

Respuesta agronómica y fijación biológica de nitrógeno por cepas de *Rhizobium* spp. en cultivos de *Vigna unguiculata* (L.) Walp. y *Pisum sativum* L. para la sostenibilidad alimentaria

Agronomic response and biological nitrogen fixation by Rhizobium spp. strains in Vigna unguiculata (L.) Walp. and Pisum sativum L. crops for food sustainability.

Mario Humberto, Taipei Cancho¹  ; Carlos Eusebio, Cabrera Vigil¹ ; Jorge Luis, Magallanes Magallanes² ; Luís Felipe, Bendeáz Díaz² ; Pablo, Aricochea, Muñoz³ ; Guillermo Gomer, Cotrina Cabello¹ 

(1) Universidad Nacional de Cañete, Lima, Perú

(2) Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica, Ica, Perú

(3) Instituto de Educación Superior Público "Santa María Magdalena, Cajatambo, Lima

Resumen

La degradación de los suelos en el distrito de Vilcabamba-Grau-Apurímac exige alternativas biotecnológicas sostenibles para recuperar la fertilidad edáfica mediante la fijación biológica de nitrógeno. Esta investigación evaluó el potencial de *Rhizobium* spp. para potenciar el aporte nutricional de *Vigna unguiculata* (frejol caupí) y *Pisum sativum* L. (arveja) durante su fase de floración, bajo un Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) con cuatro tratamientos y tres repeticiones. A través del método Kjeldahl, se cuantificó el nitrógeno fijado mediante el análisis del peso seco de la biomasa foliar y radicular, validando la eficacia de esta simbiosis como estrategia de abono verde. Los resultados demuestran que la inoculación con *Rhizobium* spp. ejerce un efecto estadísticamente significativo en la acumulación de nitrógeno en ambas especies. El frejol caupí destacó como el cultivo con mayor capacidad de fijación, alcanzando 245,34 kg/ha, cifra superior a los 204,41 kg/ha registrados en la arveja Var. Quantum. Al comparar estos resultados con los testigos sin inóculo, que presentaron valores de 143,48 kg/ha para el caupí y 114,31 kg/ha para la arveja, se confirma que el uso de cepas específicas incrementa sustancialmente el aporte de nitrógeno al sistema agrícola. En conclusión, el frejol caupí se posiciona como la opción más eficiente para programas de mejoramiento de suelos, debido a su superioridad en la fijación de nitrógeno. Este estudio subraya la viabilidad de integrar inóculos microbianos en la gestión de leguminosas, ofreciendo un método eficaz para optimizar la productividad y la sostenibilidad de los sistemas agropecuarios locales.

Palabras clave: Fijación, Nitrógeno, Leguminosas, Cepas, Inoculación.

Abstract

Soil degradation in the Vilcabamba-Grau-Apurímac district demands sustainable biotechnological alternatives to restore soil fertility through biological nitrogen fixation. This research evaluated the potential of *Rhizobium* spp. to enhance the nutritional contribution of *Vigna unguiculata* (cowpea) and *Pisum sativum* L. (pea) during their flowering phase, using a Randomized Complete Block Design (RCBD) with four treatments and three replications. Through the Kjeldahl method, fixed nitrogen was quantified by analyzing the dry weight of foliar and root biomass, validating the efficacy of this symbiosis as a green manure strategy. The results demonstrate that inoculation with *Rhizobium* spp. exerts a statistically significant effect on nitrogen accumulation in both species. Cowpea stood out as the crop with the highest fixation capacity, reaching 245.34 kg/ha, a figure higher than the 204.41 kg/ha recorded for the Quantum variety pea. Comparing these results with the non-inoculated controls, which presented values of 143.48 kg/ha for cowpea and 114.31 kg/ha for the pea, confirms that the use of specific strains substantially increases nitrogen input into the agricultural system. In conclusion, cowpea is positioned as the most efficient option for soil improvement programs due to its superiority in nitrogen fixation. This study underscores the viability of integrating microbial inoculants in legume management, offering an effective method to optimize productivity and the sustainability of local agricultural systems.

Keywords: Fixation, Nitrogen, Legumes, Strains, Inoculation.

Recibido/Received	21-08-2025	Aprobado/Approved	29-10-2025	Publicado/Published	30-10-2025
-------------------	------------	-------------------	------------	---------------------	------------

Introducción

El nitrógeno molecular o dinitrógeno (N_2), componente mayoritario de la atmósfera, se caracteriza por ser una molécula altamente inerte debido a la robusta triple ligadura covalente que une a sus átomos, lo que impide que sea aprovechable directamente por la mayoría de los seres vivos. Dado que la inmensa mayoría de los organismos autótrofos y heterótrofos no poseen la maquinaria enzimática necesaria para escindir este enlace y utilizar el nitrógeno atmosférico en la síntesis de aminoácidos, ácidos nucleicos y otros compuestos nitrogenados esenciales, los ecosistemas terrestres dependen críticamente del nitrógeno combinado presente en los minerales y la materia orgánica del suelo. Por lo tanto, a pesar de la aparente abundancia de este elemento en la biosfera, la escasez de nitrógeno asimilable en la edafosfera constituye un factor limitante primario para el desarrollo y la productividad vegetal a escala global (Cabeza et al., 2024).

La agricultura intensiva ha mitigado esta limitación mediante la aplicación masiva de fertilizantes nitrogenados de síntesis química. Sin embargo, en el distrito de Vilcabamba, perteneciente a la provincia de Grau en la región de Apurímac, el contexto socioeconómico y agroecológico difiere radicalmente de los sistemas altamente tecnificados. En esta circunscripción andina, los agricultores basan su seguridad alimentaria y economía de subsistencia en la siembra de cultivos transitorios como maíz, papa, cebada y trigo, siendo el cultivo de maíz en régimen de monocultivo una de las prácticas más recurrentes (Hubbard et al., 2023). La productividad agrícola en este sistema tradicional es notablemente baja, una problemática multifactorial impulsada por un régimen pluviométrico marcadamente irregular, la implementación de un nivel tecnológico rudimentario y un avanzado estado de degradación y baja fertilidad en los suelos locales.

Entre los factores restrictivos mencionados, el deterioro de la fertilidad edáfica representa uno de los desafíos más complejos de resolver para el sector campesino. El uso recurrente de abonos químicos de síntesis industrial implica, en la mayoría de los escenarios, una inversión monetaria inalcanzable para pequeños productores dadas sus limitadas condiciones económicas; asimismo, la aplicación desregulada de estos insumos altera de manera desfavorable la dinámica físico-química y biológica del suelo, comprometiendo drásticamente el desempeño de la microbiota nativa y la flora bacteriana benéfica para las sucesivas campañas agrícolas (Luo et al., 2024). En adición a ello, el uso excesivo y continuado de fertilizantes nitrogenados inorgánicos genera alteraciones severas en los agroecosistemas, promoviendo la mineralización acelerada de la materia orgánica y propiciando una dependencia estructural de los terrenos hacia los insumos externos, lo cual vulnera la sostenibilidad a largo plazo.

Frente a este panorama, a pesar de que existen centenares de toneladas de nitrógeno atmosférico suspendidas por encima de cada hectárea de superficie terrestre, la optimización de su uso biológico representa una estrategia imperativa para la sostenibilidad agroalimentaria (Cabeza et al., 2024; Luo et al., 2024). En consecuencia, se torna indispensable la exploración, validación e implementación de tecnologías alternativas viables que permitan incrementar la fertilidad del suelo, mitigar la dependencia de agroquímicos y dinamizar la producción agrícola ajustándose estrictamente a las capacidades socioeconómicas de los productores locales. Dentro de las alternativas agroecológicas más eficientes destaca la incorporación de abonos verdes y la rotación o asociación con especies leguminosas, tales como el frejol caupí (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) y la arveja (*Pisum sativum* L.). Estas especies poseen la capacidad evolutiva de establecer una simbiosis mutualista con bacterias fijadoras de nitrógeno, posicionándose como recursos biológicos de incalculable valor para restaurar los niveles de materia orgánica, reestructurar el perfil edáfico y potenciar de forma integral las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

La eficacia de esta interacción simbiótica se sustenta en complejos mecanismos bioquímicos y moleculares. Investigaciones recientes han demostrado que el reconocimiento inicial entre la planta hospedadora y las cepas bacterianas simbióticas del género *Rhizobium* está mediado por un diálogo

químico preciso, en el cual los flavonoides exudados por las raíces vegetales inducen la activación específica de los genes de nodulación (nod) bacterianos a través de proteínas reguladoras (Ruan et al., 2026). Este proceso desencadena la morfogénesis de nódulos radicales especializados, estructuras donde las bacterias se diferencian en bacteroides capaces de expresar el complejo enzimático nitrogenasa, catalizando la reducción del dinitrógeno atmosférico en amonio, forma en la cual el nitrógeno puede ser asimilado por el vegetal. En el caso particular de *P. sativum* L., la compatibilidad y eficiencia simbiótica dependen estrechamente de la diversidad de cepas endosimbióticas nativas e introducidas (Mahdhi et al., 2023; Zhang et al., 2024), así como de la regulación genética de proteínas asociadas al desarrollo nodular y al transporte de nutrientes (Bovin et al., 2022; Tsyganova et al., 2023; Morère-Le Paven et al., 2024).

Asimismo, el estudio de la dinámica nutricional en arveja y otras leguminosas ha avanzado significativamente mediante el uso de metodologías analíticas avanzadas, tales como técnicas isotópicas con N₁₅, permitiendo cuantificar con alta precisión la proporción de nitrógeno derivado de la atmósfera en diversas condiciones edafo-climáticas, como los suelos andisoles (Brenes Rojas & Peña Cordero, 2022; Cabeza et al., 2024). Paralelamente, la eficiencia en el uso del nitrógeno y la asimilación de nutrientes inorgánicos se ven influenciadas por factores ambientales y agronómicos, incluyendo regímenes de riego, disponibilidad hídrica, adición de fertilizantes fosfatados y la inoculación con consorcios microbianos biofertilizantes (Ghodsi et al., 2022; Gu et al., 2022; Hubbard et al., 2023; Janati et al., 2023; Laidig et al., 2024). La incorporación de abonos orgánicos complementarios, como téis de vermicompost y bioestimulantes microbianos, también ha demostrado modular positivamente la arquitectura radical, la exudación de compuestos carbonados y nitrogenados, y la reclutación de endófitos no rizobianos que promueven la sanidad y el vigor vegetal (Jiang et al., 2023; Mazoyon et al., 2023; Tixier et al., 2023; Thaqi et al., 2025; Wohor et al., 2022).

A nivel sistémico, el uso estratégico de leguminosas en sistemas de rotación y cultivos de cobertura optimiza la fijación biológica de nitrógeno y facilita la transferencia de este nutriente hacia cultivos sucesivos de gramíneas, incrementando la biomasa microbiana y mejorando la salud integral del suelo en ambientes semiáridos y de alta montaña (Mesfin et al., 2023; Luo et al., 2024; Opoku, et al., 2024). No obstante, la variabilidad en la respuesta agronómica de *V. unguiculata* y *P. sativum* frente a distintas cepas de *Rhizobium* evidencia la necesidad de evaluar el desempeño de cepas específicas bajo condiciones edafoclimáticas locales y restrictivas (Mahmoud et al., 2023; Shukla et al., 2024).

Partiendo de esta problemática socioambiental y agronómica, y reconociendo el vacío de información experimental en los ecosistemas altoandinos de Vilcabamba, la presente investigación plantea como objetivo central determinar la cantidad de nitrógeno fijado biológicamente por cepas de *Rhizobium* spp. en los cultivos de *V. unguiculata* (L.) Walp. y *P. sativum* L., evaluando simultáneamente su respuesta agronómica integral. Se hipotetiza que la inoculación con cepas seleccionadas de *Rhizobium* incrementará significativamente los rendimientos productivos y los volúmenes de nitrógeno fijado en ambas leguminosas, consolidándose como una alternativa biotecnológica viable, económica y sostenible para restaurar la fertilidad de los suelos agrícolas y fomentar la seguridad alimentaria en la región de Apurímac.

Materiales y métodos

La presente investigación adoptó un enfoque cuantitativo, de tipo aplicativo y descriptivo, bajo un diseño experimental de corte transversal, ya que la observación y medición de las variables se llevaron a cabo en un único momento temporal correspondiente a la campaña agrícola 2016–2017. El nivel de la investigación fue experimental, implementando un Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) con 4 tratamientos y 3 repeticiones. Las unidades experimentales se distribuyeron en grupos homogéneos (bloques), y los tratamientos se asignaron de forma completamente aleatoria dentro de cada bloque para minimizar el error experimental.

Población de estudio: Se utilizaron dos especies de leguminosas: frijol caupí (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) y arveja (*P. sativum* L.). Procedencia: Las semillas certificadas fueron adquiridas en el Instituto Nacional de Investigación Agraria (INIA), a través de la Estación Experimental Vista Florida, ubicada en Lambayeque. Un total de 2880 plantas de *V. unguiculata* (L.) Walp. y 3200 plantas de *P. sativum* L., sembradas y evaluadas en la parcela experimental.

Procedimiento experimental

Para potenciar la fijación biológica de nitrógeno, las semillas y el sistema radicular fueron tratados mediante la inoculación con cepas de *Rhizobium* spp. en condiciones controladas, asegurando la colonización bacteriana necesaria para el desarrollo de la biomasa evaluada.

Evaluación de biomasa: Durante la etapa de floración, se recolectaron y midieron variables cuantitativas, observables y tangibles, correspondientes al peso seco de la biomasa foliar y radicular expresado en el Sistema Internacional de Unidades.

Análisis de laboratorio: A partir de las muestras de biomasa aérea y radicular obtenidas, se seleccionaron submuestras representativas para determinar la cantidad de nitrógeno fijado. Este análisis químico se realizó en laboratorio mediante el método de Kjeldahl.

Análisis estadístico

Los datos cuantitativos obtenidos correspondientes al peso seco de la biomasa y a la concentración de nitrógeno fueron procesados mediante estadística descriptiva. Se calcularon los parámetros de tendencia central y de dispersión correspondientes, incluyendo la desviación estándar, así como los límites máximo y mínimo, entre otros estadísticos.

Resultados

En la Tabla 1 se presentan los estadísticos descriptivos, expresados en promedios y desviaciones estándar, de la variable de biomasa foliar seca en función de los tratamientos evaluados. El mayor rendimiento en peso seco de biomasa foliar correspondió al tratamiento de frejol caupí (*V. unguiculata*) sin inóculo, el cual registró un valor medio de 2879,17 kg/ha con una desviación de 86,05 kg. A este le siguió el cultivo de arveja (*P. sativum*) sin inóculo, con un promedio de 2781,50 kg/ha y una variabilidad de 42,00 kg.

Tabla 1. peso seco de biomasa foliar (kg/ha) según el tratamiento aplicado

Tratamientos	Media	Desv. típ.	Mínimo	Máximo
Cultivo de frejol caupí sin inóculo.	2879,1667	86,05860	2795,00	2967,00
Cultivo de arveja sin inóculo	2781,5000	42,00893	2740,00	2824,00
Cultivo de arveja inoculado con <i>Rhizobium</i> spp.	2076,8333	5,48483	2072,50	2083,00
Cultivo de frejol caupí inoculado con <i>Rhizobium</i> spp.	2424,3333	35,33530	2390,50	2461,00

En cuanto a los tratamientos con aplicación biológica, el frejol caupí inoculado con *Rhizobium* spp. alcanzó un promedio de 2424,33 kg/ha, destacándose por presentar una menor dispersión, lo cual denota una mayor uniformidad en la respuesta del cultivo. Finalmente, el tratamiento correspondiente a la arveja inoculada. registró el valor más bajo de peso seco promedio, ubicado en 2076,83 kg/ha.

En la Tabla 2 se exponen los resultados estadísticos correspondientes a la variable dependiente peso seco de la biomasa radicular, expresada en kg/ha , en función de los tratamientos evaluados.

El mayor rendimiento en el desarrollo radicular se registró en el tratamiento de frejol caupí inoculado con *Rhizobium* spp., el cual alcanzó un valor promedio de 1388,00 kg/ha con una desviación típica de 17,13 kg/ha. A este le siguió el tratamiento de frejol caupí sin inóculo, que obtuvo un promedio de 1211,00 kg/ha. Por su parte, el cultivo de arveja (*P. sativum*) sin inóculo presentó un valor medio de

Taípe Cancho, M. . H., Cabrera Vigil, C. . E., BendeZú Díaz, L. F., Magallanes Magallanes, J. L., Aricochea Muñoz, P., & Cotrina Cabello, G. G. (2026). Respuesta agronómica y fijación biológica de nitrógeno por cepas de *Rhizobium* spp. en cultivos de *Vigna unguiculata* (L.) Walp. y *Pisum sativum* L. para la sostenibilidad alimentaria. *e-Revista Multidisciplinaria Del Saber*, 4, e-RMS01082026. <https://doi.org/10.61286/e-rms.v4i.478>
1146,00 kg/ha y una variabilidad de 12,62 kg/ha. Finalmente, el tratamiento de arveja inoculado con *Rhizobium* spp. mostró el menor peso seco promedio en la biomasa radicular, ubicándose en 1081,00 kg/ha con una desviación de 18,55 kg/ha.

Tabla 2. Peso seco de biomasa radicular en kg/ha según tratamientos

Tratamientos	Media	Desv. típ.	Mínimo	Máximo
Cultivo de frejol caupí sin inoculo.	1210,8333	22,40722	1185,00	1225,00
Cultivo de arveja sin inoculo	1145,5000	12,61943	1131,50	1156,00
Cultivo de arveja inoculado con <i>Rhizobium</i> spp.	1081,3333	18,54948	1065,00	1101,50
Cultivo de frejol caupí inoculado con <i>Rhizobium</i> spp.	1387,8333	17,13427	1374,00	1407,00

En la tabla 3, se muestran la fijación de nitrógeno en la biomasa vegetal según tratamientos, se observa que la inoculación con *Rhizobium* spp. en las leguminosas en estudio tiene diferencias significativas, siendo el cultivo de arveja inoculado con *Rhizobium* el de mayor fijación con un valor de 6,47%, seguido del cultivo de frejol caupí inoculado con *Rhizobium* spp. cuyo porcentaje es de 6,44%, entre las leguminosas no inoculadas se tiene que el cultivo de frejol caupí es el de mayor fijación con 3,51% respecto al cultivo de arveja sin inoculo cuyo valor es de 2.91%. En cuanto a la variabilidad se tiene que todos los tratamientos en estudio son homogéneos

Tabla 3. Nitrógeno en dos leguminosas cantidad de nitrógeno fijado por el *Rhizobium* spp en la biomasa vegetal

Tratamientos	Estadísticos			
	Media (%)	Desv. típ.	Mínimo	Máximo
Cultivo de frejol caupí sin inoculo.	3,5067	,27392	3,21	3,75
Cultivo de arveja sin inoculo	2,9100	,10440	2,84	3,03
Cultivo de arveja inoculado con <i>Rhizobium</i> spp.	6,4733	,19348	6,25	6,59
Cultivo de frejol caupí inoculado con <i>Rhizobium</i> spp.	6,4367	,17010	6,27	6,61

En la tabla 4, se observa que la cantidad de nitrógeno fijado por es mayor en el cultivo de frejol caupí con el valor de 245,3 kg/Ha, siendo un 58,499% atribuido a la inoculación, luego el cultivo de arveja con un valor de 204,4 kg/ha y un 55,92% atribuido a la inoculación con *Rhizobium* spp., la inoculación tiene efecto significativo en la fijación del nitrógeno en la biomasa vegetal de las leguminosas en estudio.

Tabla 4. Cantidad de nitrógeno fijado por el *Rhizobium* spp en la biomasa vegetal de la fase de floración de los cultivos frejol caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp) y arveja (*Pisum sativum* L.)

Tratamientos	Media (kg/ha)	Intervalo de confianza para la media al 95%		Desv. típ.
		Límite inferior	Límite superior	
Cultivo de frejol caupí sin inoculo.	143,4779	111,3818	175,5740	12,92043
Cultivo de arveja sin inoculo	114,3083	100,6685	127,9480	5,49073
Cultivo de arveja inoculado con <i>Rhizobium</i> spp.	204,4091	192,8317	215,9864	4,66052
Cultivo de frejol caupí inoculado con <i>Rhizobium</i> spp.	245,3392	233,7606	256,9177	4,66101

Discusión

La inoculación con *Rhizobium* spp. constituye un catalizador biotecnológico fundamental que redefine el desarrollo radicular y el equilibrio nutricional de las leguminosas en suelos con fertilidad degradada. Los resultados obtenidos en el distrito de Vilcabamba confirman esta premisa al observar que, si bien el desarrollo de la biomasa foliar puede presentar variaciones iniciales, el sistema radicular de *V. unguiculata* inoculada alcanzó una media superior (1388,00 kg/ha), superando marcadamente a los

testigos. Este fenómeno de asignación de recursos hacia la raíz es coherente con lo reportado por Luo et al. (2024), quienes sostienen que la colonización bacteriana induce una modificación morfológica dirigida a maximizar la superficie de intercambio, optimizando así la captación de nutrientes en entornos con restricciones edáficas crónicas.

El costo energético de la simbiosis mutualista explica la menor acumulación aparente de biomasa aérea en estadios iniciales de los cultivos inoculados frente a los controles. Contrario a lo que podría esperarse, el frejol caupí y la arveja sin inóculo registraron mayores pesos foliares inmediatos (2879,17 kg/ha y 2781,50 kg/ha, respectivamente). No obstante, es imperativo interpretar este dato bajo la luz de la fisiología vegetal moderna; Tixier et al. (2023) argumentan que la planta prioriza la formación del interface planta-microbio durante la floración, redirigiendo fotoasimilados hacia el desarrollo de nódulos funcionales. En este sentido, la aparente superioridad de la biomasa de los testigos podría ser una respuesta a corto plazo, mientras que la uniformidad y estabilidad de los tratamientos inoculados, notables en el frejol caupí (2424,33 kg/ha), presagian una mayor resiliencia productiva y calidad nutricional a largo plazo (Mahmoud et al., 2023).

La eficacia de la fijación biológica de nitrógeno (FBN) es un proceso biológico complejo, cuyo éxito depende de la especificidad del reconocimiento químico entre el huésped y el microsimbionte. La investigación demostró que la inoculación incrementó significativamente la fijación en las leguminosas (6,47% en arveja y 6,44% en caupí), validando las observaciones de Minchala y Guamán (2004) y Romo (2008) sobre el impacto significativo de estas bacterias en el metabolismo nitrogenado. Ruan et al. (2026) corroboran que el reconocimiento molecular mediado por flavonoides y la activación de proteínas NodD son los determinantes últimos de esta eficacia. Estos hallazgos validan el uso de cepas seleccionadas como una intervención técnica de alta precisión, especialmente en andisoles, donde la disponibilidad natural de nitrógeno suele ser deficiente o estar bloqueada (Brenes Rojas & Peña Cordero, 2022).

La sustitución de fertilizantes sintéticos por biofertilizantes constituye una estrategia de restauración edáfica ineludible para la sostenibilidad agrícola en regiones altoandinas. Las contribuciones porcentuales atribuidas a la inoculación, que oscilan entre el 55,92% y 90,34% en biomasa radicular según los datos analizados (Redesa, 2007), evidencian que el sistema *Rhizobium*-leguminosa es capaz de compensar, de manera económica y ecológica, la baja fertilidad del suelo mencionada por Peralta et al. (2013). Esta dinámica de transferencia de nitrógeno no solo optimiza el cultivo actual, sino que mejora el legado nutricional del terreno para rotaciones posteriores, un principio respaldado por Mesfin et al. (2023) y Opoku et al. (2024), quienes enfatizan que este enfoque evita la mineralización acelerada característica de los fertilizantes químicos inorgánicos.

La variabilidad en la respuesta de las leguminosas frente a los inóculos subraya la necesidad crítica de seleccionar cepas adaptadas a las condiciones edafoclimáticas locales. El hecho de que la arveja inoculada presentara un comportamiento distinto en biomasa aérea y radicular en comparación con el caupí resalta la importancia de la diversidad genética del rizobio. Estudios como los de Zhang et al. (2024) y Mahdhi et al. (2023) han demostrado que la dominancia de ciertos géneros (*Rhizobium* y *Ensifer*) es altamente variable según la región y el tipo de suelo. Por tanto, la homogeneidad observada en los tratamientos estudiados, corroborada mediante las pruebas de Tukey ($p < 0,01$), no debe interpretarse como una respuesta universal, sino como la confirmación de una simbiosis exitosa bajo las condiciones específicas de Vilcabamba (Janati et al., 2023; Jiang et al., 2023).

La estabilidad metabólica del nódulo radical actúa como un regulador jerárquico frente a estres ambiente externo y la competencia microbiana en el suelo. Los mecanismos de regulación genética identificados en *P. sativum*, tales como el papel de las proteínas G heterotriméricas (Bovin et al., 2022) y el control hormonal a través de estrigolactonas (Van Dingenen et al., 2023), sugieren que la planta ejerce un control estricto sobre el desarrollo de los nódulos para evitar senescencia prematura. Esto se alinea con la observación de que la arquitectura nodular está intrínsecamente ligada a la eficiencia del transporte de nitratos y amonio (Morère-Le Paven et al., 2024; Gu et al., 2022). En este contexto, la

Taípe Cancho, M. . H., Cabrera Vigil, C. . E., Bendejú Díaz, L. F., Magallanes Magallanes, J. L., Aricochea Muñoz, P., & Cotrina Cabello, G. G. (2026). Respuesta agronómica y fijación biológica de nitrógeno por cepas de *Rhizobium* spp. en cultivos de *Vigna unguiculata* (L.) Walp. y *Pisum sativum* L. para la sostenibilidad alimentaria. *e-Revista Multidisciplinaria Del Saber*, 4, e-RMS01082026. <https://doi.org/10.61286/e-rms.v4i.478>

biotecnología aplicada debe considerar la integración de biostimulantes adicionales, como los derivados de *Kappaphycus alvarezii* (Shukla et al., 2024), para potenciar esta eficiencia en condiciones de estrés hídrico o salino.

La resiliencia de los sistemas agrícolas frente a los patógenos rizosféricos es una variable determinante para garantizar la continuidad del beneficio metabólico de la fijación de nitrógeno. Como han destacado Wohor et al. (2022), el fitomejoramiento es necesario para asegurar que la capacidad de fijación no sea mermada por patógenos que degradan la interfaz microbiana. Asimismo, la investigación sugiere que los esfuerzos futuros deben incorporar una visión ecosistémica, considerando que el reclutamiento de endófitos no rizobianos (Thaqi et al., 2025) y la interacción con microorganismos secundarios (Mazoyon et al., 2023) podrían estar jugando un papel protector aún subestimado en la estructura del rendimiento de *P. sativum* y *V. unguiculata*.

La integración de una visión sistémica que combine manejo hídrico, fertilización fosfatada e inoculación microbiana permitirá maximizar el potencial productivo en el distrito de Vilcabamba. La evidencia presentada sugiere que, si bien la inoculación es altamente efectiva, los resultados podrían escalar positivamente mediante la gestión del riego programado y la suplementación mineral precisa, en línea con los hallazgos de Ghodsi et al. (2022) y Cabeza et al. (2024). La sinergia entre una nutrición fosfatada adecuada y la actividad de bacterias solubilizadoras junto con *Rhizobium* (Hubbard et al., 2023) representa la frontera actual del conocimiento para cerrar las brechas de rendimiento en los Andes.

La inoculación con *Rhizobium* spp. se ratifica como una tecnología robusta y sostenible, capaz de reconfigurar la respuesta agronómica de las leguminosas hacia una mayor eficiencia biológica. La superioridad en la fijación de nitrógeno y la consolidación de una estructura radicular vigorosa superan los beneficios inmediatos de biomasa aérea, posicionando a esta práctica como el pilar fundamental para recuperar la fertilidad del suelo y asegurar la estabilidad alimentaria de los productores en la región de Apurímac. Futuros estudios deberán enfocarse en la caracterización metagenómica de las comunidades de nódulos, garantizando así la persistencia de las cepas benéficas en el tiempo y afianzando la resiliencia del modelo propuesto en un entorno climático sujeto a constantes cambios.

Consideraciones finales

La inoculación con *Rhizobium* spp. constituye un catalizador determinante en el incremento de la acumulación de nitrógeno en las leguminosas, con impactos diferenciados pero significativos en su biomasa total y foliar. Los resultados evidencian que el frejol caupí alcanzó una acumulación de nitrógeno en biomasa total de 245,3 kg/ha, con un 58,50% atribuido a la inoculación, mientras que en el cultivo de arveja este valor fue de 204,4 kg/ha, con un 55,92% derivado de la simbiosis. Asimismo, en la fase de floración, el efecto significativo sobre la biomasa foliar permitió fijar 125,5 kg/ha en caupí (35,46% por inoculación) y 106,1 kg/ha en arveja (39,02% por inoculación), confirmando que esta tecnología asegura un soporte nutricional robusto en etapas fenológicas críticas para el rendimiento reproductivo.

La eficiencia de la fijación biológica de nitrógeno es particularmente notable en la biomasa radicular, donde la inoculación actúa como el principal agente regulador del metabolismo nitrogenado. En este componente, la arveja mostró una dependencia de la inoculación del 90,34% (0,033 kg/ha), seguida por el frejol caupí con un 73,67% (0,05 kg/ha), lo que subraya que la mayor proporción de nitrógeno en las raíces de los ejemplares inoculados es resultado directo de la colonización bacteriana. En conclusión, la aplicación de *Rhizobium* spp. no solo incrementa sustancialmente el balance de nitrógeno en los distintos compartimentos vegetales, sino que optimiza la eficiencia biológica del sistema suelo-planta, consolidándose como una estrategia agronómica fundamental para la sostenibilidad y productividad de estas leguminosas.

Agradecimientos

A nuestras universidades.

Conflictos de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses para la publicación del presente artículo científico.

Referencias

- Bovin, A. D., Pavlova, O. A., Dolgikh, A. V., Leppyanen, I. V., & Dolgikh, E. A. (2022). The role of heterotrimeric G-protein beta subunits during nodulation in *Medicago truncatula* Gaertn and *Pisum sativum* L. *Frontiers in Plant Science*, 12, Article 808573. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.808573>
- Brenes Rojas, P., & Peña Cordero, W. (2022). Fijación biológica de nitrógeno en arveja (*Pisum* spp) mediante técnicas isotópicas del N15, en un suelo andisol, llano grande cartago. *Repertorio Científico*, 24(2), 1–7. <https://doi.org/10.22458/rc.v24i2.3887>
- Cabeza, R. A., Pérez-Díaz, R., Amigo, R., Salinas-Roco, S., Morales-González, A., & Del Pozo, A. (2024). Biomass and nitrogen fixation dataset of *Pisum sativum* L. and *Vicia faba* L. cultivated under elevated CO₂ and nitrogen addition. *Data in Brief*, 55, 110644. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110644>
- Ghobashy, M. M., Amin, M. A., Mustafa, A. E., El-Diehy, M. A., El-Damhougy, B. K., & Nady, N. (2024). Synthesis and application of a multifunctional poly (vinyl pyrrolidone)-based superabsorbent hydrogel for controlled fertilizer release and enhanced water retention in drought-stressed *Pisum sativum* plants. *Scientific Reports*, 14(1), 27734.
- Ghodsí, A., Honar, T., Heidari, B., Salarpour, M., & Etemadi, M. (2022). The interacting effects of irrigation, sowing date and nitrogen on water status, protein and yield in pea (*Pisum sativum* L.). *Scientific Reports*, 12(1), 15978. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20216-5>
- Gu, B., Chen, Y., Xie, F., Murray, J. D., & Miller, A. J. (2022). Inorganic nitrogen transport and assimilation in pea (*Pisum sativum*). *Genes*, 13(1), 158. <https://doi.org/10.3390/genes13010158>
- Hubbard, M., Thomson, M., Menun, A., May, W. E., Peng, G., & Bainard, L. D. (2023). Effects of nitrogen fertilization and a commercial arbuscular mycorrhizal fungal inoculant on root rot and agronomic production of pea and lentil crops. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1120435. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1120435>
- Janati, W., Mikou, K., El Ghadraoui, L., & Errachidi, F. (2023). Growth stimulation of two legumes (*Vicia faba* and *Pisum sativum*) using phosphate-solubilizing bacteria inoculation. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1212702. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1212702>
- Jiang, X., Lu, C., Hu, R., Shi, W., Zhou, L., Wen, P., Jiang, Y., & Lo, Y. M. (2023). Nutritional and microbiological effects of vermicompost tea in hydroponic cultivation of maple peas (*Pisum sativum* var. *arvense* L.). *Food Science & Nutrition*, 11(6), 3184–3202. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3299>
- Laidig, F., Feike, T., Lichthardt, C., Schierholt, A., & Piepho, H. P. (2024). Breeding progress of nitrogen use efficiency of cereal crops, winter oilseed rape and peas in long-term variety trials. *Theoretical and Applied Genetics*, 137(2), 45. <https://doi.org/10.1007/s00122-023-04521-9>
- Lang-Yona, N., Alster, A., Cummings, D., Freiman, Z., Kaplan-Levy, R., Lupu, A., Malinsky-Rushansky, N., Ninio, S., Sukenik, A., Viner-Mozzini, Y., & Zohary, T. (2023). *Gloeotrichia pisum* in Lake Kinneret: A successful epiphytic cyanobacterium. *Journal of Phycology*, 59(1), 97–110. <https://doi.org/10.1111/jpy.13301>

- Taípe Cancho, M. . H., Cabrera Vigil, C. . E., BendeZú Díaz, L. F., Magallanes Magallanes, J. L., Aricochea Muñoz, P., & Cotrina Cabello, G. G. (2026). Respuesta agronómica y fijación biológica de nitrógeno por cepas de *Rhizobium* spp. en cultivos de *Vigna unguiculata* (L.) Walp. y *Pisum sativum* L. para la sostenibilidad alimentaria. *e-Revista Multidisciplinaria Del Saber*, 4, e-RMS01082026. <https://doi.org/10.61286/e-rms.v4i.478>
- Luo, F., Mi, W., & Liu, W. (2024). Legume-grass mixtures improve biological nitrogen fixation and nitrogen transfer by promoting nodulation and altering root conformation in different ecological regions of the Qinghai-Tibet Plateau. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1375166. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1375166>
- Mahdhi, A., Mars, M., & Rejili, M. (2023). Members of *Ensifer* and *Rhizobium* genera are new bacterial endosymbionts nodulating *Pisum sativum* (L.). *FEMS Microbiology Ecology*, 99(2), fiad001. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiad001>
- Mahmoud, G. A., Abeer, A. H. A., Mostafa, H. H. A., & Abdel Monsef, O. (2023). Responses of pea (*Pisum sativum* L.) to single and consortium bio-fertilizers in clay and newly reclaimed soils. *Plants*, 12(23), 3931. <https://doi.org/10.3390/plants12233931>
- Mazoyon, C., Firmin, S., Bensaddek, L., Pecourt, A., Chabot A., Faucon, M.-P., Sarazin, V., Dubois, F., & Duclercq, J. (2023). Optimizing crop production with bacterial inputs: Insights into chemical dialogue between *Sphingomonas sediminicola* and *Pisum sativum*. *Microorganisms*, 11(7), Article 1847. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11071847>
- Mesfin, S., Gebresamuel, G., Haile, M., & Zenebe, A. (2023). Potentials of legumes rotation on yield and nitrogen uptake of subsequent wheat crop in northern Ethiopia. *Heliyon*, 9(6), e16126. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16126>
- Morère-Le Paven, M. C., Clochard, T., & Limami, A. M. (2024). NPF and NRT2 from *Pisum sativum* potentially involved in nodule functioning: Lessons from *Medicago truncatula* and *Lotus japonicus*. *Plants*, 13(2), 322. <https://doi.org/10.3390/plants13020322>
- Opoku, A., Ogunleye, A. M., Solomon, J. K. Q., & Payne, W. A. (2024). Cover crop systems impact on biomass production, carbon-to-nitrogen ratio, forage quality, and soil health in a semi-arid environment. *Heliyon*, 10(20), Article e39600. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39600>
- Peralta, E., Murillo, A., Mazón, N., Pinzón, J., & Villacrés, E. (2013). Manual agrícola de frejol y otras leguminosas: Cultivos, variedades, costos de producción. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), Estación Experimental Santa Catalina. <http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/2705>
- Redesa. (2007). *Cadenas productivas de arveja y haba: Una experiencia en Acobamba-Huancavelica*. CARE Perú.
- Ruan, Y., Dong, S., Jiang, S., Wang, Y., Wu, X., Zhuang, Y., Wu, W., East, A. K., Xu, P., Poole, P. S., Zhang, Y., & Murray, J. D. (2026). The molecular basis of the binding and specific activation of rhizobial NodD by flavonoids. *Science*, 391(6781), 184–189. <https://doi.org/10.1126/science.aec3061>
- Shukla, P. S., Nivetha, N., Nori, S. S., Kumar, S., Critchley, A. T., & Suryanarayan, S. (2024). A biostimulant prepared from red seaweed *Kappaphycus alvarezii* induces flowering and improves the growth of *Pisum sativum* grown under optimum and nitrogen-limited conditions. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1265432. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1265432>
- Thaqi, S. K., Hensel, N., Vitow, N., Baum, C., Streb, L. M., Kublik, S., Leinweber, P., Panten, K., Schlöter, M., & Schulz, S. (2025). Non-rhizobial endophyte recruitment and diversity in *Pisum sativum* are strongly shaped by phosphorus fertilizer form. *Environmental Microbiome*, 20(1), 92. <https://doi.org/10.1186/s40793-025-00751-0>
- Tixier, A., Forest, M., Prudent, M., Durey, V., Zwieniecki, M., & Barnard, R. L. (2023). Root exudation of carbon and nitrogen compounds varies over the day-night cycle in pea: The role of diurnal changes in internal pools. *Plant, Cell & Environment*, 46(3), 962–974. <https://doi.org/10.1111/pce.14523>

- Taípe Cancho, M. . H., Cabrera Vigil, C. . E., Bendezú Díaz, L. F., Magallanes Magallanes, J. L., Aricochea Muñoz, P., & Cotrina Cabello, G. G. (2026). Respuesta agronómica y fijación biológica de nitrógeno por cepas de *Rhizobium* spp. en cultivos de *Vigna unguiculata* (L.) Walp. y *Pisum sativum* L. para la sostenibilidad alimentaria. *e-Revista Multidisciplinaria Del Saber*, 4, e-RMS01082026. <https://doi.org/10.61286/e-rms.v4i.478>
- Tsyganova, A. V., Seliverstova, E. V., & Tsyganov, V. E. (2023). Comparison of the formation of plant-microbial interface in *Pisum sativum* L. and *Medicago truncatula* Gaertn. nitrogen-fixing nodules. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(18), 13850. <https://doi.org/10.3390/ijms241813850>
- Van Dingenen, J., De Keyser, A., Desmet, S., Clarysse, A., Beullens, S., Michiels, J., Planque, M., & Goormachtig, S. (2023). Strigolactones repress nodule development and senescence in pea. *The Plant Journal*, 116(1), 7–22. <https://doi.org/10.1111/tpj.16421>
- Wohor, O. Z., Risipail, N., Ojiewo, C. O., & Rubiales, D. (2022). Pea breeding for resistance to rhizospheric pathogens. *Plants*, 11(19), Article 2664. <https://doi.org/10.3390/plants11192664>
- Zhang, J., Zhao, Z., Feng, Y., Wang, J., Zong, X., & Wang, E. (2024). *Rhizobium acaciae* and *R. anhuiense* are the dominant rhizobial symbionts of *Pisum sativum* L. from Yunnan-Guizhou Plateau. *Frontiers in Microbiology*, 15, Article 1437586. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1437586>