











Efectos sinérgicos de bioinoculantes microbianos en el desarrollo radicular de variedades de maíz morado (*Zea mays* L.)
Synergistic effects of microbial bioinoculants on root development of purple corn (*Zea mays* L.) varieties

Bhill Thoño Rondinel Huanaco¹ , Eugenia Rocío Quispe-Medina² , Cayo Garcia-Blásquez Morote¹ ,
José Antonio Quispe-Tenorio¹ , José Velásquez Mantari² , Omar Paitamala Campos³ , Luis Alberto Díaz Morales³ ,
Daniel Claudio Matsusaka Quiliano^{3*} 

RESUMEN

El maíz morado (*Zea mays* L.), originario de los Andes peruanos, destaca por su alto contenido de antocianinas, lo que le otorga un valor nutracéutico creciente en mercados globales. Sin embargo, su cultivo en zonas altoandinas suele depender del uso intensivo de fertilizantes sintéticos, comprometiendo la sostenibilidad del suelo. Este estudio evaluó como la bioinoculación individual y combinada con *Azospirillum brasilense* y *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* influyen en caracteres morfofisiológicos radicales en cinco variedades contrastantes de maíz morado, cultivadas en la región de Ayacucho (2735 m s.n.m.). Se aplicó un diseño de bloques completos al azar con cuatro tratamientos de bioinoculación. Se midieron peso seco, longitud, volumen, diámetro y número de ramificaciones radicales. La coinoculación microbiana generó diferencias altamente significativas ($p < 0.0001$) en todos los parámetros evaluados respecto al control. En particular, duplicó el volumen radical ($28,0 \pm 0,41$ cm³), triplicó el peso seco ($180,29 \pm 8,51$ g) y mejoró notablemente la longitud ($31,81 \pm 0,48$ cm), el diámetro ($128,36 \pm 2,3$ mm) y el número de ramificaciones ($27,28 \pm 0,66$), superando tanto a las inoculaciones individuales como al control (Tukey, $p < 0.05$). Los resultados confirman que la coinoculación rizobacteria-micorriza mejora significativamente la arquitectura del sistema radical, potenciando la absorción de nutrientes. Así, la coinoculación representa una estrategia agroecológica eficaz para optimizar el rendimiento del maíz morado y reducir la dependencia de insumos sintéticos en contextos altoandinos.

Palabras clave: maíz morado, bioinoculantes, *azospirillum brasilense*, *glomus iranicum*, fenotipo de raíz

ABSTRACT

Purple corn (*Zea mays* L.), native to the Peruvian Andes, stands out for its high anthocyanin content, which gives it a growing nutraceutical value in global markets. However, its cultivation in high Andean areas often depends on the intensive use of synthetic fertilizers, compromising soil sustainability. This study evaluated how individual and combined bioinoculation with *Azospirillum brasilense* and *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* influence root morpho-physiological traits in five contrasting varieties of purple corn grown in the Ayacucho region (2735 m a.s.l.). A randomized complete block design with four bioinoculation treatments was applied. Dry weight, length, volume, diameter and number of root branches were measured. Microbial co-inoculation generated highly significant differences ($p < 0.0001$) in all parameters evaluated with respect to the control. In particular, it doubled root volume (28.0 ± 0.41 cm³), tripled dry weight (180.29 ± 8.51 g) and significantly improved length (31.81 ± 0.48 cm), diameter (128.36 ± 2.3 mm) and number of ramifications (27.28 ± 0.66), outperforming both individual inoculations and the control (Tukey, $p < 0.05$). The results confirm that rhizobacteria-mycorrhizal co-inoculation significantly improves root system architecture, enhancing nutrient uptake. Thus, co-inoculation represents an effective agroecological strategy to optimize purple corn yield and reduce dependence on synthetic inputs in high Andean contexts.

Keywords: purple corn, bioinoculants, *azospirillum brasilense*, *glomus iranicum*, Root phenotype

¹Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga (UNSCB), Ayacucho, Perú.

²Dirección de Desarrollo Tecnológico Agrario, Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), Ayacucho, Perú.

³Dirección de Desarrollo Tecnológico Agrario, Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), Lima, Perú.

*Autor de correspondencia. E-mail: dmatsusaka@agro.uba.ar

I. INTRODUCCIÓN

El maíz morado (*Zea mays* L.), un recurso autóctono de los Andes peruanos, ha sido cultivado desde tiempos preincaicos, siendo fundamental en la dieta de las poblaciones andinas (Castellano-Hinojosa et al., 2018). Su tonalidad púrpura se debe a la elevada acumulación de antocianinas, compuestos con reconocidas propiedades antioxidantes (Suriano et al., 2021; Cai et al., 2023). Estas antocianinas han sido vinculadas con beneficios para la salud humana, entre los que destacan la reducción del riesgo de cáncer, la protección cardiovascular y la mitigación de enfermedades neurodegenerativas (Long et al., 2013; Petroni et al., 2014). El creciente interés de los consumidores en alimentos funcionales ha impulsado la demanda de productos derivados de maíz morado. De hecho, Perú se mantiene como uno de los principales productores y exportadores de esta variedad (Minagri, 2017; Midagri 2021; Ritchie, 2023).

Dicho auge comercial se refleja en incrementos anuales en la producción del 2,7 % en volumen y del 2,4 % en superficie sembrada (Midagri, 2022). Particularmente, la región de Ayacucho es responsable del 35 % de la producción nacional, convirtiéndose en un núcleo estratégico para la cadena de valor del cultivo (Midagri, 2022). Sin embargo, la expansión e incremento de la producción se ha apoyado en prácticas de fertilización sintética intensiva, generando preocupación por su impacto ambiental y la sostenibilidad del suelo (Castellano-Hinojosa et al., 2018).

Frente a este desafío, los bioinoculantes microbianos como los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) surgen como herramientas clave para la transición hacia una agricultura sostenible (Moreno-Reséndez et al., 2018). Estos microorganismos mejoran la absorción de nutrientes, la biomasa radical y el rendimiento en cultivos de maíz (Pérez-Montaña et al., 2014; Yaadesh et al., 2023; He et al., 2024). En particular, las rizobacterias del género *Azospirillum* spp. estimulan el crecimiento vegetal mediante múltiples mecanismos, como la síntesis

de fitohormonas ácido indolacético y giberelinas (Calzavara et al., 2018), mientras que los HMA del género *Glomus* spp. incrementan la eficiencia en la absorción de agua y fósforo, además de conferir resistencia a estrés abiótico (Smith & Read, 2010; Luna et al., 2012). Experimentos previos han demostrado la sinergia entre HMA y PGPR, generan incrementos significativos en la longitud total de la raíz a superficie radicular total, área superficial de las raíces y peso seco (Ribeiro et al., 2018; Tiepo et al., 2024). Particularmente, Luna et al., (2012) señala que la bioinoculación de *Azospirillum brasilense* y *Glomus intraradices* encontraron un incremento en peso seco de follaje y el rendimiento de grano.

Aun así, persiste un vacío de conocimiento respecto a la respuesta de variedades de maíz morado a consorcios microbianos bajo condiciones agroclimáticas andinas, donde factores como la altitud (>2400 m s.n.m.) y la limitada disponibilidad de nutrientes condicionan la eficacia de los biofertilizantes (Calvo et al., 2014; Ribeiro et al., 2021). Para reducir la brecha de conocimiento, se seleccionaron cinco variedades contrastantes de maíz morado. Dos criterios guiaron la elección: (i) representan la diversidad genética y antecedentes de adaptación altitudinal y (ii) exhiben rangos diferenciados de contenido de antocianinas y potencial de rendimiento, atributos que definen su valor comercial y funcional (INIA, 2007; Medina-Hoyos et al., 2020; Narro-León et al., 2022, Sánchez & Vargas, 2023). El estudio de este conjunto heterogéneo permite, por un lado, identificar genotipos con mayor plasticidad a la coinoculación microbiana y, por otro, generar recomendaciones agronómicas específicas para los productores que buscan maximizar tanto la productividad como el contenido nutracéutico del grano.

En este contexto, el presente estudio evaluó el efecto individual y combinado de *Azospirillum brasilense* y *Glomus intraradices* sobre caracteres fenotípicos radiculares de las cinco variedades seleccionadas de maíz morado. El conocimiento resultante contribuirá a diseñar estrategias de fertilización biológica que fortalezcan la sostenibilidad de los sistemas agrícolas andinos y satisfagan la creciente demanda

internacional de maíz morado de alta calidad.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

Ubicación y Clima

La investigación se llevó a cabo durante la campaña agrícola 2023-2024, en el departamento de Ayacucho, la Estación Experimental Agraria Canaán, ubicada en el distrito de Andrés Avelino Cáceres Dorregaray, provincia de Huamanga ($13^{\circ} 9' 49.557''$ S, $74^{\circ} 12' 6.405''$ W, 2735 m.s.n.m.).

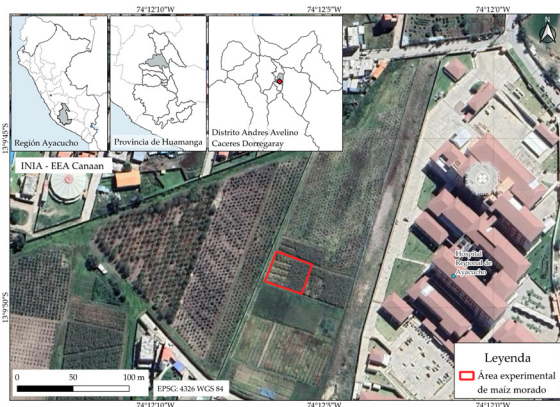


Figura 1. Ubicación geográfica del campo experimental en la localidad de Canaán.

Las temperaturas registradas durante el experimento oscilaron entre $6,6^{\circ}\text{C}$ y $26,4^{\circ}\text{C}$, con promedios de $15,8$ a $19,3^{\circ}\text{C}$. La precipitación máxima fue de $194,6$ mm en marzo, de acuerdo a los datos meteorológicos de temperatura y precipitación en la localidad de Canaán mostrados en la **Tabla 1**.

El análisis de fertilidad del suelo se realizó en el Laboratorio de Suelos, Agua y Foliare (LABSAF) de la Estación Experimental Agraria Canaán bajo los parámetros (**Tabla 2**).

Material Vegetal y Bioinoculantes

Se seleccionaron cinco variedades contrastantes de maíz morado Canteño, INIA- 601, INIA- 615, Sintético MM y PMV 615 de maíz morado (*Zea mays* L.) de libre polinización, seleccionados por su alto rendimiento y adaptación a condiciones andinas (**Tabla 3**).

Los bioinoculantes utilizados en los tratamientos fueron (i) *Azospirillum brasilense* (cepa Az-007). La cepa de *Azospirillum brasilense* fue suministrada por la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga

(UNSCH-FOCAM). Esta cepa fue caracterizada previamente en condiciones de invernadero en cultivos de palto (Palomino-Malpartida et al., 2023) y (ii) el producto comercial Mycoup® (*Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* propagules ≥ 80 spores/g) (**Tabla 4**).

Diseño Experimental y Manejo de campo

Posteriormente, se estableció el diseño experimental para evaluar el efecto de los bioinoculantes aplicados. El experimento implementó un Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA). Cada unidad experimental tuvo una superficie de $12,8\text{ m}^2$ ($3,2\text{ m}$ de ancho \times 4 m de largo), conformada por cuatro surcos separados entre sí por $0,8\text{ m}$ de los cuales se evaluaron los dos surcos centrales. Las semillas se sembraron manualmente, depositando tres semillas por golpe, con una separación de $0,5\text{ m}$ entre golpes. Cada surco contenía 24 semillas, totalizando 96 plantas por unidad experimental. Entre bloques se dispuso un espacio de $1,5\text{ m}$ entre bloques para labores de manejo. El área total por bloque fue de 64 m^2 (16 m de largo \times 4 m de ancho), permitiendo una adecuada distribución de bioinoculaciones y variedades según el esquema mostradocomo se detalla a continuación.

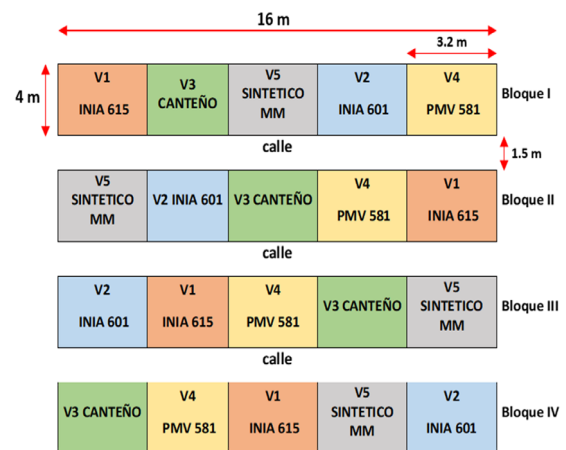


Figura 2: Diseño experimental

La fertilización se realizó utilizando abono orgánico comercial Mallki, aplicando dos dosis de 75 kg en el área experimental. Este fertilizante contiene ácidos fúlvicos, ácidos húmicos, boro, calcio, cobre, fósforo, hierro, magnesio, manganeso y nitrógeno. Para la inoculación se utilizó la cepa de *Azospirillum brasilense*, la cual fue proporcionada por la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga

(UNSCH-FOCAM), la cepa fue aislada de las raíces de maíz amiláceo en la zona de Ccerayoc, distrito de Quinoa-Ayacucho. Esta cepa fue previamente estudiada en invernaderos en el cultivo de palto (Palomino-Malpartida et al., 2022).

La inoculación se realizó aplicando 400 g de inoculante sólido en turba ($1,0 \times 10^8$ UFC/g), complementado con 50 mL de inoculante líquido ($1,0 \times 10^8$ UFC/mL) y 25 mL de goma arábiga como agente de adhesión para la peletización de las semillas.

El hongo micorrízico arbuscular se aplicó mediante el producto comercial Mycoup® (con *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum*, ≥ 120 propágulos/g de sustrato). Se utilizó una dosis de 3 kg/ha, diluyendo 22 g del producto en 64 L de agua, aplicados en el cuello de la planta durante el estado fenológico V10 (tenth-leaf stage).

Se evaluaron cuatro tipos de bioinoculaciones: T1 (control, sin microorganismos), T2 (*Azospirillum brasilense*), T3 (*Glomus iranicum* var. *tenuihypharum*) y T4 (coino inoculación de ambos microorganismos), con un total de 20 unidades experimentales (Tabla 5).

Parámetros de la Raíz

En cada unidad experimental se seleccionaron cinco plantas al azar para evaluar los parámetros radicales como peso (balanza de precisión OHAUS AX4202), longitud (flexómetro y regla de aluminio), volumen (desplazamiento de agua en probeta graduada), diámetro (vernier digital DCLA-1205 VINCA) y número de ramificaciones (evaluación por inspección visual directa).

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para identificar diferencias significativas entre los bioinoculantes y/o las variedades. Para las fuentes de variación donde se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) se realizaron las comparaciones múltiples según Tukey. Se utilizó el software Infostat (versión 2008; Di Rienzo et al., 2020).

III. RESULTADOS

El análisis de varianza (ANOVA) para el peso de la raíz mostró ser altamente significativo ($p < 0,0001$)

en los factores variedad y bioinoculación, así como su interacción radical evaluados (Tabla 6). En el peso de la raíz, se encontraron respuestas significativas (Tukey, $p < 0,05$) entre las bioinoculaciones T4 (*Azospirillum* y *Glomus*) y T1 (Testigo), con medias de $180,28 \pm 8,5$ g y $78,5 \pm 4,2$ g, respectivamente (Figura 3, Tabla 7).

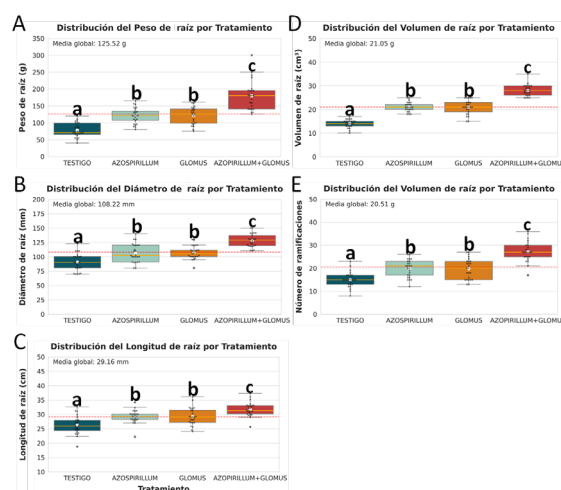


Figura 3. Respuesta fenotípica de los caracteres radicales para los cuatro tratamientos evaluados. (A) Peso de raíz (g), (B) Longitud de raíz (cm), (C) Volumen de raíz (cm³), (D) Diámetro de raíz (mm) y (E) Número de ramificaciones. En los diagramas de caja, la línea central representa la mediana, los límites de la caja indican el primer y tercer cuartil (25-75%), los bigotes muestran el rango intercuartílico (1.5×IQR), y los puntos individuales representan valores atípicos. Las letras diferentes muestran diferencias significativas entre las medias (Tukey test $p < 0,05$).

Seguidamente se realizó la misma evaluación entre las variedades, sin hallarse diferencias significativas. A pesar de no encontrar diferencias significativas INIA 601 destacó al tener la media más elevada con $145,37 \pm 11$ g para el peso de la raíz, mientras que la variedad PMV 581 obtuvo $114,20 \pm 5,96$ g (Figura 4, Tabla 8).

En cuanto a la longitud raíz el análisis de ANOVA reveló ser significativa con la bioinoculación ($p < 0,0001$; Tabla 9). Se observaron diferencias significativas (Tukey, $p < 0,05$) en la longitud de la raíz entre los tratamientos para el carácter fenotípico de longitud de la raíz (cm), destacando que la aplicación combinada T4 alcanzando una media de $31,81 \pm 0,48$ cm, superando significativamente al tratamiento T1 con $26,27 \pm 0,63$ cm. (Figuras 3 y 4, Tabla 10). No



Figura 4. Longitud de la raíz en los cinco genotipos evaluados de maíz morado

se observó diferencias significativas entre las cinco variedades, observando la mayor diferencia entre las medias de Sintético MM ($29,8 \pm 0,77$ cm) y PMV 581 ($28,0 \pm 0,8$ cm), lo que evidencia la uniformidad de la respuesta (**Figura 5, Tabla 11**).

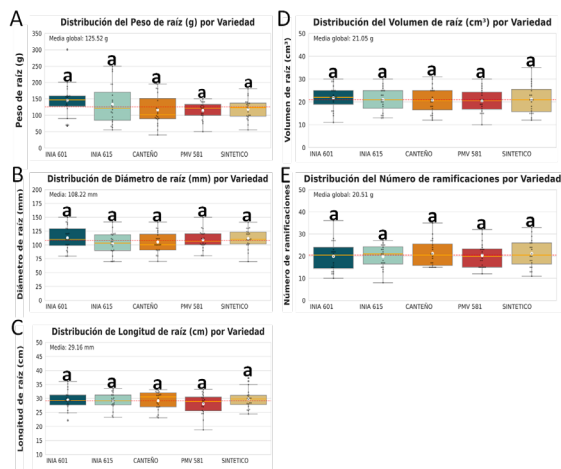


Figura 5. Respuesta fenotípica de los caracteres radicales para los cinco genotipos evaluados. (A) Peso de raíz (g), (B) Longitud de raíz (cm), (C) Volumen de raíz (cm^3), (D) Diámetro de raíz (mm) y (E) Número de ramificaciones. En los diagramas de caja, la línea central representa la mediana, los límites de la caja indican el primer y tercer cuartil (25-75%), los bigotes muestran el rango intercuartílico ($1,5 \times \text{IQR}$), y los puntos individuales representan valores atípicos. Las letras diferentes muestran diferencias significativas entre las medias (Tukey test $p < 0,05$)

Coherentemente con estos hallazgos, el volumen de la raíz respondió con igual contundencia para el factor de bioinoculación en el análisis de ANOVA ($p < 0,0001$), no observando diferencias significativas en la interacción y el factor variedad (**Tabla 12**).

La coinoculación T4 ($28,0 \pm 0,5 \text{ cm}^3$) duplicó el volumen en relación con T1 ($14,1 \pm 0,3 \text{ cm}^3$), además las bioinoculaciones T2 y T3 obtuvieron valores muy similares entre $21,12 \pm 0,4 \text{ cm}^3$ y $20,92 \pm 0,61 \text{ cm}^3$, respectivamente (**Figura 3; Tabla 13**). Las diferencias entre variedades fueron menores de $1,3 \text{ cm}^3$ y carecieron de significancia estadística (**Figura 5, Tabla 14**). Esto refuerza la noción de que la inoculación, más que el genotipo, determinó la expansión volumétrica del sistema radical.

De manera análoga, el diámetro de la raíz tuvo una respuesta significativa en la bioinoculación en el análisis de ANOVA ($p < 0,0001$), no se observa diferencias significativas entre la interacción y el factor variedad respectivamente (**Tabla 15**). El diámetro medio mostró un patrón análogo. T4 registró $128,36 \pm 2,3$ mm, un 41,5 % superior a T1 con $90,65 \pm 2,98$ mm (**Figura 3, Tablas 16**). A pesar de no encontrar diferencias significativas entre los genotipos, si se observa una ligera diferencia entre el diámetro de las variedades INIA 601 e INIA 615 con $112,7 \pm 4,6$ mm y $102,2 \pm 4,5$ mm, respectivamente (**Figura 5, Tabla 17**).

Finalmente, el número de ramificaciones de la raíz sólo tuvo una respuesta significativa en la bioinoculación (**Tabla 18**). Las plantas sometidas a T4 desarrollaron $27,3 \pm 0,8$ ramas, frente a $15,0 \pm 0,7$ en el control, mostrando un incremento de casi el doble de número de ramificaciones (**Figura 3,**

Tabla 19). Las medias de las variedades fluctuaron entre 19,8 y 21,3 ramas (**Figura 5, Tabla 20**) sin diferencias significativas, y la ausencia de interacción confirma que la estimulación de la ramificación fue independiente del genotipo.

IV. DISCUSIÓN

Estos resultados cuantitativos confirman que la asociación *Azospirillum brasilense* y *Glomus iranicum* generan una respuesta altamente significativa en plantas (Li et al., 2020; Moreira et al., 2016, Meyer et al., 2024; Raklami 2019; Ma, 2009; Xie et al., 2020), ampliando las evidencias previas de mejoras del 35–90 % en biomasa reportadas para maíz, caña de azúcar y otros cereales (Raklami et al., 2019; Meyer et al., 2024).

Nuestros resultados son explicados por múltiples variables destacando el incremento de la fijación biológica de nitrógeno y solubilización de fósforo (Aliasghar zad et al., 2006; Xie et al., 2020), que están correlacionados positivamente con la longitud de la raíz, favoreciendo la absorción de recursos en los sistemas radiculares (Cantarel et al., 2015; Comas et al., 2002), indicando el efecto positivo y sinérgico al utilizar la coinoculación de microorganismos en una planta hospedera (Bourles et al., 2020; Shockley, McGraw & Garrett, 2004; Xie et al., 2020).

Además, la asociación microbiana induce la síntesis de fitohormonas (auxinas, citoquininas) que estimulan divisiones celulares en la rizodermis y el incremento de la actividad enzimática (Patten & Glick, 2002, Abdel-Rahman & El-Naggar, 2014; Espindula et al., 2023, Souza et al., 2020; Ghosh et al., 2020), Esta reconfiguración conduce a raíces más gruesas, largas y densamente ramificadas, rasgos directamente vinculados a un aumento de la capacidad conductiva y a una mejor adaptación a suelos de baja fertilidad (Aloni et al., 2006; Chamam et al., 2013; Combes-Meynet et al., 2011).

Finalmente, Pérez-Montaña et al., (2014) y Tiepo et al., (2024) demostraron que la combinación de *Azospirillum brasilense* y *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* promovió un incremento en el peso seco de raíces en comparación con los tratamientos individuales.

En conjunto, nuestros resultados respaldan la coinoculación PGPR–AMF como una estrategia agronómica robusta para optimizar la nutrición, la arquitectura radical y, en último término, la productividad del maíz morado en entornos altoandinos.

V. CONCLUSIÓN

La evidencia reunida sugiere que la coinoculación de *Azospirillum brasilense* con *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* reconfiguró de manera profunda la arquitectura radical del maíz morado, casi triplicando la biomasa subterránea y duplicando el volumen de la raíz sin que el trasfondo genético limitara la respuesta. Estos resultados confirman que la complementariedad funcional entre fijación biológica de N, solubilización de P y señalización hormonal se traduce en un sistema radicular más denso, extenso y conductivo, atributos clave para sostener la captación de recursos en suelos. Desde la perspectiva agronómica, el incremento en la eficiencia de minerales alcanzada con la coinoculación puede generar reducciones tangibles en el uso de fertilizantes sintéticos y un aumento de la tolerancia hídrica, dos factores decisivos para la sostenibilidad de la agricultura altoandina. Queda, no obstante, contrastar estos beneficios en ciclos productivos completos y bajo presiones bióticas diversas, así como dilucidar la cinética de colonización microbiana en campo. En conjunto, los hallazgos obtenidos de la aplicación de bioinoculantes microbianos representa una estrategia agronómica viable para mejorar el establecimiento y desarrollo del sistema radical del maíz morado, constituyen un paso hacia una agricultura más sostenible al reducir la dependencia de fertilizantes químicos y optimizar la absorción de nutrientes.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que la investigación se llevó a cabo en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un posible conflicto de intereses.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abanto, W., Medina, A., & Injante, P, (2014), Maíz morado INIA 601: Variedad de maíz morado para la sierra norte del

- Perú, Instituto Nacional de Innovación Agraria (Plegable 3-2014), Cajamarca, Perú, <https://repositorio.inia.gob.pe/handle/20,500,12955/65>
- Abdel-Rahman, S. S. A., & El-Naggar, A. I. (2014). Promotion of rooting and growth of some types of bougainvilleas cutting by plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in combination with Indole-3-Butyric acid (IBA) *International Journal of Science and Research*. 3:97–108
- Aliasgharzar, N., Neyshabouri, M. R., & Salimi, G. (2006). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and *Bradyrhizobium japonicum* on drought stress of soybean. *Biología*. 61: S324–S328. <https://doi.org/10.2478/s11756-006-0182-x>
- Aloni E, Langhans M, Ullrich CI (2006). Role of cytokinin and auxin in shaping root architecture: regulating vascular differentiation, lateral root initiation, root apical dominance and root gravitropism. *Annals of Botany*. 97:883–893. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl027>
- Bazán, R, Manual de Procedimientos de Los Análisis de Suelos y Agua Con Fines de Riego; Repositorio INIA: Lima, Peru, 2017; Volume 1
- Bourles A, Guentas L, Charvis C, Gensous S, Majorel C, Crossay T, Cavaloc Y, Burtet-Sarramegna V, Jourand P, Amir H (2020). Co-inoculation with a bacterium and arbuscular mycorrhizal fungi improves root colonization, plant mineral nutrition, and plant growth of a Cyperaceae plant in an ultramafic soil. *Mycorrhiza*,30(1), 121-131. <https://doi.org/10.1007/s00572-019-00929-8>
- Cai, T., Ge-Zhang, S., & Song, M. (2023). Anthocyanins in metabolites of purple corn. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1154535. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1154535>
- Calvo, P., Nelson, L., & Kloepper, J. W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and soil*, 383, 3-41. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>
- Calzavara, A. K., Paiva, P. H. G., Gabriel, L. C., Oliveira, A. L. M., Milani, K., Oliveira, H. C., Bianchini, E., Pimenta, J. A., De Oliveira, M. C. N., Dias-Pereira, J., & Stolf-Moreira, R. (2018). Associative bacteria influence maize (*Zea mays* L.) growth, physiology and root anatomy under different nitrogen levels. *Plant Biology*, 20(5), 870-878. <https://doi.org/10.1111/plb.12841>
- Cantarel A.A.M, Pommier T, Desclos-Theveniau M, Diquelou S, Dumont M, Grassein F, Kastl E, Grigulis K, Laine P, Lavorel S. (2015). Using plant traits to explain plant-microbe relationships involved in nitrogen acquisition. *Ecology*. 2015;96(3):788–799. <https://doi.org/10.1890/13-2107.1>
- Castellano-Hinojosa, A., Pérez-Tapia, V., Bedmar, E. J., & Santillana, N. (2018). Purple corn-associated rhizobacteria with potential for plant growth promotion. *Journal of Applied Microbiology*, 124(5), 1254-1264. <https://doi.org/10.1111/jam.13708>
- Chamam, A., Sanguin, H., Bellvert, F., Meiffren, G., Comte, G., Wisniewski-Dyé, F., & Prigent-Combaret, C. (2013). Plant secondary metabolite profiling evidences strain-dependent effect in the *Azospirillum-Oryza sativa* association. *Phytochemistry*. 2013;87(12):65–77. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2012.11.009>
- Comas, Bouma & Eissenstat (2002). Comas LH, Bouma TJ, Eissenstat DM. Linking root traits to potential growth rate in six temperate tree species. *Oecologia*. 2002;132(1):34–43. <https://doi.org/10.1007/s00442-002-0922-8>
- Combes-Meynet, E., Pothier, J. F., Moenne-Loccoz, Y., & Prigent-Combaret, C. (2011). The *Pseudomonas* secondary metabolite 2,4-diacetylphloroglucinol is a signal inducing rhizoplane expression of *Azospirillum* genes involved in plant-growth promotion. *Molecular Plant-Microbe Interaction*. 2011;24(2):271–284. [doi: 10.1094/MPMI-07-10-0148](https://doi.org/10.1094/MPMI-07-10-0148)
- Espindula, E., Sperb, E. R., Moz, B., Pankiewicz, V. C. S., Tuleski, T. R., Tadra-Sfeir, M. Z., & Passaglia, L. M. P. (2023). Effects on gene expression during maize–*Azospirillum* interaction in the presence of a plant-specific inhibitor of indole-3-acetic acid production. *Genetics and Molecular Biology*, 46, e20230100. <https://doi.org/10.1590/1678-4685-gnmb-2023-0100>
- Ghosh, S. K., Bera, T., & Chakrabarty, A. M. (2020). Microbial siderophore: A boon to agricultural sciences. *Biological Control*,

- 144, 104214. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2020.104214>
- Glick, B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica*, 2012(1), 963401.
- He, T., Lin, W., Yang, S., Du, J., Giri, B., Feng, C., Gilliam, F. S., Zhang, F., Zhang, X., & Zhang, X. (2024). Arbuscular mycorrhizal fungi reduce soil N₂O emissions by altering root traits and soil denitrifier community composition. *Science of the Total Environment*, 933, 173065. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173065>
- Instituto Nacional de Innovación Agraria -INIA Canaán. (2007). Maíz INIA 615 - Negro Canaán: Nueva variedad de maíz morado para la sierra peruana. Instituto Nacional de Innovación Agraria. (Plegable; 17). <https://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/648>
- ISO 11261:1995(1995); Soil Quality—Determination of Total Nitrogen—Modified Kjeldahl Method, International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland.
- ISO 11265:1994 (1994); Soil Quality—Determination of the Specific Electrical Conductivity, International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland.
- Li, Y., Zeng, J., Wang, S., Lin, Q., Ruan, D., Chi, H., & Yang, Y. (2020). Effects of cadmium-resistant plant growth-promoting rhizobacteria and *Funneliformis mosseae* on the cadmium tolerance of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). *International Journal of Phytoremediation*, 22(5), 451-458. <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1671796>
- Long, N., Suzuki, S., Sato, S., Naiki-Ito, A., Sakatani, K., Shirai, T., & Takahashi, S. (2013). Purple corn color inhibition of prostate carcinogenesis by targeting cell growth pathways. *Cancer Science*, 104(3), 298-303. <https://doi.org/10.1111/cas.12078>
- Luna, Y. del C. P. (2012). Impacto de la biofertilización y aplicación de abonos orgánicos en la productividad de maíz (*Zea mays* L.) en Chiapas. <http://ecosur.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1017/1704>
- Ma, Y., Rajkumar, M., & Freitas, H. (2009). Inoculation of plant growth-promoting bacterium *Achromobacter xylosoxidans* strain Ax10 for the improvement of copper phytoextraction by *Brassica juncea*. *Journal of Environmental Management*, 90(2), 831-837. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.01.014>
- Medina, A., Yoshino, M., Morita, T., & Maruyama, H. (2016). Guía de producción comercial de maíz morado, En Incremento de los Ingresos Económicos de los Pequeños Productores en la Región Cajamarca—IEPARC (pp, 1-66)
- Medina-Hoyos, A., Narro-León, L. A., & Chávez-Cabrera, A. (2020). Cultivo de maíz morado (*Zea mays* L.) en zona altoandina de Perú: Adaptación e identificación de cultivares de alto rendimiento y contenido de antocianina. *Scientia Agropecuaria*, 11(3), 291-299. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.03.01>
- Meyer E, Stoffel S, de Almeida A, do Amaral Scarsanella J, Vieira A, Ventura B, Canei A, Bortolini J, de Faria S, Soares C, Lovato P (2024). *Rhizophagus intraradices* and *Azospirillum brasilense* improve growth of herbaceous plants and soil biological activity in revegetation of a recovering coal-mining area. *Brazilian Journal of Microbiology*, 55(3), 2827-2837. <https://doi.org/10.1007/s42770-024-01390-2>
- Midagri. (2021). *El maíz morado peruano*. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego del Perú. <http://repositorio.Midagri.gob.pe/handle/20.500.13036/1152>
- Midagri. (2022). *Análisis de mercado: Maíz morado 2015-2021*. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego del Perú. <https://www.gob.pe/institucion/agromercado/informes-publicaciones/2624383>
- Minagri. (2017). *Anuario estadístico de la producción agrícola y ganadera 2016*. Ministerio de Agricultura y Riego del Perú. Anuario Estadístico de la producción Agrícola y Ganadera, 2016. Ministerio de Agricultura y Riego del Perú. <http://sica.minagri.gob.pe/sica>
- Moreira, H., Pereira, S. I., Marques, A. P., Rangel, A. O., & Castro, P. M. (2016). Mine land valorization through energy maize production enhanced by the application of plant growth-promoting rhizobacteria and arbuscular mycorrhizal fungi. *Environmental*

- Science and Pollution Research*, 23, 6940-6950. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5914-4>
- Moreno Reséndez, A., García Mendoza, V., Reyes Carrillo, J. L., Vásquez Arroyo, J., & Cano Ríos, P. (2018). Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal: Una alternativa de biofertilización para la agricultura sustentable. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 20(1), 68-83. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v20n1.73707>
- Navarro-León, L. A., Chávez, A., Calvo, T. W. J., León, T. P. N., Hoyos, A. E. M., Ruiz, I. C. & Valencia, F. E. (2022). Tecnologías disponibles para incrementar la producción de maíz en Perú. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 14, 2507.
- NOM-021-RECNAT-2000 (2002); Norma Oficial Mexicana Que Establece Las Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos, Estudios, Muestreo y Análisis: México.
- Palomino-Malpartida, J. R., Esquivel-Quispe, R., Huamancusi-Morales, J. L., Alarcón-Romani, S. M., & Blásquez-Morote, C. G. (2023). *Azospirillum brasilense* and indole-3-butyric acid in rooting of avocado stems (*Persea americana* Mill.). *Bioagro*, 35, 69-74.
- Patten C.L., & Glick B.R. (2002). Role of *Pseudomonas putida* indoleacetic acid in development of the host plant root system. *Applied and Environmental Microbiology*. 2002; 68:3795–3801. doi: 10.1128/AEM.68.8.3795-3801.2002.
- Pérez-Montaño, F., Alías-Villegas, C., Bellogín, R. A., Del Cerro, P., Espuny, M. R., Jiménez-Guerrero, I., López-Baena, F. J., Ollero, F. J., & Cubo, T. (2014). Plant growth promotion in cereal and leguminous agricultural important plants: From microorganism capacities to crop production. *Microbiological Research*, 169(5-6), 325-336. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.09.011>
- Petroni, K., Pilu, R., & Tonelli, C. (2014). Anthocyanins in corn: a wealth of genes for human health. *Planta*, 240, 901-911. <https://doi.org/10.1007/s00425-014-2131-1>
- Raklami, A., Bechtaoui, N., Tahiri, A. I., Anli, M., Meddich, A., & Oufdou, K. (2019). Use of rhizobacteria and mycorrhizae consortium in the open field as a strategy for improving crop nutrition, productivity and soil fertility. *Frontiers in microbiology*, 10, 1106. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01106>
- Ribeiro, V. P., Gomes, E. A., De Sousa, S. M., Lana, U. G. D. P., Coelho, A. M., Marriel, I. E., & Paiva, C. A. (2021). Co-inoculation With Tropical Strains of *Azospirillum* and *Bacillus* Is More Efficient Than Single Inoculation for Improving Plant Growth and Nutrient Uptake in Maize. In Review. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-675990/v1>
- Ribeiro, V. P., Marriel, I. E., Sousa, S. M. D., Lana, U. G. D. P., Mattos, B. B., Oliveira, C. A. D., & Gomes, E. A. (2018). Endophytic *Bacillus* strains enhance pearl millet growth and nutrient uptake under low-P. *Brazilian Journal of Microbiology*, 49, 40-46. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2018.06.005>
- Ritchie, H., Roser, M., Rosado, P. (2023). Crop yields (OurWorldInData.org). Available at: <https://ourworldindata.org/crop-yields>
- Sánchez, E. R., & Vargas, D. J. C. (2023). Extracción y cuantificación de Antocianinas de maíz morado (*Zea mays* L.) utilizando dos solventes a diferentes temperaturas y tiempos de extracción. *Revista Latinoamericana de Difusión Científica*, 5(8), 47-80. <https://doi.org/10.38186/difcie.58.0>
- Shockley FW, McGraw RL, Garrett HE (2004). Growth and nutrient concentration of two native forage legumes inoculated with *Rhizobium* and *Mycorrhiza* in Missouri, USA. *Agroforestry Systems*. 60:137–142. <https://doi:10.1023/B:AGFO.0000013269.19284.53>.
- Smith S, & Smith F (2012) Fresh perspectives on the roles of arbuscular mycorrhizal fungi in plant nutrition and growth. *Mycologia* <https://doi.org/10.3852/11-229>
- Smith, S. E., & Read, D. J. (2010). *Mycorrhizal symbiosis*. Academic press.
- Souza M, Vargas MMM, Ventura BS, Müller Júnior V, Soares CRFS, Kurtz C, Comin JJ, Lovato PE (2020) Microbial activity in soil with onion grown in a no-tillage system with single or intercropped cover crops. *Ciência Rural* 50: e20190849. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190849>.
- Suriano, S., Balconi, C., Valoti, P., & Redaelli, R.

- (2021). Comparison of total polyphenols, profile anthocyanins, color analysis, carotenoids and tocopherols in pigmented maize. *LWT*, 144, 111257. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111257>
- Tiepo, A. N., Fávoro, M. H., Amador, T. S., Tavares, L. F., Hertel, M. F., Calzavara, A. K., De Oliveira, A. L. M., Oliveira, H. C., Dias-Pereira, J., De Araújo, H. H., Bianchini, E., Pimenta, J. A., & Stolf-Moreira, R. (2024). Associative Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungus Increase Drought Tolerance in Maize (*Zea mays* L.) through Morphoanatomical, Physiological, and Biochemical Changes. *Plants*, 13(12), 1667. <https://doi.org/10.3390/plants13121667>
- USEPA METHOD 9045D (2004). Soil and Waste pH 2004, US, Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA
- Xie, M. M., Zou, Y. N., Wu, Q. S., Zhang, Z. Z., & Kuča, K. (2020). Single or dual inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobia regulates plant growth and nitrogen acquisition in white clover. *Plant, Soil and Environment*, 66(6), 287–294. <https://doi.org/10.17221/234/2020-PSE>
- Yaadesh, S., Tomar, G. S., Kaushik, R., Prasanna, R., & Grover, M. (2023). Azospirillum–Bacillus associations: Synergistic effects on in vitro PGP traits and growth of pearl millet at early seedling stage under limited moisture conditions. *3 Biotech*, 13(3), 90. <https://doi.org/10.1007/s13205-023-03503-4>