grano por encima de los niveles alcanzados con fertilización completa. Estos resultados refuerzan la necesidad de integrar estrategias de biofertilización en sistemas agrícolas para optimizar el uso del fósforo, reducir costos y disminuir el impacto ambiental de la fertilización química.

Contenido de P

El análisis estadístico mostró diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) en el contenido total de fósforo en paja, grano y total entre los tratamientos evaluados. La inoculación con HMA influyó en la acumulación de P en el trigo, observándose respuestas contrastantes entre especies, con efectos positivos, neutros o negativos según el inoculante evaluado. Los resultados presentados en el Cuadro 3 muestran la influencia significativa de la inoculación al sustrato con diversas especies de HMA en la acumulación de fósforo (P) en plantas de trigo.

El tratamiento con *Scutellospora* sp. QR00-5 registró el mayor PT (7.3168 mg), significativamente superior al testigo con 100 % de P (5.3023 mg). Este resultado es relevante considerando que el tratamiento micorrizado recibió únicamente el 50 % de la fertilización fosfatada, lo que indica una mayor eficiencia en la adquisición y translocación de P. Este comportamiento coincide con lo reportado para los HMA, cuya red de micelio extraradical incrementa el volumen de suelo explorado y favorece la absorción de P (Finlay, 2008; Smith et al., 2011; Deepika y Kothamasi, 2015).

Con relación al PG, los tratamientos con *Rhizophagus intraradices* QR00-30082 y *R. intraradices* C-15 Mich 0034 destacaron con valores de 3.0708 mg y 3.2506 mg, respectivamente, duplicando los valores observados en el

testigo 100 % P (1.6443 mg). Este comportamiento puede atribuirse a la mayor eficiencia de las plantas micorrizadas para asimilar y translocar P hacia los órganos reproductivos, asociada a la expansión del micelio extraradical que amplía la zona de exploración del sustrato. Asimismo, se ha reportado que las asociaciones micorrízicas pueden influir en la partición y redistribución interna del P, favoreciendo su repartición hacia el grano. Este efecto resulta relevante, ya que un mayor contenido de P en el grano es un indicador de mejor calidad nutricional del trigo (Giles et al., 2017).

El tratamiento con Las Joyas *Glomus macrocarpum* mostró el mayor PP (5.2357 mg), indicando una acumulación significativa de P en la biomasa vegetativa. Aunque este P no se transloca al grano, su presencia en la paja puede contribuir a la fertilidad del suelo si se reincorpora, mejorando la sostenibilidad.

El testigo con 50 % de P presentó un PT (5.4197 mg) comparable al testigo 100 % P, lo que sugiere que la reducción de fertilización fosfatada no afectó drásticamente la acumulación total de P. Sin embargo, sí influyó en el rendimiento (Cuadro 2), ya que el PST fue menor en el testigo 50 % P en comparación con el 100 %. Al contrastar estos resultados con los tratamientos inoculados, se observa que todos los fertilizados al 50 % de P superaron al testigo con igual dosis y algunos, incluso, igualaron el rendimiento del testigo 100 % P, lo que indica un efecto compensatorio de la simbiosis micorrízica. Además, la inoculación con ciertas especies de HMA, como *Scutellospora* sp. QR00-5 y *R. intraradices* QR00-30082, incrementó significativamente la acumulación de P, incluso por encima del testigo 100 % P, mostrando la eficiencia de los HMA en la movilización y absorción del P en el trigo. La inoculación con ciertas especies de HMA, particularmente *Scutellospora* sp. QR00-5 y *R. intraradices* QR00-30082, mejora la acumulación de P en plantas de trigo, tanto en la biomasa vegetativa como en los granos. Estos resultados demuestran que la simbiosis micorrízica arbuscular puede constituir un mecanismo eficaz para optimizar la nutrición fosfatada en trigo cuando se establecen asociaciones funcionalmente compatibles. La respuesta observada confirma que la EUP puede incrementarse mediante asociaciones micorrízicas adecuadas, lo que permite reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos.

Fósforo derivado del fertilizante (Pddf) y eficiencia en el uso del fósforo (EUP)

Se observaron efectos altamente significativos ($P \leq 0.01$) de los tratamientos sobre las variables evaluadas (Cuadro 4). Los resultados indican que la inoculación con HMA tiene un impacto significativo en la absorción y distribución del P en la planta. El tratamiento con las Joyas *G. macrocarpum*

Cuadro 3. Especies de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y su efecto en la acumulación de fósforo en paja (PP), en grano (PG) y total (PT) en la variedad Luminaria F2012, en el ciclo otoño-invierno-2023.

Tratamientos	PP (mg)	PG (mg)	PT (mg)
Testigo 100 % P	3.6580 e	1.6443 c	5.3023 e
Testigo 50 % P	4.2717 b	1.1480 f	5.4197 e
Micorriza INIFAP ^{MR} <i>Rhizophagus intraradices</i>	3.1067 f	1.5717 d	4.6784 f
<i>R. intraradices</i> QR00-30082	4.1359 c	3.0708 a	7.2067 a
<i>F. mosseae</i> 004 CSDGO-3 GM	3.8556 d	1.8000 c	5.6556 e
<i>C. etunicatum</i> CSDGO-3 C0F	4.0259 c	2.6793 b	6.7052 c
<i>R. intraradices</i> C-10 Morelos	3.6808 e	2.6929 b	6.3737 d
<i>Scutellospora</i> sp. QR00-5	4.5644 b	2.7524 b	7.3168 a
<i>R. intraradices</i> C-15 Mich 0034	3.1219 f	3.2506 a	6.3725 d
Las Joyas <i>G. macrocarpum</i>	5.2357 a	1.6300 c	6.8657 b
Multicepa Pin <i>A. denticulata</i> + <i>R. intraradices</i>	2.1421 h	1.2574 e	3.3995 g
Multicepa Dan <i>G. gigantea</i> + <i>G. macrocarpum</i>	2.6967 g	1.4776 d	4.1743 g
DMS	0.33400	0.22810	0.40250

Medias con letras iguales en cada columna no son significativamente diferentes (DMS, $P \leq 0.05$).

mostró el mayor porcentaje de Pddf (0.6333 %), indicando una eficiente acumulación de P en la paja. En contraste, *R. intraradices* C-15 Mich 0034 registró el Pddf más alto (0.5000 %), teniendo una mayor acumulación de P en el grano. El tratamiento con *Scutellospora* sp. QR00-5 registró el mayor Pddf (0.4867 %) y PT (7.3168 mg), demostrando una absorción superior de Pddf y una mayor acumulación total en la planta. Aunque la acumulación de P fue superior, el rendimiento no mostró un incremento proporcional, lo que indica que el P no actúa de manera aislada y que su aprovechamiento depende del equilibrio con otros nutrientes y del metabolismo general de la planta.

Al analizar el Cuadro 4, se observa que la inoculación con HMA influyó positivamente en la asimilación y EUP. El testigo con 100 % de P sin inoculación presentó el mayor valor de EUP (37.384 %), resultado atribuible a que recibió el doble de fertilizante en comparación con los tratamientos inoculados al 50 %. Aunque el testigo 50 % P acumuló más PT que el 100 % P, su EUP fue menor porque ésta se calcula exclusivamente con base en el Pddf marcado (^{32}P) y no en el PT acumulado. Al aplicarse la mitad de la dosis, la cantidad de P marcado disponible para ser absorbido fue también menor, reduciendo el valor relativo de eficiencia. Esta precisión metodológica constituye una de las

principales ventajas del uso del isótopo ^{32}P , ya que permite distinguir el P realmente asimilado del fertilizante respecto al proveniente del suelo u otras fuentes, aportando una medición más exacta de la eficiencia fisiológica. Aun así, los tratamientos inoculados mostraron una mayor capacidad de EUP en condiciones de fertilización reducida, confirmando una mejor eficiencia en su aprovechamiento. Estos datos sugieren que una mayor disponibilidad de P en el suelo se traduce en una eficiencia más elevada en su uso por parte de la planta. Sin embargo, varios tratamientos inoculados con HMA y una fertilización reducida al 50 % de P superaron al testigo al 50 % en términos de asimilación total de Pddf y contenido total de P en la planta (PT). Por ejemplo, *Scutellospora* sp. QR00-5 registró un Pddf de 0.4867 % y un PT de 7.3168 mg, en comparación con el testigo al 50 % de P, que mostró un Pddf de 0.4003 % y un PT de 5.4197 mg. Esto indica que, aunque la EUP fue menor en los tratamientos micorrizados, la inoculación con HMA promovió una mayor absorción y acumulación de P en la planta, compensando la reducción en la dosis de fertilizante aplicado.

Además, algunos tratamientos con micorrizas mostraron valores de absorción y acumulación de P comparables al testigo con 100 % de P, a pesar de haber recibido solo la mitad del fertilizante fosforado. Destaca el tratamiento con

Cuadro 4. Inoculación con hongos micorrízicos arbusculares y asimilación del fósforo aplicado como fertilizante en la variedad Luminaria F2012 en el ciclo otoño-invierno-2023.

Tratamientos	Pddf _p (%)	Pddf _g (%)	Pddf _t (%)	PT (mg)	EUP (%)
Testigo 100 % P	0.4066 d	0.2500 d	0.3404 e	5.3023 e	37.384 a
Testigo 50 % P	0.5133 b	0.2200 e	0.4003 d	5.4197 e	16.242 e
Micorriza INIFAP ^{MR} <i>Rhizophagus intraradices</i>	0.3600 f	0.2733 d	0.3253 e	4.6784 f	33.058 a
<i>R. intraradices</i> QR00-30082	0.4733 c	0.4433 b	0.4600 a	7.2067 a	14.136 f
<i>F. mosseae</i> 004 CSDGO-3 GM	0.4533 c	0.3600 c	0.4187 c	5.6556 e	20.728 d
<i>C. etunicatum</i> CSDGO-3 C0F	0.4600 c	0.4233 b	0.4446 b	6.7052 c	11.551 f
<i>R. intraradices</i> C-10 Morelos	0.4400 c	0.4333 b	0.4373 b	6.3737 d	9.722 g
<i>Scutellospora</i> sp. QR00-5	0.5200 b	0.4400 b	0.4867 a	7.3168 a	10.103 g
<i>R. intraradices</i> C-15 Mich 0034	0.3733 e	0.5000 a	0.4287 c	6.3725 d	7.969 h
Las Joyas <i>G. macrocarpum</i>	0.6333 a	0.2433 d	0.4585 b	6.8657 b	16.880 e
Multicepa Pin A. <i>denticulata</i> + <i>R. intraradices</i>	0.3400 f	0.2200 e	0.2824 g	3.3995 g	24.289 c
Multicepa Dan G. <i>gigantea</i> + <i>G. macrocarpum</i>	0.3600 f	0.2300 e	0.2999 f	4.1743 g	28.108 b
DMS	0.01470	0.02850	0.01470	0.40250	5.8827

Medias dentro del mismo factor con letras iguales en cada columna no son significativamente diferentes. (DMS, $P \leq 0.05$): Diferencia Mínima Significativa, Pddf_p: fósforo derivado del fertilizante en paja, Pddf_g: fósforo derivado del fertilizante en grano, Pddf_t: fósforo derivado del fertilizante total, PT: fósforo total en la planta, EUP: eficiencia de uso de fósforo del fertilizante.

Micorriza INIFAP^{MR} *Rhizophagus intraradices*, que presentó una EUP de 33.058 %, estadísticamente igual al testigo con 100 % de P (37.384 %), a pesar de haber recibido solo el 50 % del fertilizante. Este resultado indica que ciertas especies de HMA pueden mejorar la eficiencia en la adquisición de P y compensar parcialmente la reducción en la fertilización, lo que podría traducirse en una estrategia para optimizar el uso de fertilizantes fosforados en la producción de trigo (Wu et al., 2024).

La menor EUP en los tratamientos micorrizados podría atribuirse al costo energético asociado a la simbiosis micorrízica, donde la planta destina recursos para mantener la asociación con el hongo, lo que puede reducir la eficiencia en el uso del P absorbido. No obstante, la mayor absorción total de P en estos tratamientos sugiere que los HMA mejoran la capacidad de la planta para explorar el suelo y acceder a formas de P menos disponibles, incrementando la reserva total de este nutriente en los tejidos vegetales (Das et al., 2023).

Los resultados obtenidos destacan la importancia de seleccionar especies específicas de HMA que, incluso con

una fertilización reducida, puedan mejorar la absorción y acumulación de P en las plantas de trigo, reduciendo su aplicación sin comprometer el rendimiento.

Estos resultados son consistentes con estudios que demuestran que la simbiosis con HMA puede aumentar la absorción de P en cultivos de trigo, mejorando el crecimiento y rendimiento. Wang et al. (2023) encontraron que los HMA facilitan la movilización y absorción de P por las plantas. Además, investigaciones han demostrado que la inoculación con HMA puede incrementar la eficiencia en el uso del P en condiciones de baja disponibilidad de este nutriente, lo que es crucial para optimizar la producción en suelos pobres en P. Sin embargo, la eficiencia en el uso del P no siempre se correlaciona directamente con la inoculación micorrízica. Factores como la disponibilidad inicial de P en el suelo, la compatibilidad entre la cepa de HMA y la variedad y las condiciones ambientales pueden influir en la eficacia de la simbiosis (Mbotho et al., 2021; Das et al., 2023). Por ejemplo, estudios han mostrado que, en suelos con alta disponibilidad de P, la dependencia de la planta hacia la simbiosis micorrízica puede disminuir, ya que la planta puede satisfacer sus necesidades

nutricionales sin la asistencia del hongo (Smith *et al.*, 2011; van de Wiel *et al.*, 2016).

Los resultados de este estudio evidencian que las especies de HMA utilizadas influyeron positivamente en la asimilación y distribución del P dentro de la planta de trigo. Se observaron diferencias significativas en la proporción de P_{ddfp}, P_{ddfg} y P_{ddft} de la planta, lo que indica que cada cepa modula de manera distinta la absorción y el transporte de este nutriente dentro del sistema planta-hongo-suelo. Especies como *Scutellospora* sp. QR00-5 y *R. intraradices* QR00-30082 promovieron una mayor asimilación total de P en la planta, lo que se reflejó en los valores más altos de PT.

La variabilidad en la distribución del P entre los distintos órganos de la planta podría deberse a diferencias en la capacidad de cada cepa para modular la expresión de transportadores de P en la planta. Se ha demostrado que la activación de transportadores de P en la planta micorrizada varía en función de la cepa y la planta hospedera, lo que repercute en la eficiencia con la que el P es absorbido y redistribuido dentro de la planta (Qi *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2023). Esto sugiere que la cepa de HMA podría determinar no solo la cantidad de P absorbido, sino también su distribución entre los órganos de la planta y, en última instancia, su impacto en el rendimiento del cultivo.

CONCLUSIONES

La inoculación con HMA mejoró la absorción y distribución del P en trigo, permitiendo, en algunos casos, igualar o superar la acumulación lograda con el 100 % de fertilización fosfórica, aun cuando los tratamientos micorrizados recibieron solo el 50 % del fertilizante. La variabilidad entre especies en la asimilación del P indica que la eficiencia de la simbiosis depende tanto de la disponibilidad del nutriente como de la capacidad de cada hongo para facilitar su adquisición y movilización. Además de incrementar la absorción total, la inoculación modificó la partición del P en la planta, con diferencias claras según la cepa utilizada. Estos resultados confirman el potencial de los HMA para optimizar la fertilización fosfatada en trigo, reduciendo el uso de fertilizantes sin afectar la nutrición ni el rendimiento del cultivo.

BIBLIOGRAFÍA

- Begum N., C. Qin, M. A. Ahanger, S. Raza, M. I. Khan, M. Ashraf, ... and L. Zhang (2019) Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: implications in abiotic stress tolerance. *Frontiers in Plant Science* 10:1068, <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01068>
- Berruti A., E. Lumini, R. Balestrini and V. Bianciotto (2016) Arbuscular mycorrhizal fungi as natural biofertilizers: let's benefit from past successes. *Frontiers in Microbiology* 6:1559, <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01559>
- Chaudhary A., S. Poudyal and A. Kaundal (2025) Role of arbuscular mycorrhizal fungi in maintaining sustainable agroecosystems. *Applied Microbiology* 5:6 <https://doi.org/10.3390/applmicrobiol5010006>
- Cordell D., J. O. Drangert and S. White (2009) The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global Environmental Change* 19:292-305, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009>
- Das B. T., S. Schmidt, M. T. Harrison, I. Hunt, J. S. Biggs and N. I. Huth (2023) Key drivers of phosphorus use efficiency (PUE) in a dryland cropping system. *Agronomy for Sustainable Development* 43:76, <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00929-1>
- Deepika S. and D. Kothamasi (2015) Soil moisture - a regulator of arbuscular mycorrhizal fungal community assembly and symbiotic phosphorus uptake. *Mycorrhiza* 25:67-75, <https://doi.org/10.1007/s00572-014-0596-1>
- Di H. J., K. C. Cameron and R. G. McLaren (2000) Isotopic dilution methods to determine the gross transformation rates of nitrogen, phosphorus, and sulfur in soil: a review of the theory, methodologies, and limitations. *Soil Research* 38:213-230, <https://doi.org/10.1071/sr99005>
- El Attar I., M. Hnini, K. Taha and J. Aurag (2022) Phosphorus availability and its sustainable use. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 22:5036-5048, <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00980-z>
- Finlay R. D. (2008) Ecological aspects of mycorrhizal symbiosis: with special emphasis on the functional diversity of interactions involving the extraradical mycelium. *Journal of Experimental Botany* 59:1115-1126, <https://doi.org/10.1093/jxb/ern059>
- Frossard E., D. L. Achat, S. M. Bernasconi, E. K. Bünemann, J. C. Fardeau, J. Jansa, ... A. Oberson (2011) The use of tracers to investigate phosphate cycling in soil-plant systems. In: Phosphorus in Action: Biological Processes in Soil Phosphorus Cycling. E. Bünemann, A. Oberson and E. Frossard (eds.). Springer. Berlin, Germany. pp:59-91, https://doi.org/10.1007/978-3-642-15271-9_3
- Giles C. D., L. K. Brown, M. O. Adu, M. M. Mezeli, G. A. Sandral, R. J. Simpson, ... and T. S. George (2017) Response-based selection of barley cultivars and legume species for complementarity: root morphology and exudation in relation to nutrient source. *Plant Science* 255:12-28, <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.11.002>
- Kessler M. J. (1988) Liquid scintillation analysis: Science and technology. PACKARD Instruments Co., Inc. Downers, Illinois, USA. pp: 1-17-9.
- Kuila D. and S. Ghosh (2022) Aspects, problems and utilization of arbuscular mycorrhizal (AM) application as bio-fertilizer in sustainable agriculture. *Current Research in Microbial Sciences* 3:100107, <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2022.100107>
- Mbotho A., D. Selikane, J. S. Sefadi and M. J. Mochane (2021) Exophysical and endophysical interactions of plants and microbial activities. In: Biofertilizers: Study and Impact. pp: 183-210, <https://doi.org/10.1002/9781119724995.ch6>
- OMS, Organización Mundial de la Salud y UNICEF, Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (2021) El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2021, <https://doi.org/10.4060/cb4474es>
- Qi S., J. Wang, L. Wan, Z. Dai, D. M. S. Matos, D. Du, ... and A. T. Moles (2022) Arbuscular mycorrhizal fungi contribute to phosphorus uptake and allocation strategies of *Solidago canadensis* in a phosphorus-deficient environment. *Frontiers in Plant Science* 13:831654, <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.831654>
- SAS Institute (2022) SAS® OnDemand for Academics. Statistical Analysis System. SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA. https://www.sas.com/en_us/software/on-demand-for-academics.html. (January 2022).
- Sebastianelli A. (1990) FAO/OIEA Guía práctica para conteo por centelleo líquido y autoradiografía. Trabajos Prácticos para Becados. Seibersdorf, Austria. 31 p.
- Smith S. E., I. Jakobsen, M. Grønlund and F. A. Smith (2011) Roles of arbuscular mycorrhizas in plant phosphorus nutrition: interactions between pathways of phosphorus uptake in arbuscular mycorrhizal roots have important implications for understanding and manipulating plant phosphorus acquisition. *Plant Physiology* 156:1050-1057, <https://doi.org/10.1104/pp.111.174581>

- Thirkell T. J., M. D. Charters, A. J. Elliott, S. M. Sait and K. J. Field (2017) Are mycorrhizal fungi our sustainable saviours? Considerations for achieving food security. *Journal of Ecology* 105:921-929, <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12788>
- Ughamba K. T., J. K. Ndukwe, I. D. Lidbury, N. D. Nnaji, C. N. Eze, C. C. Aduba, S. Groenhof, K. O. Chukwu, C. A. Anyanwu and C. K. Anumudu (2025) Trends in the application of phosphate-solubilizing microbes as biofertilizers: implications for soil improvement. *Soil Systems* 9:6, <https://doi.org/10.3390/soilsystems9010006>
- van de Wiel C. C., C. G. van der Linden and O. E. Scholten (2016) Improving phosphorus use efficiency in agriculture: opportunities for breeding. *Euphytica* 207:1-22, <https://doi.org/10.1007/s10681-015-1572-3>
- Wang G., Z. Jin, T. S. George, G. Feng and L. Zhang (2023) Arbuscular mycorrhizal fungi enhance plant phosphorus uptake through stimulating hyphosphere soil microbiome functional profiles for phosphorus turnover. *New Phytologist* 238:2578-2593, <https://doi.org/10.1111/nph.18772>
- Wu, Y., C. Chen and G. Wang (2024) Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi improves plant biomass and nitrogen and phosphorus nutrients: A meta-analysis. *BMC Plant Biology* 24:960, <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05638-9>
- Zapata F. (2000) Isotopic techniques in soil fertility and plant nutrition studies. In: Handbook of Nuclear Techniques in Agriculture. Pp: 123-145.
- Zhang B., H. Zhang, H. Wang, P. Wang, Y. Wu and M. Wang (2018) Effect of phosphorus additions and arbuscular mycorrhizal fungal inoculation on the growth, physiology, and phosphorus uptake of wheat under two water regimes. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 49:862-874, <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1435798>

