



Artículo científico

Efecto de la inoculación con *Rhizobium* spp en el perfil de polifenoles del grano de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.)

Kenneth Segura-Hidalgo^{1/*}, Andrea Irias-Mata², Marcela Dumani-Echandi³, Lidieth Uribe-Lorío⁴

*Autor para correspondencia. Correo electrónico: kenneth.segurahidalgo@ucr.ac.cr

¹Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Agronómicas, San Pedro de Montes de Oca, 11503-2060 San Pedro, Costa Rica.



²Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones en Granos y Semillas (CIGRAS), San Pedro de Montes de Oca, 11503-2060 San Pedro, Costa Rica



³Universidad de Costa Rica, Escuela de Nutrición, San Pedro de Montes de Oca, 11503-2060 San Pedro, Costa Rica.



⁴Universidad de Costa Rica, Facultad de Agronomía, Centro de Investigaciones Agronómicas, San José, Costa Rica.



DOI: <https://doi.org/10.15517/0qb5h940>

Recibido el 22 de octubre del 2025; Aceptado el 17 de diciembre del 2025.

Resumen

Introducción. La simbiosis de *Rhizobium* spp, con el frijol aporta grandes beneficios a la planta y a la producción en general. Sin embargo, la investigación se ha centrado en la fijación biológica de nitrógeno y poco se ha estudiado acerca de la modificación del perfil nutricional que pueda tener el grano como consecuencia de la simbiosis. **Objetivo.** Evaluar el impacto de la inoculación con dos cepas de *Rhizobium* spp, sobre la concentración de polifenoles en granos de dos variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) Cabécar (rojo) y Guaymí (negro). **Materiales y métodos.** El experimento se realizó en invernadero (CIA), utilizando suelo autolavado y cinco tratamientos: T1 (CIAT899), T2 (CR4019B), T3 (CIAT899 + CR4019B), T4 (urea) y T5 (testigo). Las plantas se inocularon al momento de la siembra (10^8 UFC mL⁻¹) y se analizaron los polifenoles mediante Cromatografía Líquida de Ultra Alta Resolución en el CIGRAS, además se cuantificó el contenido de proteína y de saponinas del grano, así como su tiempo de imbibición. **Resultados.** Los resultados muestran diferencias como resultado de la inoculación en las fracciones solubles e insolubles de polifenoles. En la variedad Cabécar, el T2 (CR4019B) mostró mayor concentración de polifenoles solubles que el T4 (urea) ($p < 0,05$), mientras que los tratamientos inoculados presentaron menor concentración de polifenoles insolubles respecto al mismo control.

La relación de polifenoles solubles / insolubles fue significativamente mayor en T2 que en T4, sugiriendo que *Rhizobium* spp modifica el perfil de polifenoles en el grano. **Conclusión.** La inoculación con *Rhizobium* spp, parece modificar el perfil de polifenoles del grano de frijol al aumentar la concentración de polifenoles solubles y mejorar la relación entre las fracciones. El uso de bacterias como *Rhizobium* representa una herramienta que modula el desarrollo de actividades agrícolas con técnicas ambientalmente sostenibles.

Palabras clave: *Rhizobium*; polifenoles totales; frijol; antioxidantes; proteína; imbibición.

Scientific article

Abstract

Effect of *Rhizobium* spp. inoculation on the polyphenol profile of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) grains

Introduction. Symbiosis between *Rhizobium* spp. and common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) enhances plant growth and productivity; however, its effects on grain nutritional quality have received limited attention. **Objective.** To evaluate the effect of inoculation with two *Rhizobium* spp. strains on the polyphenol content of grains from two common bean varieties, Cabécar (red) and Guaymí (black). **Materials and methods.** A greenhouse experiment was conducted at CIA using autoclaved soil and five treatments: CIAT899, CR4019B, CIAT899 + CR4019B, urea, and a non-inoculated control. Plants were inoculated at sowing (10^8 CFU mL⁻¹). Soluble and insoluble polyphenols were quantified by ultra-high-performance liquid chromatography at CIGRAS. Grain protein and saponin contents and imbibition time were also determined. **Results.** Inoculation significantly affected polyphenol fractions. In the Cabécar variety, CR4019B increased soluble polyphenol concentration compared with urea ($p < 0.05$), while inoculated treatments showed lower insoluble polyphenol levels relative to the same control. The soluble-to-insoluble polyphenol ratio was significantly higher under CR4019B, indicating that *Rhizobium* spp. modified the grain polyphenol profile. **Conclusion.** *Rhizobium* spp. inoculation alters the polyphenol profile of common bean grains by increasing soluble polyphenols and improving the balance between polyphenol fractions, highlighting its potential as a sustainable agronomic strategy.

Keywords: *Rhizobium*; total polyphenols; common beans; antioxidants; protein; imbibition.

Introducción

La producción de frijol en Costa Rica para el año 2024 llegó a las 11 050 toneladas métricas, con un área sembrada estimada en 14 662, un rendimiento de 0,70 t ha⁻¹ (CNP 2025) y esto representa para la población un importante aporte nutricional de aminoácidos esenciales, fibra, vitaminas, antioxidantes (Dumani 2021), y un contenido de proteína que va del 16 hasta el 27% en algunos casos (Mencía Guevara *et al.* 2021).

Además, aportan compuestos bioactivos como los polifenoles con marcados beneficios para la salud (Ulloa *et al.* 2011), en especial su capacidad antioxidante cuya relevancia fisiológica radica la neutralización de radicales libres y la mitigación del estrés oxidativo, mecanismos que se encuentran asociados a la prevención de enfermedades crónicas (Mojica *et al.* 2015). Químicamente se definen como metabolitos secundarios vegetales caracterizados por poseer al menos un anillo aromático en su estructura (Watson 2018).

Estos compuestos, pueden ser estimulados mediante la aplicación de inoculantes microbianos (Sánchez *et al.* 2022), en leguminosas, particularmente en *Vicia fava* L., la concentración de polifenoles totales fue estimulado por la inoculación con *Rhizobium* spp. (Abdelkhalek *et al.* 2022, Amalfitano *et al.* 2018, Mandal *et al.* 2009), resultados similares se encontraron en maní *Arachis hypogaea* L. (Chakraborty *et al.* 2008), en donde se incrementó significativamente la concentración de polifenoles tanto en las raíces como en los brotes (Charitha Devi y Reddy 2002). Investigaciones recientes ofrecen evidencia de que las bacterias del área de la rizosfera pueden modular cambios en la ruta de la biosíntesis de los compuestos fenólicos (Kisiel *et al.* 2024).

En frijol común la información referente al efecto de un inoculante microbiano sobre la concentración de polifenoles en el grano es limitada. Por lo que, el objetivo de esta investigación fue evaluar el impacto de la inoculación con *Rhizobium* spp sobre la calidad del grano de frijol, mediante la cuantificación de la concentración de polifenoles, el contenido de proteína, la capacidad de imbibición y la concentración de saponinas en las variedades de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) Cabécar y Guaymí.

Material es y métodos

La investigación se llevó a cabo en el invernadero del Laboratorio de Microbiología Agrícola (LMA) del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) y en el laboratorio de biotecnología del Centro para Investigaciones en Granos y Semillas (CIGRAS). Se utilizaron las variedades de frijol Cabécar de testa roja y Guaymí de testa negra. Las cepas de *Rhizobium* spp, se tomaron de la colección del Laboratorio de Microbiología Agrícola (LMA). Las semillas de frijol se colocaron en macetas de 5 L con suelo autoclavado dos veces a 121 °C durante 1 h y posteriormente fueron inoculadas con 10 mL de una suspensión de bacterias 10^8 UFC mL⁻¹ de *Rhizobium* spp., CIAT899 y CR4019B en cinco tratamientos:

- 1 (Cepa CIAT899).
- 2 (Cepa CR4019B).
- 3 (Cepa CIAT899 + Cepa CR4019B).
- 4 (Testigo fertilizado con Urea).
- 5 (Testigo absoluto).

Cada maceta corresponde a una unidad experimental y fueron dispuestas en el invernadero completamente al azar con cuatro repeticiones cada tratamiento. Al tratamiento fertilizado con Urea se le aplicó una dosis de 150 kg·ha⁻¹, todos los tratamientos recibieron una dosis de K₂O₅ a razón de 70 kg·Ha⁻¹ de K₂O (Acuña y Castro 1996) y de P₂O₅ a razón de 100 kg·Ha⁻¹ (Acuña y Uribe 1996). Las plantas se llevaron a cosecha y las vainas se dejaron secar en la planta.

La concentración polifenoles totales se determinó en el laboratorio de biotecnología del CIGRAS de acuerdo con la metodología de Lux *et al.* (2020). Se determinaron dos fracciones solubles e insolubles, para la extracción de polifenoles solubles o libres se procedió a moler las muestras de granos de frijol en un molino eléctrico hasta obtener un polvo fino. Se pesaron 100 mg de frijol en un tubo de ensayo y se le adicionó 3 mL de metanol (80% v v⁻¹), se homogenizó la suspensión y se llevó a la centrífuga a 1718x g por 10 minutos a una temperatura de 10°C. El sobrenadante fue recolectado y la extracción se repitió tres veces con 2 mL de metanol (80% v v⁻¹). El total de los sobrenadantes recolectados se evaporó al vacío.

Para la determinación de los polifenoles insolubles o ligados a la membrana celular, la matriz resultante del paso anterior se suspendió en 2 mL de NaOH (2 mol L^{-1}) y se llevó a agitación por 4 horas a 20°C . Posteriormente se acidificó la solución con HCl (6 mol L^{-1}) hasta obtener un pH cercano a 2 y se le añadieron 2 mL de agua ultrapura. Luego se procedió a realizar la extracción líquido-líquido con 3 mL de acetato de etilo y se llevó a la centrifuga a $1718 \times g$ por 3 minutos a 10°C y se recolectaron los sobrenadantes. El proceso se repitió dos veces más con 2 mL de acetato de etilo y se evaporó al vacío.

Las muestras fueron analizadas mediante cromatografía líquida UHPLC (Ultra-High Performance Liquid Chromatography - UHPLC-MS/MS - Ultimate 3000 TSQ Endura, series TQH-E1-0288, Thermo Fisher Scientific, Massachusetts, USA). La separación de los compuestos en fase reversa se realizó mediante una columna C18 (Acquity UPLC CSH, $1,7 \mu\text{m}$, $100 \times 2,1 \text{ mm}$) y como eluyentes una disolución acuosa de ácido acético (7,5 mL, eluyente A) y acetonitrilo (eluyente B) a un flujo de $0,25 \text{ mL minuto}^{-1}$. Los polifenoles fueron identificados con base en su masa/carga y cuantificados usando curvas de calibración de estándares auténticos (León-Cortés *et al.* 2025).

La imbibición se realizó mediante el método descrito por Bolaños-Silvestre (2014). Se colocaron 12 granos de frijol tomados al azar, se colocaron en platos Petri y se les añadió 50 mL de agua desionizada. Se dejaron en un lugar lejos de la luz solar directa por 18 horas. Posteriormente a esto, se drenó el agua, se colocaron en papel toalla para eliminar el excedente de agua y se pesaron las muestras para medir la cantidad de agua absorbida.

El contenido de proteína se cuantificó a partir de la cantidad de nitrógeno total mediante el método Kjeldahl. Este análisis se realizó en el Laboratorio de Suelos y Foliares del CIA-UCR, y los resultados se transformaron a proteína cruda multiplicando por 6,25 (Bolaños-Silvestre 2014, Jacinto-Hernández *et al.* 2019).

La extracción de saponinas se llevó a cabo de acuerdo con la metodología empleada por Mendoza Sánchez (2018). Se tomó 0,5 gramos de muestra, se le adicionó 5 mL de metanol 80% y se colocó en el baño ultrasónico por 5 minutos. Para eliminar el metanol, la muestra se evaporó en condiciones de vacío en una centrifuga evaporatoria al vacío (SpeedVac) durante 8 horas a 15 psi. El extracto se suspendió en 1 mL de agua destilada, se le adicionó una alícuota de 200 μL de acetona, se llevó a la centrifuga a 2500 rpm durante 15 minutos y se separó el sobrenadante.

Para determinar la concentración de saponinas se utilizó el método empleado por Dini *et al.* (2009). Se tomó 0,1 mL del sobrenadante de la operación anterior, se le añadió 1 mL de ácido sulfúrico al 72% y 0,5 de vainillina al 8% en etanol y se incubó a 60°C durante 20 minutos. Una vez fría la muestra, se midió la absorbancia a 544 nm y se estimó la concentración de saponinas mediante el coeficiente de extinción molar de la soyasaponina B ($\epsilon = 5278$).

Se comprobó la normalidad de los datos mediante una prueba de Shapiro-Wilk. Se realizó un análisis de varianza (ANDEVA), y cuando se detectaron diferencias significativas, se efectuó la comparación de medias mediante la prueba LSD Fisher con un nivel de significación (α) de 0,05. Todos estos procedimientos estadísticos se realizaron con el software R Studio versión 2025.09.2.

Resultados y discusión

La concentración de polifenoles totales en los granos de frijol inoculados con *Rhizobium* spp fue menor que en los tratamientos no inoculados (**Figura 1**). El T1 (CIAT899) de la variedad Cabécar registró la concentración más baja con un valor de 402,64 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ y el T5 (Testigo) de la variedad Guaymí registró la mayor concentración de polifenoles totales con un valor de 981,97 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, estas ligeras diferencias entre las variedades coinciden con lo reportado por (Vinas *et al.* 2025) quienes encontraron valores muy similares en todos los polifenoles evaluados, con excepción de los flavonoides que se encuentran en mayor cantidad en la variedad Cabécar debido a su coloración.

Sin embargo, el desglose de polifenoles totales en las dos fracciones estudiadas muestra que los polifenoles solubles se comportan de manera diferente en las dos variedades (**Figura 2**), mientras que en la variedad Cabécar se presentaron diferencias significativas entre el T2 (CR4019B) y el T4 (Urea), siendo la concentración de polifenoles solubles menor en el testigo con fertilización con urea, en la variedad Guaymí no se encontraron diferencias entre los tratamientos. Aunque es normal que la fracción insoluble represente una gran proporción del total de polifenoles (Jiang *et al.* 2023), sus características los hacen sumamente reactivos y con la capacidad de enlazarse a otros compuestos como proteínas o minerales como el hierro, lo que ocasionaría que se inmovilicen parcialmente (Rocchetti *et al.* 2022).

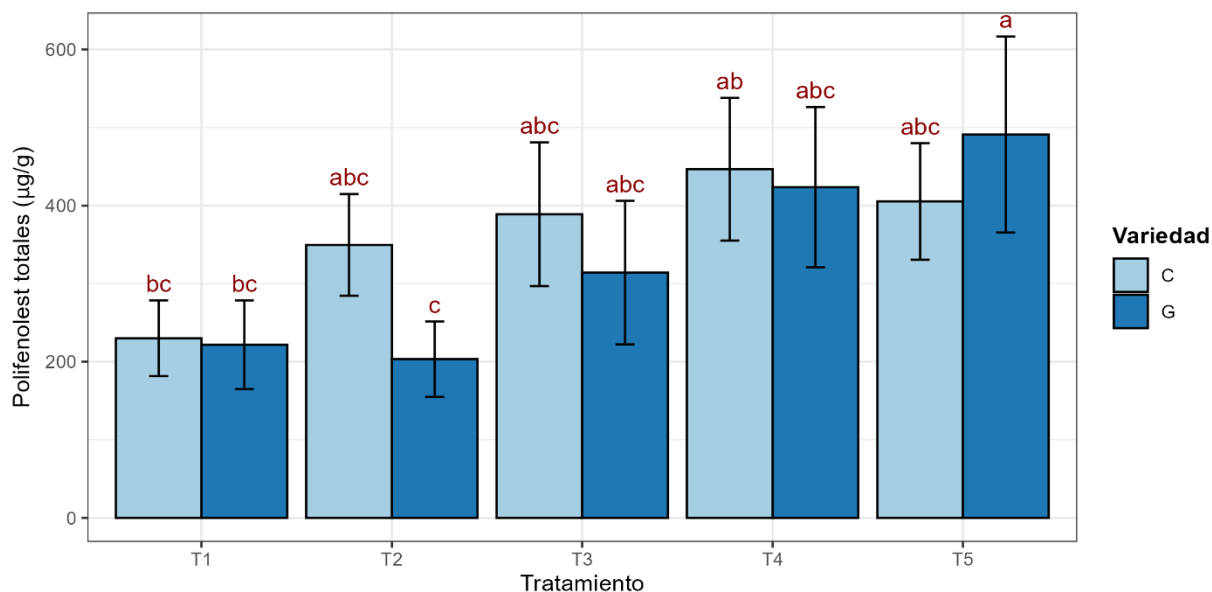


Figura 1. Concentración de polifenoles totales en granos de frijol común de las variedades Cabécar (C) y Guaymí (G) inoculados con *Rhizobium* spp. Las medias con letras en común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$). T1 = CIAT899. T2 = CR4019B. T3 = CIAT899 + CR4019B. T4 = Urea. T5 = Testigo.

Figure 1. Total polyphenol concentration in common bean grains of the Cabécar (C) and Guaymí (G) varieties inoculated with *Rhizobium* spp. Means sharing the same letter are not significantly different ($p < 0.05$). T1 = CIAT899. T2 = CR4019B. T3 = CIAT899 + CR4019B. T4 = Urea. T5 = control.

La fracción de polifenoles insolubles fue mayor en los granos de los tratamientos T4 (Urea) y T5 (Testigo) en relación con los tratamientos inoculados con *Rhizobium* spp (**Figura 2**). Las fracciones solubles e insolubles presentan diferentes distribuciones en todos los grupos alimenticios y esto repercute en las cualidades del poder antioxidante y en el metabolismo de estos compuestos (Wang *et al.* 2020, Chu *et al.* 2002, Peng *et al.* 2024, Yeo y Shahidi 2015, Shahidi y Hossain 2023).

Ya que los polifenoles insolubles se encuentran asociados a la matriz del grano, en donde interactúan con componentes estructurales de la pared celular (de la Rosa *et al.* 2019, Nicolás-García *et al.* 2021, Shahidi y Yeo 2016, Rivas Medina 2018, Rochín-Medina *et al.* 2021) estos tardan hasta 7 veces más en digerirse en el colon que los polifenoles solubles (Zhang *et al.* 2023). La reducción en la concentración de polifenoles insolubles en los tratamientos inoculados sugiere que *Rhizobium* spp podría modular el perfil de polifenoles totales favoreciendo el equilibrio de las fracciones del grano mejorando su digestibilidad (Yin *et al.* 2022, Zhu *et al.* 2020).

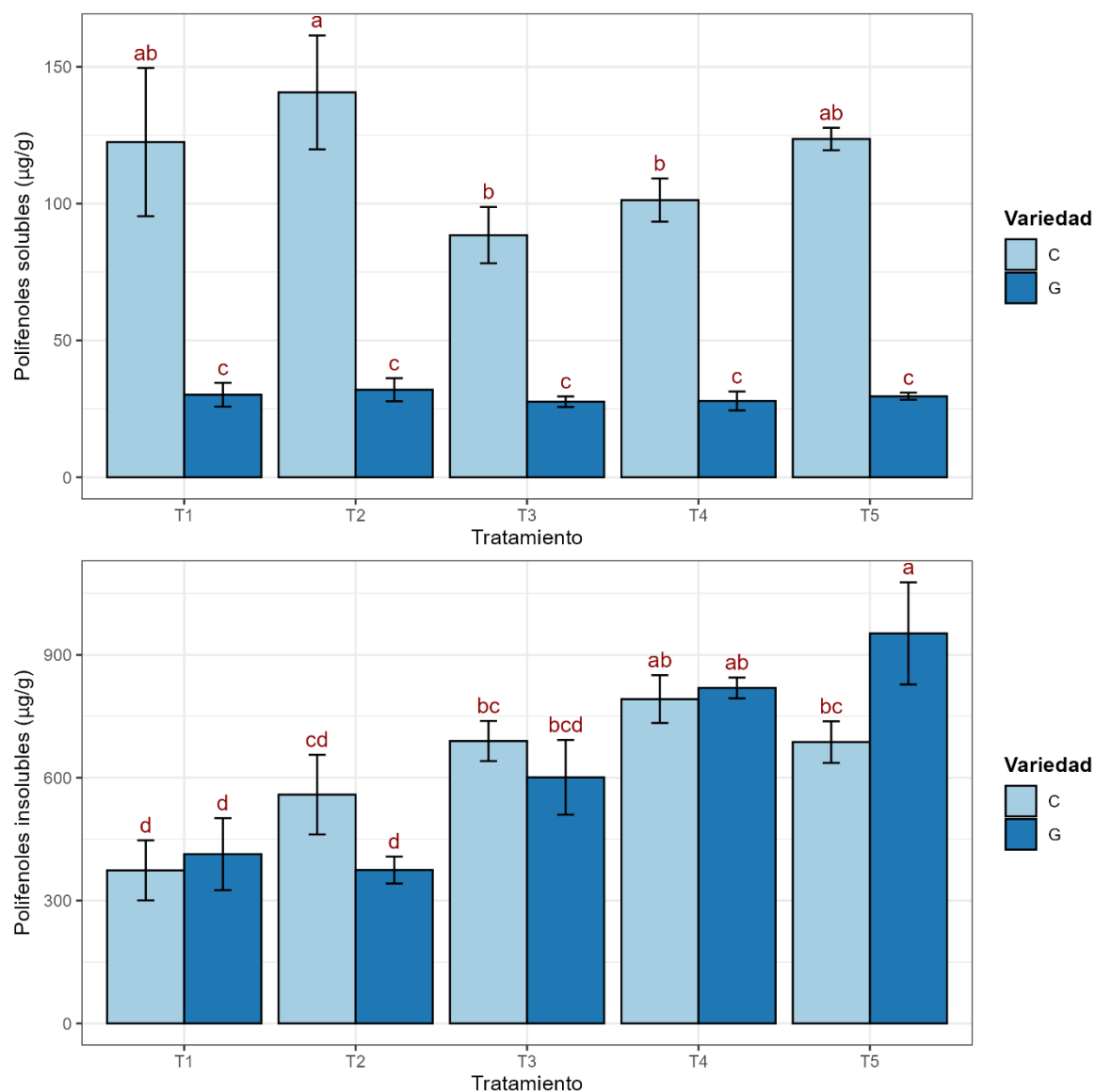


Figura 2. Concentración de polifenoles solubles e insolubles totales presentes en granos de frijol de las variedades Cabécar (C) y Guaymí (G) inoculados con *Rhizobium* spp. Las medias con letras en común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$). T1 = CIAT899. T2 = CR4019B. T3 = CIAT899 + CR4019B. T4 = Urea. T5 = Testigo.

Figure 2. Concentration of total soluble and insoluble polyphenols in common bean grains of the Cabécar (C) and Guaymí (G) varieties inoculated with *Rhizobium* spp. Means sharing the same letter are not significantly different ($p < 0.05$). T1 = CIAT899. T2 = CR4019B. T3 = CIAT899 + CR4019B. T4 = Urea. T5 = control.

La fracción de polifenoles insolubles fue mayor en los granos de los tratamientos T4 (Urea) y T5 (Testigo) en relación con los tratamientos inoculados con *Rhizobium* spp (**Figura 2**). Las fracciones solubles e insolubles presentan diferentes distribuciones en todos los grupos alimenticios y esto repercute en las cualidades del poder antioxidante y en el metabolismo de estos compuestos (Wang *et al.* 2020, Chu *et al.* 2002, Peng *et al.* 2024, Yeo y Shahidi 2015, Shahidi y Hossain 2023).

Ya que los polifenoles insolubles se encuentran asociados a la matriz del grano, en donde interactúan con componentes estructurales de la pared celular (de la Rosa *et al.* 2019, Nicolás-García *et al.* 2021, Shahidi y Yeo 2016, Rivas Medina 2018, Rochín-Medina *et al.* 2021) estos tardan hasta 7 veces más en digerirse en el colon que los polifenoles solubles (Zhang *et al.* 2023). La reducción en la concentración de polifenoles insolubles en los tratamientos inoculados sugiere que *Rhizobium* spp podría modular el perfil de polifenoles totales favoreciendo el equilibrio de las fracciones del grano mejorando su digestibilidad (Yin *et al.* 2022, Zhu *et al.* 2020).

Al estudiar la relación de polifenoles solubles sobre los insolubles totales (RSI) se encontró que los valores generales se mantuvieron en un rango de 0,03 a 0,24 (**Figura 3**) lo que concuerda con lo reportado por Rochín-Medina *et al.* (2021) en variedades mexicanas de frijol las cuales se mantuvieron entre 0,07 a 0,55 sin embargo, los materiales cuyos valores se encuentran entre 0,2 y 0,3 de RSI coincidieron con la mayor capacidad antioxidante, valores diferentes a estos produjeron una caída en esta característica.

En la variedad Cabécar, el T1 (CIAT899) y T2 (CR4019B) los datos de RSI presentaron diferencias significativas con respecto a los demás tratamientos. Caso similar se observó en la variedad Guaymí, en donde hubo diferencias entre los granos a los que se aplicó los tratamientos T1 (CIAT899) y T2 (CR4019) con respecto a los tratamientos T4 (Urea) y T5 (Testigo).

Este análisis permite proyectar que el alto valor reportado para ambas variedades en T1 (CIAT899) y T2 (CR4019B) podría estar ligado a una mayor capacidad antioxidante de acuerdo con los datos Rochín-Medina *et al.* (2021). A pesar de que la mayor concentración de polifenoles totales se reporta en los tratamientos no inoculados, el análisis detallado de la composición de polifenoles en sus fracciones otorga una visión más profunda que denota la complejidad de las interacciones resultantes (Sęczyk *et al.* 2021, Yang *et al.* 2020, 2018).

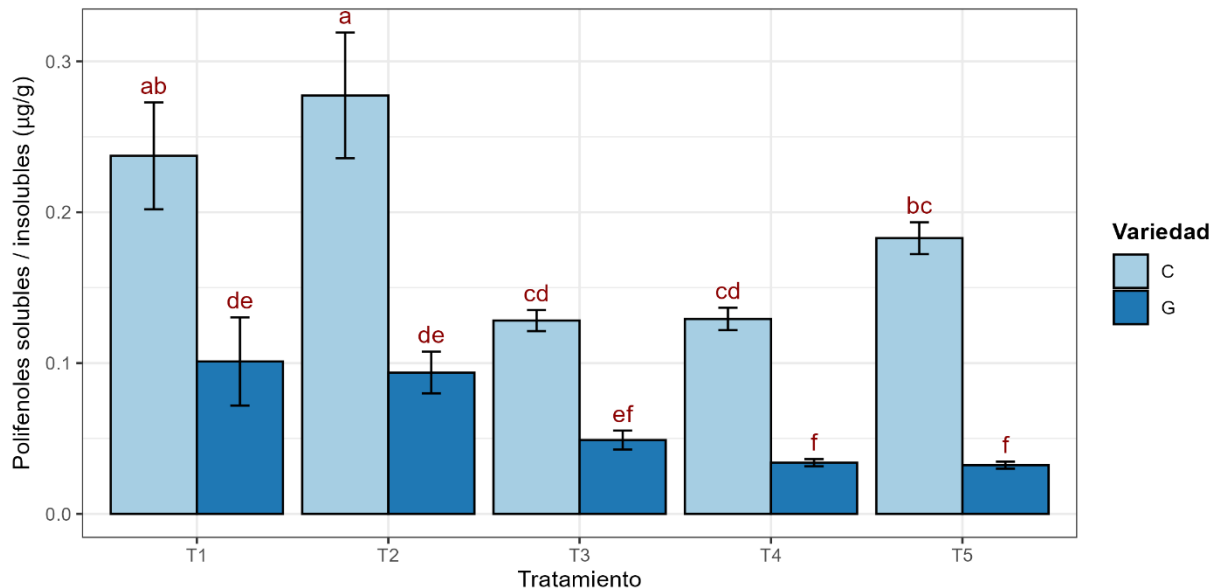


Figura 3. Relación de polifenoles solubles / insolubles presentes en granos de las variedades de frijol común Cabécar (C) y Guaymí (G) inoculados con *Rhizobium* spp. Las medias con letras en común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$). T1 = CIAT899. T2 = CR4019B. T3 = CIAT899 + CR4019B. T4 = Urea. T5 = Testigo.

Figure 3. Ratio of soluble to insoluble polyphenols in grains of common bean Cabécar (C) and Guaymí (G) varieties inoculated with *Rhizobium* spp. Means sharing the same letter are not significantly different ($p < 0.05$). T1 = CIAT899. T2 = CR4019B. T3 = CIAT899 + CR4019B. T4 = Urea. T5 = control.

El grupo de los flavonoides presentes en la fracción soluble (**Figura 4**) muestra diferencias significativas entre el tratamiento T2 (CR4019B) y los demás tratamientos. Este aumento en la concentración de flavonoides es relevante, dado el papel clave de los flavonoides en la promoción de beneficios para la salud humana (Wang *et al.* 2025, Wang y Chen 2025, Ghosh *et al.* 2025). En la variedad Guaymí no se observaron diferencias.

En la fracción soluble, los flavonoides catequina, epicatequina y el kaempferol (**Figura 5**) se encontraron con diferencias significativas en las plantas del T2 (CR4019B) de la variedad Cabécar, y la isoquercetina se encontró con diferencias en el T2 (CR4019B) de la variedad Guaymí, esto con respecto a los demás tratamientos.

Esta tendencia de acumulación de flavonoides en la variedad Cabécar se debe a que estos compuestos se encuentran relacionados con el color del grano (Pitura y Arntfield 2019, Rodríguez Madrera *et al.* 2020, Yang *et al.* 2018). Resultados similares fueron reportados por León-Cortés *et al.* (2025) para la variedad Cabécar.

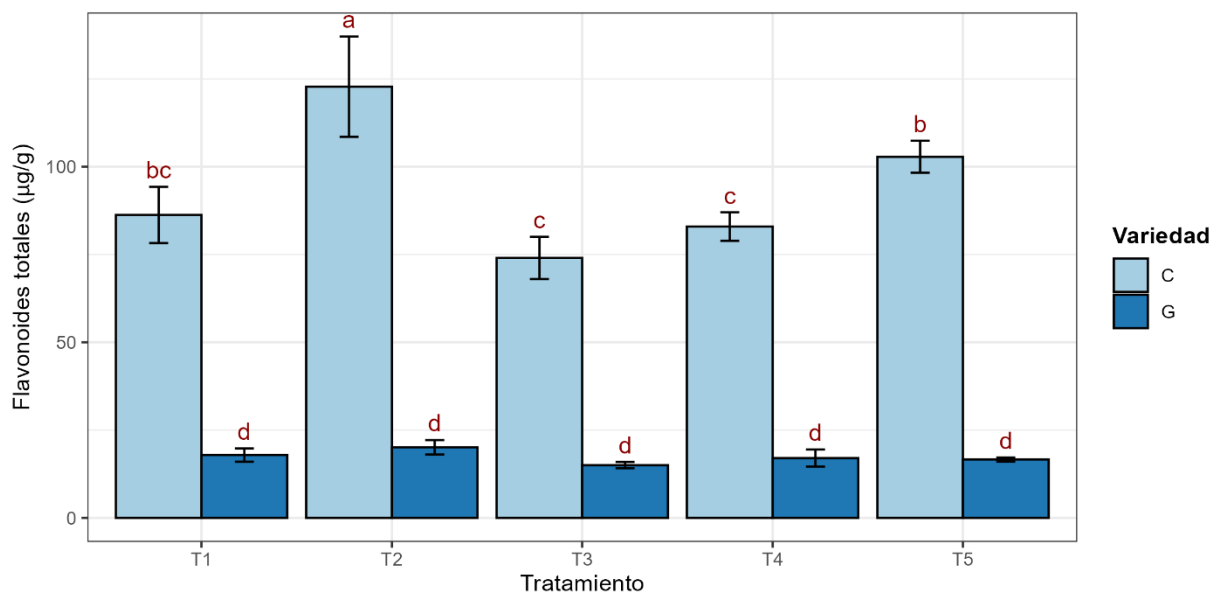


Figura 4. Flavonoides totales (Catequina, Epicatequina, Isoquercetina, Kaempferol, Naringenina, Procidiamina B2 y Rutina) presentes en la fracción soluble de granos de frijol común de las variedades Cabécar (C) y Guaymí (G) inoculados con *Rhizobium* spp. Las medias con letras en común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$). T1 = CIAT899. T2 = CR4019B. T3 = CIAT899 + CR4019B. T4 = Urea. T5 = Testigo.

Figure 4. Total flavonoids (catechin, epicatechin, isoquercetin, kaempferol, naringenin, procyanidin B2, and rutin) present in the soluble fraction of common bean grains Cabécar (C) and Guaymí (G) varieties inoculated with *Rhizobium* spp. Means sharing the same letter are not significantly different ($p < 0.05$). T1 = CIAT899. T2 = CR4019B. T3 = CIAT899 + CR4019B. T4 = Urea. T5 = control.

Los ácidos fenólicos se encuentran con mayor frecuencia en el cotiledón en forma insoluble (Madrera *et al.* 2021, Rodríguez Madrera *et al.* 2023) desempeñando diversas funciones como moléculas señalizadoras durante el establecimiento de la simbiosis entre leguminosas y *Rhizobium* spp. (Seneviratne y Jayasinghearachchi 2003, Shimamura *et al.* 2022), en la tolerancia a diferentes tipos de perturbaciones bióticas o abióticas, en la germinación y en el crecimiento de la planta (Kumar y Goel 2019, Pillimúé *et al.* 2024, Mandal *et al.* 2010).

Los datos muestran que la concentración de ácidos fenólicos (**Figura 6**) de la fracción soluble aumentó significativamente con el inoculante microbiano aplicado en el T1 (CIAT 899) en la variedad Cabécar, lo que indica que es producto de la interacción entre la bacteria y la planta (Kisiel *et al.* 2024). Los ácidos fenólicos se encuentran con mayor frecuencia en el cotiledón en forma insoluble (Madrera *et al.* 2021, Rodríguez Madrera *et al.* 2023) desempeñando diversas funciones como moléculas señalizadoras durante el establecimiento de la simbiosis entre leguminosas y *Rhizobium* spp. (Seneviratne y Jayasinghearachchi 2003, Shimamura *et al.* 2022), en la tolerancia a diferentes tipos de perturbaciones bióticas o abióticas, en la germinación y en el crecimiento de la planta (Kumar y Goel 2019, Pillimúé *et al.* 2024, Mandal *et al.* 2010). Los datos muestran que la concentración de ácidos fenólicos (**Figura 6**) de la fracción soluble aumentó significativamente con el inoculante microbiano aplicado en el T1 (CIAT 899) en la variedad Cabécar, lo que indica que es producto de la interacción entre la bacteria y la planta (Kisiel *et al.* 2024).

En cuanto a los parámetros de calidad de grano, en las dos variedades evaluadas, el mayor contenido de proteína en el grano de frijol (**Figura 7**) se encontró en el tratamiento T4 (Urea). En el caso de la variedad Cabécar el contenido de proteína en los granos del T4 (Urea) muestra diferencias significativas con respecto a los demás tratamientos, por lo que se puede inferir que la inoculación con *Rhizobium* spp no tuvo el efecto esperado, sin embargo, a pesar de que su respuesta fue menor, el contenido de proteína se encuentra dentro de rango reportado por Mencía Guevara *et al.* (2021) para muestras de frijol en Costa Rica (16 a 27%).

En el caso de la variedad Guaymí, el contenido de proteína del grano en los tratamientos T1 (CIAT899), y T2 (CR4019B) muestran diferencias con el T5 (Testigo), y su media se encuentra sin diferencias con respecto al T4 (Urea), lo que indica que la fijación biológica de nitrógeno mediada por las cepas de *Rhizobium* aportó suficiente nitrógeno para mantener el contenido de proteína del grano en valores alrededor del 24%. Esta observación se puede atribuir al aumento de nitrógeno producto de la fijación biológica (Lopetinsky *et al.* 2014, Sufar *et al.* 2024).

De igual manera, la ligera superioridad en cuanto al contenido de proteína de la variedad Guaymí con respecto a la Cabécar coincide con la evaluación de propiedades fisicoquímicas realizadas por Mencía Guevara *et al.* (2020).

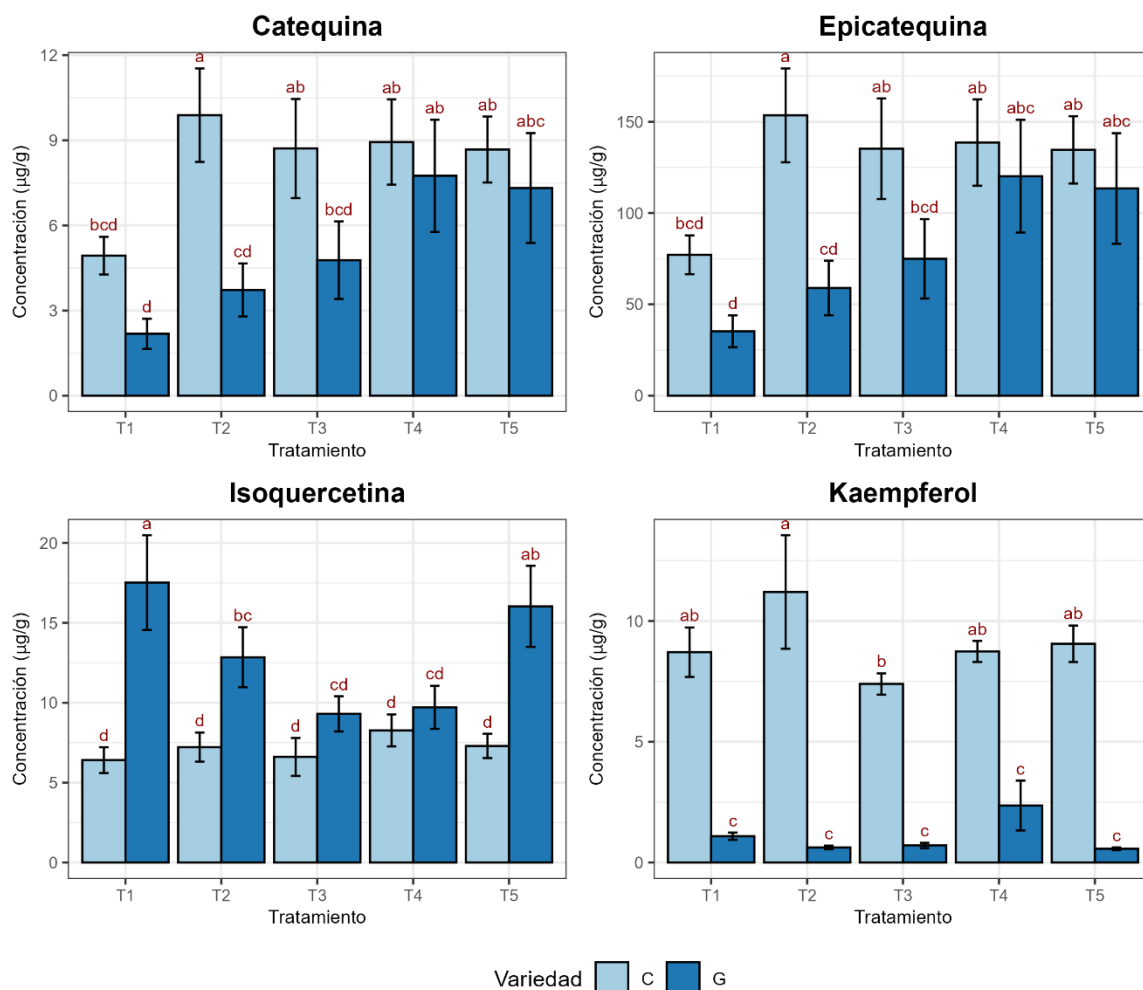


Figura 5. Concentración de flavonoides componentes del perfil de polifenoles de la fracción soluble de granos de frijol de las variedades Cabécar (C) y Guaymí (G) inoculados con *Rhizobium* spp. Las medias con letras en común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$). T1 = CIAT899. T2 = CR4019B. T3 = CIAT899 + CR4019B. T4 = Urea. T5 = Testigo.

Figure 5. Concentration of flavonoids constituting the polyphenol profile of the soluble fraction in common bean grains varieties Cabécar (C) and Guaymí (G) inoculated with *Rhizobium* spp. Means sharing the same letter are not significantly different ($p < 0.05$). T1 = CIAT899. T2 = CR4019B. T3 = CIAT899 + CR4019B. T4 = Urea. T5 = control.

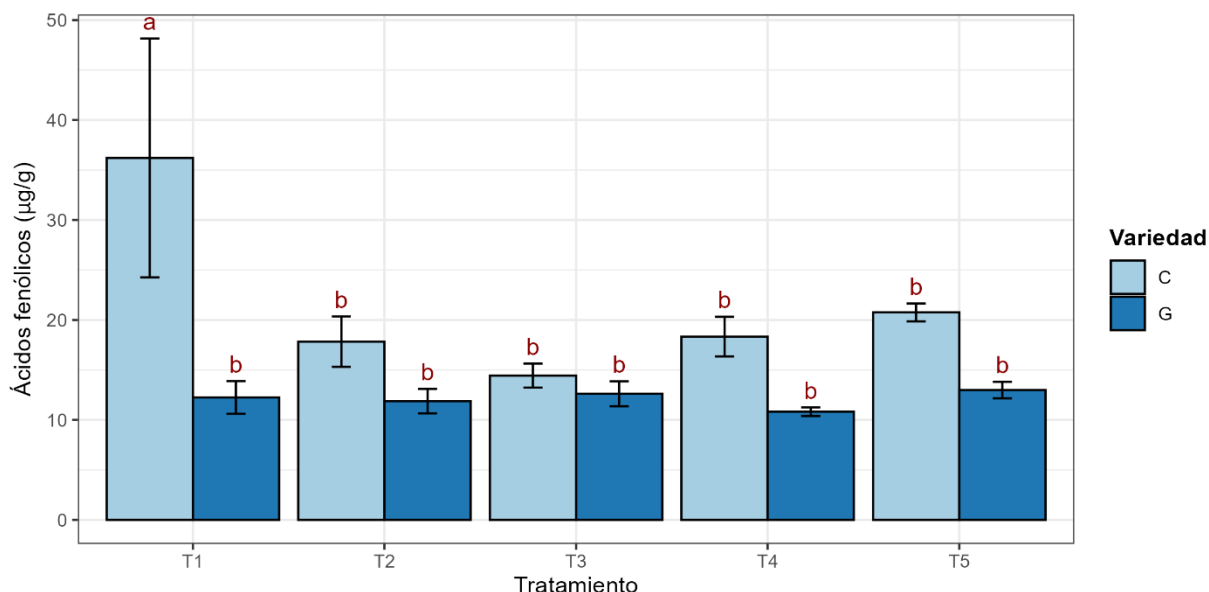


Figura 6. Ácidos fenólicos totales presentes en la fracción soluble de granos de frijol de las variedades Cabécar (C) y Guaymí (G) inoculados con *Rhizobium* spp. Las medias con letras en común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$). T1 = CIAT899. T2 = CR4019B. T3 = CIAT899 + CR4019B. T4 = Urea. T5 = Testigo.

Figure 6. Total phenolic acids in the soluble fraction of common bean grains varieties Cabécar (C) and Guaymí (G) inoculated with *Rhizobium* spp. Means sharing the same letter are not significantly different ($p < 0.05$). T1 = CIAT899. T2 = CR4019B. T3 = CIAT899 + CR4019B. T4 = Urea. T5 = control.

La absorción de agua del grano (**Figura 8**), no mostró diferencias para la variedad Cabécar, que, además, presentó granos sin cambios por absorción al momento de la evaluación. Por otra parte, la variedad Guaymí presentó diferencias en los granos del T2 (CR4019B) con respecto al T5 (Testigo), lo que parece indicar que la inoculación con *Rhizobium* spp mejoró la permeabilidad del grano y su imbibición. Esta cualidad se encuentra relacionada al tiempo de cocción, por lo que, una mejor capacidad de hidratación representa un frijol con una cocción más rápida (Sofi *et al.* 2022). Por otra parte, una baja imbibición indica una membrana más dura y se encuentra relacionada con una reducción en la calidad del grano en cuanto a la cantidad de compuestos fenólicos y en la capacidad antioxidante se refiere (Claros Osorio 2021). Esto concuerda con los datos expuestos por Mencía Guevara *et al.* (2020) que mencionan que la variedad Guaymí presentó una menor dureza y un menor tiempo de cocción.

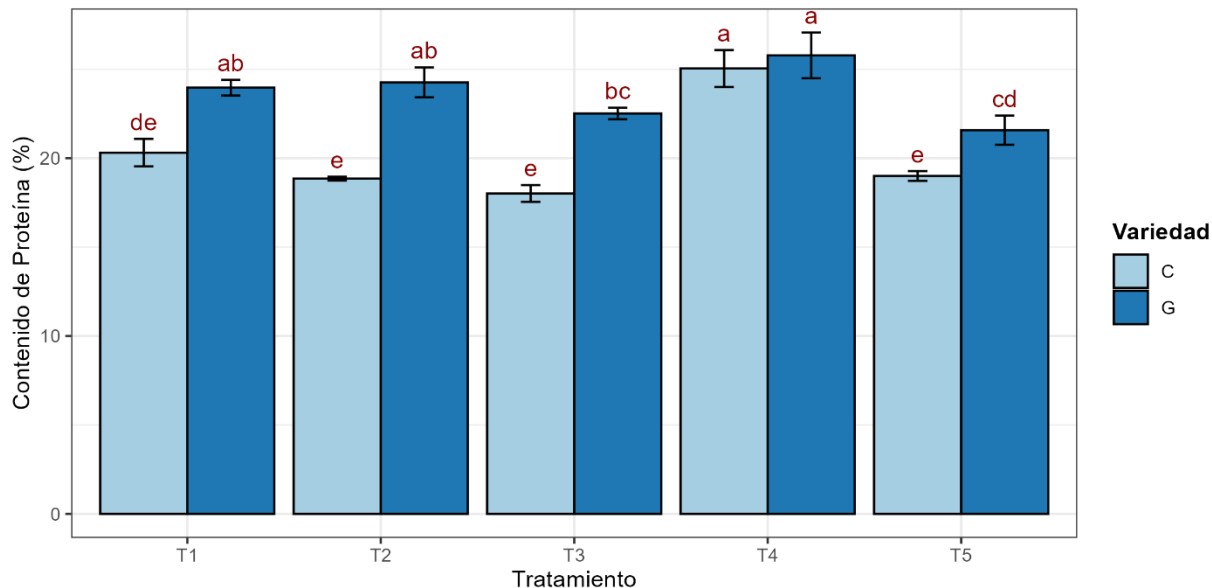


Figura 7. Contenido de proteína en el grano de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) de las variedades Cabécar (C) y Guaymí (G) inoculados con *Rhizobium* spp. Las medias con letras en común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$). T1 = CIAT899. T2 = CR4019B. T3 = CIAT899 + CR4019B. T4 = Urea. T5 = Testigo.

Figure 7. Protein content in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) grains varieties Cabécar (C) and Guaymí (G) inoculated with *Rhizobium* spp. Means sharing the same letter are not significantly different ($p < 0.05$). T1 = CIAT899. T2 = CR4019B. T3 = CIAT899 + CR4019B. T4 = Urea. T5 = control.

Aunque la información al respecto es limitada, parece existir una relación entre la concentración de saponinas en el grano de frijol y su proceso de imbibición (**Figura 9**), puesto que la baja absorción de agua observada en la variedad Cabécar coincidió con el menor contenido de saponinas en el grano. Algunos estudios sugieren que la concentración de saponinas en el grano favorece la absorción de agua durante la germinación de ciertas semillas (Helmkamp y Bonner 1953, Moses *et al.* 2014), ya que sus propiedades detergentes mejoran la permeabilidad de la membrana (Navarro Del Hierro *et al.* 2020), sin embargo, esto dependería de la concentración y del grupo químico de saponinas presente en el grano (Davidyants 2024, Debnath *et al.* 2020).

En el marco de la bioeconomía y en la búsqueda de mitigar los efectos del cambio climático (FAO 2023, Medina Morales *et al.* 2024), los resultados obtenidos en variables de calidad de grano podrían sustentar el uso de *Rhizobium* dentro de la llamada proteína sostenible (García López 2023, Bolaños-Quirós *et al.* 2024, Celemin Pérez 2024) que busca forjarse como una alternativa ante la gran huella energética generada por la fabricación de fertilizantes sintéticos (Armas Vega 2024, Navarro-Saltos *et al.* 2025) y servir como una estrategia a favor de la sostenibilidad de los agroecosistemas (Borsari 2024).

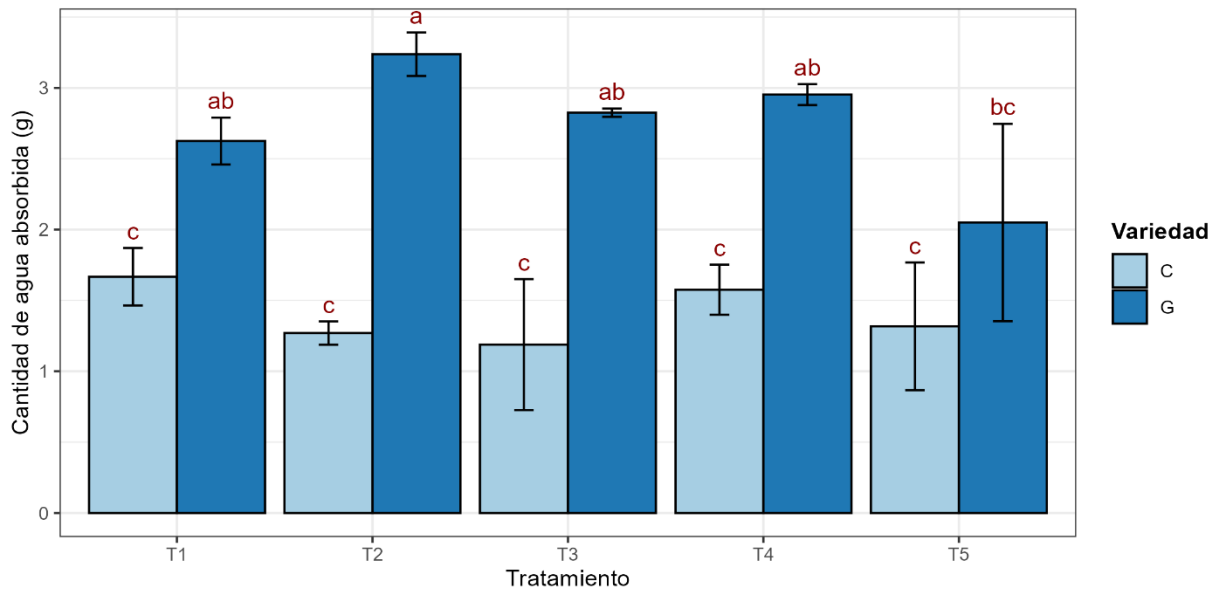


Figura 8. Imbibición del grano de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) de las variedades Cabécar (C) y Guaymí (G) inoculados con *Rhizobium* spp. Las medias con letras en común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$). T1 = CIAT899. T2 = CR4019B. T3 = CIAT899 + CR4019B. T4 = Urea. T5 = Testigo.

Figure 8. Grain imbibition of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties Cabécar (C) and Guaymí (G) inoculated with *Rhizobium* spp. Means sharing the same letter are not significantly different ($p < 0.05$). T1 = CIAT899. T2 = CR4019B. T3 = CIAT899 + CR4019B. T4 = Urea. T5 = control.

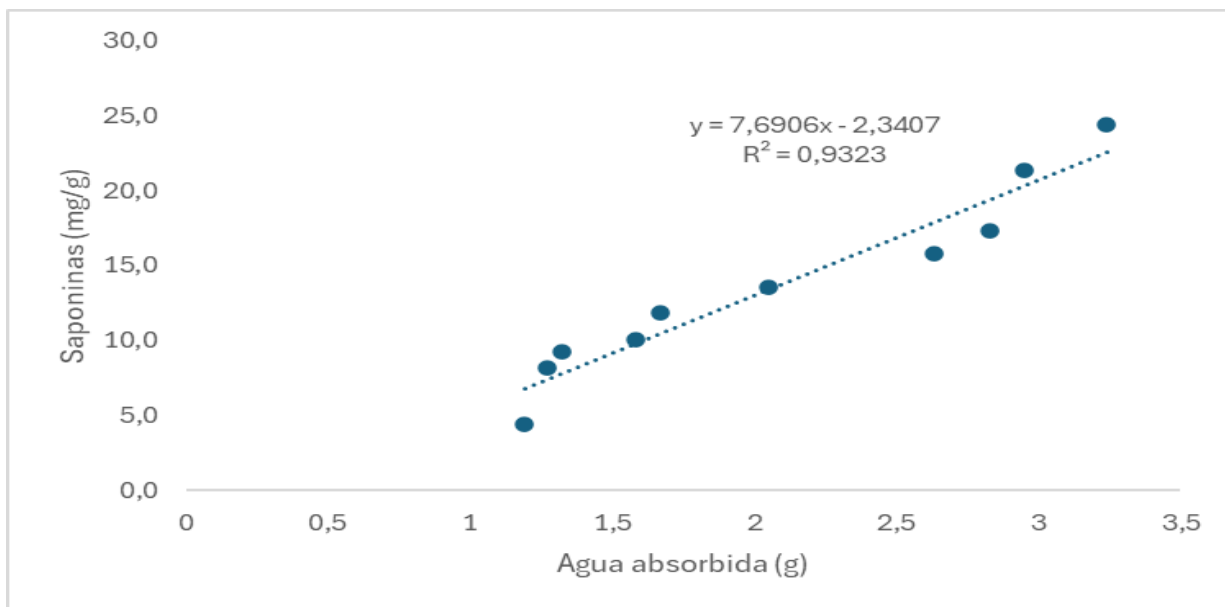


Figura 9. Comparación de la imbibición del grano (expresado como masa de agua absorbida) y el contenido de saponinas en el grano de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). Línea discontinua representa el modelo de mejor ajuste.

Figure 9. Comparison of grain imbibition (expressed as mass of water absorbed) and saponin content in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). The dotted line indicates the best fit model.

Conclusiones

La inoculación con *Rhizobium* spp, afecta la concentración de polifenoles de la fracción soluble con diferencias significativas entre las plantas inoculadas con la cepa CR4019B de la variedad Cabécar (T2), sobre las plantas a las que se aplicó Urea (T4), no así para la variedad Guaymí que no mostró diferencias. En cuanto a la fracción insoluble, se observó que los tratamientos inoculados con *Rhizobium* spp, mostraron una tendencia a tener una concentración menor de polifenoles insolubles, lo que implica una mejor distribución del perfil en busca de un equilibrio entre las fracciones.

En la variedad Cabécar la relación de polifenoles solubles sobre insolubles resulta significativamente diferente en las plantas que fueron inoculadas con los tratamientos T1 (CIAT899) y T2 (CR4019B) lo que se asocia con una mayor capacidad antioxidante. Es importante las diferencias significativas en la producción de ácidos fenólicos en el T1 (CIAT 899) y en los flavonoides del T2 (CR4019B) de la variedad Cabécar puesto que indican un posible efecto de la bacteria sobre la síntesis de estos compuestos.

La inoculación con *Rhizobium* spp fue suficiente para mantener el contenido de proteína sin diferencias aún comparado con la fertilización con urea, esto vincula y ratifica el uso de bacterias

como *Rhizobium* spp como alternativa para el avance sostenible del sector agrícola y ofrecer productos con mejor calidad nutricional, puesto que también se encontró influencia en la capacidad de imbibición como fue el caso de la variedad Guaymí. Es importante que se realice investigación dirigida a vislumbrar el efecto que tiene la microbiota del suelo sobre la calidad nutricional de los productos alimenticios.

Agradecimientos

Se agradece profundamente el Laboratorio de Microbiología Agrícola y al Centro de Investigación en Granos y Semillas B por las facilidades brindadas para esta investigación.

Literatura citada

Abdelkhalek, A; El-Gendi, H; Al-Askar, AA; Maresca, V; Moawad, H; Elsharkawy, MM; Younes, HA; Behiry, SI. 2022. Enhancing systemic resistance in faba bean (*Vicia faba* L.) to Bean yellow mosaic virus via soil application and foliar spray of nitrogen-fixing *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* strain 33504-Alex1. *Frontiers in Plant Science* 13(933498.). DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.933498>

Acuña, O; Castro, L. 1996. Efecto de la variedad de frijol y la cepa de *Rhizobium* sobre la respuesta a la inoculación en tres localidades de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 20(2):151-157. Consultado 31 may 2022. Disponible en https://www.mag.go.cr/rev_agr/v20n02_151.pdf

Acuña, O; Uribe, L. 1996. Inoculation of the common bean with three selected *Rhizobium leguminosarum* bv. *Phaseoli* strains. *Agronomía mesoamericana* 7(1). Consultado 10 may 2024. Disponible en <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agromeso/article/view/24786/24999>

Amalfitano, C; Gomez, LD; Frendo, P; De Pascale, S; Pepe, O; Simister, R; Ventorino, V; Agrelli, D; Borrelli, C; McQueen-Mason, SJ; Caruso, G. 2018. Plant-*Rhizobium* symbiosis, seed nutraceuticals, and waste quality for energy production of *Vicia faba* L. as affected by crop management. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* 5(1):15. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40538-018-0126-z>

Armas Vega, FV. 2024. Beneficios de la agricultura regenerativa en la salud del suelo. *Reciamuc* 8(2):665-677. DOI: [https://doi.org/10.26820/reciamuc/8.\(2\).abril.2024.665-677](https://doi.org/10.26820/reciamuc/8.(2).abril.2024.665-677)

Bolaños-Silvestre, E. 2014. Evaluación de las características físico químicas en *frijol* (*Phaseolus vulgaris*) variedad; pinto saltillo de dos periodos 2009 y 2010. s.l., Universidad Autónoma Agraria. s. p.

Bolaños-Quirós, F; Fallas-Rodríguez, P; Murillo-González, L; Pérez, AM; Quirós, AM. 2024. Development of a green drink with spirulina (*Arthrospira* sp.) using the experimental mixture design. *Agronomia Mesoamericana* 35. DOI: <https://doi.org/10.15517/am.2024.60115>

Borsari, B. 2024. De los agronegocios a la agroecología y la transición hacia un sistema alimentario sostenible en Panamá. *Investigación y Pensamiento Crítico* 12(1):48-62. DOI: <https://doi.org/10.37387/ipc.v12i1.375>

Celemín Pérez, M. 2024. El estigma de los alimentos de proteína vegetal. Madrid, España, Universidad Pontificia Comillas. Consultado 12 jun. 2025. Disponible en <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/bitstream/handle/11531/78742/TFG%20ADE-Maria%20Celetin.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Chakraborty, D; Santi, AE; Mandal, M. 2008. Fractional changes in phenolic acids composition in root nodules of *Arachis hypogaea* L. *Plant Growth Regu* 55(3):159-163. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10725-008-9275-6>

Charitha Devi, M; Reddy, MN. 2002. Phenolic acid metabolism of groundnut (*Arachis hypogaea* L.) plants inoculated with VAM fungus and *Rhizobium* . *Plant Growth Regulation* 2002 37:2 37(2):151-156. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1020569525965>

Chu, Y-F; Sun, J; Wu, X; Liu, RH. 2002. Antioxidant and Antiproliferative Activities of Common Vegetables. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50(23):6910-6916. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf020665f>

Claros Osorio, P del P. 2021. Evaluación de la capacidad antioxidante total y contenido de polifenoles totales del *Phaseolus vulgaris* “frijol”. Huacho –Peru, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión. Consultado 20 may 2025. Disponible en <https://repositorio.unjfsc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14067/5297/PATRICIA%20DEL%20PILAR%20CLAROS%20OSORIO.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

CNP. 2025. Boletín Frijol: Situación del cultivo en el 2024. s.l., s.e. Consultado 11 dic. 2025. Disponible en https://www.cnp.go.cr/sim/sector_agricola/granos_basicos/frijol/monitoreos/2025/M_Frijol_01_2025.pdf

Davidyants, ES. 2024. Triterpene Glycosides as Plant Growth Regulators: Application Potential and Prospects (A Review). Russian Journal of Bioorganic Chemistry 50(7):2730-2752. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1068162024070100>

de la Rosa, LA; Moreno-Escamilla, JO; Rodrigo-García, J; Alvarez-Parrilla, E. 2019. Phenolic Compounds. s.l., Elsevier. p. 253-271 DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813278-4.00012-9>

Debnath, B; Sarkar, S; Das, R. 2020. Effects of saponin capped triangular silver nanocrystals on the germination of *Pisum sativum*, *Cicer arietinum*, *Vigna radiata* seeds & their subsequent growth study. IET Nanobiotechnology 14:25-32. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2019.0161>

Dini, I; Tenore, GC; Dini, A. 2009. Saponins in Ipomoea batatas tubers: Isolation, characterization, quantification and antioxidant properties. Food Chemistry 113(2):411-419. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2008.07.053>

Dumani, M. 2021. Los frijoles ticos: más que un alimento nutritivo (Documento electrónico). Consultado 26 jun. 2022. Disponible en <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2021/10/25/los-frijoles-ticos-mas-que-un-alimento-nutritivo.html>

FAO. 2023. La bioeconomía es un catalizador para la transformación de los sistemas agroalimentarios hacia una mayor sostenibilidad. Consultado 12 jun. 2025. Disponible en <https://www.fao.org/newsroom/detail/FAO-bioeconomy-agrifood-systems-science-innovation-forum-2023/es>

García López, DA. 2023. Elaboración de proteína a base de harina de grillo – Gryprotein. Lima, Perú, Escuela de Educación Superior Tecnológica Priva. s. p.

Ghosh, R; Bhowmik, A; Biswas, S; Samanta, P; Sarkar, R; Pakhira, S; Mondal, M; Hajra, S; Saha, P. 2025. Natural flavonoid Orientin restricts 5-Fluorouracil induced cancer stem cells mediated angiogenesis by regulating HIF1 α and VEGFA in colorectal cancer. . Molecular medicine (Cambridge, Mass.) 31(1):85. DOI: <https://doi.org/10.1186/S10020-024-01032-1>

Helmkamp, G; Bonner, J. 1953. Some Relationships of Sterols to Plant Growth. Physiology 28(3):428-436.

Jacinto-Hernández, C; Coria-Peña, M; Contreras-Santos, G; Martínez-López, L; Zapata-Martelo, E; Ayala-Carrillo, M del R; Jacinto-Hernández, C; Coria-Peña, M; Contreras-Santos, G; Martínez-López, L; Zapata-Martelo, E; Ayala-Carrillo, M del R. 2019. Azúcares totales y proteína en frijol nativo de la región Triqui Alta, Oaxaca. Revista mexicana de ciencias agrícolas 10(7):1667-1674. DOI: <https://doi.org/10.29312/REMEXCA.V10I7.2114>

Jiang, Q; Wang, S; Yang, Y; Luo, J; Yang, R; Li, W. 2023. Profiles of Free and Bound Phenolics and Their Antioxidant Capacity in Rice Bean (*Vigna umbellata*). Foods 12(14):2718. DOI: <https://doi.org/10.3390/FOODS12142718/S1>

Kisiel, A; Miller, T; Łobodzińska, A; Rybak, K. 2024. Biosynthesis of Phenolic Compounds of *Medicago truncatula* After Inoculation with Selected PGPR Strains. International Journal of Molecular Sciences 25(23):12684.

Kumar, N; Goel, N. 2019. Phenolic acids: Natural versatile molecules with promising therapeutic applications. Biotechnology Reports 24:e00370. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.BTRE.2019.E00370>

León-Cortés, D; Arce-Villalobos, K; Bogantes-Ledezma, D; Irías-Mata, A; Chaves-Barrantes, N; Vinas, M. 2025. Anti-aflatoxin potential of phenolic compounds from common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). Food Chemistry 469:142597. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.142597>

Lopetinsky, KJ; Lupwayi, NZ; Olson, MA; Akter, Z; Clayton, GW. 2014. Contrasting *Rhizobium* inoculation requirements of zero-tannin faba bean and narrow-leaved lupin in western Canada . Canadian Journal of Plant Science 94(7):1117-1123.

Lux, PE; Freiling, M; Stuetz, W; Von Tucher, S; Carle, R; Steingass, CB; Frank, J. 2020. (Poly)phenols, Carotenoids, and Tocochromanols in Corn (*Zea mays* L.) Kernels As Affected by Phosphate Fertilization and Sowing Time. Journal of Agricultural and Food Chemistry 68(2):612-622.

Madrera, RR; Negrillo, AC; Valles, BS; Fernández, JJF. 2021. Phenolic content and antioxidant activity in seeds of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Foods 10(4).

Mandal, S; Mandal, M; Das, A; Pati, B; Ghosh, A. 2009. Stimulation of indoleacetic acid production in a *Rhizobium* isolate of *Vigna mungo* by root nodule phenolic acids. Archives of Microbiology 191(4):389-393. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00203-008-0455-6>

Mandal, SM; Chakraborty, D; Dey, S. 2010. Phenolic acids act as signaling molecules in plant-microbe symbioses. Plant Signaling & Behavior 5(4):359-368. DOI: <https://doi.org/10.4161/psb.5.4.10871>

Medina Morales, P; Morales Ibarra, M; González Monterrubio, C. 2024. Bioinsumos y bioeconomía circular contra el cambio climático: Alianza para la productividad, regeneración de suelos y captura de carbono en la agricultura de México, Biofábrica Siglo XXI . C3-BIOECONOMY: Circular and Sustainable Bioeconomy (5):125-142. DOI: <https://doi.org/10.21071/c3b.vi5.17771>

Mencía Guevara, A; Villalobos Moya, K; Rubí Zeledón, J; Granados Rojas, L; Hernández Aguirre, C; Brenes Monge, H. 2020. Evaluación de propiedades fisicoquímicas del frijol costarricense (*Phaseolus vulgaris*) como estrategia de diferenciación y valorización. Perspectivas Rurales Nueva Época 18(35):25-48. DOI: <https://doi.org/10.15359/prne.18-35.2>

Mencía Guevara, A; Villalobos Moya, K; Rubí Zeledón, J; Granados Rojas, L; Hernández Aguirre, C; Brenes Monge, H. 2021. Evaluación de propiedades fisicoquímicas del frijol costarricense (*Phaseolus vulgaris*) como estrategia de diferenciación y valorización. Perspectivas rurales 18(35). Consultado 13 jul. 2022. Disponible en <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/perspectivasrurales/article/view/14787/24581>

Mendoza Sánchez, M. 2018. Inducción de metabolitos de interés nutracéutico en germinados de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y el efecto de su consumo en un modelo de dislipidemia. Tesis Ph.D. Querétaro, Universidad Autónoma de Querétaro. 107 p. Consultado 6 may 2024. Disponible en <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/1176>

Mojica, L; Meyer, A; Berhow, MA; de Mejía, EG. 2015. Bean cultivars (*Phaseolus vulgaris* L.) have similar high antioxidant capacity, in vitro inhibition of α -amylase and α -glucosidase while diverse phenolic composition and concentration. Food Research International 69:38-48. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2014.12.007>

Moses, T; Papadopoulou, KK; Osbourn, A. 2014. Metabolic and functional diversity of saponins, biosynthetic intermediates and semi-synthetic derivatives . Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology 49(6):439-462. DOI: <https://doi.org/10.3109/10409238.2014.953628>

Navarro Del Hierro, J; Piazzini, V; Reglero, G; Martin, D; Bergonzi, MC. 2020. In Vitro Permeability of Saponins and Sapogenins from Seed Extracts by the Parallel Artificial Membrane Permeability Assay: Effect of in Vitro Gastrointestinal Digestion. Journal of Agricultural and Food Chemistry 68(5):1297-1305.

Navarro-Saltos, GE; Intriago-Intriago, AP; Bustamante-Mieles, XA; Guerrero-Calero, JM. 2025. Análisis de estrategias para reducir la huella de carbono en la producción agroindustrial. Innova Science Journal 3(2):27-38. DOI: <https://doi.org/10.63618/omd/isj/v3/n2/51>

Nicolás-García, M; Perucini-Avendaño, M; Jiménez-Martínez, C; Perea-Flores, M de J; Gómez-Patiño, MB; Arrieta-Báez, D; Dávila-Ortiz, G. 2021. Bean phenolic compound changes during processing: Chemical interactions and identification . Journal of Food Science 86(3):643-655. DOI: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15632>

Peng, Z; Wu, Y; Fu, Q; Xiao, J. 2024. Free and bound phenolic profiles and antioxidant ability of eleven marine macroalgae from the South China Sea . *Frontiers in Nutrition* 11. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1459757>

Pillimué, JSU; Méndez, JRB; Beltrán, GAV; Jojoa, WA; Pillimué, JSU; Méndez, JRB; Beltrán, GAV; Jojoa, WA. 2024. Antifungal evaluation of saponins extracted from quinoa husk (*Chenopodium quinoa* Willd) against *Botrytis cinerea* in strawberry . *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín* 77(2):10679-10690. DOI: <https://doi.org/10.15446/RFNAM.V77N2.109082>

Pitura, K; Arntfield, SD. 2019. Characteristics of flavonol glycosides in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seed coats. *Food Chemistry* 272:26-32. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2018.07.220>

Rivas Medina, M. 2018. Identificación de Compuestos Bioactivos en Frijol Común (*Phaseolus vulgaris* L) Bioprocesado. Propiedades Antioxidante e Hipoglucemiante. Universidad Autónoma de Sinaloa. México. s. p.

Rocchetti, G; Gregorio, RP; Lorenzo, JM; Barba, FJ; Oliveira, PG; Prieto, MA; Simal-Gandara, J; Mosele, JI; Motilva, MJ; Tomas, M; Patrone, V; Capanoglu, E; Lucini, L. 2022. Functional implications of bound phenolic compounds and phenolics–food interaction: A review . *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 21(2):811-842.

Rochín-Medina, JJ; Mora-Rochín, S; Navarro-Cortez, RO; Tovar-Jimenez, X; Quiñones-Reyes, G; Ayala-Luján, JL; Aguayo Rojas, J. 2021. Contenido de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante de variedades de frijol sembradas en el estado de Zacatecas. *Acta Universitaria* 31:1-13. DOI: <https://doi.org/10.15174/au.2021.3059>

Rodríguez Madrera, R; Campa Negrillo, A; Ferreira Fernández, JJ. 2023. Modulation of the nutritional and functional values of common bean by farming system: organic vs. conventional. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 7:1282427.

Rodríguez Madrera, R; Campa Negrillo, A; Suárez Valles, B; Ferreira Fernández, JJ. 2020. Characterization of extractable phenolic profile of common bean seeds (*Phaseolus vulgaris* L.) in a Spanish diversity panel. Food Research International 138:109713. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109713>

Sánchez, M; Ruíz-Sánchez, E; Muñoz-Rodríguez, D; Chan Cupul, W; Medina-Dzul, K; Sánchez, M; Ruíz-Sánchez, E; Muñoz-Rodríguez, D; Chan Cupul, W; Medina-Dzul, K. 2022. Efecto de inoculantes microbianos en los compuestos bioactivos y actividad antioxidante del chile xcat'ik (*Capsicum annuum* L.). Biotecnia 24(3):123-131. DOI: <https://doi.org/10.18633/BIOTECNIA.V24I3.1691>

Sęczyk, Ł; Gawlik-Dziki, U; Świeca, M. 2021. Influence of Phenolic-Food Matrix Interactions on In Vitro Bioaccessibility of Selected Phenolic Compounds and Nutrients Digestibility in Fortified White Bean Paste. Antioxidants 10(11):1825. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox10111825>

Seneviratne, G; Jayasinghearachchi, HS. 2003. Phenolic acids: Possible agents of modifying N₂-fixing symbiosis through rhizobial alteration? Plant and Soil 252(2):385-395. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1024725511783>

Shahidi, F; Hossain, A. 2023. Importance of Insoluble-Bound Phenolics to the Antioxidant Potential Is Dictated by Source Material. Antioxidants 12(1):203.

Shahidi, F; Yeo, J. 2016. Insoluble-Bound Phenolics in Food. Molecules 21(9):1216. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules21091216>

Shimamura, M; Kumaki, T; Hashimoto, S; Saeki, K; Ayabe, S; Higashitani, A; Akashi, T; Sato, S; Aoki, T. 2022. Phenolic Acids Induce Nod Factor Production in Lotus japonicus–*Mesorhizobium* Symbiosis. Microbes and Environments 37(1):ME21094. DOI: <https://doi.org/10.1264/jsme2.ME21094>

- Sofi, PA; Mir, RR; Zargar, SM; Rani, S; Fatima, S; Shafi, S; Zaffar, A. 2022. What makes the beans (*Phaseolus vulgaris* L.) soft: insights into the delayed cooking and hard to cook trait. *Proceedings of the Indian National Science Academy* 88(2):142-159. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43538-022-00075-4>
- Sufar, EK; Hasanaliyeva, G; Wang, J; Bilsborrow, P; Rempelos, L; Volakakis, N; Baranski, M; Leifert, C. 2024. Effect of *Rhizobium* Seed Inoculation on Grain Legume Yield and Protein Content – a Systematic Review and Meta-Analysis. DOI: <https://doi.org/10.20944/preprints202404.0344.v1>
- Ulloa, JA; Rosas Ulloa, M; Ramírez Ramírez, JC; Ulloa Ángel, B. 2011. El frijol (*Phaseolus vulgaris*): su importancia nutricional y como fuente de fitoquímicos. *Fuente* 3(8). Consultado 9 jul. 2022. Disponible en <http://192.100.162.123:8080/bitstream/123456789/582/1/El%20frijol%20%28Phaseolus%20vulgari s%29%2c%20su%20importancia%20nutricional.pdf>
- Vinas, M; Irías-Mata, A; Chacón-Ordoñez, T; Quesada-Grosso, R; Arce-Villalobos, K; Holst-Sanjuán, A; Quesada-Román, I; Sandi-Bolaños, C. 2025. Polyphenols from Common Beans (*Phaseolus vulgaris* L.) with Antimycotoxigenic Potential against Fumonisin B1. *ACS Food Science & Technology* 5(2):537-544. DOI: <https://doi.org/10.1021/ACSFOODSCITECH.4C00640>
- Wang, K; Chen, X. 2025. Protective effect of flavonoids on oxidative stress injury in Alzheimer's disease. *Natural product research* 39(5):1272-1299. DOI: <https://doi.org/10.1080/14786419.2024.2345760>
- Wang, X; Contreras, M del M; Xu, D; Xing, C; Wang, L; Yang, D. 2020. Different distribution of free and bound phenolic compounds affects the oxidative stability of tea seed oil: A novel perspective on lipid antioxidation. *LWT* 129:109389. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109389>
- Wang, Y; Huang, M; Zhou, X; Li, H; Ma, X; Sun, C. 2025. Potential of natural flavonoids to target breast cancer angiogenesis (review). *British journal of pharmacology* 182(10):2235-2258. DOI: <https://doi.org/10.1111/BPH.16275>

Watson, RR. 2018. Polyphenols in Plants: Isolation, Purification and Extract Preparation. 2 ed. San Diego, San Diego: Elsevier Science & Technology. s.p.

Yang, QQ; Farha, AK; Cheng, L; Kim, G; Zhang, T; Corke, H. 2020. Phenolic content and in vitro antioxidant activity in common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) are not directly related to anti-proliferative activity. Food Bioscience 36:100662. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2020.100662>

Yang, QQ; Gan, RY; Ge, YY; Zhang, D; Corke, H. 2018. Polyphenols in Common Beans (*Phaseolus vulgaris* L.): Chemistry, Analysis, and Factors Affecting Composition. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety 17(6):1518-1539. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12391>

Yeo, J; Shahidi, F. 2015. Critical Evaluation of Changes in the Ratio of Insoluble Bound to Soluble Phenolics on Antioxidant Activity of Lentils during Germination. Journal of Agricultural and Food Chemistry 63(2):379-381. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf505632p>

Yin, W; Liu, M; Xie, J; Jin, Z; Ge, S; Guan, F; Liu, H; Zheng, M; Cai, D; Liu, J. 2022. Removal of bound polyphenols and its effect on structure, physicochemical and functional properties of insoluble dietary fiber from adzuki bean seed coat. LWT 169:114011. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2022.114011>

Zhang, L; Wu, T; Zhang, Y; Chen, Y; Ge, X; Sui, W; Zhu, Q; Geng, J; Zhang, M. 2023. Release of bound polyphenols from wheat bran soluble dietary fiber during simulated gastrointestinal digestion and colonic fermentation in vitro. Food Chemistry 402:134111. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2022.134111>

Zhu, L; Li, W; Deng, Z; Li, H; Zhang, B. 2020. The Composition and Antioxidant Activity of Bound Phenolics in Three Legumes, and Their Metabolism and Bioaccessibility of Gastrointestinal Tract . Foods 9(12):1816. DOI: <https://doi.org/10.3390/FOODS9121816>

