



EFFECTO DE LA INOCULACIÓN CON TRES MICROORGANISMOS SOBRE EL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE ARVEJA (*Pisum sativum* L.) BAJO DÉFICIT HÍDRICO

INOCULATION EFFECT OF THREE MICROORGANISMS ON GROWTH AND YIELD OF PEA (*Pisum sativum* L.) UNDER WATER DEFICIT

Diana Marcela Arias-Aguirre ¹

John Wilson Martínez-Osorio ²

Oscar Humberto Alvarado-Sanabria ³

Citación: Arias-Aguirre, D. M., Martínez-Osorio, J. W. y Alvarado-Sanabria, O. H. (2026). Efecto de la inoculación con tres microorganismos sobre el crecimiento y rendimiento de arveja (*Pisum sativum* L.) bajo déficit hídrico. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(1), 11 – 34. <https://doi.org/10.22490/21456453.8974>

¹ Ingeniero Agrónomo, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia.
diana.arias03@uptc.edu.co

² Magíster en Ciencias Agrarias. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia. john.martinez@uptc.edu.co

³ Ph. D (c). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia.
ohalvarados@unal.edu.co

RESUMEN

Contextualización: La arveja es una leguminosa de importancia comercial en Colombia que se destaca por su contenido nutricional. Por lo tanto, es importante buscar estrategias que permitan mejorar el rendimiento de esta especie en condiciones de estrés por déficit hídrico en el suelo.

Vacío de conocimiento: Se desconoce el efecto de múltiples microorganismos promotores de crecimiento vegetal (PGPM) en el cultivo de arveja variedad Santa Isabel sometido a diferentes condiciones de riego.

Propósito: Determinar el efecto de tres PGPM en el crecimiento y rendimiento de arveja (*Pisum sativum* L. variedad Santa Isabel) en condiciones hídricas óptimas y bajo estrés hídrico.

Metodología: Se llevó a cabo un diseño factorial en bolsas plásticas de 60 litros en

donde se evaluó la inoculación en semilla con *Bacillus amyloliquefaciens*, *Pseudomonas fluorescens* y *Trichoderma koningiopsis* y la aplicación de riego durante el ciclo del cultivo de 50 % o 100 % de la capacidad de campo (CC).

Resultados y conclusiones: La inoculación de PGPM en las semillas no mitigó los efectos del estrés hídrico al 50 % CC en la variedad Santa Isabel. La inoculación con *Pseudomonas fluorescens* resulta prometedora en condiciones más favorables de riego (100 % CC) al incrementar el peso seco de raíz, el uso eficiente del agua de riego y el rendimiento en vaina verde y en grano seco.

Palabras clave: conductancia estomática, estimulantes de crecimiento vegetal, estrés de sequía, rizósfera.

ABSTRACT

Contextualization: The pea crop is a commercially important legume in Colombia that stands out for its nutritional content. Therefore, it is important to pursue strategies to improve the yield of this species under conditions of water deficit stress in the soil.

Knowledge gap: The effect of multiple plant growth promoting microorganisms (PGPM) on the pea crop variety Santa Isabel subjected to different irrigation conditions is unknown.

Purpose: To determine the effect of three PGPM on pea plant (*Pisum sativum* L. var. Santa Isabel) growth and yield under optimal and water stress conditions.

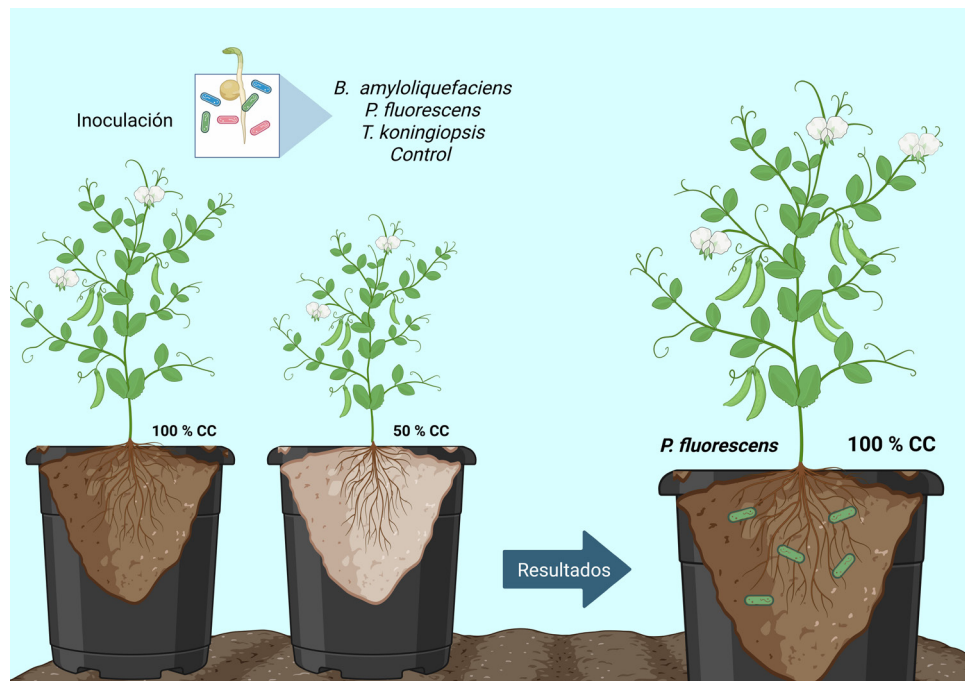
Methodology: A factorial design was carried out in 60 liter plastic bags where seed

inoculation with *Bacillus amyloliquefaciens*, *Pseudomonas fluorescens* and *Trichoderma koningiopsis* and irrigation application during the crop cycle of 50 % or 100 % of field capacity (CC) were evaluated.

Results and conclusions: PGPM inoculation of seeds did not mitigate the effects of water stress at 50 %CC on the variety Santa Isabel. *Pseudomonas fluorescens* inoculation is promising under more favorable irrigation conditions (100 %CC) by increasing root dry weight, irrigation use efficiency and green pod and dry grain yield.

Keywords: stomatal conductance, plant growth stimulants, drought stress, rhizosphere.

RESUMEN GRÁFICO



Fuente: autores, creado en <https://biorender.com/e07u090>

1 INTRODUCCIÓN

El agua es esencial en todas las etapas de crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que permite el transporte, absorción de nutrientes y procesos como la fotosíntesis (Sánchez-Díaz & Aguirreolea, 2013). Cuando las plantas no obtienen agua para satisfacer sus requerimientos hídricos se genera estrés por déficit hídrico, que ocurre comúnmente por fenómenos de sequías que surgen a menudo en ciertas regiones, como consecuencia del cambio climático (IPCC, 2023). Este estrés es una tensión abiótica que puede reducir significativamente el rendimiento de

los cultivos, ocasionando pérdidas económicas para los productores.

El estrés hídrico o por sequía afecta múltiples parámetros fisiológicos y morfológicos en las plantas, situación que desencadena reducciones del rendimiento. En *Pisum sativum* L. se han reportado reducciones en parámetros como el contenido de clorofila, número de hojas por planta, número de vainas, peso fresco y seco de la raíz, debido al estrés por sequía (Kausar et al., 2023), lo que indica la susceptibilidad de esta especie al estrés por déficit hídrico.

La arveja o guisante (*Pisum sativum* L.) es una leguminosa consumida a nivel mundial, tanto en fresco como en seco. Para 2023 la producción de arveja seca en el mundo fue de 13 763 334 toneladas en un área de 7 407 979 ha (FAO, 2025). Este cultivo destaca por sus efectos en la salud, gracias a su contenido de proteína y a sus propiedades benéficas para los sistemas cardiovascular y gastrointestinal (Dahl et al., 2012). En Colombia, este cultivo representa una importante fuente de ingresos para agricultores en los departamentos de Nariño, Cundinamarca y Boyacá, que para el año 2022 fueron los principales productores a nivel nacional (Agronet, 2024). Estudios en Nariño reportan que por lo general los productores de arveja de las áreas evaluadas son minifundistas (Torres-Martínez et al., 2020).

En el contexto agrícola actual, este cultivo ha demostrado gran potencial en cuanto a sostenibilidad ambiental, debido a que permite la fijación de nitrógeno atmosférico gracias a la simbiosis con los rizobios; se estima que mediante este mecanismo se pueden fijar hasta 75 kg de nitrógeno ha⁻¹ año⁻¹ (Garaté y Bonilla, 2013). Esta condición permitiría hacer un uso más eficiente de los recursos como los fertilizantes y, por lo tanto, reducir costos de producción asociados al uso de los mismos.

En ese mismo contexto de sostenibilidad ambiental, el uso de hongos y bacterias como microorganismos promotores de crecimiento vegetal (PGPM, Plant Growth Promoting Microorganism) ha exhibido múltiples beneficios asociados a la germinación, el crecimiento y el rendimiento de diferentes

especies cultivables, incluso en condiciones estresantes como la salinidad y el déficit hídrico (Bakhshandeh et al., 2020). Diversos autores han reportado que dichos beneficios tienen varios mecanismos, como la síntesis y regulación de hormonas (Akbari et al., 2024), la expresión de genes, la actividad enzimática y el aumento en el contenido de nitrógeno y fósforo (El-Esawi et al., 2018), entre otros. La implementación de PGPM en la agricultura moderna se convierte en una estrategia prometedora al incrementar el rendimiento con menores recursos económicos.

Arshad et al. (2008) han reportado que la inoculación de *Pseudomonas fluorescens* a la semilla de arveja aumenta el número de vainas y el rendimiento de las plantas respecto a plantas no inoculadas con o sin estrés por déficit hídrico en diferentes etapas fenológicas. Mientras que la inoculación de *Bacillus amyloliquefaciens* QST713 ha exhibido un aumento en la biomasa de plantas de alfalfa al incrementar parámetros como peso seco y fresco de brotes y raíces, así como el contenido de clorofila a con o sin estrés por sequía (Han et al., 2022). Por otro lado, You et al. (2022) reportan que *Trichoderma koningiopsis* ha exhibido un efecto positivo como control biológico y de promoción del crecimiento mediante la producción de compuestos orgánicos volátiles (COVs) que pueden aumentar de forma significativa variables como longitud radicular, peso fresco e incluso el contenido de clorofila en plantas de *Arabidopsis thaliana*, respecto a plantas sin el contacto con estos COVs.

Aunque el uso de PGPM beneficia el crecimiento y rendimiento de la arveja, existen

escasas investigaciones que evalúen la interacción del déficit hídrico y la inoculación con microorganismos en arveja variedad Santa Isabel, pese a ser una de las variedades más cultivadas en el territorio nacional. Por lo anterior, el objetivo de esta investigación

es determinar el efecto de los microorganismos *Bacillus amyloliquefaciens*, *Pseudomonas fluorescens* y *Trichoderma koningiopsis* sobre el crecimiento y rendimiento de arveja (*Pisum sativum* L.) en condiciones hídricas óptimas y bajo estrés hídrico.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

El efecto de los promotores de crecimiento *B. amyloliquefaciens*, *P. fluorescens* y *T. koningiopsis* en arveja (*Pisum sativum* L.) variedad Santa Isabel bajo déficit hídrico se evaluó en un ensayo bajo cubierta plástica en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), ubicada en Tunja, Boyacá, Colombia, con coordenadas geográficas 5° 33' 14.36" N y 73° 21' 29.71" O, a una altitud de 2711 m. La temperatura promedio durante el ciclo de cultivo fue de 18,06 °C.

Desinfección de semillas

Las semillas de arveja (*Pisum sativum* L.) variedad Santa Isabel se lavaron con agua destilada estéril y se llevó a cabo el proceso de desinfección descrito por Moreno-Conn et al. (2014) para las semillas de este cultivo. Se sumergieron en etanol al 85 % durante 20 segundos y luego en hipoclorito de sodio al 2 % durante 2 minutos; seguidamente fueron enjuagadas 5 veces con agua destilada estéril para evitar que quedaran residuos de dichas soluciones y se viera afectada la inoculación de los PGPM.

Inoculación de microorganismos

Las semillas de arveja fueron inoculadas con productos comerciales, cuyos ingredientes activos corresponden a los microorganismos promotores de crecimiento vegetal: *Bacillus amyloliquefaciens*, cepa QST713 en una concentración de 1×10^9 UFC g⁻¹, *Pseudomonas fluorescens* con 1×10^9 UFC ml⁻¹ y *Trichoderma koningiopsis* con 1×10^6 conidios ml⁻¹. Las semillas fueron sumergidas durante 30 minutos en 50 ml de solución con los diferentes inóculos. En el tratamiento control (sin inoculación de PGPM), las semillas fueron sumergidas en agua destilada estéril durante 30 minutos.

Diseño experimental

Se utilizó un diseño factorial con 8 tratamientos y 5 repeticiones, para un total de 40 unidades experimentales (UE). Cada UE consistió en una planta sembrada en bolsa plástica de 60 litros con sustrato (se usó un suelo franco arenoso con un 25 % de cascari-lla de arroz (m/m)). El primer factor correspondió al microorganismo inoculado en la

semilla (*Bacillus amyloliquefaciens*, *Pseudomonas fluorescens* y *Trichoderma koningiopsis*) o la ausencia de este (control). El segundo factor fue el régimen de riego (100 % y 50 % de humedad), donde el 100 % corresponde a la humedad necesaria para que el sustrato se encuentre a capacidad de campo (1 L por bolsa plástica) y 50 % a la mitad de dicho

volumen (0,5 L por bolsa plástica). Todas las plantas se regaron al 100 % CC desde la siembra hasta los 15 días después de la siembra (dds), momento luego del cual comenzaron los tratamientos de riego. La frecuencia de riego en el experimento fue cada 3 días. Los tratamientos se describen con detalle en la tabla 1.

Tabla 1.
Tratamientos aplicados en la investigación

Tratamientos	Factores	
	Microorganismo inoculado	Régimen de riego (% CC)
Control (100 %)	Sin inoculación	100
<i>B. amyloliquefaciens</i> (100 %)	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	100
<i>P. fluorescens</i> (100 %)	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	100
<i>T. koningiopsis</i> (100 %)	<i>Trichoderma koningiopsis</i>	100
Control (50 %)	Sin inoculación	50
<i>B. amyloliquefaciens</i> (50 %)	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	50
<i>P. fluorescens</i> (50 %)	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	50
<i>T. koningiopsis</i> (50 %)	<i>Trichoderma koningiopsis</i>	50

% CC: Porcentaje de humedad volumétrica a capacidad de campo del sustrato.

Fuente: autores.

Variables relacionadas con el estado hídrico de las plantas

Las mediciones de las variables mencionadas a continuación se realizaron en la hoja más joven totalmente expandida de la parte media del dosel de la planta entre las 9 y 12 horas del día. La conductancia estomática

(gs) ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) se determinó cada 15 días mediante un porómetro (DECAGON Devices Inc., Pullman, SC-1) y el potencial hídrico (Ψ_h) de la hoja al medio día, en dos ocasiones, con la cámara de presión Scholander (Model 615, PMS Instrument Company, Albany, OR, USA). Estas variables se midieron previo a la siguiente aplicación de riego.

Por otro lado, cada 15 días se determinó el contenido relativo de clorofila (SPAD) mediante un fluorómetro no modulado (MultispeQ V2.0, PhotosynQ) de acuerdo con Kuhlert et al. (2016), hasta llegar a la madurez de cosecha del cultivo.

Variables relacionadas con el crecimiento

Cuando las plantas de arveja alcanzaron la madurez de cosecha se determinó la longitud del tallo (cm) y la longitud de la raíz (cm). Se llevó a cabo un análisis de partición en el cual se determinó el peso seco (g) de las estipulas, folíolos, tallos y raíz de las plantas. Las muestras se secaron a 75 °C durante 48 horas en estufa de secado (Dies, D480 FU, Colombia) y se pesaron en una balanza digital (Sartorius Spain S.A., Acculab, VIC 612) con 0,01 g de precisión.

El área foliar se determinó teniendo en cuenta el área de estipulas y folíolos; para las estipulas se tomaron imágenes fotográficas que se analizaron mediante las diferentes configuraciones del *software* libre ImageJ®, mientras que para los folíolos se siguió la metodología descrita por Galindo (2006).

Variables relacionadas con el rendimiento

Se determinó el rendimiento en vaina verde (g planta^{-1}) y rendimiento en grano seco (g planta^{-1}), así como el componente de rendimiento número de vainas por planta. También se determinó el uso eficiente del agua de riego (IWUE), siguiendo la ecuación 1 de El-Hendawy et al. (2008):

$$IWUE = \frac{GY}{I} \quad (1)$$

donde: GY es el rendimiento en grano (g planta^{-1}) e I es la cantidad de riego aplicada (mm planta^{-1}).

Análisis estadístico

Con los datos obtenidos se realizó la prueba Durbin-Watson para determinar la correlación de los residuos, la prueba de normalidad Shapiro-Wilk y la de homogeneidad de varianza de Bartlett. Luego se realizó un análisis de varianza ANOVA y pruebas de Tukey ($p \leq 0,05$). Para las variables que no cumplieron con los supuestos de independencia, normalidad y homogeneidad de varianza se realizaron las pruebas no paramétricas de Kruskal Wallis y la prueba de Wilcoxon ($p \leq 0,05$). El análisis estadístico se realizó con la herramienta R versión 4.3.1 (R Core Team, 2024).

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estado hídrico

En condiciones de estrés hídrico usualmente ocurren cierres estomáticos para evitar la pérdida de agua, sin embargo, dicha estrategia interfiere con el intercambio gaseoso y en consecuencia con el proceso de fotosíntesis (Osakabe et al., 2014). Este fue el caso del presente estudio donde el estrés hídrico disminuyó significativamente la conductancia estomática a los 43, 57 y 85 días después de siembra (Tabla 2). Sin embargo, dicho efecto no presentó interacción con la inoculación con microorganismos (Tabla 2). Los microorganismos afectaron significativamente la conductancia estomática a los 15 y 43 días después de la siembra (dds), donde las plantas del tratamiento control y las inoculadas con *B. amyloliquefaciens* presentaron similar conductancia estomática (Figura 1). La inoculación con *P. fluorescens* redujo la conductancia estomática en estos dos momentos entre el 17,54 % y el 25,03 % respecto al control. Mientras que *T. koningiopsis* la redujo entre el 14,09 % y el 22,33 %, respecto al control.

Estos resultados indican un cierre de los estomas de plantas inoculadas con *P. fluorescens* y *T. koningiopsis*. Esta condición puede estar influenciada por la síntesis de ABA por estos microorganismos, ya que esta hormona regula el cierre estomático (Devireddy et al., 2021). De forma similar, Mekureyaw et al. (2022) reportaron que plantas de tomate en condiciones de sequía e inoculadas con *Pseudomonas fluorescens* G20-18 presenta-

ron conductancia estomática más baja que plantas sin inocular, lo que concuerda con los resultados obtenidos.

El contenido relativo de clorofila estuvo en un rango de $34,92 \pm 3,40$ y $50,77 \pm 3,11$ SPAD en el tiempo (15, 29, 43, 57, 71 y 85 dds) y no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos (datos no mostrados). Estos resultados contrastan con otros estudios en arveja, en los que el contenido de clorofila se incrementaba a medida que aumentaba la capacidad de retención de agua del suelo (10 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 %) durante 7 y 14 días (Al-Quraan et al., 2021). Por otro lado, la investigación de Juzoñ et al. (2019) reporta que el contenido de clorofila en arveja aumenta en el tiempo, situación contrastante a la de este experimento con la variedad Santa Isabel.

En cuanto al potencial hídrico de hoja al mediodía (Ψ_h), la interacción entre los factores no fue significativa. Sin embargo, sí hubo diferencias significativas para el régimen de riego: plantas al 100 % CC obtuvieron mayor potencial hídrico a los 64 dds (Tabla 3). Esto puede significar que el cierre estomático no fue suficiente para evitar la pérdida de agua y posiblemente disminuyó la turgencia celular, uno de los componentes del potencial hídrico. Por otro lado, el potencial osmótico también pudo haber disminuido como una estrategia para evitar la pérdida de agua (Basu et al., 2016). Estos resultados confirman que un riego de 50 % CC afecta el estado hídrico de la planta de arveja variedad Santa Isabel. Sin embargo, no se considera severo, ya que las plantas continuaron su desarrollo hasta

la madurez de cosecha y su disminución se considera un mecanismo para evitar la pérdida de turgor y continuar con la absorción de agua en condiciones de estrés hídrico.

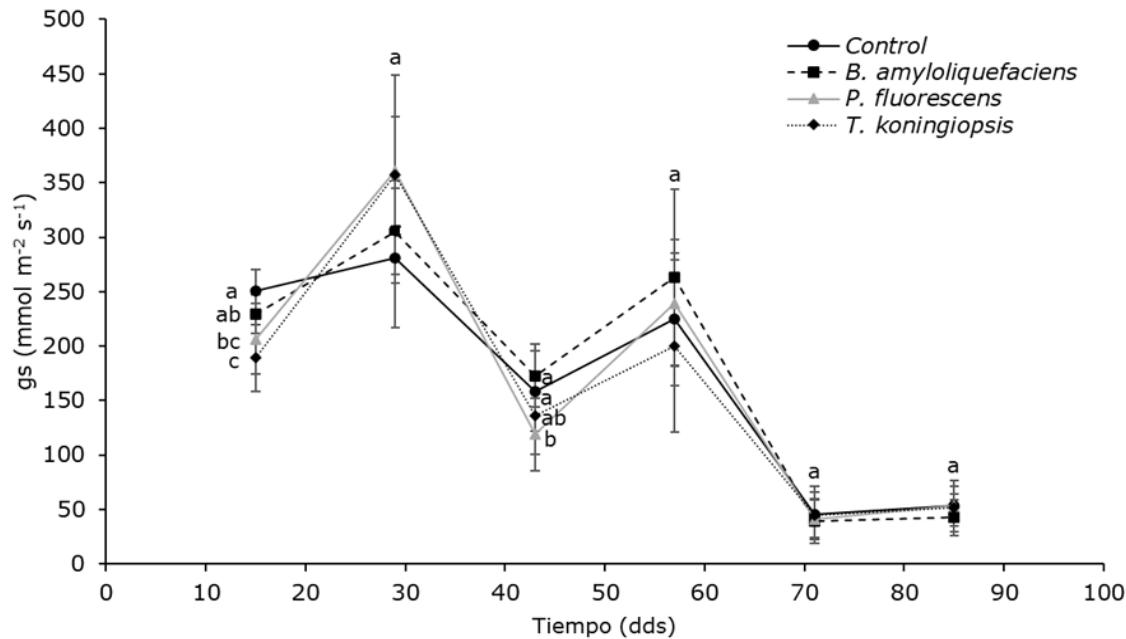


Figura 1. Conductancia estomática (gs) de plantas de arveja inoculadas con *B. amyloliquefaciens*, *P. fluorescens*, *T. koningiopsis* y sin inoculación. Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos según la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). Las barras verticales indican la desviación estándar (SD, $n=5$)

Fuente: autores.

Tabla 2.

p -valores para la variable conductancia estomática en plantas de arveja inoculadas con los PGPM, bajo condiciones de riego de 50 % CC y 100 % CC

Tiempo (dds)	p-valores		
	Microorganismo inoculado	Régimen de riego	Interacción
15	8,013x10 ⁻⁵	0,4151	0,6586
29	0,03452	0,86504	0,96990
43	0,002832	0,006071	0,726368
57	0,09445	7,3x10 ⁻⁵	0,11949
71	0,90310	0,08409	0,97218
85	0,378908	0,003113	0,330995

Fuente: autores.

Tabla 3.

Potencial hídrico de hoja al medio día en arveja con régimen de riego óptimo y deficiente (50 % y 100 % CC)

Tiempo (dds)	Ψ_h (MPa)		p-valor		
	50 %	100 %	Microorganismo inoculado	Régimen de riego	Interacción
64	-1,78 \pm 1,20 b	-1,60 \pm 0,23 a	0,28042	0,01809	0,91014
85	-1,61 \pm 0,15 a	-1,53 \pm 0,15 a	0,1189	0,1021	0,1798

Las medias de los tratamientos están con \pm SD ($n=5$). Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos según la prueba de Tukey ($p \leq 0,5$).

Fuente: autores.

Crecimiento

La interacción entre los factores para el peso seco de los órganos aéreos (vástago) de las plantas (Tabla 4), la longitud del tallo y el área foliar fue significativa (Tabla 5). Sin embargo, el régimen de riego también afectó de forma significativa estas variables a pesar de las pocas diferencias en la conductancia estomática y el potencial hídrico. Plantas inoculadas con *P. fluorescens* bajo 100 % CC presentaron mayor peso seco de los órganos aéreos. Sin embargo, la inoculación con este PGPM a 50 % CC redujo significativamente el peso seco de tallos, hojas y estipulas en comparación a plantas inoculadas con *T. koningiopsis*. Este comportamiento, sumado a que la inoculación con PGPM de plantas bajo estrés hídrico no presentó diferencias estadísticas entre sí, indica que ninguno de los PGPM evaluados mitiga el impacto del estrés hídrico a 50 % CC en el crecimiento del vástago para arveja variedad Santa Isabel.

Moreno (2009) establece que el contenido de agua afecta la expansión celular. Debido a la intensidad y prolongación del estrés, se infiere que dicho proceso se vio afectado, lo que se manifiesta en la reducción del área foliar y en el peso seco de tallos, hojas y estipulas. La reducción del área foliar también puede estar asociada a la senescencia de las hojas como resultado del estrés hídrico (Etienne et al., 2018). Estas situaciones desencadenan una disminución de la capacidad fotosintética de las plantas, lo que afecta de forma negativa la producción de biomasa y en consecuencia el rendimiento del cultivo (Figura 3). Los resultados obtenidos concuerdan con el estudio de Kausar et al. (2023), en el cual se determinó que el déficit hídrico redujo significativamente el peso seco del vástago de arveja variedad Metior.

La sequía también puede desencadenar limitaciones o deficiencias nutricionales en las plantas al impedir el transporte y la ab-

sorción de nutrientes (Etienne et al., 2018). Al respecto, Prudent et al. (2016) determinaron que en *Pisum sativum* L. cv. Caméor, la absorción de nitrógeno, así como el crecimiento del vástago disminuye a medida que se reduce la disponibilidad de agua. Por lo que la reducida absorción de nitrógeno pue-

de estar relacionada con la baja producción de biomasa de las plantas bajo 50 % CC, ya que este nutriente es indispensable para la formación de proteínas, ácidos nucleicos, fitohormonas y metabolitos secundarios (Hawkesford et al., 2023).

Tabla 4.

Peso seco de tallos, hojas y estípulas de plantas de arveja inoculadas con los PGPM, bajo condiciones de riego de 50 % CC y 100 % CC

Tratamiento	Peso seco (g)		
	Tallos	Hojas	Estípulas
<i>Control (100 %)</i>	3,19 ± 1,79 abc	4,07 ± 0,83 b	3,58 ± 1,12 abc
<i>B. amyloliquefaciens (100 %)</i>	4,58 ± 2,30 a	4,66 ± 1,86 b	3,89 ± 1,51 a
<i>P. fluorescens (100 %)</i>	5,51 ± 1,93 a	5,75 ± 1,46 abc	4,49 ± 1,04 a
<i>T. koningiopsis (100 %)</i>	3,22 ± 0,88 ab	4,06 ± 0,99 bc	3,19 ± 0,79 ab
<i>Control (50 %)</i>	2,07 ± 0,60 c	2,02 ± 0,74 de	1,68 ± 0,57 d
<i>B. amyloliquefaciens (50 %)</i>	2,47 ± 1,00 bc	3,30 ± 1,05 cde	2,77 ± 0,76 cd
<i>P. fluorescens (50 %)</i>	1,75 ± 0,44 c	1,62 ± 0,55 e	1,71 ± 0,36 d
<i>T. koningiopsis (50 %)</i>	2,37 ± 0,39 bc	2,88 ± 0,65 d	2,05 ± 0,81 bcd
<i>p-valor interacción</i>	0,0009479	0,0001866	0,0002169
<i>p-valor microorganismo inoculado</i>	0,5038	0,8633	0,8764
<i>p-valor régimen de riego</i>	1,038x10 ⁻⁵	2,754x10 ⁻⁷	3,668x10 ⁻⁷

Las medianas de los tratamientos están con ± SD (n=5). Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos según la prueba de Wilcoxon (p ≤ 0,05).

Fuente: autores.

Tabla 5.

Longitud del tallo, longitud radical y área foliar de plantas de arveja inoculadas con los PGPM, bajo condiciones de riego de 50 % CC y 100 % CC

Tratamiento	Longitud (cm)		Área foliar (cm ²)
	Tallo	Radical	
Control (100 %)	111,1 ± 11,04 a	23,46 ± 5,48 a	624,29 ± 60,36 ab
<i>B. amyloliquefaciens</i> (100 %)	120,0 ± 7,08 a	23,38 ± 4,69 a	752,72 ± 22,71 a
<i>P. fluorescens</i> (100 %)	120,1 ± 25,69 abc	21,92 ± 5,59 a	745,08 ± 102,40 a
<i>T. koningiopsis</i> (100 %)	111,3 ± 9,83 ab	18,46 ± 3,23 a	541,51 ± 197,41 abc
Control (50 %)	78,6 ± 12,15 c	19,68 ± 2,73 a	440,45 ± 107,78 d
<i>B. amyloliquefaciens</i> (50 %)	100,5 ± 22,32 bcd	22,34 ± 4,88 a	461,71 ± 142,83 bcd
<i>P. fluorescens</i> (50 %)	88,6 ± 8,06 cd	23,76 ± 2,43 a	386,78 ± 110,13 cd
<i>T. koningiopsis</i> (50 %)	89,0 ± 36,99 cd	22,72 ± 3,55 a	464,82 ± 75,61 cd
<i>p</i> -valor interacción	0,001773	0,1884	0,000408
<i>p</i> -valor microorganismo inoculado	0,7157	0,5767	0,355
<i>p</i> -valor régimen de riego	3,732x10 ⁻⁶	0,8129	3,278x10 ⁻⁶

Las medianas de los tratamientos están con ± SD (n=5). Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos según la prueba de Wilcoxon ($p \leq 0,05$). La variable longitud radical se analizó según la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$).

Fuente: autores.

A diferencia del peso seco de los órganos aéreos de las plantas, el comportamiento del peso seco de la raíz fue afectado solo por la inoculación con los PGPM. En la figura 2 se evidencia el aumento significativo del peso seco de la raíz de plantas inoculadas con *Pseudomonas fluorescens*, respecto a plantas sin inoculación (los *p*-valores para la interacción entre factores, el factor microor-

ganismo inoculado y el factor régimen de riego fueron 0,259380, 0,009619, 0,814722, respectivamente).

En el cultivo de arveja se ha reportado que *Pseudomonas fluorescens* SPB2137gfp sintetiza auxinas, específicamente AIA e incluso puede suprimir el efecto inhibidor del aluminio en el crecimiento radicular (Belimov et al., 2022). La producción de auxi-

nas por *Pseudomonas fluorescens* podría explicar el aumento del peso seco de la raíz. Estudios en fríjol demuestran que el AIA producido por *Pseudomonas putida* GR12-2 estimula el crecimiento radicular, aumentando el número de raíces adventicias (Patton & Glick, 2002). Por otro lado, la longitud radical no presentó diferencias significativas entre los tratamientos (Tabla 5), pero la longitud aérea sí. Esto se corrobora al analizar la relación peso seco del vástago (peso seco de tallos, hojas y estípulas): peso seco de la

raíz y la relación área foliar: peso seco de la raíz (Tabla 6), evidenciando que las plantas sometidas a estrés hídrico limitaron el crecimiento aéreo para que sus reservas se destinaran al crecimiento radical y así continuar la búsqueda de agua y nutrientes. Este efecto es aún más marcado con la inoculación de *Pseudomonas fluorescens*. Esta relación entre el crecimiento aéreo y el crecimiento de la raíz concuerda con Moreno (2009) como uno de los principales efectos del estrés hídrico en las plantas.

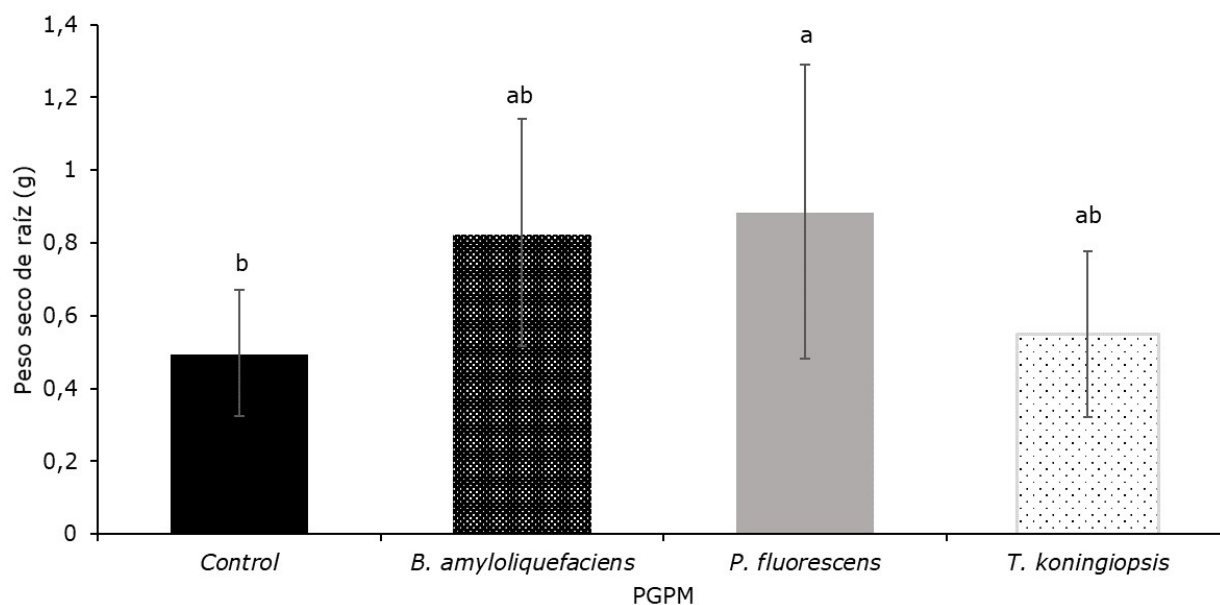


Figura 2. Peso seco de raíz de plantas de arveja inoculadas con los microorganismos *B. amyloliquefaciens*, *P. fluorescens*, *T. koningiopsis* y en ausencia de estos. Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos según Tukey ($p \leq 0,05$). Las barras verticales indican la desviación estándar ($n=5$)

Fuente: autores.

Tabla 6.

Relación peso seco vástago:raíz y área foliar:peso seco de raíz

Tratamiento	Relaciones	
	Vástago: raíz (g g ⁻¹)	Área foliar: raíz (cm ² g ⁻¹)
Control (100 %)	20,36 ± 11,11 a	1490,63 ± 707,05 a
<i>B. amyloliquefaciens</i> (100 %)	16,15 ± 3,10 bc	885,59 ± 222,01 abc
<i>P. fluorescens</i> (100 %)	17,36 ± 14,98 abc	1069,83 ± 740,78 abc
<i>T. koningiopsis</i> (100 %)	26,23 ± 11,36 ab	1278,80 ± 755,67 ab
Control (50 %)	11,29 ± 4,82 cd	847,68 ± 188,15 bc
<i>B. amyloliquefaciens</i> (50 %)	11,81 ± 6,93 abcd	793,43 ± 394,97 abc
<i>P. fluorescens</i> (50 %)	6,78 ± 3,00 d	381,27 ± 381,92 c
<i>T. koningiopsis</i> (50 %)	12,02 ± 3,29 bc	827,80 ± 229,56 bc
<i>p</i> -valor interacción	0,00271	0,04709
<i>p</i> -valor microorganismo inoculado	0,2038	0,5099
<i>p</i> -valor régimen de riego	0,0001525	0,002677

Las medianas de los tratamientos están con ± SD (n=5). Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos según la prueba de Wilcoxon ($p \leq 0,05$).

Fuente: autores.

Rendimiento

El rendimiento en vaina verde presentó diferencias significativas con la interacción de los factores ($p = 0,0001365$). La inoculación con *Pseudomonas fluorescens* aumentó

el rendimiento en vaina verde de las plantas en condiciones de riego al 100 % CC (Figura 3). La inoculación con los demás PGPM no incrementó el rendimiento bajo ninguno de los regímenes de riego evaluados.

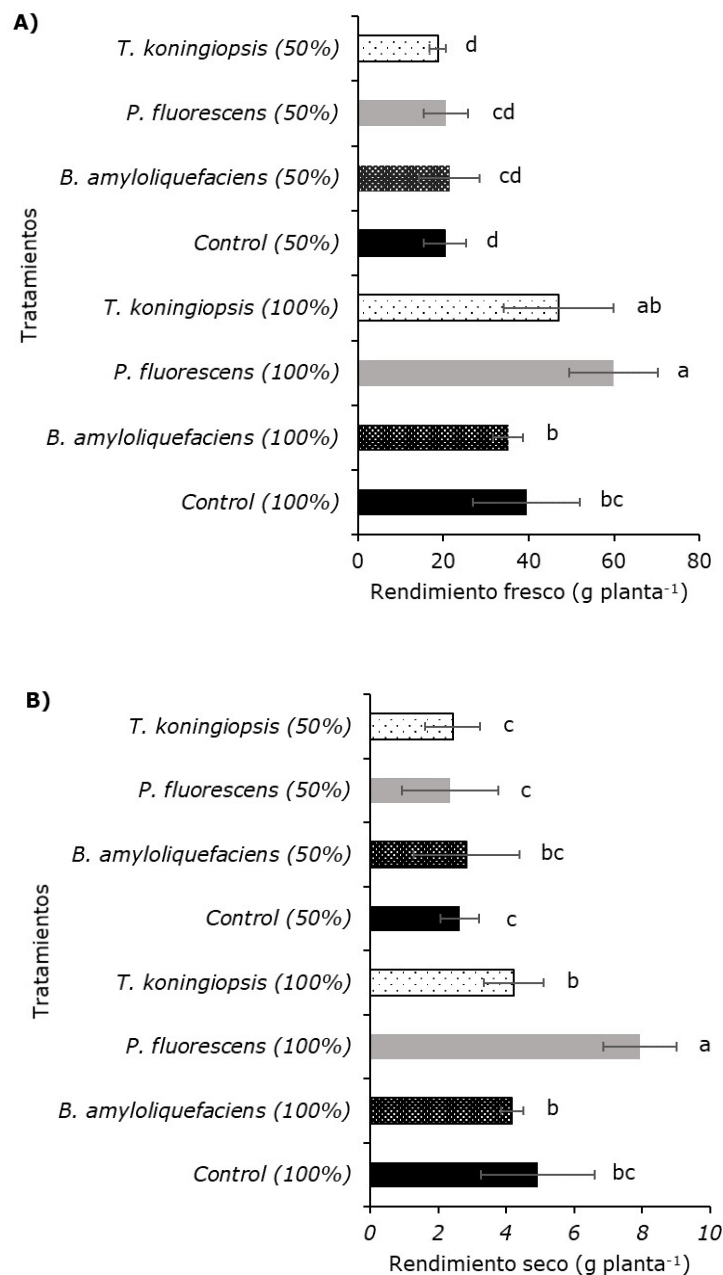


Figura 3. A) Rendimiento en fresco y B) Rendimiento en seco de plantas de arveja inoculadas con los PGPM, bajo condiciones de riego de 50 % CC y 100 % CC. Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos según la prueba de Wilcoxon ($p \leq 0,05$).

Fuente: autores.

Arshad et al. (2008) determinaron que plantas de arveja inoculadas con *Pseudomonas fluorescens* obtuvieron mayor ren-

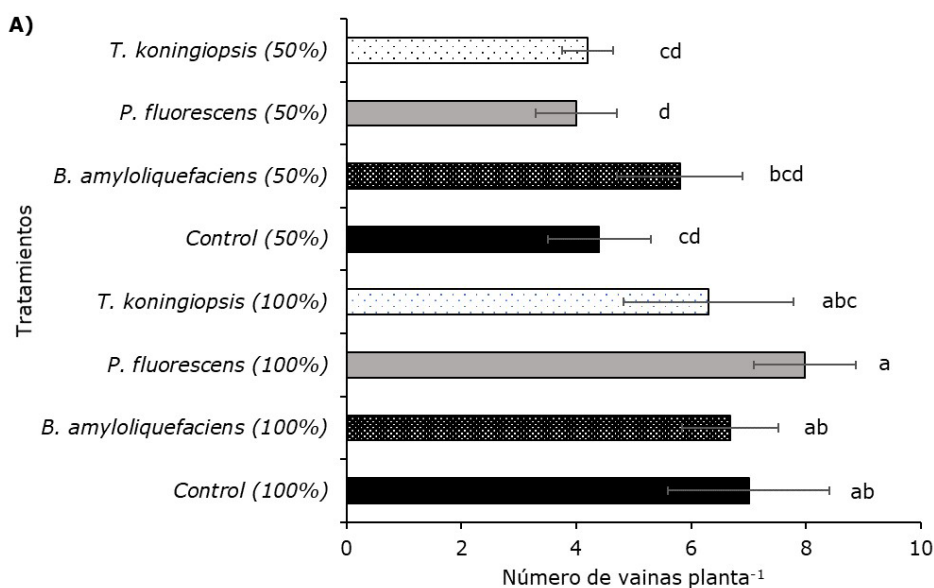
dimiento que plantas sin inocular con y sin estrés por déficit hídrico en diferentes etapas (vegetativa, floración y llenado de vai-

na), debido a que este PGPM contiene la enzima ACC-desaminasa y puede reducir los niveles de etileno de la planta y retrasar la maduración de las vainas. Esto ocurre debido a que la enzima ACC-desaminasa actúa sobre el ácido 1-amino-ciclopropano-1-carboxílico (ACC), el cual es un precursor de la biosíntesis del etileno; también se ha reportado que algunas especies y cepas de *Pseudomonas* utilizan la ACC como fuente de nitrógeno (Belimov et al., 2015). Los efectos de la ACC-desaminasa podrían incurrir en un mejor llenado de vaina en *P. fuorescens* (100 %), sin embargo, el estrés hídrico en *P. fuorescens* (50 %) pudo ser muy prolongado e intenso, impidiendo dilucidar el efecto de la ACC-desaminasa en el llenado de las vainas.

Por otra parte, se ha reportado que la rizobacteria *Pseudomonas fuorescens* produce fitohormonas como AIA y ácido giberélico (GA) (Bhardwaj et al., 2024). La aplicación foliar de estos reguladores de crecimiento ha demostrado un aumento del rendimiento en diferentes variedades de arveja (Hussain et

al., 2020), por lo que, en este caso, el incremento del rendimiento puede estar relacionado con la síntesis de estos reguladores.

El rendimiento en fresco se relaciona directamente con el número de vainas por planta obtenido (coeficiente de correlación de Pearson de 0,78 con un p valor de $2,24 \times 10^{-9}$), ya que en la mayoría de los casos plantas con riego a 100 % CC poseen un número de vainas significativamente superior a plantas con 50 % CC ($p = 0,01757$) (Figura 4). Kausar et al. (2023) reportan el mismo comportamiento en las variedades Sarsabz y Metior bajo estrés hídrico similar al de la presente investigación (capacidad de campo del suelo al 50 %), puesto que no se presentaron diferencias significativas entre plantas regadas al 100 % con o sin PGPM. En contraste, Arshad et al. (2008) determinaron que la inoculación con *P. fuorescens* aumentaba significativamente el número de vainas, tanto en condiciones de estrés hídrico en diferentes etapas fenológicas como sin estrés hídrico.



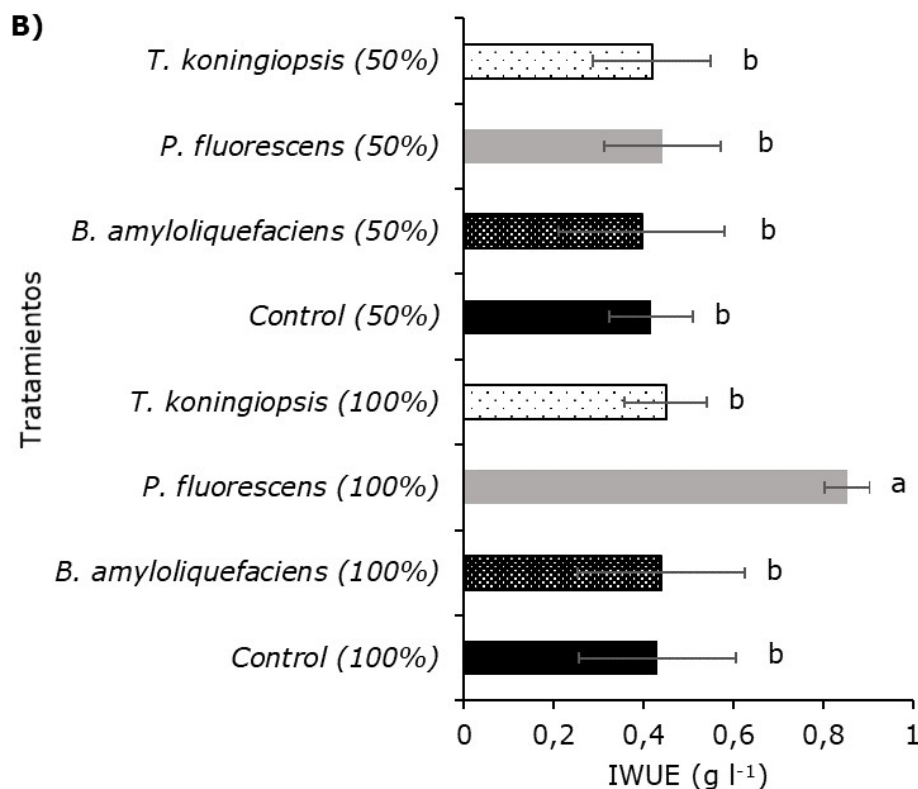


Figura 4. A) Número de vainas por planta de arveja y B) Uso eficiente del agua de riego en arveja inoculada con los PGPM y sin inoculación, bajo condiciones de riego de 50 % CC y 100 % CC. Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos según la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). Las barras verticales indican la desviación estándar ($n=5$)

Fuente: autores.

Respecto al rendimiento en seco, se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos ($p = 0,001617$) donde el tratamiento *P. fluorescens* (100 %) presentó el mayor rendimiento en seco (Figura 3). Estos resultados, junto a los relacionados con el crecimiento, indican que la inoculación a la semilla con los PGPM evaluados no mitiga el estrés hídrico; sin embargo, la inoculación con *Pseudomonas fluorescens* en condiciones de riego óptimo es prometedora al aumentar aproximadamente 3 g planta⁻¹ respecto a plantas control. Empleando este microorga-

nismo se han reportado aumentos hasta de 6,4 g planta⁻¹ en arveja sin déficit hídrico (Arshad et al., 2008).

El aumento en el rendimiento con la inoculación de este PGPM puede deberse a que algunas cepas de *P. fluorescens* tienen la capacidad de solubilizar fosfatos (Browne et al., 2009). Esta cualidad fertilizante podría ocasionar mayor rendimiento de plantas de arveja junto al adecuado suministro de riego, teniendo en cuenta que el fósforo es un macronutriente que cumple una función es-

tructural al ser parte de los ácidos nucleicos y contribuye con la fotosíntesis al ser parte de la molécula de ATP (Hawkesford et al., 2023). En maíz (*Zea mays* L. var *saccharata*), Zarei et al. (2019) reportan que la inoculación con las cepas P1, P3 y P8 de *Pseudomonas fluorescens* con habilidad de solubilizar fosfatos aumenta de forma significativa el rendimiento, tanto en mazorca como semillas en conserva, así como el uso eficiente del agua. Samavat et al. (2012) también encontraron que los aislados de *P. fluorescens* UTPF68 y UTPF109 tienen capacidad de solubilización de fosfato mineral y que la inoculación con este PGPM aumenta la absorción de fósforo y el contenido de nitrógeno en plantas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.).

Teniendo en cuenta el rendimiento en seco y la cantidad de agua de riego suministrada, se determinó que se presentaron diferencias significativas para el uso eficiente del agua de riego ($p = 0,0023068$). Plantas tratadas con *P. fluorescens* (100 %) fueron más eficientes en el uso del agua de riego ($0,85 \pm 0,05$), respecto a los demás tratamientos (Figura 4). Esto demuestra el potencial de este microorganismo para incrementar el rendimiento de esta especie, que a su vez se relaciona con el aumento de peso seco de la raíz de plantas inoculadas con *P. fluorescens*, ya que al aumentar la superficie aumenta la absorción y disponibilidad de recursos como agua y nutrientes.

4 CONCLUSIONES

Los PGPM *Bacillus amyloliquefaciens*, *Pseudomonas fluorescens* y *Trichoderma koningiopsis* no mitigan el efecto del estrés hídrico a un 50 % CC; sin embargo, la inoculación de las semillas de arveja variedad Santa Isabel con *Pseudomonas fluorescens* resulta prometedora a un 100 % CC al incrementar el peso seco de raíz, el uso eficiente del agua de riego y el rendimiento.

Se sugiere realizar investigaciones con estos microorganismos en condiciones de cultivo a campo abierto y en otras variedades de arveja, para determinar si dichos microorganismos presentan el mismo comportamiento. Así mismo, evaluar su efecto en condiciones de estrés hídrico menos intenso y prolongado.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Autor 1: metodología, investigación, análisis de datos, conceptualización, escritura, borrador original, revisión y edición.

Autor 2: adquisición de recursos, supervisión, logística, revisión y edición.

Autor 3: conceptualización, metodología, análisis de datos, escritura, revisión y edición.

AGRADECIMIENTOS

Al grupo de investigación Manejo biológico de cultivos y la Dirección de Investigaciones de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), por el apoyo para el desarrollo del proyecto SGI

3652 “Efecto de los promotores de crecimiento *B. amyloliquefaciens*, *P. fluorescens* y *T. harzianum* en arveja (*Pisum sativum* L.) bajo déficit hídrico en condiciones controladas en Tunja, Boyacá”.

FINANCIAMIENTO

El estudio se realizó en el marco del proyecto SGI 3652 “Efecto de los promotores de crecimiento *B. amyloliquefaciens*, *P. fluorescens* y *T. harzianum* en arveja (*Pisum sativum* L.) bajo déficit hídrico en condiciones controladas en Tunja, Boyacá” financiado

por la convocatoria 14 de 2023 - Jóvenes Investigadores 2024 - Aportando a la Agenda de Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 2030 de la Dirección de Investigaciones de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC).

USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

No aplica.

CONFLITO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

LITERATURA CITADA

Agronet. (2024). Reporte: Área, Producción y Rendimiento Nacional por Cultivo. ht-

[tps://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1](https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1)

- Akbari, S. I., Prismantoro, D., Kusmoro, J., Hasan, R., Nurzaman, M., Rossiana, N. & Doni, F. (2024). Isolation, screening, and molecular characterization of indigenous *Trichoderma* isolates from West Java, Indonesia and their plant growth-promoting capability on rice plants (*Oryza sativa* L.). *Journal of King Saud University - Science*, 36(9), 103378. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2024.103378>
- Al-Quraan, N. A., Al-Ajlouni, Z. I. & Qawasma, N. F. (2021). Physiological and biochemical characterization of the gaba shunt pathway in pea (*Pisum sativum* L.) seedlings under drought stress. *Horticulturae*, 7(6). <https://doi.org/10.3390/horticulturae7060125>
- Arshad, M., Shaharoona, B. & Mahmood, T. (2008). Inoculation with *Pseudomonas* spp. Containing ACC-Deaminase Partially Eliminates the Effects of Drought Stress on Growth, Yield, and Ripening of Pea (*Pisum sativum* L.). *Pedosphere*, 18(5), 611-620. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(08\)60055-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(08)60055-7)
- Bakhshandeh, E., Gholamhosseini, M., Yaghoubian, Y. & Pirdashti, H. (2020). Plant growth promoting microorganisms can improve germination, seedling growth and potassium uptake of soybean under drought and salt stress. *Plant Growth Regulation*, 90, 123-136. <https://doi.org/10.1007/s10725-019-00556-5>
- Basu, S., Ramegowda, V., Kumar, A. & Pereira, A. (2016). Plant adaptation to drought stress. *F1000Research*, 5. Faculty of 1000 Ltd. <https://doi.org/10.12688/F1000RESEARCH.7678.1>
- Belimov, A. A., Dodd, I. C., Safronova, V. I., Shaposhnikov, A. I., Azarova, T. S., Makarova, N. M., Davies, W. J. & Tikhonovich, I. A. (2015). Rhizobacteria that produce auxins and contain 1-amino-cyclopropane-1-carboxylic acid deaminase decrease amino acid concentrations in the rhizosphere and improve growth and yield of well-watered and water-limited potato (*Solanum tuberosum*). *Annals of Applied Biology*, 167(1), 11-25. <https://doi.org/10.1111/aab.12203>
- Belimov, A. A., Shaposhnikov, A. I., Azarova, T. S., Syrova, D. S., Kitaeva, A. B., Ulyanich, P. S., Yuzikhin, O. S., Sekste, E. A., Safronova, V. I., Vishnyakova, M. A., Tsyganov, V. E. & Tikhonovich, I. I. (2022). Rhizobacteria Mitigate the Negative Effect of Aluminum on Pea Growth by Immobilizing the Toxicant and Modulating Root Exudation. *Plants*, 11(18), 2416. <https://doi.org/10.3390/plants11182416>
- Bhardwaj, T., Singh, R., Singh, H., Bhanwaria, R., Gandhi, S. G., Bhardwaj, R., Ahmad, A. & Ahmad, P. (2024). *Pseudomonas* consortium improves soil health and alleviates cadmium (Cd) toxicity in *Brassica juncea* L. via biochemical and *in silico* approaches. *Plant Stress*, 14, 100611. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100611>
- Browne, P., Rice, O., Miller, S. H., Burke, J., Dowling, D. N., Morrissey, J. P. & O'Gara, F. (2009). Superior inorganic phosphate solubilization is linked to phylogeny within the *Pseudomonas fluorescens*

- complex. *Applied Soil Ecology*, 43(1), 131-138. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2009.06.010>
- Dahl, W. J., Foster, L. M. & Tyler, R. T. (2012). Review of the health benefits of peas (*Pisum sativum* L.). *British Journal of Nutrition*, 108, Issue S1. <https://doi.org/10.1017/S0007114512000852>
- Devireddy, A. R., Zandalinas, S. I., Fichman, Y. & Mittler, R. (2021). Integration of reactive oxygen species and hormone signaling during abiotic stress. *Plant Journal*, 105(2), 459-476. <https://doi.org/10.1111/tpj.15010>
- El-Esawi, M. A., Alaraidh, I. A., Alsahli, A. A., Alamri, S. A., Ali, H. M. & Alayafi, A. A. (2018). *Bacillus firmus* (SW5) augments salt tolerance in soybean (*Glycine max* L.) by modulating root system architecture, antioxidant defense systems and stress-responsive genes expression. *Plant Physiology and Biochemistry*, 132, 375-384. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.09.026>
- El-Hendawy, S. E., Adb El-Lattief, E. A., Ahmed, M. S., & Schmidhalter, U. (2008). Irrigation rate and plant density effects on yield and water use efficiency of drip-irrigated corn. *Agricultural Water Management*, 95(7), 836-844. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.02.008>
- Etienne, P., Diquelou, S., Prudent, M., Salon, C., Maillard, A. & Ourry, A. (2018). Macro and Micronutrient Storage in Plants and Their Remobilization When Facing Scarcity: The Case of Drought. *Agriculture*, 8(1), 14. <https://doi.org/10.3390/agriculture8010014>
- FAO. (2025). Cultivos y productos de ganadería: área cosechada y producción de guisantes secos en el mundo en 2023. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>. Licencia: CC-BY-4.0.
- Galindo, J. R. (2006). Desarrollo de un modelo explicativo de la productividad potencial del cultivo de arveja (*Pisum Sativum* L.) Var. Santa Isabel bajo condiciones de la Sabana de Bogotá. Agrosavia. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/35017>
- Garaté, A. y Bonilla, I. (2013). Nutrición mineral y producción vegetal. In J. Azcón-Bieto & M. Talón (Eds.), *Fundamentos de Fisiología Vegetal*, 2nd ed, 143-164. McGraw-Hill Interamericana de España, S.L.
- Han, L., Zhang, M., Du, L., Zhang, L. & Li, B. (2022). Effects of *Bacillus amyloliquefaciens* QST713 on Photosynthesis and Antioxidant Characteristics of Alfalfa (*Medicago sativa* L.) under Drought Stress. *Agronomy*, 12(9), 2177. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092177>
- Hawkesford, M. J., Cakmak, I., Coskun, D., De Kok, L. J., Lambers, H., Schjoerring, J. K. & White, P. J. (2023). Chapter 6 - Functions of macronutrients. In Z. Rengel, I. Cakmak, & P. J. White (Eds.), *Marschner's Mineral Nutrition of Plants (Fourth Edition)*, 201-281. Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819773-8.00019-8>
- Hussain, K., Anwer, S., Nawaz, K., Malik, M. F., Zainab, N., Nazeer, A., Bashir, Z., Ali, S.

- S., Siddiqi, E. H., Bhatti, K. H. & Majeed, A. (2020). Effect of foliar applications of iaa and ga3 on growth, yield and quality of pea (*Pisum sativum* L.). *Pakistan Journal of Botany*, 52(2), 447-460. [https://doi.org/10.30848/PJB2020-2\(32\)](https://doi.org/10.30848/PJB2020-2(32))
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). Water. In Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 551-712. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.006>
- Juzoń, K., Czyczyło-Mysza, I., Ostrowska, A., Marcińska, I. & Skrzypek, E. (2019). Chlorophyll fluorescence for prediction of yellow lupin (*Lupinus luteus* L.) and pea (*Pisum sativum* L.) susceptibility to drought. *Photosynthetica*, 57(4), 950-959. <https://doi.org/10.32615/ps.2019.102>
- Kausar, A., Zahra, N., Zahra, H., Hafeez, M. B., Zafer, S., Shahzadi, A., Raza, A., Djalic, I. & Prasad, P. V. (2023). Alleviation of drought stress through foliar application of thiamine in two varieties of pea (*Pisum sativum* L.). *Plant Signaling and Behavior*, 18(1). <https://doi.org/10.1080/15592324.2023.2186045>
- Kuhlgert, S., Austic, G., Zegarac, R., Osei-Bonsu, I., Hoh, D., Chilvers, M. I., Roth, M. G., Bi, K., TerAvest, D., Weebadde, P. & Kramer, D. M. (2016). MultispeQ Beta: A tool for large-scale plant phenotyping connected to the open photosynQ network. *R. Soc. Open Sci.* 3. <https://doi.org/10.1098/rsos.160592>
- Mekureyaw, M. F., Pandey, C., Hennessy, R. C., Nicolaisen, M. H., Liu, F., Nybroe, O. & Roitsch, T. (2022). The cytokinin-producing plant beneficial bacterium *Pseudomonas fluorescens* G20-18 primes tomato (*Solanum lycopersicum*) for enhanced drought stress responses. *Journal of Plant Physiology*, 270, 153629. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jplph.2022.153629>
- Moreno-Conn, L. M., Pérez, A., Ramírez, M. y Franco, M. (2014). Efecto de la temperatura de almacenamiento sobre la viabilidad de bacterias simbióticas fijadoras de nitrógeno utilizadas en la elaboración de inoculantes biológicos para arveja (*Pisum sativum*) y soya (*Glycine max*). *Revista Colombiana de Biotecnología*, 16(2), 45-56. <https://doi.org/https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v16n2.47244>
- Moreno, L. P. (2009). Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 27(2), 179-191. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180316234006>
- Osakabe, Y., Osakabe, K., Shinozaki, K. & Tran, L. S. P. (2014). Response of plants to water stress. *Frontiers in Plant Science*, 5. Frontiers Research Foundation. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00086>
- Patten, C. L. & Glick, B. R. (2002). Role of *Pseudomonas putida* indoleacetic acid in development of the host plant root system. *Applied and Environmental Mi-*

- crobiology*, 68(8), 3795-3801. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.8.3795-3801.2002>
- Prudent, M., Vernoud, V., Girodet, S. & Salon, C. (2016). How nitrogen fixation is modulated in response to different water availability levels and during recovery: A structural and functional study at the whole plant level. *Plant and Soil*, 399(1), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2674-3>
- R Core Team. (2024). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing.
- Samavat, S., Samavat, S., Mafakheri, S., & Shakouri, J. (2012). Promoting common bean growth and nitrogen fixation by the co-inoculation of *Rhizobium* and *Pseudomonas fluorescens* isolates. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 18(3), 387-395. <https://www.agrojournal.org/18/03-11-12.pdf>
- Sánchez-Díaz, M. y Aguirreolea, J. (2013). El agua en la planta. Movimiento del agua en el sistema suelo-planta-atmósfera. In J. Azcón-Bieto & M. Talón (Eds.), *Fundamentos de Fisiología Vegetal*, 2nd ed, 25-40. McGraw-Hill Interamericana de España, S.L.
- Torres-Martínez, F. J., Rivadeneira-Miranda, C. N. & Castillo-Marín, Á. J. (2020). Pea production and commercialization in the department of Nariño-Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 31(1), 129-140. <https://doi.org/10.15517/AM.V31I1.36776>
- You, J., Li, G., Li, C., Zhu, L., Yang, H., Song, R. & Gu, W. (2022). Biological Control and Plant Growth Promotion by Volatile Organic Compounds of *Trichoderma koningiopsis* T-51. *Journal of Fungi*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/jof8020131>
- Zarei, T., Moradi, A., Kazemeini, S. A., Farajee, H. & Yadavi, A. (2019). Improving sweet corn (*Zea mays* L. var *saccharata*) growth and yield using *Pseudomonas fluorescens* inoculation under varied watering regimes. *Agricultural Water Management*, 226, 105757. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105757>

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.