



Received: May 14, 2025 / Accepted: June 08, 2026

Artículo Original

Bacillus velezensis y cepas halotolerantes aisladas de suelos salinos como promotoras del crecimiento de maíz (*Zea mays* L.) en invernadero

Bacillus velezensis and halotolerant strains isolated from saline soils as growth promoters of maize (*Zea mays* L.) in greenhouse

J. A. Llontop-Llaque^{*1} , S. V. Chozo-Mestanza² , J. E. Jiménez-Ventura² , R. A. Tiparra-Montoya² , A. Risco-León² 



<https://doi.org/10.51431/par.v8i1.1112>

RESUMEN

Objetivo: Evaluar el efecto de *Bacillus velezensis* y cuatro cepas halotolerantes, aisladas de suelos salinos de la Región Lambayeque (Perú), como promotoras del crecimiento de plantas de maíz en condiciones de invernadero.

Metodología: El estudio inició con el aislamiento de bacterias provenientes de suelos agrícolas con problemas de sales y la selección de cepas tolerantes al cloruro de sodio, denominadas M6S, cepa 1, cepa 2 y cepa 3. Además, se utilizó la bacteria halotolerante *B. velezensis*, previamente identificada. En invernadero, se utilizó plantas de maíz (*Zea mays* L.) 'Pioneer', sembradas directamente en macetas con dos plantas por unidad experimental y tres repeticiones por tratamiento. Las cepas bacterianas se evaluaron con dos y tres inoculaciones, un testigo con fertilizante químico y un testigo absoluto durante 60 días. Se evaluó altura de planta, vigor, desarrollo radicular y biomasa aérea y radicular. Los datos fueron analizados mediante ANOVA y la prueba de Duncan ($p \leq 0.05$).

Resultados: Las cepas 1 y 2, con tres inoculaciones, incrementaron significativamente la altura de planta, respecto al testigo absoluto (41,68 % y 42,78 %, respectivamente). En vigor, las cepas 1, 2 y 3 alcanzaron grado 6 (muy vigorosas y frondosas). Respecto al desarrollo radicular, todas las cepas lograron el grado 6; la biomasa aérea seca fue igual o superior al fertilizante químico; además, la cepa 2 presentó la mayor biomasa radicular. **Conclusiones:** Las cepas halotolerantes aisladas de suelos salinos (M6S, cepa 1, cepa 2, cepa 3) y *B. velezensis*, demostraron capacidad para promover el crecimiento de maíz en condiciones de invernadero.

Palabras clave: Bacterias halotolerantes, salinidad, promotores de crecimiento, maíz.

ABSTRACT

Objective: To evaluate the effect of *Bacillus velezensis* and four halotolerant strains, isolated from saline soils in the Lambayeque Region (Peru), as growth promoters of maize plants under greenhouse conditions. **Methodology:** The study began with the isolation of bacteria from agricultural soils with salinity problems and the selection of sodium chloride-tolerant strains, designated M6S, strain 1, strain 2, and strain 3. The previously identified halotolerant bacterium *B. velezensis* was also used. In the greenhouse, maize (*Zea mays* L.) 'Pioneer' plants were sown directly in pots with two plants per experimental unit and three replicates per treatment. The bacterial strains were evaluated with two and three inoculations, a control with chemical fertilizer, and an untreated control for 60 days. Plant height, vigor, root development, and shoot and root biomass were evaluated. Data were analyzed using ANOVA and Duncan's test ($p \leq 0.05$). **Results:** Strains 1 and 2, with three inoculations, significantly increased plant height compared to the control (41.68 % and 42.78 %, respectively). In terms of vigor, strains 1, 2, and 3 reached grade 6 (very vigorous and leafy). Regarding root development, all strains achieved grade 6; aboveground dry biomass was equal to or greater than that of the chemical fertilizer; furthermore, strain 2 exhibited the greatest root biomass. **Conclusions:** The halotolerant strains isolated from saline soils (M6S, strain 1, strain 2, strain 3) and *B. velezensis* demonstrated the capacity to promote maize growth under greenhouse conditions.

Keywords: Halotolerant bacteria, salinity, growth promoters, maize.

¹Facultad de Agronomía, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Perú

²Fitosanidad Perú EIRL

*Autor para correspondencia: jllontop@unprg.edu.pe.

Introducción

El incremento acelerado de la población mundial ha generado una creciente presión sobre los sistemas agrícolas para satisfacer la demanda alimentaria. Se estima que para el año 2050 la producción de alimentos deberá incrementarse en al menos un 70 % respecto a los niveles actuales (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2018). Este escenario exige el desarrollo de estrategias productivas sostenibles que permitan aumentar el rendimiento de los cultivos sin comprometer los recursos naturales ni expandir la frontera agrícola hacia ecosistemas vulnerables.

Tradicionalmente, el incremento de la productividad agrícola se ha basado en el uso intensivo de fertilizantes sintéticos y otros insumos químicos. Sin embargo, su aplicación indiscriminada ha generado efectos negativos como eutrofización de cuerpos de agua, emisión de gases de efecto invernadero y degradación de la microbiota del suelo (Martínez et al., 2021; Dang et al., 2022). Frente a esta problemática, las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR, abreviación en inglés) han surgido como una alternativa sostenible para reducir la dependencia de fertilizantes químicos y mejorar el desarrollo de los cultivos. Estas bacterias favorecen el crecimiento vegetal mediante mecanismos como la producción de fitohormonas, fijación biológica de nitrógeno, solubilización de fosfatos y síntesis de sideróforos (Hakim et al., 2021).

Entre las PGPR, el género *Bacillus* destaca por su capacidad de formar endosporas, lo que les confiere resistencia a condiciones ambientales adversas y favorece su supervivencia en el suelo después de la inoculación (Chandran et al., 2021; Rabbee et al., 2019). Asimismo, especies como *B. velezensis* han demostrado capacidad para promover el crecimiento vegetal mediante la producción de fitohormonas y la mejora en la disponibilidad de nutrientes (Sharma et al., 2022).

Por otro lado, las bacterias halotolerantes han despertado especial interés debido a la creciente salinización de los suelos agrícolas en regiones áridas y semiáridas. Estos microorganismos pueden desarrollarse en concentraciones elevadas de NaCl gracias a mecanismos de osmorregulación basados en la

acumulación de solutos compatibles, además de contribuir a mitigar el estrés salino en las plantas (Mukhtar et al., 2020; Wael et al., 2024). En ambientes salinos costeros, estas bacterias representan una fuente importante de microorganismos con potencial biotecnológico para la agricultura sostenible. En este sentido, Llontop et al. (2025) reportaron que aislados de *Bacillus* provenientes de suelos salinos de la costa peruana mostraron alta tolerancia a NaCl y promovieron el crecimiento de tomate bajo estrés salino.

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos de mayor importancia económica y alimentaria a nivel mundial; sin embargo, la salinidad y la alta dependencia de fertilización química limitan su productividad y sostenibilidad. A pesar del potencial de las PGPR halotolerantes, existe limitada información sobre el uso de cepas aisladas de suelos salinos de la costa peruana como promotoras del crecimiento de maíz en condiciones de invernadero. Por ello, el objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de *B. velezensis* y cuatro cepas halotolerantes aisladas de suelos salinos de la región Lambayeque (Perú) como promotoras del crecimiento de plantas de maíz en condiciones de invernadero.

Metodología

Recolección de suelo rizosférico

En octubre de 2025, se colectaron muestras de suelo en la rizosfera de plantas de frijol caupí (*Vigna unguiculata* L.) y de las malezas *Ammannia coccinea* (Calvo de agua) y *Scirpus maritimus* (Junco) las cuales crecían espontáneamente en suelos con diferentes niveles de salinidad. Estos suelos presentaban costras blanquecinas en la superficie, indicativas de acumulación de sales.

Se recolectaron doce muestras de suelo (10 kg cada una), en dos localidades de la región Lambayeque, Perú. Las muestras de suelo de frijol caupí fueron tomadas en el Fundo La Peña, distrito de Lambayeque (6°42'56" S, 79°54'59" W), mientras que las muestras de suelo de las malezas se recolectaron en el Sector Las Maravillas, distrito de Mochumí (6°32'07.5" S, 79°54'34.0" W).

Las muestras fueron analizadas para conocer sus componentes de salinidad en el

Laboratorio Agrícola de Análisis de Suelos y Aguas (CYSAG EIRL) y sometidas a un análisis microbiológico en el Laboratorio de Fitosanidad Perú EIRL (Chiclayo, Perú), con énfasis en la identificación de bacterias halotolerantes. Según los resultados obtenidos por CYSAG EIRL, los suelos presentaron textura franco-arcillo-arenoso, densidad aparente de $1,39 - 1,42 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ y pH ligeramente alcalino ($7,23 - 7,82$). Asimismo, registraron contenidos altos de CaCO_3 ($2,58 - 3,57 \%$), capacidad de intercambio catiónico ($30,93 - 31,60 \text{ meq}\cdot 100 \text{ g}^{-1}$), fósforo extraíble ($19 - 25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y potasio extraíble ($276 - 420 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). La conductividad eléctrica (CE) clasificó a los suelos como salinos ($6,82 - 7,23 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) y altamente salinos ($15,10 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$).

Aislamiento y caracterización de bacterias halotolerantes

A partir de las muestras de suelo rizosférico con mayor conductividad eléctrica provenientes del Sector Las Maravillas, se aislaron bacterias halotolerantes mediante siembra en Agar Nutritivo Modificado suplementado con NaCl. Las cepas con crecimiento hasta 13 % de NaCl fueron seleccionadas y codificadas como M6S, cepa 1, cepa 2 y cepa 3. Las cepas 1 y 2 fueron aisladas de la rizosfera de *A. coccinea* y la cepa 3 de *S. maritimus*. Todas las cepas correspondieron a bacilos Gram positivos esporulados.

Cepa de Bacillus velezensis utilizada

Adicionalmente, se utilizó una cepa de *B. velezensis* previamente aislada de suelos agrícolas salinos rizosféricos de frijol caupí del Fundo La Peña. Su identidad taxonómica fue confirmada mediante análisis molecular de la región 16S ARNr. La cepa correspondió a un bacilo Gram positivo esporulado con capacidad de crecimiento hasta 13 % de NaCl.

Instalación del ensayo en invernadero

El ensayo se realizó bajo condiciones de invernadero. Se sembró maíz híbrido Pioneer en macetas con capacidad para 2,5 kg, utilizando suelo de CE $< 1 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, mezclado con estiércol esterilizado en una proporción 3:1 (v/v).

A los 15 días después de la siembra (dds), fueron seleccionadas plantas con altura y vigor homogéneo, dejando dos plantas por maceta con tres repeticiones por tratamiento.

Los tratamientos consistieron en: cinco

cepas bacterianas (*B. velezensis*, M6S, cepa 1, cepa 2 y cepa 3) con dos y tres inoculaciones, cada 7 días; T0 (testigo absoluto, sin inoculación y sin fertilización), TQ (testigo con fertilizante químico: NPK 20:20:20 a $0,5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$). El riego se realizó en días alternos con agua potable de conductividad eléctrica de $0,8 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$.

Preparación e inoculación de cepas bacterianas en la rizosfera de maíz

Las cinco cepas bacterianas se cultivaron en caldo nutritivo a 30°C durante 4 días para la preparación del inóculo bacteriano, obteniéndose concentraciones superiores a $1,0 \times 10^8 \text{ UFC}\cdot\text{mL}^{-1}$.

Las inoculaciones se realizaron a los 22 y 29 dds, aplicando 100 mL de suspensión bacteriana ($10 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$) por maceta directamente en la rizosfera de las plantas. La cantidad de agua aplicada se ajustó para mantener el suelo a capacidad de campo.

Variables evaluadas

Independientes

Número de inoculaciones: dos y tres inoculaciones de cada cepa bacteriana (intervalo de 7 días).

Inóculo: *B. velezensis*, cepas M6S, 1, 2 y 3. Se incluyó un testigo absoluto (T0) y un testigo con fertilizante químico (TQ).

Dependientes

Altura de planta (cm): a los 30 y 60 dds. Se calculó dos porcentajes de incremento:

Incremento altura (%) respecto a 30 días = $[(\text{altura final}/\text{altura inicial}) \times 100] - 100$

Incremento altura (%) respecto al Testigo = $[(\text{altura Tratamiento}/\text{altura Testigo}) \times 100] - 100$

Vigor de planta (Grado): a los 30 y 60 dds, se evaluó visualmente mediante una escala convencional de seis grados: G6 = planta muy vigorosa y frondosa; G5 = planta muy vigorosa pero menos frondosa; G4 = planta moderadamente vigorosa y menos frondosa; G3 = planta débil o raquítica; G2 = planta muy débil; y G1 = planta casi muerta.

Desarrollo Radicular (Grado): a los 60 dds se evaluó mediante una escala convencional de

seis grados: G6 = raíz muy vigorosa y abundante; G5 = raíz muy vigorosa pero menos abundante; G4 = raíz moderadamente vigorosa y menos abundante; G3 = raíz débil o raquítica; G2 = raíz muy débil; y G1 = raíz casi ausente.

Peso aéreo y radicular (g): a los 60 dds se determinó el peso fresco de la parte aérea (tallos y hojas) y del sistema radicular. Posteriormente, los tejidos se secaron en estufa a 70 °C hasta alcanzar peso constante, obteniéndose el peso seco (g).

Análisis estadístico

Los datos obtenidos se analizaron con el paquete estadístico SAS (Statistical Analysis System). Se realizó el Análisis de Varianza, y las comparaciones de tratamientos con la prueba de significación Duncan ($P \leq 0,05$).

Resultados y discusión

Efecto promotor del crecimiento de plantas de maíz

Tabla 1

Incremento de la altura de planta de maíz (%) respecto a la inicial y al testigo (T0) inoculadas con bacterias halotolerantes, a los 60 días después de la siembra.

Tratamiento	N° de inoculaciones	Momento de evaluación (días)			
		Altura (cm)		Incremento (%) respecto a:	
		30 (inicial)	60	30 (inicial)	Testigo (T0)
<i>B. velezensis</i>	2	64,00 f	148,00 g	131,28 c	23,34 g
<i>B. velezensis</i>	3	64,00 f	156,00 f	143,81 b	30,00 f
M6S	2	64,00 f	156,00 f	143,76 b	30,01 f
M6S	3	68,00 d	158,00 e	132,38 c	31,68 e
Cepa 1	2	66,00 e	167,00 b	153,06 a	39,17 b
Cepa 1	3	66,00 e	170,00 a	157,61 a	41,68 a
Cepa 2	2	75,00 a	170,00 a	126,68 c	41,67 a
Cepa 2	3	75,00 a	171,33 a	128,48 c	42,78 a
Cepa 3	2	70,67 c	160,00 d	126,43 c	33,34 d
Cepa 3	3	73,00 b	160,33 d	119,67 d	33,62 d
FQ	0	64,00 f	163,00 c	154,74 a	35,84 c
T0	0	63,00 f	120,00 h	90,49 e	0,00 h

En concordancia con estos hallazgos, Azeem et al. (2024) reportaron que la cepa halotolerante *Bacillus aryabhattai* PM34, aislada de la rizosfera de maíz, incrementó la altura (19,9 - 50 %), así como el peso fresco (23,5 - 37,9 %) y seco (10,0 - 25,7 %) de las plantas.

Las cepas M6S, cepa 1, cepa 2, cepa 3 y *B. velezensis* promovieron significativamente el crecimiento de las plantas de maíz. En general, las variables de crecimiento registradas en los tratamientos inoculados fueron superiores al testigo absoluto (T0) y, en varios casos, comparables o superiores al tratamiento con FQ. Asimismo, se encontró que tres inoculaciones de las bacterias promovieron más el crecimiento de la planta de maíz.

Altura de la planta

En la Tabla 1, se observó que a los 60 dds, con la cepa 2 y con 3 inoculaciones las plantas tuvieron la mayor altura (171,33 cm), superando al FQ (163,00 cm) y diferenciándose significativamente de los demás tratamientos. Por otro lado, las cepas 1 y 2 con tres inoculaciones (41,68 % y 42,78 %, respectivamente) superaron significativamente al T0 y al FQ (35,84 %).

Del mismo modo, Falconí et al. (2025) reportaron que inoculaciones repetidas con *B. subtilis* favorecieron la colonización del ápice radical y promovieron incrementos sostenidos en altura de planta e índice de clorofila.

Estos antecedentes respaldan el potencial de las PGPR halotolerantes como bioinoculantes sostenibles para reducir la dependencia de fertilizantes químicos y mejorar el crecimiento de cultivos de importancia agrícola como el maíz.

Vigor de planta

A los 60 dds, con dos inoculaciones, hubo respuestas variables de las plantas de maíz a las cepas evaluadas. *B. velezensis* y M6S alcanzaron Grado 5 (plantas muy vigorosas, pero menos frondosas) y las cepas 1, 2 y 3, Grado 6 (plantas muy vigorosas y frondosas), igualando al FQ y superando al T0. Con tres inoculaciones, todas las cepas alcanzaron Grado 6, sin diferencias significativas respecto al FQ (Figura 1).

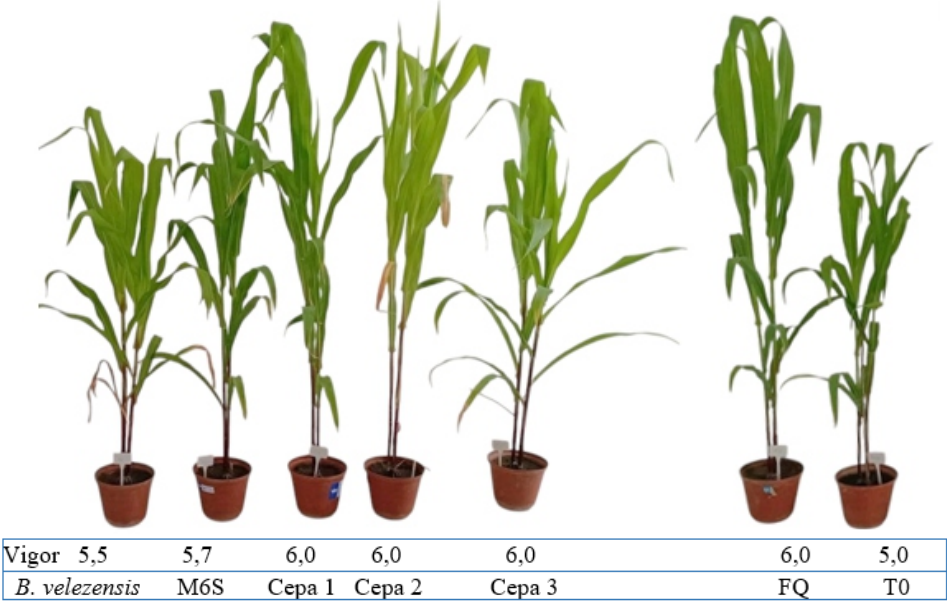
Estos resultados coinciden con estudios previos que reportan respuestas dependientes del número de inoculaciones con PGPR. Zakavi et al. (2024) señalaron que aislados de *Bacillus* provenientes de marismas mejoraron parámetros

de crecimiento en maíz, evidenciando efectos positivos incluso con una sola inoculación, mientras que Foster et al. (2025) y Kurt (2025) señalaron que inoculaciones repetidas incrementan la eficiencia promotora del crecimiento debido a una colonización más persistente de la rizosfera.

La necesidad de tres inoculaciones en *B. velezensis* y M6S podría estar asociada a una menor capacidad de colonización inicial de la rizosfera. En contraste, las cepas 1, 2 y 3 mostraron una respuesta más rápida, alcanzando el máximo vigor con solo dos inoculaciones, lo que sugiere una mayor eficiencia en la colonización radicular o en la producción de metabolitos promotores del crecimiento vegetal.

Desde el punto de vista agronómico, aunque *B. velezensis* y M6S, con dos inoculaciones, no alcanzaron el máximo nivel de vigor, su desempeño fue favorable. No obstante, para maximizar el vigor vegetal, se recomienda realizar tres inoculaciones con estas cepas.

Figura 1
Incremento (%) de la altura y vigor de la planta de maíz, respecto al Testigo (T0) y fertilizante químico (FQ), a los 60 días después de tres inoculaciones de cepas halotolerantes. Escala de vigor: G (1 – 6).



Desarrollo radicular

A los 60 dds, la evaluación de la masa radicular mostró que, con dos inoculaciones, la mayoría de las cepas alcanzaron Grado 6 (raíces muy vigorosas y abundantes), igualando al FQ. Con tres inoculaciones, todas las cepas alcanzaron Grado 6, superando al T0 (Figura 2), sin diferencias significativas entre ambos

números de inoculaciones.

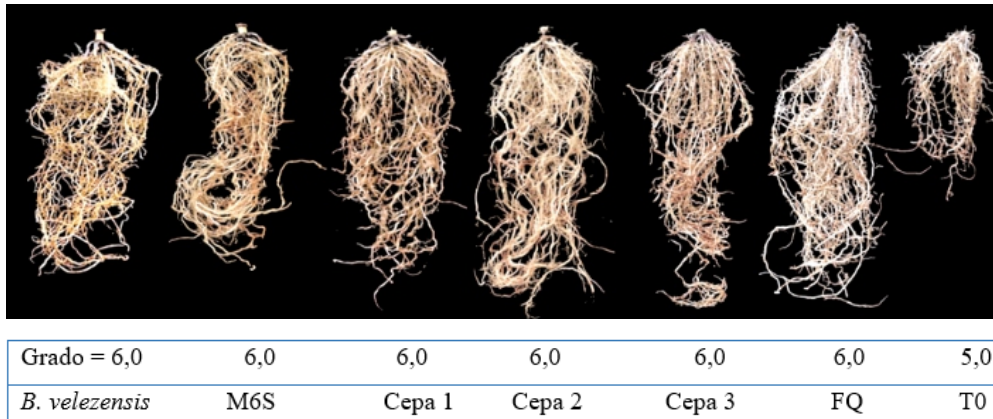
Lo anterior es corroborado por Zhang et al. (2024), quienes demostraron que *B. velezensis* D103 incrementó significativamente la longitud total de raíces en maíz. Nisa et al. (2026) también reportaron mejoras en vigor y biomasa radicular mediante coinoculación con *Bacillus cereus*.

La respuesta diferencial observada en *B. velezensis*, que requirió tres inoculaciones para alcanzar el máximo desarrollo radicular, sugiere un comportamiento dependiente de la frecuencia de inoculación, similar a lo descrito por Falconí et al. (2025). Asimismo, los resultados obtenidos

con las demás cepas, concuerdan con las investigaciones de Mosela et al. (2022) y Severo et al. (2025), quienes observaron incrementos en biomasa radicular asociados a especies de *Bacillus*.

Figura 2

Desarrollo radicular (Grados 1 - 6) de plantas de maíz a los 60 días después de la siembra (dds), sometidas a tres inoculaciones de bacterias halófilas.



Peso aéreo y radicular

Biomasa aérea: Con dos inoculaciones, las cepas 1, 2 y 3 (111 - 120 g) superaron al FQ (114 g) en biomasa aérea fresca. Para materia seca las cepas 1, 2 y 3 (40 - 46 g) presentaron valores comparables o superiores al FQ (40,07 g). En contraste, *B. velezensis* y M6S requirieron tres inoculaciones para alcanzar valores comparables

al FQ (Tabla 2).

Con tres inoculaciones, todas las cepas alcanzaron valores de biomasa aérea seca iguales o superiores al FQ, destacando la cepa 2 (48 g) y la cepa 1 (46 g). Estos resultados muestran un efecto positivo de las cepas bacterianas sobre la acumulación de biomasa aérea en maíz.

Tabla 2

Incremento del peso aéreo de planta de maíz (%) respecto al testigo (T0) inoculadas con bacterias halotolerantes, a los 60 días después de la siembra.

Tratamiento	N° de inoculaciones	Momento de evaluación (días)			
		Peso (g)		Incremento (%) respecto a:	
		Fresco	Seco	T0 fresco	T0 seco
<i>B. velezensis</i>	2	98,67 g	37,10 g	10,87 g	46,48 g
<i>B. velezensis</i>	3	101,33 f	46,33 ab	13,88 f	82,97 ab
M6S	2	106,67 e	40,33 ef	19,86 e	59,28 ef
M6S	3	109,67 d	44,00 c	23,23 d	73,69 c
Cepa 1	2	119,00 b	42,00 de	33,72 b	65,79 de
Cepa 1	3	121,00 a	46,00 b	35,97 a	81,69 b
Cepa 2	2	120,00 ab	46,00 b	34,84 ab	81,49 b
Cepa 2	3	120,67 a	48,00 a	35,60 a	89,49 a
Cepa 3	2	111,00 d	40,00 f	24,73 d	57,95 f
Cepa 3	3	111,00 d	43,00 cd	24,73 d	69,79 cd
FQ	0	114,00 c	40,07 f	28,11 c	58,16 f
T0	0	89,00 h	25,33 h	0,00 h	0,00 h

Biomasa radicular

En peso radicular fresco, la cepa 2 con tres inoculaciones presentó el mejor resultado (92,00 g), alcanzando el mayor incremento respecto al T0 (72,58 %), seguida por la cepa 1 con (65,11 %). Estos valores superaron al FQ, que registró un incremento de 58,54 %.

En biomasa radicular seca, las cepas 1 (12 g), 2 (13,67 g), M6S (11,33 g) y 3 (9 g), con dos inoculaciones, superaron a FQ (9 g). Con tres

inoculaciones, todas las cepas superaron al FQ, destacando la cepa 2 con 15 g de biomasa radicular seca, equivalente a un incremento de 155,95 % respecto al T0.

Aunque *B. velezensis* tuvo menor incremento de materia seca, con tres inoculaciones (11,17 g) respecto a las otras cepas superó al FQ (Tabla 3). Estos resultados confirman la capacidad de las cepas para promover el desarrollo radicular y la acumulación de biomasa en plantas de maíz.

Tabla 3

Incremento del peso radicular de planta de maíz (%) respecto al testigo (T0) inoculadas con bacterias halotolerantes, a los 60 días después de la siembra.

Tratamiento	N° de inoculaciones	Momento de evaluación (días)			
		Peso (g)		Incremento (%) respecto a:	
		Fresco	Seco	T0 fresco	T0 seco
<i>B. velezensis</i>	2	67,67 g	9,00 e	26,98 f	53,57 e
<i>B. velezensis</i>	3	72,00 f	11,17 cd	35,14 e	90,48 cd
M6S	2	80,00 e	11,33 cd	50,12 d	93,25 cd
M6S	3	82,00 de	13,33 b	53,86 cd	127,78 b
Cepa 1	2	88,00 b	12,00 c	65,07 b	104,37 c
Cepa 1	3	88,00 b	14,00 ab	65,11 b	138,89 ab
Cepa 2	2	90,33 ab	13,67 b	69,42 ab	132,94 b
Cepa 2	3	92,00 a	15,00 a	72,58 a	155,95 a
Cepa 3	2	82,33 cde	9,00 e	54,45 cd	53,77 e
Cepa 3	3	83,33 cd	10,33 d	56,36 c	76,19 d
FQ	0	84,50 c	9,00 e	58,54 c	53,57 e
T0	0	53,33 h	5,87 f	0,00 g	0,00 f

En condiciones de suelo sin limitaciones por salinidad, las cepas demostraron capacidad para incrementar la biomasa aérea y radicular, incluso superando al FQ. Las cepas 1, 2, 3 y M6S tuvieron un desempeño óptimo con dos inoculaciones, sugiriendo una rápida colonización de la rizosfera y una eficiente producción de fitohormonas, como auxinas y giberelinas.

Los investigadores Mosela et al. (2022) reportaron que la cepa *B. velezensis* Ag75 incrementó la biomasa aérea y radicular en maíz, atribuyendo este efecto a su capacidad para producir altos niveles de AIA y solubilizar fosfatos. Asimismo, Fuga et al. (2023) demostraron que la inoculación con *Bacillus*

aryabhattai CMAA 1363 promovió el crecimiento de plantas de maíz y alcanzó niveles de productividad comparables a los obtenidos con inoculantes comerciales, debido a la producción de fitohormonas.

La cepa 2 destacó particularmente en biomasa radicular seca, superando ampliamente al FQ, sugiriendo un marcado efecto promotor sobre la arquitectura radicular y, en consecuencia, una mayor capacidad de absorción de agua y nutrientes. Resultados similares fueron hallados por Eshaghi et al. (2024), quienes encontraron que aislamientos bacterianos con múltiples características PGPR incrementaron significativamente el peso seco de raíces en maíz. De igual manera, Deng et al. (2024) demostraron

que *B. aryabhattai* LAD estableció una interacción positiva con las raíces de maíz, estimulando la producción bacteriana de AIA y promoviendo el crecimiento vegetal. Estos antecedentes respaldan la capacidad de las PGPR del género *Bacillus* para estimular el desarrollo de sistemas radiculares más robustos y eficientes.

Desde una perspectiva agronómica, dos inoculaciones de las cepas 1, 2, 3 y M6S fueron suficientes para obtener niveles de biomasa aérea y radicular equivalentes o superiores al FQ, representando una alternativa ecológica y rentable para reducir costos y disminuir la dependencia de insumos sintéticos. No obstante, cuando se busca una colonización más persistente y una mayor respuesta fisiológica, una tercera inoculación puede resultar ventajosa.

En conjunto, estos resultados confirman que las cepas halotolerantes aisladas de suelos salinos conservan su potencial como promotoras del crecimiento de maíz en condiciones de suelo no salino, constituyendo una alternativa sostenible y eficiente frente a la fertilización química convencional.

Conclusiones

Las cepas halotolerantes (M6S, cepa 1, cepa 2 y cepa 3) y *B. velezensis* demostraron capacidad para promover el crecimiento del maíz en condiciones de invernadero, superando o igualando en diversos parámetros al fertilizante químico (NPK 20:20:20). Entre ellas, la cepa 2 mostró el mayor efecto promotor del crecimiento, seguida de la cepa 1.

B. velezensis, las cepas 3 y M6S presentaron efectos promotores positivos, aunque menores que las cepas 1 y 2; sin embargo, con tres inoculaciones todas las cepas igualaron o superaron al FQ en biomasa aérea y radicular seca.

Finalmente, se confirma que las cepas aisladas de suelos rizosféricos salinos conservan su capacidad de estimular el crecimiento vegetal en condiciones no salinas, destacando su potencial como bioinoculantes sostenibles para el cultivo de maíz.

Agradecimiento

Los autores expresan su agradecimiento a la empresa Fitosanidad Perú por el apoyo financiero y uso de su laboratorio e invernadero de

diagnóstico e investigación fitosanitaria, para la ejecución de la presente investigación.

Referencias

- Azeem, M. A., Khan, S., Ali, F., Ahmad, S., Rahim, G., Iftikhar, M., Iqbal, M., Aljaloud, R. S., Alarjani, K. M., & Chaudhary, H. J. (2024). Halotolerant *Bacillus aryabhattai* strain PM34 mitigates salinity stress and enhances the physiology and growth of maize. *Journal of Plant Growth Regulation*, 44 (12), 7000 - 7018. <https://doi.org/10.1007/s00344-024-11456-y>
- Chandran, H., Meena, M., & Swapnil, P. (2021). Plant Growth-Promoting Rhizobacteria as a Green Alternative for Sustainable Agriculture. *Sustainability*, 13(19), 10986. <https://doi.org/10.3390/su131910986>
- Dang, P., Li, C., Lu, C., Zhang, M., Huang, T., Wan, C., Wang, H., Chen, Y., Qin, X., Liao, Y., & Siddique, K. H. M. (2022). Effect of fertilizer management on the soil bacterial community in agroecosystems across the globe. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 326 (1). <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107795>
- Deng, C., Zeng, N., Li, C., Pang, J., Zhang, N., & Li, B. (2024). Mecanismos de las interacciones mediadas por ROS entre *Bacillus aryabhattai* LAD y las raíces del maíz para promover el crecimiento de las plantas. *BMC Microbiology*, 24 (1), 327. <https://doi.org/10.1186/s12866-024-03479-y>
- Eshaghi, E., Mousae, S., Hendiyani, A., Habibi Khave, A., & Nosrati, R. (2024). Evaluación del potencial de aislamientos de PGPR multicaracterísticos como inoculantes para el crecimiento del maíz (*Zea mays* L.). *Iranian Journal of Microbiology*, 16 (6), 812–826. <https://doi.org/10.18502/ijm.v16i6.17260>
- Falconí, C. E., Yáñez-Mendizábal, V., Goodwin, S. B., & Cruz, C. D. (2025). Native *Bacillus subtilis* strains cultivated in a low-cost medium enhance maize growth and suppress seed-borne fungi by defense activation and rhizosphere colonization. *Biological Control*, 211 (105923).

- <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2025.105923>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2018). *The future of food and agriculture – Alternative pathways to 2050*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/e51e0cf0-4ece-428c-8227-f6c51b06b16/content>
- Foster, L., Yang, J., Riethoven, J., Mukhtar, H., & Schachtman, D. (2025). Inoculation frequency and maize genotype influence plant growth-promoting effects of soil bacteria under low nitrogen conditions. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1637156. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1637156>
- Fuga, C. A. G., Caixeta, G. A. N., Caixeta, C. F., & de Melo, I. S. (2023). Promoción del crecimiento en maíz (*Zea mays* L.) por *Bacillus aryabhattai* cepa CMAA 1363. *Agraria-Revista Brasileira de Ciencias Agrarias*, 18 (3), e3340. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1164575?locale=en>
- Hakim, S., Naqqash, T., Nawaz, M. S., Laraib, I., Siddique, M. J., Zia, R., Mirza, M. S., & Imran, A. (2021). Rhizosphere engineering with plant growth-promoting microorganisms for agriculture and ecological sustainability. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 617157. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.617157>
- Kurt, P. O. (2025). Field-based evaluation of multi-strain PGPR to improve *Zea mays* yield and soil nutrient dynamics in semi-arid of Türkiye. *Scientific reports*, 15(1), 2253. <https://www.nature.com/articles/s41598-025-07643-w>
- Llontop-Llaque, J. A., Chozo-Mestanza, S. V., Jiménez-Ventura, J. E., Tiparra-Montoya, R. A., Risco-León, A., & Carhuapoma-Aldaz, A. J. (2025). Reducción de la salinidad de un suelo agrícola y crecimiento del tomate (*Solanum lycopersicum*) usando *Bacillus velezensis* en invernadero. *Peruvian Agricultural Research*, 7(2), 58-67. <https://agris.fao.org/search/en/providers/125029/records/69b97703ce5e0ae4f878e9b1>
- Martínez-Dalmau, J., Berbel, J., & Ordóñez-Fernández, R. (2021). Nitrogen fertilization. A review of the risks associated with the inefficiency of its use and policy responses. *Sustainability*, 13 (10), 5625. <https://doi.org/10.3390/su13105625>
- Mosela, M., Andrade, G., Massucato, L. R., de Araújo Almeida, S. R., Nogueira, A. F., de Lima Filho, R. B., Zeffa, D. M., Mian, S., Higashi, A. Y., Shimizu, G. D., Teixeira, G. M., Branco, K. S., Faria, M. V., Giacomini, R. M., Scapim, C. A., & Gonçalves, L. S. A. (2022). *Bacillus velezensis* cepa Ag75 como nuevo agente multifuncional para el biocontrol, la solubilización de fosfatos y la promoción del crecimiento en cultivos de maíz y soja. *Informes científicos*, 12 (1), 15284. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19515-8>
- Mukhtar, S., Malik, K. A., & Mehnaz, S. (2020). Osmoadaptation in halophilic bacteria and archaea. *Research Journal of Biotechnology*, 15(5), 154-161. https://www.researchgate.net/publication/341881730_Osmoadaptation_in_halophilic_bacteria_and_archaea
- Nisa, M. U., Rizvi, Z. F., Hyder, S., Gondal, A. S., Ahmed, I., Riaz, N., Iqra, Montoya, A. C., Santos-Villalobos, S., & Iqbal, M. (2026). La aplicación integrada de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal y enmiendas orgánicas mejora el crecimiento y la absorción de nutrientes en el maíz. *Journal of Agriculture and Food Research*, 26, 102742. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2026.102742>
- Rabbee, M. F., Ali, M. S., Choi, J., Hwang, B. S., Jeong, S. C., & Baek, K.-h. (2019). *Bacillus velezensis*: A Valuable Member of Bioactive Molecules within Plant Microbiomes. *Molecules*, 24(6), 1046. <https://doi.org/10.3390/molecules24061046>
- Sharma, M., Charron, J., Rani, M., & Jabaji, S. (2022). *Bacillus velezensis* strain B26 modulates the inflorescence and root

- architecture of *Brachypodium distachyon* via hormone homeostasis. *Scientific Reports*, 12, 7951. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12026-6>
- Severo, H. C de A. R., de Santana Arauco, A. M., Nunes, R. W. F., Monteiro, G. N., Duarte, M. H. F., da Silva, A. P. M., de Castro Ferreira, A., Luz, M. R., de Souza Miranda, R., de Araújo, A. S. F., & da Costa, E. M. (2025). La co-inoculación de hongos micorrízicos arbusculares y *Bacillus subtilis* mejora los rasgos morfológicos, el crecimiento y la absorción de nutrientes en el maíz con una disponibilidad limitada de fósforo. *Scientific Reports*, 15 (1), 25448. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10038-6>
- Wael, D., El-Amier, Y., Wesameldin, S., & El-Sayed, A. (2024). Plant-associated halotolerant bacteria improving growth of *Vicia faba* L. Mariout-2 under salinity conditions. *Scientific Reports*, 14(1), 16737. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39033227/>
- Zakavi, M., Askari, H., & Shahrooei, M. (2024). Maize growth response to different *Bacillus* strains isolated from a salt-marshland area under salinity stress. *BMC Plant Biology*. 22 (1) , 367. <https://doi.org/10.1186/s12870-022-03702-w>
- Zhang, Y., Zhang, N., Bi, X., Bi, T., Baloch, F. B., Miao, J., Zeng, N., Li, B., & An, Y. (2024). Promoción del crecimiento en maíz y análisis de la secuencia del genoma completo de *Bacillus velezensis* D103. *Microbiology Spectrum*, 12(12), e01147-24. <https://doi.org/10.1128/spectrum.01147-24>