



Abanico Microbiano. Enero-Diciembre 2025; 1:24-38. <https://doi.org/10.21929/abanicomicrobiano/2025.2>

Artículo Original. Recibido: 04/06/2025. Aceptado: 30/07/2025. Publicado: 20/08/2025. Clave: e2025-2.

<https://www.youtube.com/watch?v=chHhtPYuk28>

Consorcio bacteriano mejora la nodulación y el rendimiento de leguminosas cultivadas en suelos degradados

Bacterial consortium enhances nodulation and yield of legumes grown
in degraded soils



Ortega-García Marisel*^{1ID}, Ríos-Rocafull Yoania^{1ID}, Gil-Vidal José^{2ID}, Zelaya-
Molina Lily^{3ID}, Chávez-Díaz Ismael^{3ID}

¹Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical “Alejandro de Humboldt”, Departamento de Recursos Microbianos y Productos Bioactivos. La Habana, Cuba. ²Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical “Alejandro de Humboldt”, Departamento de Recursos Fitogenéticos y Semillas. La Habana, Cuba. ³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Recursos Genéticos. Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. E-mail: mariselortega9@gmail.com, dpagrobiotec@inifat.co.cu, genetica11@inifat.co.cu, lilyzelayam@yahoo.com.mx, chavez.fernando@inifap.gob.mx. *Autor de correspondencia: Ortega-García Marisel. micro-suelos@inifat.co.cu

RESUMEN

Los consorcios microbianos son una alternativa sostenible para mejorar el rendimiento de cultivos en suelos degradados, pero aún existe poca evidencia de su eficacia en leguminosas bajo condiciones tropicales. Este estudio evaluó el efecto de un consorcio bacteriano multiespecífico sobre tres especies de leguminosas cultivadas en un suelo Ferralítico Rojo Lixiviado con degradación física y química moderada. Entre 2022 y 2024, en el Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical “Alejandro de Humboldt”, La Habana, Cuba, se seleccionaron tres cepas compatibles de bacterias promotoras del crecimiento vegetal (*Rhizobium pusense*, *Bacillus thuringiensis* y *Bacillus velezensis*), que se aplicaron como consorcio a dos cultivares de garbanzo (*Cicer arietinum*), frijol común (*Phaseolus vulgaris*) y frijol caupí (*Vigna unguiculata*). Se utilizó un diseño de bloques al azar y un análisis de varianza seguido de la prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$) para comparar cuatro tratamientos: consorcio, consorcio +50% de fertilización mineral, fertilización 100% NPK y testigo absoluto. El consorcio incrementó significativamente el número y la biomasa de nódulos, así como el número y la masa de vainas en los tres cultivos, superando al testigo y al tratamiento fertilizado al 100%, con diferencias significativas entre cultivares. Nacional-29 (garbanzo), Güira-89 (frijol) e INIFAT-94 (caupí) fueron los que mostraron la mejor respuesta. Estos resultados confirman el potencial del consorcio bacteriano de *R. pusense* R3, *B. thuringiensis* B3 y *B. velezensis* B8, como un biofertilizante eficaz para incrementar la productividad de leguminosas en suelos degradados y reducir el uso de fertilizantes químicos en agroecosistemas tropicales.

Palabras clave: biofertilizantes, degradación del suelo, fijación biológica de nitrógeno, leguminosas.

ABSTRACT

Microbial consortia are a sustainable alternative to improve crop performance in degraded soils; however, evidence of their effectiveness in legumes under tropical conditions remains scarce. This study evaluated the effect of a multispecific bacterial consortium on three legume species grown in a Ferrallitic Red Lixivated soil with moderate physical and chemical degradation. Between 2022 and 2024, at the Institute of Fundamental Research in Tropical Agriculture “Alejandro de Humboldt,” Havana, Cuba, three compatible



plant growth-promoting bacterial strains (*Rhizobium pusense*, *Bacillus thuringiensis* and *Bacillus velezensis*) were selected and applied as a consortium to two cultivars each of chickpea (*Cicer arietinum*), common bean (*Phaseolus vulgaris*) and cowpea (*Vigna unguiculata*). A randomized complete block design and analysis of variance followed by Duncan's test ($\alpha = 0.05$) were used to compare four treatments: consortium, consortium + 50% mineral fertilization, 100% NPK fertilization and an untreated control. The consortium significantly increased nodule number and biomass, as well as pod number and weight in all three crops, outperforming both the control and the 100% fertilized treatment, with significant differences among cultivars. Nacional-29 (chickpea), Güira-89 (common bean) and INIFAT-94 (cowpea) showed the greatest response to inoculation. These findings confirm the potential of the bacterial consortium of *R. pusense* R3, *B. thuringiensis* B3 and *B. velezensis* B8, as an effective biofertilizer to enhance legume productivity in degraded soils and reduce the use of chemical fertilizers in tropical agroecosystems.

Keywords: biofertilizers, soil degradation, biological nitrogen fixation, legumes.

INTRODUCCIÓN

Las actividades naturales y antrópicas han generado efectos adversos sobre los suelos, provocando un incremento en su degradación. Esta situación ha conducido a una pérdida progresiva de biodiversidad agrícola, así como a desequilibrios en la disponibilidad de nutrientes esenciales para el desarrollo vegetal (Zhu *et al.*, 2020; Asad *et al.*, 2022). En este contexto, resulta fundamental considerar el papel que desempeñan las interacciones beneficiosas entre plantas y microorganismos, ya que estas contribuyen directamente a la salud y fertilidad del suelo. Dichas interacciones no solo influyen en el crecimiento y desarrollo de los cultivos, sino que también estructuran la biodiversidad microbiana en los agroecosistemas (Vishwakarma *et al.*, 2020).

Entre los microorganismos asociados a plantas, los rizobios representan un grupo clave debido a su capacidad para formar nódulos en las raíces de leguminosas y fijar nitrógeno atmosférico en condiciones de simbiosis (Lindström & Mousavi, 2020). No obstante, el nitrógeno no es el único nutriente limitante en los suelos degradados; el fósforo también desempeña un papel crucial y su baja disponibilidad puede restringir significativamente el desarrollo vegetal (Timofeeva *et al.*, 2022). A este respecto, diversos microorganismos del suelo contribuyen a su solubilización, facilitando su absorción por las plantas (Zhang *et al.*, 2022).

Las especies leguminosas son fundamentales en los sistemas agrícolas por su alto contenido proteico, su aporte de aminoácidos esenciales y su capacidad para enriquecer el suelo con nitrógeno (Echevarría *et al.*, 2021). En estos cultivos, el fósforo resulta indispensable para procesos fisiológicos clave como la nodulación, la síntesis de aminoácidos y la producción de proteínas (Etesami *et al.*, 2021). Por tanto, garantizar la disponibilidad de fósforo es esencial para lograr asociaciones simbióticas eficientes. En este sentido, se ha reportado que la coinoculación de rizobios con otras bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPB) puede favorecer una nodulación más temprana e intensa, así como mejorar la absorción de agua y nutrientes, lo que se



traduce en un mayor desarrollo de la planta (Rosabal *et al.*, 2021). Estas bacterias pueden colonizar los nódulos y establecer interacciones sinérgicas con los rizobios, potenciando el crecimiento vegetal. Tal es el caso de diversas especies del género *Bacillus*, conocidas por su papel en la promoción del crecimiento, la solubilización de fósforo y la inducción de tolerancia a diferentes tipos de estrés (Chaudhary *et al.*, 2022). Además, la combinación funcional de varias cepas bacterianas en consorcios microbianos ha demostrado ser más efectiva que el uso individual de cepas, debido a la complementación metabólica y a la sinergia en la colonización de la rizosfera (Devi *et al.*, 2022; Flores-Duarte *et al.*, 2022a).

A pesar de los avances en el uso de microorganismos promotores del crecimiento vegetal, la información disponible sobre el efecto de consorcios microbianos multiespecíficos en el crecimiento y la nodulación de leguminosas cultivadas en suelos degradados bajo condiciones tropicales sigue siendo limitada. Además, aún no es claro si la respuesta a estos consorcios varía en función de la especie vegetal, aspecto especialmente relevante para los programas de recuperación de suelos mediante cultivos adaptados. En este contexto, el presente estudio se llevó a cabo en un suelo con degradación física y química moderada, caracterizada por compactación, bajo contenido de materia orgánica, y desequilibrio nutricional, condiciones que afectan negativamente la estructura, aireación, retención de nutrientes y funcionalidad microbiana. Se planteó la hipótesis de que la coinoculación con un consorcio bacteriano promotor del crecimiento vegetal puede mejorar significativamente el crecimiento y la nodulación de leguminosas cultivadas bajo estas condiciones edáficas. Por ello, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la aplicación de un consorcio microbiano sobre el crecimiento de tres especies leguminosas: *Cicer arietinum* (garbanzo), *Phaseolus vulgaris* (frijol) y *Vigna unguiculata* (caupí), en dicho suelo degradado.

MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en una unidad experimental sobre un Ferralsol Rojo Lixiviado agrogénico (Hernández *et al.*, 2020), ubicada en el Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical “Alejandro de Humboldt” (INIFAT), Santiago de Las Vegas, Cuba, durante el periodo 2022-2024.

Muestreo, caracterización del suelo y material biológico

Se realizó un muestreo aleatorio sistematizado mediante un patrón en zigzag en cinco puntos georreferenciados, obteniéndose duplicados de la capa arable (0-20 cm) y conformando una muestra compuesta ($n = 10$). El contenido de materia orgánica se determinó por el método de oxidación húmeda de Walkley y Black (NC 51, 1999); el pH se midió potenciométricamente en suspensión suelo:KCl 1:2.5 (NC ISO 10390, 1999). El fósforo asimilable (P_2O_5 , mg kg⁻¹) se cuantificó mediante extracción con H₂SO₄ 0.1 mol



L^{-1} (1:25; NC 52, 1999) y los cationes intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , Na^{+} ; $cmolc\ kg^{-1}$) se determinaron por extracción con NH_4Ac 1 mol L^{-1} a pH 7 (NC 65, 2000). Los cationes Ca^{2+} y Mg^{2+} se determinaron por complejometría, mientras que K^{+} y Na^{+} se cuantificaron mediante fotometría de llama (Paneque-Pérez *et al.*, 2010).

El consorcio microbiano utilizado estuvo conformado por *Rhizobium pusense* R3 (CM-CNRG 562) (Ortega-García *et al.*, 2024a), *Bacillus thuringiensis* B3 (CM-CNRG 568) y *Bacillus velezensis* B8 (CM-CNRG 570) (Ortega-García *et al.*, 2024b), cepas conservadas en la Colección de Bacterias Benéficas del INIFAT y en la Colección de Microorganismos del CNRG-INIFAP (CM-CNRG, México). Las semillas correspondieron a dos cultivares por especie: garbanzo (Nacional-29 y JP-94), frijol común (Caujerí 2170 y Güira 89) y frijol caupí (INIFAT-93 e INIFAT-94).

Producción de inóculos y tratamiento de semillas

Las cepas se cultivaron por fermentación sumergida en medio Caldo Nutriente bajo condiciones controladas (200 rpm, 30 °C, 48 h) en zaranda orbital (EDMUD BUHLER). Los cultivos se cosecharon al alcanzar una densidad de 10^8 UFC mL^{-1} (escala de McFarland). La coinoculación se efectuó mediante inmersión de las semillas en una dilución 1:10 (v:v) del producto fermentado en agua desionizada durante 10 min, seguida de un oreado a temperatura ambiente durante 30 min previo a la siembra.

Diseño experimental, variables y análisis estadístico

El experimento se estableció bajo un Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) con cuatro repeticiones por tratamiento. Cada parcela (30 m^2) estuvo conformada por siete surcos (6 $\times$ 5 m) con distancias de 0.70 m entre surcos y 0.20 m entre plantas; los cinco surcos centrales se consideraron como parcela útil para minimizar el efecto borde.

Se evaluaron cuatro tratamientos: (1) testigo absoluto (sin inoculación ni fertilización), (2) testigo fertilizado con el 100% de la dosis recomendada de NPK, (3) inoculación con el consorcio bacteriano, (4) inoculación con el consorcio bacteriano combinada con el 50% de la dosis de NPK. En cada parcela se seleccionaron al azar diez plantas por cultivo para cuantificar el número y biomasa seca de nódulos, así como el número y biomasa fresca de vainas ($g\ planta^{-1}$).

Los datos obtenidos se analizaron mediante ANOVA utilizando el software STATGRAPHICS Plus v.5.0, y las medias se compararon con la prueba de rangos múltiples de Duncan ($\alpha = 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El suelo Ferralítico Rojo Lixiviado agrogénico evaluado presentó bajos niveles de materia orgánica (2.07 %), pH ligeramente alcalino (7.45), contenido medio de fósforo disponible



(22.95 mg kg⁻¹ de P₂O₅), valores elevados de K⁺ (1.34 cmolc kg⁻¹) y Na⁺ muy bajos (0.04 cmolc kg⁻¹), además de un marcado desbalance en la relación Ca²⁺/Mg²⁺ (20.33/1.30 cmolc kg⁻¹)(Tabla 1), respecto al rango óptimo de 2-6 cmolc kg⁻¹ (Hernández et al., 2020). Este conjunto de limitaciones confirma un estado de degradación física y química moderada, caracterizado por baja disponibilidad de nutrientes y condiciones poco favorables para la actividad microbiana, lo que puede restringir severamente el establecimiento de simbiosis funcionales y el crecimiento de los cultivos (Hassen et al., 2020; Rosabal et al., 2021).

La baja fertilidad intrínseca de este suelo favorece respuestas positivas a la biofertilización. En suelos con deficiencias nutricionales, los bioinoculantes suelen incrementar el crecimiento vegetal debido a su capacidad de movilizar nutrientes poco disponibles y estimular procesos fisiológicos clave (Spolaor et al., 2016). La simbiosis *Rhizobium*–leguminosa aporta nitrógeno, pero la incorporación de bacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPB) que mejoran la disponibilidad de fósforo y potasio es determinante para maximizar la fijación biológica de N y el desarrollo de la planta (Tamayo et al., 2020). Estos efectos son particularmente relevantes en suelos degradados donde la baja concentración de materia orgánica y el desbalance catiónico comprometen la absorción de nutrientes (Alemneh et al., 2020). Por ello, en este trabajo se evaluó la combinación de PGPB con niveles adecuados de fertilización mineral para contrarrestar las limitaciones del suelo en estudio.

Tabla 1. Propiedades químicas del suelo Ferralítico Rojo Lixiviado agrogénico en estudio

Materia orgánica (%)	pH	P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	K ₂ O (mg kg ⁻¹)	K (cmolc kg ⁻¹)	Na (cmolc kg ⁻¹)	Mg (cmolc kg ⁻¹)	Ca (cmolc kg ⁻¹)
2.07	7.45	22.95	28.81	1.34	0.040	1.30	20.33

Materia Orgánica: Walkey y Black; pH: Potenciometría; P₂O₅ asimilable: extracción con H₂SO₄ 0,1N (método de Oniani); cationes intercambiables por extracción con NH₄Ac 1 mol L⁻¹ a pH 7 y determinación por fotometría de llama (Na+y K+) y por complejometría (Ca²⁺ y Mg²⁺).

Efecto del consorcio sobre la nodulación

Se observaron diferencias significativas en el número y la biomasa de nódulos en los tres cultivos, con una respuesta claramente positiva a la aplicación del consorcio bacteriano (Figura 1). El tratamiento con el consorcio combinado con el 50 % de la dosis de fertilización mineral presentó los mayores incrementos en ambos indicadores, lo que resalta el potencial de la coinoculación en suelos degradados. Estos resultados confirman que la interacción entre los microsimbiontes y la planta hospedera se ve



potenciada cuando las cepas aplicadas son compatibles y cumplen funciones complementarias.

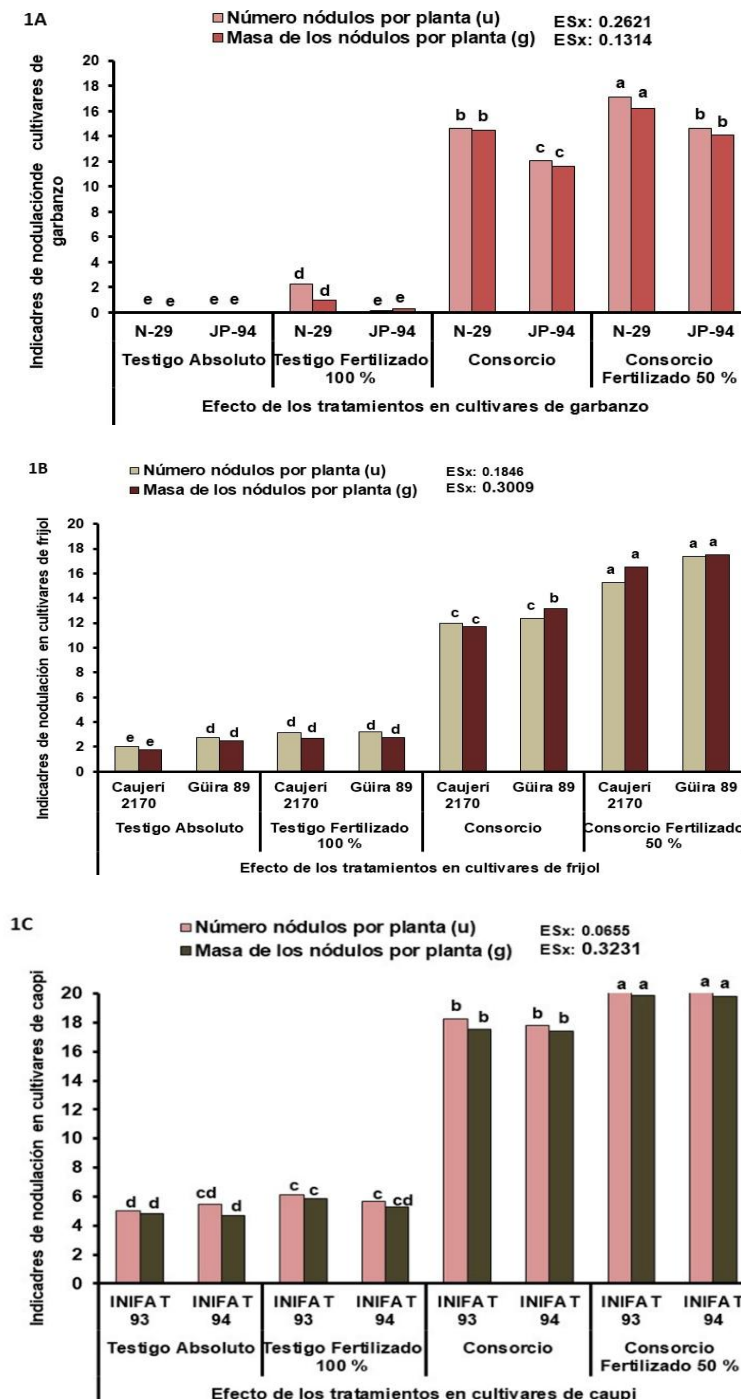


Figura 1. Efecto del consorcio sobre el número y la masa de los nódulos en garbanzo (A), frijol común (B) y caupi (C) en un suelo degradado (2022-2024). Letras iguales no difieren significativamente (Duncan, $\alpha = 0.05$, $n = 10$).



En garbanzo, el cultivar Nacional-29 se destacó sobre JP-94 en cuanto a número y masa de nódulos, probablemente debido a diferencias genéticas y en el perfil de exudados radicales que favorecen la atracción de *Rhizobium pusense*, cepa originalmente aislada de este cultivar (Ortega-García *et al.*, 2024a). La composición de exudados radicales juega un papel determinante en la colonización por rizobios y PGPB, ya que contienen compuestos señalizadores como flavonoides, aminoácidos y azúcares que modulan la quimiotaxis bacteriana (Wang *et al.*, 2018). Este fenómeno explicaría la superioridad de Nacional-29 frente a JP-94. Los tratamientos testigos (absoluto y 100 % NPK) mostraron una nodulación deficiente, evidenciando la dependencia de este cultivo a la inoculación (Bai *et al.*, 2022).

En frijol, el cultivar Güira-89 presentó los mejores valores de nodulación cuando se aplicó el consorcio más 50 % de fertilización, seguido por Caujerí 2170. En caupí, ambos cultivares (INIFAT-93 e INIFAT-94) respondieron favorablemente a la inoculación, aunque sin diferencias significativas entre ellos, lo que podría estar asociado a su conocida facilidad para establecer simbiosis con rizobios. Cabe destacar que estos son los primeros trabajos en Cuba que evalúan la asociación de *R. pusense* con frijol y caupí en consorcio con otras bacterias.

La superioridad de los tratamientos con consorcio puede atribuirse a la complementariedad funcional de las cepas empleadas, las cuales fueron escogidas considerando su capacidad de interactuar eficazmente con leguminosas (Bianco, 2020; Chaudhary *et al.*, 2022). *R. pusense* R3 se comporta como fijador de nitrógeno y ha demostrado estimular el crecimiento de garbanzo (Ortega-García *et al.*, 2024a), como se ha reportado con otras cepas de *R. pusense* en otros cultivos como maíz (Amezquita-Avilés *et al.*, 2022), garbanzo (Gopalakrishnan *et al.*, 2018), maní bajo estrés hídrico (Ramakrishnan *et al.*, 2024) y soya en presencia de metales pesados (Saran *et al.*, 2020). *B. thuringiensis* B3 se caracteriza por su capacidad de solubilizar fosfatos, ejercer biocontrol de fitopatógenos y favorecer el desarrollo de lechuga y tomate (Ortega-García *et al.*, 2024b), *B. thuringiensis* es bien conocido por su uso en biocontrol y como PGPR, ya que promueve el desarrollo radicular, mejora la absorción de nutrientes y favorece el crecimiento y la tolerancia al estrés de las plantas (Azizoglu, 2019). Mientras que *B. velezensis* B8 presenta efectos similares y ha mostrado impacto positivo en maíz y trigo (Ríos-Rocafull *et al.*, 2011). Además, *B. velezensis*, previamente clasificado como *B. subtilis* y *B. amyloliquefaciens* (Bagheri *et al.*, 2019; Vahidinasab *et al.*, 2019), se destaca por producir sideróforos, enzimas hidrolíticas y antibióticos que limitan el desarrollo de fitopatógenos (Khan *et al.*, 2018; Moreno-Galván *et al.*, 2020; Redondo-Gómez *et al.*, 2022). Así, esta interacción sinérgica también puede mejorar la tolerancia a estrés biótico y abiótico, como lo sugieren Wang *et al.* (2018) y Tewari & Sharma (2020).



Efecto sobre la producción de vainas

En cuanto a la producción de vainas, se evidencia un patrón similar al observado en la nodulación, con incrementos significativos en el número y masa de vainas por planta en los tres cultivos al aplicar el consorcio, particularmente en combinación con el 50 % de fertilización mineral (Figura 2). Los cultivares Nacional-29 (garbanzo), Güira-89 (frijol) e INIFAT-94 (caupí) fueron los que mostraron mayor productividad, lo que se relaciona directamente con el rendimiento potencial. Este incremento en productividad confirma la relación entre nodulación efectiva y mayor disponibilidad de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo.

La combinación de bioinoculantes con dosis reducidas de fertilizantes ha sido reportada como una estrategia eficiente para mejorar la productividad y reducir la dependencia de insumos químicos. En garbanzo, [Ahlawat et al. \(2007\)](#) y [González-Leyva et al. \(2012\)](#) demostraron la eficacia de *Rhizobium* y *Bacillus* con fertilización parcial de NPK, mientras que [Escobar-Oña et al. \(2017\)](#) y [Apáez-Barrios et al. \(2020\)](#) destacaron el incremento de vainas y la mejor asimilación de nutrientes al utilizar biofertilizantes. En frijol, la coinoculación con *Rhizobium etli* y micorrizas (*Glomus intraradices*) más fertilización reducida mostró efectos similares ([Apáez-Barrios et al., 2014](#)). Otros autores han evidenciado que los consorcios bacterianos incrementan el número de nódulos efectivos, la acumulación de N y P en el tejido vegetal y la tolerancia a sequía y salinidad en leguminosas y gramíneas ([Flores-Duarte et al., 2022a](#); [Flores-Duarte et al., 2022b](#); [Flores-Duarte et al., 2022c](#); [Saleem et al., 2021](#); [Redondo-Gómez et al., 2022](#)).

Implicaciones agronómicas del consorcio bacteriano

La aplicación del consorcio multiespecífico permitió incrementar significativamente el número y biomasa de nódulos, así como el rendimiento (vainas planta⁻¹), en comparación con los tratamientos testigo. Estas mejoras están asociadas a una mayor colonización rizosférica y formación de nódulos efectivos para fijación biológica de nitrógeno ([Beyene et al., 2022](#)), una mejor absorción de nutrientes (N, P, K, micronutrientes) gracias a la actividad solubilizadora de *Bacillus* spp. ([Huang et al., 2020](#); [Khan et al., 2018](#)) y efectos de biocontrol y resistencia inducida, reportados en *B. velezensis* ([Bagheri et al., 2019](#); [Redondo-Gómez et al., 2022](#)).

La evidencia acumulada indica que el uso de consorcios bacterianos permite reducir hasta en un 50 % las dosis de fertilizantes sin comprometer el rendimiento ([Ahlawat et al., 2007](#); [Apáez-Barrios et al., 2020](#)), lo que representa una alternativa sostenible en sistemas de bajos insumos. Estos resultados son consistentes con estudios previos donde consorcios bacterianos mostraron ventajas frente a inoculantes mono-específicos en términos de nodulación, absorción de nutrientes y tolerancia a estrés abiótico en leguminosas y gramíneas ([Flores-Duarte et al., 2022a](#); [Flores-Duarte et al., 2022b](#); [Flores-Duarte et al., 2022c](#); [Saleem et al., 2021](#); [Tewari & Sharma, 2020](#)).

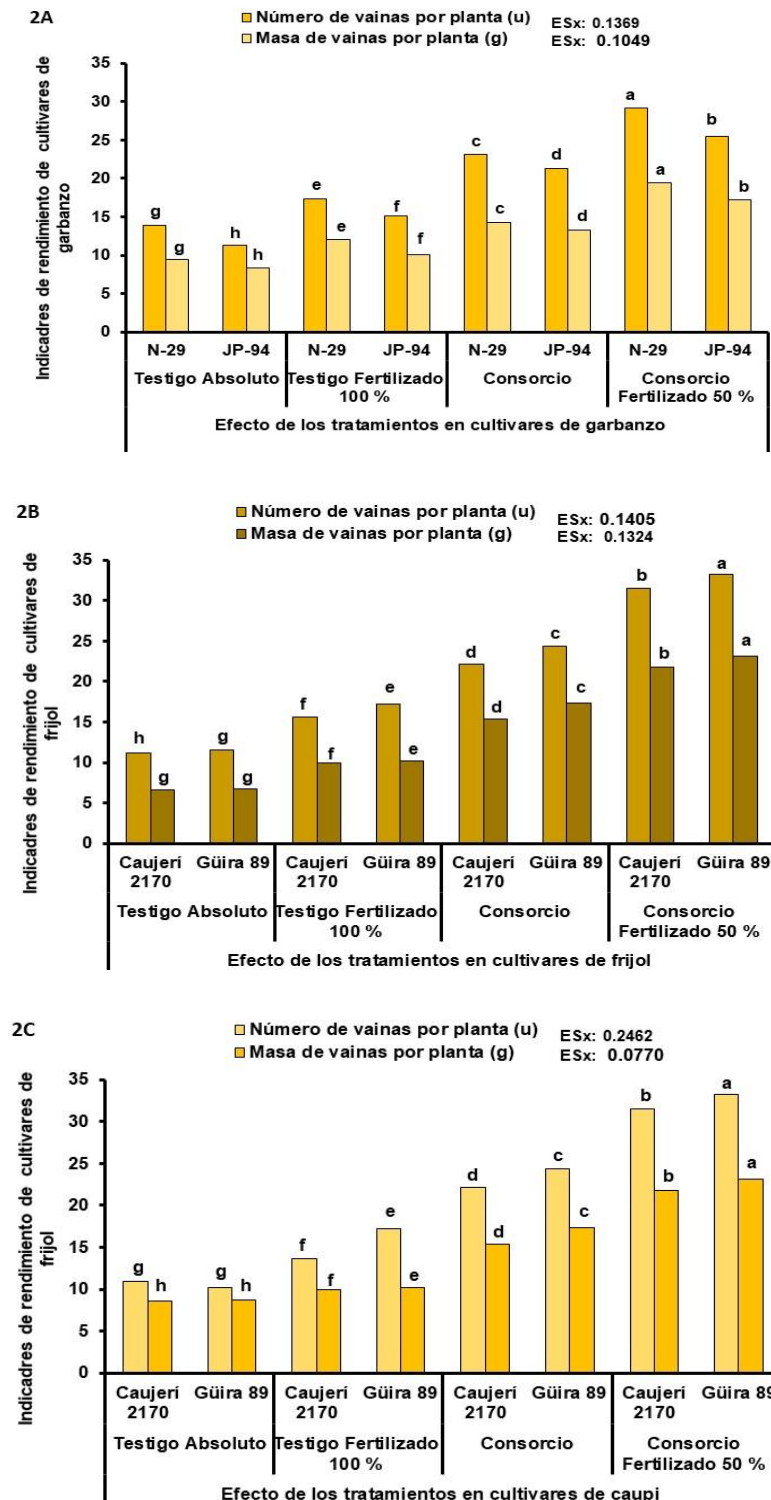


Figura 2. Efecto del consorcio sobre el número y la masa de vainas en garbanzo (A), frijol (B) y caupi (C) en un suelo degradado (2022-2024). Letras iguales no difieren significativamente (Duncan, $\alpha = 0,05$, $n = 10$).



Finalmente, las leguminosas evaluadas demostraron ser cultivos estratégicos para agroecosistemas degradados, dada su capacidad de asociarse con rizobios y mejorar la fertilidad del suelo (Hassen *et al.*, 2020). Por lo tanto, la biofertilización con consorcios bacterianos constituye una estrategia viable para incrementar la productividad y reducir el uso de fertilizantes sintéticos en suelos con limitaciones físicas y químicas como el Ferralítico Rojo Lixiviado estudiado.

CONCLUSIONES

El consorcio bacteriano conformado por *Rhizobium pusense* R3, *Bacillus thuringiensis* B3 y *Bacillus velezensis* B8 promovió de manera significativa la nodulación, el número y la masa de vainas, y el rendimiento potencial de las tres leguminosas evaluadas en un suelo Ferralítico Rojo Lixiviado con degradación física y química moderada.

Los cultivares Nacional-29 (garbanzo), Güira-89 (frijol común) e INIFAT-94 (frijol caupí) mostraron la mejor respuesta al consorcio, evidenciando la importancia de la compatibilidad entre el microsimbionte y el genotipo vegetal.

Estos resultados confirman el potencial del consorcio como un biofertilizante multiespecífico capaz de mejorar la productividad de leguminosas en suelos degradados y permitir una reducción del uso de fertilizantes químicos, contribuyendo a la sostenibilidad de los agroecosistemas.

REFERENCIAS

AHLAWAT PS, Gangaiah B, Zahid A. 2007. Nutrition management in chickpea. En: Yadav SS, Redden RJ, Chen W, Sharma B, *Chickpea breeding and management*. CAB International. 213-222.

<https://www.cabdigitalibrary.org/doi/book/10.1079/9781845932138.000>

ALEMNEH AA, Zhou Y, Ryder MH, Denton MD, Denton M, Zhou Y. 2020. Mechanisms in plant growth-promoting rhizobacteria that enhance legume-rhizobial symbioses. *J. Appl. Microbiol.* 129:1133-1156. <https://doi.org/10.1111/jam.14754>

AMEZQUITA-AVILES CF, Coronel-Acosta CB, de los Santos-Villalobos S, Santoyo G, Parra-Cota FI. 2022. Characterization of native plant growth-promoting bacteria (PGPB) and their effect on the development of maize (*Zea mays* L.). *Biotechnia* 24:15-22. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v24i1.1353>



APÁEZ-BARRIOS M, Escalante-Estrada JAS, Apáez-Barrios P, Álvarez-Hernandez JC. 2020. Producción, crecimiento y calidad nutrimental del garbanzo en función del nitrógeno y fósforo. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 11(6):1273-1284.

<http://doi.org/10.29312/remexca.v11i6.2226>

APÁEZ-BARRIOS P, Escalante P, Salvador JA, Sosa E, Rodríguez MT, Apáez-Barrios M. 2014. Fenología, producción y calidad nutrimental del grano de frijol chino en función de la biofertilización y fertilización foliar. *Interciencia*, 39(12):857-862.

<https://www.interciencia.net/volumen-39/numero-12-3/>

ASAD A, Sikandar A, Mujtaba H, Malik M, Saad M, Ali S, Mukhtaj K. 2022. Detection of deficiency of nutrients in grape leaves using deep network. *Math. Probl. Eng.* 2022: e3114525. <https://doi.org/10.1155/2022/3114525>

AZIZOGLU U. 2019. *Bacillus thuringiensis* as a biofertilizer and biostimulator: a mini-review of the little-known Plant Growth-Promoting Properties of Bt. *Curr. Microbiol.* 76:1379-1385. <https://doi.org/10.1007/s00284-019-01705-9>

BAGHERI N, Ahmadzadeh M, Salehi Jouzani G. 2019. Interaction of *Bacillus amyloliquefaciens* and *Azospirillum oryzae* on wheat growth promotion and *Fusarium graminearum* disease inhibition. *Crop Biotechnol.* 9:19-33.

<http://doi.org/10.30473/cb.2019.43198.1757>

BAI B, Liu W, Qiu X, Zhang J, Zhang J, Bai Y. 2022. The root microbiome: Community assembly and its contributions to plant fitness. *J. Integr. Plant Biol.* 64:230-243.

<http://doi.org/10.1111/jipb.13226>

BEYENE BB, Pagano MC, Vaiyapuri PR, Tuji FA. 2022. Microbial consortia inoculation of woody legume *Erythrina brucei* increases nodulation and shoot nitrogen and phosphorus under greenhouse conditions. *Biotechnol. Rep.* 33:e00707.

<https://doi.org/10.1016/j.btre.2022.e00707>

BIANCO L. 2020. Principales aspectos de la nodulación y fijación biológica de nitrógeno en Fabáceas. *IDESIA*. 38(2):21-29. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292020000200021>

CHAUDHARY P, Singh S, Chaudhary A, Sharma A, Kumar G. 2022. Overview of biofertilizers in crop production and stress management for sustainable agriculture. *Front. Plant Sci.* 13: e930340. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.930340>

DEVI R, Kaur T, Kour D, Yadav AN. 2022. Microbial consortium of mineral solubilizing and nitrogen fixing bacteria for plant growth promotion of amaranth (*Amaranthus hypochondrius* L.). *Biocatal. Agric. Biotechnol.* 43:10240.

<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102404>



ESCOBAR-OÑA WS, Tafur-Recalde V, Pazmiño-Mayorga JA, Vivas-Vivas RJ. 2017. Respuesta del cultivo de frejol caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) a la aplicación foliar complementaria de tres bioestimulantes. *Dom. Cien.* 3(3):556-571.

<https://dominodelasciencias.com/ojs/index.php/es/article/view/492>

ECHEVARRÍA A Wong FJ, Borboa J, Rodríguez F, Del Toro CL, García JL, Rueda-Puente EO. 2021. Fertilization systems in chickpea (*Cicer arietinum* L.) in soils of arid-desertic areas. *Trop. Subtrop. Agroecosyst.* 24(2):53.

<http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.3485>

ETESAMI H, Jeong BR, Glick BR. 2021. Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi, phosphate-solubilizing bacteria, and silicon to P uptake by plant. *Front. Plant Sci.* 12: e699618. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.699618>

FLORES-DUARTE NJ, Pérez-Pérez J, Navarro-Torre S, Mateos-Naranjo E, Redondo-Gómez S, Pajuelo E, Rodríguez-Llorente ID. 2022a. Improved *Medicago sativa* nodulation under stress assisted by *Variovorax* sp. endophytes. *Plants* 11: e1091.

<https://doi.org/10.3390/plants11081091>

FLORES-DUARTE NJ, Caballero-Delgado S, Pajuelo E, Mateos-Naranjo E, Redondo-Gómez S, Navarro-Torre S, Rodríguez-Llorente ID. 2022b. Enhanced legume growth and adaptation to degraded estuarine soils using *Pseudomonas* sp. nodule endophytes. *Front. Microbiol.* 13: e1005458. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1005458>

FLORES-DUARTE NJ, Mateos-Naranjo E, Redondo-Gómez S, Pajuelo E, Rodríguez-Llorente ID, Navarro-Torre S. 2022c. Role of nodulation-enhancing rhizobacteria in the promotion of *Medicago sativa* development in nutrient-poor soils. *Plants* 11: e1164.

<https://doi.org/10.3390/plants11091164>

GONZÁLEZ-LEYVA M, González-Cruz M, Nápoles-Gallardo E, Baldaquín-Pagan A. 2012. Efectividad de algunos biofertilizantes en el cultivo del garbanzo (*Cicer Arietinum* L.) en un suelo Fersialítico Pardo Rojizo Mullido. *Innov. Tecnol.* 18:1-10.

GOPALAKRISHNAN S, Srinivas V, Vemula A, Samineni Sn, Rathore A. 2018. Influence of diazotrophic bacteria on nodulation, nitrogen fixation, growth promotion and yield traits in five cultivars of chickpea. *Biocatal. Agric. Biotechnol.* 15 35-42.

<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.05.006>

HASSEN AI, Lamprecht SC, Bopape FL. 2020. Emergence of β -rhizobia as new root nodulating bacteria in legumes and current status of the legume-rhizobium host specificity dogma. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 36:40.

<https://doi.org/10.1007/s11274-020-2811-x>



HERNÁNDEZ A, Morales M, Carnero G, Hernández Y, Terán Z, Grandio D, Bojórnes JI, Vargas D, Bernal A, Terry E, Gonzalez PJ, Cabrera JA, Garcia JD. 2020. Nuevos resultados sobre el cambio de las propiedades de los suelos Ferralíticos Rojos Lixiviados de la “LLanura Roja de La Habana”. La Habana, Cuba. Ediciones INCA. Pp. 159. ISBN 978-959-7258-04-9.

HUANG H, Zhao Y, Fan L, Jin Q, Yang G, Xu Z. 2020. Improvement of manganese phytoremediation by *Broussonetia papyrifera* with two plant growth promoting (PGP) *Bacillus* species. *Chemosphere* 260: e127614.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127614>

KHAN N, Martínez-Hidalgo P, Ice TA, Maymon M, Humm EH, Nejat N, Sanders ER, Kaplan D, Hirsch AM. 2018. Antifungal activity of *Bacillus* species against *Fusarium* and analysis of the potential mechanisms used in biocontrol. *Front. Microbiol.* 9: e2363.

<https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02363>

LINDSTRÖM K, Mousavi SA. 2020. Effectiveness of nitrogen fixation in rhizobia. *Microb. Biotechnol.* 13(5):1314-1335. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13517>

MORENO-GALVÁN A, Romero-Perdomo FA, Estrada-Bonilla G, Gadelha-Meneses CHS, Bonilla RR. 2020. Dry-Caribbean *Bacillus* spp. strains ameliorate drought stress in maize by a strainspecific antioxidant response modulation. *Microorganisms* 8(6):823.

<https://doi.org/10.3390/microorganisms8060823>

NC 51. 1999. Determinación del por ciento de material orgánica. Comité Técnico de Normalización. No. 3. Calidad del suelo. Análisis químico, La Habana: Oficina Nacional de Normalización. Cuba.

NC 52. 1999. Determinación de las formas móviles de fósforo y potasio. Comité Técnico de Normalización. No. 3. Calidad del suelo. Análisis químico, La Habana: Oficina Nacional de Normalización. Cuba.

NC 65. 2000. Determinación de la capacidad de intercambio catiónico y de los cationes intercambiables del suelo. Comité de Normalización. No. 3. Calidad del suelo. Análisis químico, La Habana: Oficina Nacional de Normalización. Cuba.

NC ISO 10390. 1999. Determinación de Ph. Comité Técnico de Normalización. No. 3. Calidad del suelo. Análisis químico, La Habana: Oficina Nacional de Normalización. Cuba.

ORTEGA-GARCÍA M, Ríos-Rocafull Y, Zelaya-Molina L, Lara-Aguilera J, Arteaga-Garibay R, Nápoles-García MC. 2024a. *Rhizobium pusense* asociado al garbanzo (*Cicer arietinum* L.) en Cuba. *Agron. Mesoam.* 35: e55876.

<https://doi.org/10.15517/am.2024.55876>



ORTEGA-GARCÍA M, Ríos-Rocafull Y, Zelaya-Molina LX, Ruíz-Ramírez S, Zaldívar-Lopez HA, Chavez-Díaz IF. 2024b. Bioprospecting a mountain-derived phosphorus-solubilizing bacterium: *Bacillus thuringiensis* B3 as a plant-growth promoter in lettuce and tomato horticultural crops *Sci. Hort.* 337: e113568.

<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113568>

PANEQUE-PÉREZ VM. 2010. Manual de técnicas analíticas para análisis de suelo, foliar, abonos orgánicos y fertilizantes químicos. La Habana, Cuba. Ediciones INCA. Pp. 160. ISBN: 978-959-7023-51-7.

https://ediciones.inca.edu.cu/files/folletos/folleto_suelos.pdf

RAMAKRISHNAN P, Rangasamy A, Manikandan A, Raghu R, Ramasamy K, SenthilKumar M, Subramaniam T, Saminathan V. 2024. Rhizobial and passenger endophytes alleviate moisture stress in groundnut (*Arachis hypogaea*). *Plant Stress*. 14: e100590. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100590>

REDONDO-GÓMEZ S, Romano-Rodríguez E, Mesa-Marín J, Sola-Elías C, Mateos-Naranjo E. 2022. Consortia of plant-growth-promoting rhizobacteria isolated from halophytes improve the response of swiss chard to soil salinization. *Agronomy* 12:468.

<https://doi.org/10.3390/agronomy11081609>

RÍOS-ROCAFULL Y, Ortega-García M, Rojas-Badia M, Lugo-Hernández D, Fey-Govin L, Cañizares-Hernández K, Dibut-Álvarez B. 2011. Caracterización de cepas bacterianas con potencial para la elaboración de biofertilizantes. *Agrotec. Cuba* 24(1):9-12.

<https://agrotecnia.edicionescervantes.com/index.php/agrotecnia/article/view/457>

ROSABAL L, Macías P, Maza M, López R, Guevara F. 2021. Microorganismos del suelo y sus usos potenciales en la agricultura frente al escenario del cambio climático. *Magna Scientia Uceva* 1:104-117. <https://doi.org/10.54502/msuceva.v1n1a14>

SALEEM M, Nawaz F, Hussain MB, Ikram RM. 2021. Comparative effects of individual and consortia plant growth promoting bacteria on physiological and enzymatic mechanisms to confer drought tolerance in maize (*Zea mays* L.). *J. Soil. Sci. Plant. Nutr.* 21:3461-3476. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00620-y>

SARAN A, Imperato V, Fernandez L, Gkorezis P, d'Haen J, Merini LJ, Vangronsveld J, Thijs S. 2020. Phytostabilization of polluted military soil supported by bioaugmentation with PGP-trace element tolerant bacteria isolated from *Helianthus petiolaris*. *Agronomy* 10:204. <http://doi.org/10.3390/agronomy10020204>

SPOLAOR LT, Gonçalves SA, Santos O, Martínez-Oliveira AL, Scapim CA, Bengosi-Bertagna FA, Kuki MC. 2016. Plant growth-promoting bacteria associated with nitrogen fertilization at topdressing in popcorn agronomic performance. *Bragantia* 75(1):33-40.

<https://www.scielo.br/j/bragi/2016.v75n1/>



TAMAYO Y, Juárez P, Capdevila W, Lescaille J, Terry E. 2020. Bioproductos en el crecimiento y rendimiento de *Phaseolus vulgaris* L. var. Delicia 364. *Terra Latinoam.* 38(3):667-678. <http://dx.doi.org/10.28940/terra.v38i3.672>

TEWARI S, Sharma S. 2020. Rhizobial exopolysaccharides as supplement for enhancing nodulation and growth attributes of *Cajanus cajan* under multi-stress conditions: A study from lab to field. *Soil Tillage Res.* 198: e104545.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104545>

TIMOFEEVA A, Galyamova M, Sedykh S. 2022. Prospects for using phosphate-solubilizing microorganisms as natural fertilizers in agriculture. *Plants* 11: e2119.
<https://doi.org/10.3390/plants11162119>

VAHIDINASAB M, Ahmadzadeh M, Henkel M, Hausmann R, Heravi KM. 2019. *Bacillus velezensis* UTB96 is an antifungal soil isolate with a reduced genome size compared to that of *Bacillus velezensis* FZB42. *Microbiol. Resour. Announc.* 8: e00667-19.
<https://doi.org/10.1128/mra.00667-19>

VISHWAKARMA K, Kumar N, Shandilya C, Mohapatra S, Bhayana S, Varma A. 2020. Revisiting plant–microbe interactions and microbial consortia application for enhancing sustainable agriculture: a review. *Front. Microbiol.* 11: e560406.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.560406>

WANG Q, Liu J, Zhu H. 2018. Genetic and molecular mechanisms underlying symbiotic specificity in legume-rhizobium interactions. *Front. Plant Sci.* 9: e313.
<http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2018.00313>

ZHANG C, Cai K, Li M, Zheng J, Han Y. 2022. Plant-growth-promoting potential of PGPE isolated from *Dactylis glomerata* L. *Microorganisms* 10: e731.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms10040731>

ZHU Q, Wang B, Tan J, Liu T, Li L, Liu YG. 2020. Plant synthetic metabolic engineering for enhancing crop nutritional quality. *Plant Commun.* 1: e100017.
<https://doi.org/10.1016/j.xplc.2019.100017>