

Artículo

Evaluación integrada de cepas de *Bacillus* spp. para la supresión de *Ralstonia solanacearum* raza 2 y la promoción del crecimiento vegetal

Integrated Evaluation of Bacillus spp. Strains for the Suppression of Ralstonia solanacearum Race 2 and Plant Growth Promotion

Kenyi Janina Suárez Romero ^{1*}, Héctor Damian Toscano Zamora ², Victor Emilio Zurita Chavarría ³, Pedro Francisco Piza Zambrano ⁴, Vicente David Chavarría Llor ⁵

¹ Agronovalabx, Los Ríos, Quevedo, Ecuador 091307; <https://orcid.org/0000-0003-4181-8442>, Kenyi.suarez2017@uteq.edu.ec

² Agronovalabx, Los Ríos, Quevedo, Ecuador 091307; <https://orcid.org/0000-0001-7888-5679>, hector.toscano2017@uteq.edu.ec

³ Agronovalabx, Los Ríos, Quevedo, Ecuador 091307; <https://orcid.org/0009-0004-1704-4832>, vezuritac@outlook.com

⁴ ServiAgropetter, Los Ríos, Quevedo, Ecuador 084528; <https://orcid.org/0009-0004-6035-078X>, pedropiza@hotmail.com

⁵ Agronovalabx, Los Ríos, Quevedo, Ecuador 091307; <https://orcid.org/0009-0003-9734-532X>, davidchavarria@hotmail.com

* Correspondencia: kenyi.suarez2017@uteq.edu.ec

 <https://doi.org/10.70881/mcj/v4/n3/175>

Cita: Suárez Romero, K. J., Toscano Zamora, H. D., Zurita Chavarría, V. E., Piza Zambrano, P. F., & Chavarría Llor, V. D. (2026). Evaluación integrada de cepas de *Bacillus* spp. para la supresión de *Ralstonia solanacearum* raza 2 y la promoción del crecimiento vegetal. *Multidisciplinary Collaborative Journal*, 4(3), 171-183. <https://doi.org/10.70881/mcj/v4/n3/175>

Recibido: 19/06/2026

Revisado: 02/08/2026

Aceptado: 05/08/2026

Publicado: 12/08/2026



Copyright: © 2026 por los autores. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la Licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial 4.0 Internacional. (CC BY-NC).

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Resumen: *Ralstonia solanacearum* raza 2 es un patógeno vascular transmitido por suelo que limita la producción de cultivos susceptibles y cuyo manejo requiere estrategias biológicas eficaces. Este estudio evaluó el potencial de cepas de *Bacillus* sp. para suprimir el patógeno y promover el crecimiento de vitroplantas de banano. La actividad antagonista se determinó mediante cultivo dual in vitro. Para el ensayo en planta, se emplearon vitroplantas de banano con cuatro semanas de aclimatación, establecidas en macetas con 750 g de suelo esterilizado e inoculado con *R. solanacearum* raza 2. Veinticuatro horas después, se aplicaron 0,5 mL de suspensiones de *Bacillus* sp. ajustadas a aproximadamente 1×10^8 UFC mL⁻¹. Se evaluaron la inhibición in vitro, la población residual del patógeno en suelo, la longitud radicular, la biomasa seca y la incidencia de la enfermedad. Los datos se analizaron mediante ANOVA o Kruskal-Wallis, según el cumplimiento de los supuestos, y se integraron mediante análisis de componentes principales. La cepa C2 mostró la mayor inhibición in vitro ($57,4 \pm 11,1$ %), redujo la población residual de *R. solanacearum* a 23,1 UFC g⁻¹ de suelo, frente a 186,3 UFC g⁻¹ en el testigo, y disminuyó la incidencia de la enfermedad a 13,9 %, en comparación con 56,8 % en el testigo. Además, C2 promovió el mayor desarrollo radicular (30,4 cm) y la mayor biomasa seca (55,2 g). El análisis multivariado explicó el 84,4 % de la variación total y separó claramente a C2 del testigo. En conclusión, C2 presentó el perfil más consistente de supresión de *R. solanacearum* raza 2 y promoción del crecimiento vegetal, por lo que constituye una cepa candidata para futuras evaluaciones de biocontrol en condiciones de invernadero y campo.

Palabras clave: *Bacillus* sp.; biocontrol; *Ralstonia solanacearum* raza 2; marchitez bacteriana; promoción del crecimiento vegetal; banano.

Abstract: *Ralstonia solanacearum* race 2 is a soil-borne vascular pathogen that constrains the production of susceptible crops and requires effective biological management strategies. This study evaluated the potential of *Bacillus* sp. strains to suppress the pathogen and promote the growth of banana vitroplants. Antagonistic activity was determined through dual culture assays in vitro. For the plant assay, banana vitroplants acclimatized for four weeks were individually established in pots containing 750 g of sterilized soil inoculated with *R. solanacearum* race 2. After 24 h, 0.5 mL of *Bacillus* sp. suspensions adjusted to approximately 1×10^8 CFU mL⁻¹ were applied. In vitro inhibition, residual pathogen population in soil, root length, dry biomass, and disease incidence were evaluated. Data were analyzed using ANOVA or Kruskal–Wallis tests, according to assumption compliance, and integrated through principal component analysis. Strain C2 showed the highest in vitro inhibition ($57.4 \pm 11.1\%$), reduced the residual population of *R. solanacearum* to 23.1 CFU g⁻¹ of soil, compared with 186.3 CFU g⁻¹ in the control, and decreased disease incidence to 13.9%, compared with 56.8% in the control. In addition, C2 promoted the greatest root development (30.4 cm) and dry biomass accumulation (55.2 g). The multivariate analysis explained 84.4% of the total variation and clearly separated C2 from the control. In conclusion, C2 showed the most consistent profile for suppressing *R. solanacearum* race 2 and promoting plant growth, making it a promising candidate for further biocontrol evaluations under greenhouse and field conditions.

Keywords: *Bacillus* sp.; biocontrol; *Ralstonia solanacearum* race 2; bacterial wilt; plant growth promotion; banana.

1. Introducción

El marchitamiento bacteriano causado por *Ralstonia solanacearum* constituye una de las enfermedades vasculares más destructivas de los sistemas agrícolas tropicales y subtropicales (Ghorai et al., 2022). Este patógeno habita en el suelo, ingresa principalmente a través de heridas o aberturas naturales de la raíz y coloniza rápidamente el xilema, donde forma biopelículas y produce exopolisacáridos, enzimas degradadoras de la pared celular y efectores del sistema de secreción tipo III (Ababa, 2024). Como consecuencia, se altera el transporte de agua y nutrientes, se desarrollan síntomas de marchitez y, en infecciones severas, ocurre la muerte de las plantas (Chachar et al., 2022). La amplia gama de hospedantes, su variabilidad genética y su capacidad de persistir en suelo, agua y material vegetal infectado dificultan su manejo sostenible (Ileri, 2020).

La raza 2 de *R. solanacearum* representa una amenaza fitosanitaria relevante por su capacidad de establecerse en sistemas productivos susceptibles y generar focos persistentes de inóculo (Dickstein et al., 2024). Las medidas convencionales, como la eliminación de plantas enfermas, la desinfección, el uso de material de siembra sano y las prácticas culturales, son fundamentales para limitar la dispersión del patógeno; sin embargo, su eficacia puede ser insuficiente una vez que la bacteria se ha establecido en el suelo o en el sistema vascular de las plantas (Karim et al., 2018). Por ello, el desarrollo de herramientas biológicas capaces de reducir simultáneamente la población del patógeno en el suelo, limitar la incidencia de la enfermedad y mejorar la respuesta fisiológica de la planta constituye una prioridad para el manejo integrado de esta enfermedad (Vailleau et al., 2023).

Las bacterias del género *Bacillus* han recibido creciente atención como agentes de biocontrol debido a su capacidad de formar endosporas, sobrevivir en condiciones

ambientales adversas y colonizar la rizosfera (Ali et al., 2024). Diversas cepas de *Bacillus* spp. pueden limitar el crecimiento de fitopatógenos mediante antibiosis, competencia por nutrientes y nichos ecológicos, producción de compuestos volátiles y lipopeptídicos, formación de biopelículas benéficas e inducción de resistencia sistémica en la planta (Karačić et al., 2024). Adicionalmente, estas bacterias pueden favorecer el crecimiento vegetal mediante la producción de fitohormonas, la solubilización de nutrientes y la mejora de la arquitectura radicular (Sagar et al., 2022). Esta doble funcionalidad convierte a *Bacillus* spp. en una alternativa particularmente atractiva para el manejo de patógenos vasculares transmitidos por suelo, como *R. solanacearum* (Khan et al., 2022).

No obstante, la selección de una cepa con potencial de uso agrícola no debe basarse exclusivamente en su actividad antagonista *in vitro* (Cáceres et al., 2024). Un agente de biocontrol efectivo debe mantener su capacidad supresora en suelo, reducir la incidencia de la enfermedad en planta y, de forma ideal, promover variables asociadas con el vigor vegetal, como el desarrollo radicular y la acumulación de biomasa (Ali et al., 2025; Zhang et al., 2023). Por tanto, la integración de indicadores microbiológicos, fitopatológicos y agronómicos permite identificar cepas con una respuesta funcional más robusta y con mayor posibilidad de éxito bajo condiciones de producción (Hernández et al., 2026).

En este contexto, el objetivo del presente estudio fue evaluar el potencial de cepas de *Bacillus* sp. para suprimir *Ralstonia solanacearum* raza 2 y promover el crecimiento vegetal. Para ello, se determinaron la inhibición *in vitro* del patógeno, la población bacteriana residual en suelo, la incidencia de la enfermedad, el desarrollo radicular y la biomasa seca de las plantas. Además, se utilizó un análisis multivariado para integrar las respuestas evaluadas e identificar las cepas con el perfil más prometedor para su aplicación como agentes de biocontrol.

2. Metodología

2.1. Análisis estadístico

Los datos de inhibición *in vitro* de *Ralstonia solanacearum* raza 2, carga bacteriana residual en suelo, desarrollo radicular, biomasa seca e incidencia de la enfermedad se analizaron mediante un diseño de un solo factor, en el que el tratamiento correspondió a las cepas de *Bacillus* sp. y al testigo no inoculado. El análisis inferencial se realizó con los tratamientos que contaron con al menos tres repeticiones independientes (C1, C2, C3 y testigo); los tratamientos con una sola observación se presentaron únicamente de forma descriptiva y no se incluyeron en las comparaciones estadísticas.

La variable de carga bacteriana en suelo fue transformada mediante $\log_{10}(\text{UFC g}^{-1} + 1)$ para estabilizar la varianza. Para cada variable, la normalidad de los residuos y la homogeneidad de varianzas se evaluaron mediante las pruebas de Shapiro–Wilk y Levene, respectivamente. Cuando se cumplieron los supuestos paramétricos, las medias se compararon mediante un análisis de varianza de una vía (ANOVA), seguido de la prueba de Tukey; en caso contrario, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis, seguida de comparaciones múltiples de Dunn con ajuste de Benjamini–Hochberg.

Adicionalmente, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) a partir de las variables estandarizadas para explorar el patrón multivariado de respuesta de las cepas

de *Bacillus* sp. frente al patógeno. Los resultados se expresaron como medias e intervalos de confianza del 95 %, y se consideraron significativos valores de $p < 0,05$. Todos los análisis se realizaron en R versión 4.6.1.

2.2. Inhibición *in vitro* de *Ralstonia solanacearum* raza 2

La actividad antagonista de las cepas de *Bacillus* sp. contra *R. solanacearum* raza 2 se evaluó mediante cultivo dual. Se inoculó una suspensión estandarizada del patógeno sobre la superficie de placas con medio agar nutritivo y, posteriormente, se aplicó cada cepa de *Bacillus* sp. en [puntos/discos/estrías] equidistantes. Las placas se incubaron a 30 °C durante 48 h. La inhibición se determinó a partir del crecimiento del patógeno en presencia de cada cepa y se expresó como porcentaje de inhibición respecto al testigo, mediante la ecuación:

$$\text{Inhibición (\%)} = \frac{C - T}{C} \times 100$$

donde C representa el crecimiento de *R. solanacearum* en el testigo y T el crecimiento registrado en presencia de la cepa antagonista.

2.3. Supresión de *Ralstonia solanacearum* raza 2 en suelo

Para evaluar la reducción de la población de *R. solanacearum* raza 2 en suelo, se utilizaron macetas con 750 g de suelo previamente esterilizado. El suelo fue inoculado con una suspensión estandarizada del patógeno y, después de 24 horas, se aplicaron las suspensiones de las cepas de *Bacillus* sp. a una concentración aproximada de 1×10^8 UFC mL⁻¹, usando un volumen de 0,5 mL por unidad experimental. Al finalizar el período de evaluación, se tomaron 10 g de suelo por unidad experimental, los cuales se homogenizaron en 90 mL de agua peptonada estéril al 0,1 %. Se realizaron diluciones seriadas y se sembraron en un medio semiselectivo para *Ralstonia*, SMSA y TZC. Las placas se incubaron a 30 °C durante 72 h, y las colonias presuntivas se expresaron como UFC g⁻¹ de suelo.

2.4. Material vegetal y establecimiento del ensayo en planta

Se utilizaron vitroplantas de banano (*Musa* spp.) con cuatro semanas de aclimatación, seleccionadas por presentar tamaño uniforme y ausencia de síntomas visibles de daño o enfermedad. Las plantas se trasplantaron individualmente en macetas que contenían 750 g de suelo esterilizado e inoculado con *Ralstonia solanacearum* raza 2, de acuerdo con el procedimiento descrito. Veinticuatro horas después de la inoculación del suelo, se aplicaron las suspensiones de las cepas de *Bacillus* sp. en la zona radicular de cada planta. Las macetas se mantuvieron bajo condiciones controladas de 30°C, humedad relativa 80% y fotoperiodo 12/12, con riego según las necesidades hídricas del cultivo, durante todo el período experimental.

2.5. Desarrollo radicular

Al finalizar el ensayo en planta, las raíces se extrajeron cuidadosamente del suelo y se lavaron con agua corriente para retirar el sustrato adherido. El desarrollo radicular se evaluó mediante la medición de la longitud de la raíz principal, desde el cuello de la

planta hasta el ápice radical, utilizando una regla milimetrada o calibrador. Los resultados se expresaron en centímetros por planta.

2.6. Biomasa seca

Después de la evaluación del sistema radicular, las plantas se separaron en sus componentes [aéreo/radicular o planta completa], según el objetivo del ensayo. Las muestras se colocaron en bolsas de papel y se secaron en una estufa de ventilación forzada a 65 °C hasta alcanzar peso constante. Posteriormente, la biomasa seca se determinó con una balanza analítica y se expresó en gramos por planta.

2.7. Incidencia de la enfermedad

La incidencia de la enfermedad se determinó mediante evaluaciones periódicas de síntomas característicos de moko, incluyendo marchitez, clorosis foliar, flacidez, necrosis vascular y muerte de plantas. Al final del experimento, se calculó el porcentaje de incidencia mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Incidencia (\%)} = \frac{\text{Número de plantas con síntomas}}{\text{Número total de plantas evaluadas}} \times 100$$

Las plantas tratadas con cepas de *Bacillus* sp. se compararon con el testigo inoculado únicamente con *R. solanacearum* raza 2.

2.8. Integración multivariada de las variables

Finalmente, los valores de inhibición *in vitro*, población residual de *R. solanacearum* en suelo, desarrollo radicular, biomasa seca e incidencia de la enfermedad se integraron mediante un análisis de componentes principales. Antes del análisis, las variables se estandarizaron para evitar que las diferencias de escala influyeran en la ordenación. El ACP permitió identificar la separación entre cepas de *Bacillus* sp., el testigo y los patrones conjuntos de supresión del patógeno y promoción del crecimiento vegetal.

3. Resultados y Discusión

3.1. Inhibición *in vitro*

La inhibición *in vitro* de *Ralstonia solanacearum* raza 2 difirió entre los tratamientos ($p < 0,001$). El tratamiento C2 correspondiente a *Bacillus* sp. cepa 2 presentó la mayor actividad antagonista, con una inhibición media de $57,4 \pm 11,1$ %, superando a C1 ($26,9 \pm 8,3$ %), C3 ($26,6 \pm 5,4$ %) y al testigo ($1,4 \pm 2,1$ %). Los tratamientos C1 y C3 mostraron niveles de inhibición intermedios y similares entre sí, aunque ambos fueron superiores al testigo (Figura 1). En conjunto, estos resultados evidencian que C2 posee el mayor potencial para inhibir el crecimiento de *R. solanacearum* raza 2 bajo condiciones *in vitro*.

La inhibición *in vitro* ocurre cuando una bacteria antagonista limita el crecimiento de otra bacteria en un medio de cultivo compartido. Este efecto puede producirse por la liberación de sustancias antimicrobianas, por la reducción de nutrientes esenciales disponibles para el patógeno, por cambios locales en el pH o por interferencias en procesos celulares necesarios para la multiplicación bacteriana (De Gioia et al., 2022). En el caso de *Bacillus* sp., su actividad antagonista se asocia con frecuencia a la producción de metabolitos secundarios y moléculas que afectan la viabilidad, la

membrana celular o la formación de biopelículas de bacterias fitopatógenas (Barbé et al., 2022).

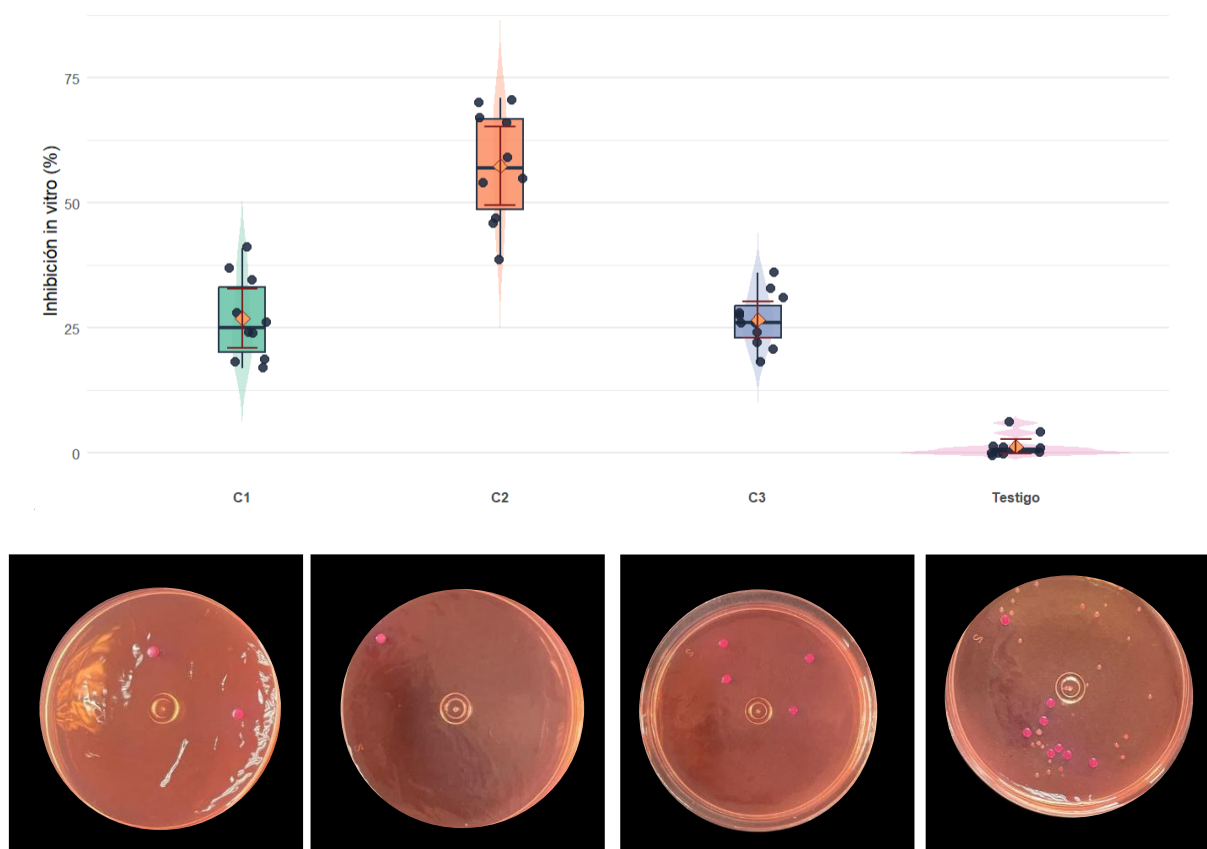


Figura 1. Inhibición *in vitro* de *Ralstonia solanacearum* raza 2 por los tratamientos evaluados. Los puntos representan las repeticiones individuales; los violines muestran la distribución de los datos; las cajas corresponden al rango intercuartílico y la línea interna indica la mediana. El rombo naranja representa la media y las barras verticales su intervalo de confianza del 95 %.

3.2. Inhibición de *Ralstonia* en suelo

Las cepas de *Bacillus* sp. evaluadas ejercieron un efecto supresor significativo sobre la población de *Ralstonia solanacearum* raza 2 en suelo ($p < 0,001$). Entre ellas, la cepa C2 mostró la mayor eficacia, al reducir la carga bacteriana residual hasta 23,1 UFC/g, lo que representa una disminución del 87,6 % con respecto al testigo (186,3 UFC/g). Las cepas C1 y C3 también redujeron la población del patógeno, registrando 45,2 y 56,3 UFC/g, respectivamente; sin embargo, su capacidad supresora fue inferior a la observada para C2. Estos hallazgos posicionan a C2 como la cepa de *Bacillus* sp. con mayor potencial de biocontrol frente a *R. solanacearum* raza 2 en condiciones de suelo, probablemente mediante mecanismos combinados de antibiosis, competencia por recursos y/o inducción de respuestas defensivas en la planta (Figura 2).

En el suelo, la población de un patógeno puede disminuir cuando se enfrenta a microorganismos capaces de establecerse y utilizar los mismos recursos y espacios ecológicos. Las cepas de *Bacillus* sp. pueden colonizar la zona cercana a las raíces y modificar las interacciones microbianas del suelo, limitando las condiciones necesarias para que *Ralstonia solanacearum* sobreviva y se multiplique (Morris y Blackwood, 2024).

Además, algunas cepas de este género pueden liberar sustancias con actividad antibacteriana o modificar el entorno inmediato de la raíz, lo que reduce la viabilidad del patógeno. No obstante, estos procesos describen mecanismos biológicamente posibles; identificar cuál opera en una cepa determinada requiere evaluaciones específicas adicionales (Alqahtani, 2025).

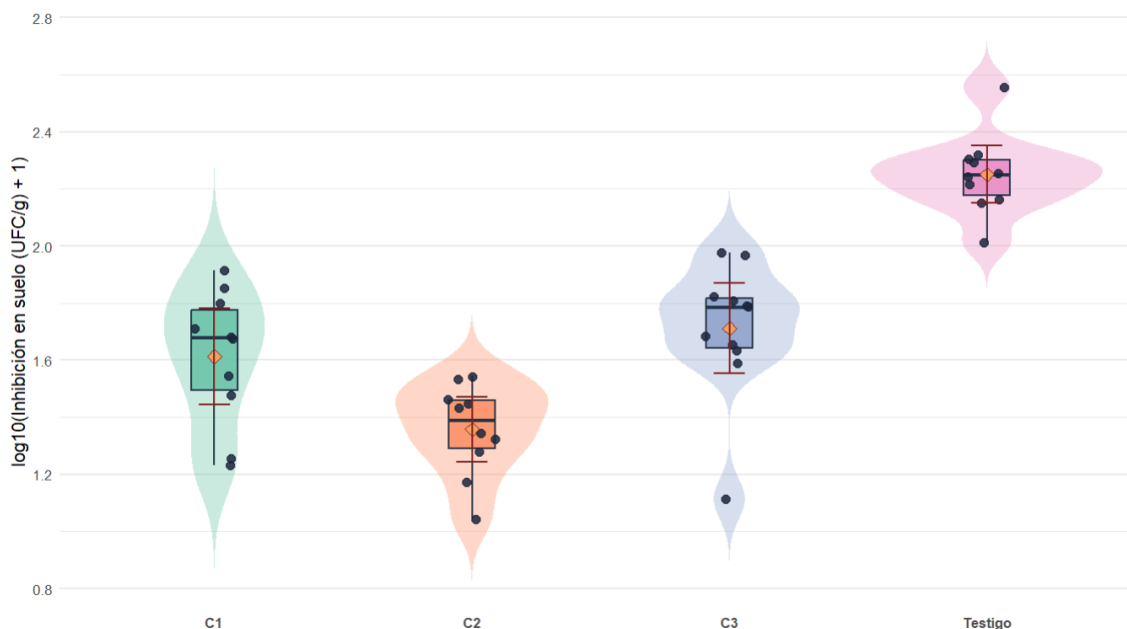


Figura 2. Efecto de cepas de *Bacillus* sp. sobre la población de *Ralstonia solanacearum* raza 2 en suelo. La carga bacteriana se expresa como $\log_{10}(\text{UFC/g} + 1)$. Los puntos representan las repeticiones individuales; los violines indican la distribución de los datos; las cajas muestran el rango intercuartílico y la línea central representa la mediana. El rombo naranja corresponde a la media y las barras verticales a su intervalo de confianza del 95 %.

3.3. Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales (ACP) evidenció una diferenciación marcada entre las cepas de *Bacillus* sp. evaluadas y el testigo. Las dos primeras componentes explicaron el 84,4 % de la variación total (CP1 = 70,3 %; CP2 = 14,1 %), confirmando una representación robusta de la respuesta multivariada. La cepa C2 se separó claramente hacia valores positivos de la CP1, mientras que el testigo se concentró en el extremo negativo, demostrando que C2 generó un perfil integral de respuesta sustancialmente diferente y asociado con una mayor supresión de *Ralstonia solanacearum* raza 2 (Figura 3). En contraste, C1 y C3 presentaron una superposición parcial, lo que sugiere respuestas funcionales más próximas entre ambas cepas. En conjunto, el ACP respalda a C2 como la cepa de *Bacillus* sp. con el desempeño multivariado más diferenciado y mayor potencial para el biocontrol de *R. solanacearum* raza 2.

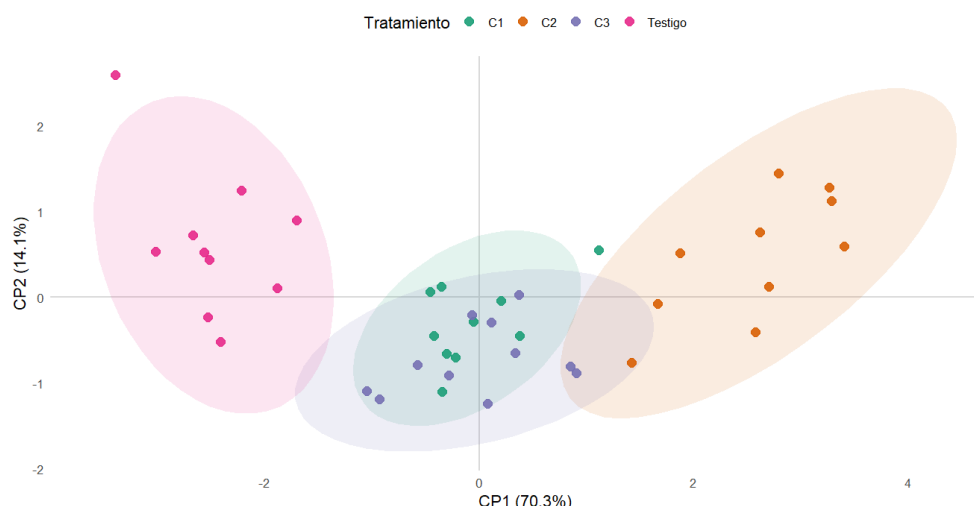


Figura 3. Análisis de componentes principales (ACP) de la respuesta multivariada inducida por cepas de *Bacillus* sp. frente a *Ralstonia solanacearum* raza 2. La CP1 y la CP2 explicaron el 70,3 % y el 14,1 % de la variación total, respectivamente. Cada punto representa una repetición individual y las elipses sombreadas representan la dispersión multivariada de cada tratamiento (intervalo de confianza del 95 %).

3.4. Desarrollo radicular

El desarrollo radicular fue fuertemente modulado por las cepas de *Bacillus* sp. ($p < 0,001$). La cepa C2 promovió el mayor crecimiento de raíces, alcanzando una longitud media de 30,4 cm, valor 78,8 % superior al registrado en el testigo (17,0 cm) y aproximadamente 45 % mayor que el observado con C1 (20,9 cm) y C3 (20,7 cm). Esta respuesta confirma que C2 no solo ejerce una elevada actividad antagonista frente a *Ralstonia solanacearum* raza 2, sino que también presenta una capacidad superior para estimular el crecimiento radicular de la planta (Figura 4). Por tanto, C2 se posiciona como la cepa de *Bacillus* sp. más promisoría, al combinar un efecto de biocontrol con una marcada promoción del desarrollo vegetal.

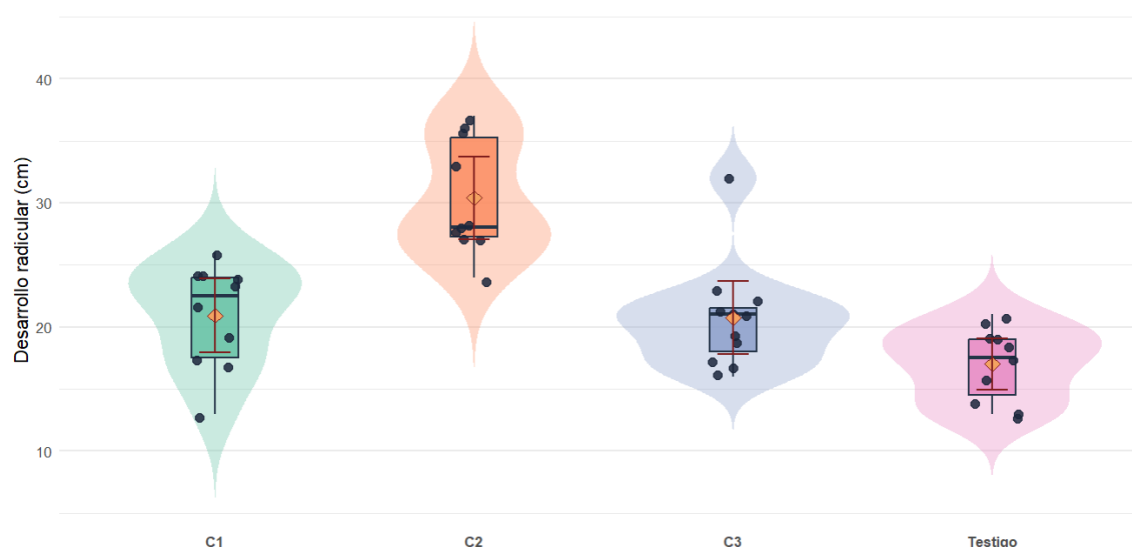


Figura 4. Efecto de cepas de *Bacillus* sp. sobre el desarrollo radicular de las plantas. Los puntos representan las repeticiones individuales; los violines muestran la distribución de los datos; las cajas corresponden al rango intercuartílico y la línea central representa la mediana. El rombo naranja indica la media y las barras verticales su

intervalo de confianza del 95 %.

3.5. Biomasa seca

La biomasa seca fue significativamente influenciada por las cepas de *Bacillus* sp. ($p < 0,001$). La cepa C2 produjo la mayor acumulación de biomasa, con una media de 55,2 g, superando en 63,8 % al testigo (33,7 g), en 35,3 % a C1 (40,8 g) y en 62,4 % a C3 (34,0 g). Este resultado confirma que C2 posee una capacidad sobresaliente para promover el crecimiento vegetal, expresada no solo en un mayor desarrollo radicular, sino también en una mayor producción de materia seca. En conjunto, la respuesta observada posiciona a C2 como la cepa de *Bacillus* sp. más eficiente para integrar la supresión de *Ralstonia solanacearum* raza 2 con la promoción del vigor y la productividad vegetal (Figura 5).

Algunas cepas de *Bacillus* sp. actúan como bacterias promotoras del crecimiento vegetal y favorecen procesos que mejoran la adquisición y el aprovechamiento de recursos por la planta. Biológicamente, esto puede ocurrir mediante la estimulación del desarrollo radicular, el aumento de la disponibilidad de nutrientes en la rizosfera y la disminución del estrés ocasionado por la presencia del patógeno (Vasques et al., 2024). Como resultado, la planta puede destinar una mayor proporción de sus recursos a la formación de tejidos y a la acumulación de materia seca. Sin embargo, estos mecanismos son posibilidades biológicas; su confirmación requeriría evaluar variables específicas, como la producción de fitohormonas, la solubilización de nutrientes o la colonización radicular por las cepas (Tsoetsi et al., 2022).

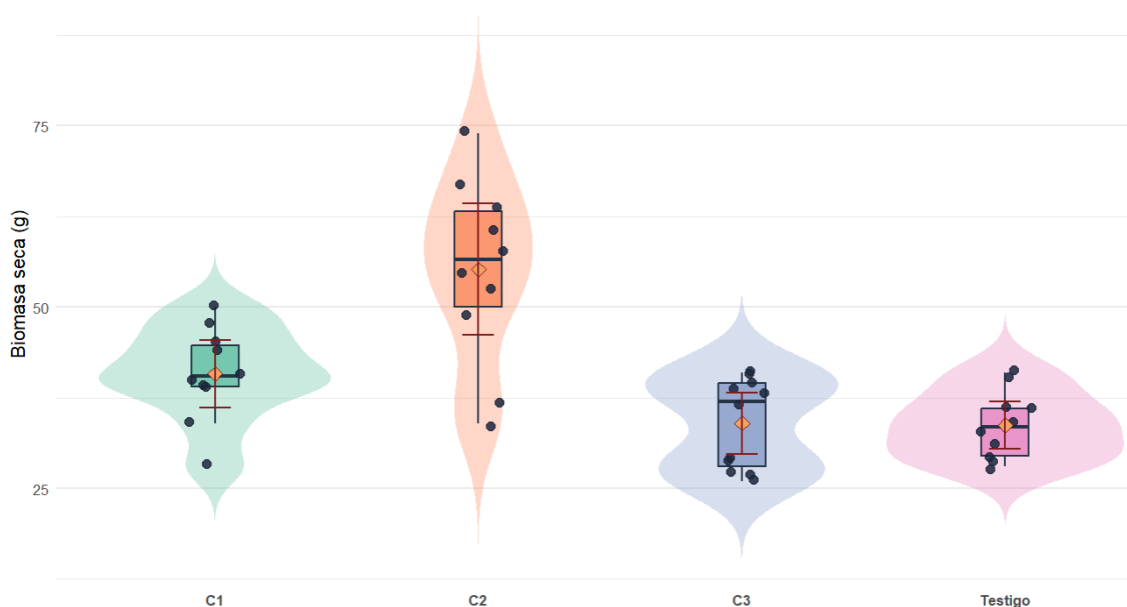


Figura 5. Efecto de cepas de *Bacillus* sp. sobre la biomasa seca de las plantas. Los puntos representan las repeticiones individuales; los violines muestran la distribución de los datos; las cajas indican el rango intercuartílico y la línea central representa la mediana. El rombo naranja corresponde a la media y las barras verticales a su intervalo de confianza del 95 %.

3.6. Incidencia de la enfermedad

La incidencia de la enfermedad fue significativamente afectada por las cepas de *Bacillus*

sp. ($p < 0,001$). La cepa C2 proporcionó el mayor nivel de protección, reduciendo la incidencia a 13,9 %, en comparación con 56,8 % en el testigo. Esta disminución equivale a una reducción relativa del 75,5 % de la incidencia, y fue superior a la alcanzada por C1 (37,0 %) y C3 (24,9 %). Aunque C3 mostró un efecto parcial de supresión, C2 mantuvo consistentemente la menor incidencia entre los tratamientos evaluados (Figura 6). En conjunto, estos resultados confirman que C2 es la cepa de *Bacillus* sp. con mayor eficacia para limitar el establecimiento de *Ralstonia solanacearum* raza 2 en planta, consolidando su potencial como agente de biocontrol y promotor de una respuesta fitosanitaria más favorable.

La reducción de la incidencia puede ocurrir cuando una cepa de *Bacillus* sp. limita la capacidad de *Ralstonia solanacearum* raza 2 para establecerse, multiplicarse y avanzar dentro de la planta. Desde el punto de vista biológico, este efecto puede estar relacionado con una menor población del patógeno en la rizosfera, una interferencia en la colonización de la raíz o una mayor capacidad de la planta para responder frente a la infección (Wang et al., 2023). Al disminuir la colonización bacteriana del sistema radical y vascular, se reduce la probabilidad de que las plantas desarrollen síntomas visibles de la enfermedad. Sin embargo, determinar si el efecto se debe a antagonismo directo, competencia microbiana o activación de defensas vegetales requiere evaluaciones complementarias específicas (Abu Bakar et al., 2025).

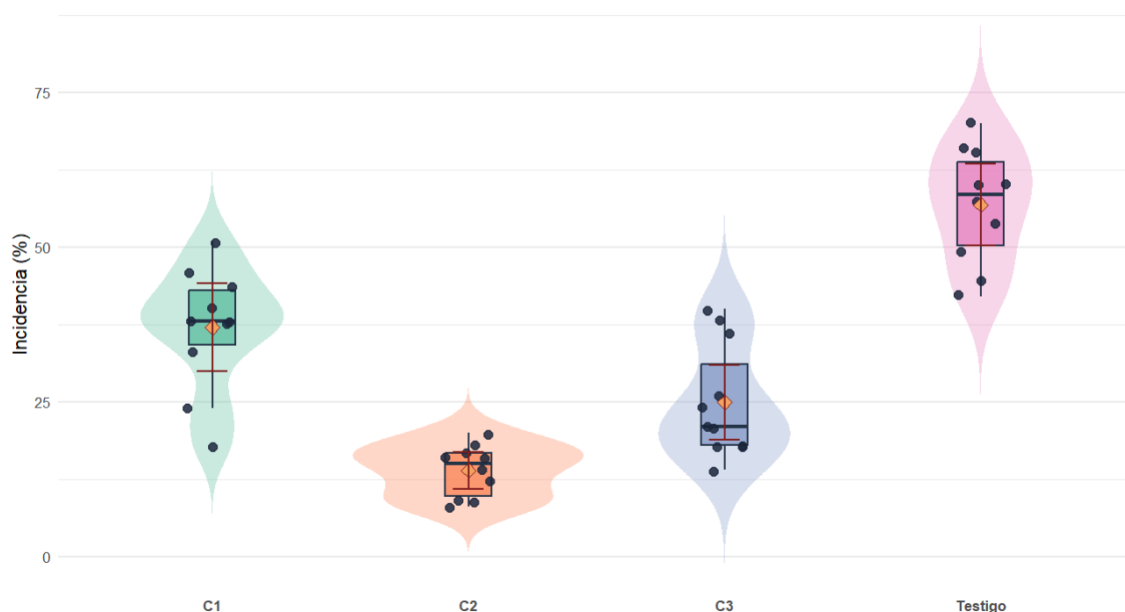


Figura 6. Efecto de cepas de *Bacillus* sp. sobre la incidencia de la enfermedad causada por *Ralstonia solanacearum* raza 2. Los puntos representan las repeticiones individuales; los violines muestran la distribución de los datos; las cajas indican el rango intercuartílico y la línea central representa la mediana. El rombo naranja corresponde a la media y las barras verticales a su intervalo de confianza del 95 %.

4. Conclusiones

Bajo las condiciones evaluadas, la cepa C2 de *Bacillus* sp. mostró una respuesta multifuncional superior, al combinar la supresión de *Ralstonia solanacearum* raza 2 en ensayos *in vitro* y en suelo con una reducción consistente de la incidencia de la enfermedad en vitroplantas de banano. Estos resultados respaldan su selección como

candidata prioritaria para el desarrollo de estrategias de biocontrol dirigidas al manejo de la marchitez bacteriana.

La asociación entre la reducción de la presión del patógeno y el incremento del desarrollo radicular y de la biomasa seca indica que C2 puede contribuir simultáneamente a la sanidad y al vigor de las plantas. La validación de su eficacia en suelos no esterilizados, bajo condiciones de invernadero y campo, junto con la caracterización taxonómica y funcional de la cepa, será necesaria para determinar su viabilidad como bioinsumo agrícola.

Contribución de los autores: Conceptualización, KJS-R. y HDT-Z.; metodología, KJS-R., HDT-Z. y VEZ-C.; software, VEZ-C.; validación, PFP-Z.; análisis formal, KJS-R. y VEZ-C.; investigación, KJS-R., HDT-Z., VEZ-C. y PFP-Z.; recursos, HDT-Z. y PFP-Z.; curación de datos, VEZ-C.; redacción del borrador original, KJS-R.; revisión y edición del manuscrito, HDT-Z., VEZ-C. y PFP-Z.; visualización, VEZ-C.; supervisión, PFP-Z. Todos los autores han leído y aprobado la versión final publicada del manuscrito.

Financiamiento: La presente investigación no recibió financiamiento externo.

Agradecimientos: Los autores expresan su agradecimiento a la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) del Ecuador, por el apoyo otorgado mediante su programa de becas, y a la Unidad de Posgrado de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ), por el respaldo académico e institucional brindado durante el desarrollo de esta investigación.

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses de carácter personal, profesional, institucional, académico o financiero que pudiera haber influido de manera inapropiada en el diseño, desarrollo, análisis, interpretación de los resultados o preparación del presente manuscrito. Asimismo, manifiestan que la investigación fue realizada con independencia y transparencia, y que no mantienen relaciones o compromisos que puedan afectar la objetividad, integridad o imparcialidad del trabajo presentado.

Referencias bibliograficas

- Ababa, G. (2024). Pathogenic diversity, ecology, epidemiology, and management practices of the potato bacterial wilt (*Ralstonia solanacearum*) disease. *Cogent Food & Agriculture*, 10(1). <https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2407953>
- Abu Bakar, F., Ramaiya, S. D., & Min, K. Y. (2025). Molecular insight, pathogenesis and resistance management of bacterial wilt (*Ralstonia solanacearum*) disease. *Cogent Food & Agriculture*, 11(1). <https://doi.org/10.1080/23311932.2025.2579885>
- Ali, I. I. (2025). *Bacillus* spp. As bioagents- applications and effective strategies in plant bacterial disease management: A review. *Agricultural Reviews, Of*. <https://doi.org/10.18805/aq.rf-371>
- Ali, MA, Ahmed, T., Ibrahim, E., Rizwan, M., Chong, KP, & Yong, JWH (2024). Una revisión sobre los mecanismos y perspectivas de las bacterias endófitas en el biocontrol de hongos fitopatógenos y sus actividades promotoras del crecimiento vegetal. *Heliyon*, 10 (11), e31573. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31573>
- Alqahtani, F. S. (2025). The utilization of microorganisms for biological control of soil-borne plant pathogens: a sustainable strategy for managing plant diseases - a

- comprehensive review. *Journal of Plant Pathology: An International Journal of the Italian Phytopathological Society*, 107(4), 1815–1839. <https://doi.org/10.1007/s42161-025-01984-1>
- Barbé, S., Figàs-Segura, À., Benada, M., Navarro-Herrero, I., Sampaio, T. M., Biosca, E. G., & Marco-Noales, E. (2022). Plant-associated microbiota as a source of antagonistic bacteria against the phytopathogen *Erwinia amylovora*. *Environmental Microbiology Reports*, 14(4), 559–569. <https://doi.org/10.1111/1758-2229.13064>
- Cáceres, H., Barriga-Sánchez, M., Bendezú, L., Huamán, E., Becerra-Canales, B., Almanza, A., Ortiz-Campos, J., & Barra-Bucarei, L. (2024). Actividad antagonista de levaduras y bacterias lácticas frente a cepas fitopatógenas de importancia económica en agricultura. *Revista Chilena de Investigaciones Agropecuarias*, 84 (5), 663–673. <https://doi.org/10.4067/s0718-58392024000500663>
- Chachar, Z., Xue, X., Fang, J., Chen, M., Jiarui, C., Chen, W., Ahmed, N., Chachar, S., Narejo, M.-U.-N., Ahmed, N., Fan, L., Lai, R. y Qi, Y. (2025). Mecanismos clave de la interacción planta-*Ralstonia solanacearum* en la patogénesis del marchitamiento bacteriano. *Fronteras en microbiología*, 16, 1521422. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1521422>
- De Gioia, M., Russo, P., De Simone, N., Grieco, F., Spano, G., Capozzi, V., & Fragasso, M. (2022). Interactions among relevant non-*Saccharomyces*, *Saccharomyces*, and Lactic Acid Bacteria species of the wine microbial consortium: Towards advances in antagonistic phenomena and biocontrol potential. *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*, 12(24), 12760. <https://doi.org/10.3390/app122412760>
- Dickstein, ER, Bocsanczy, AM, Champoiseau, PG, Jones, JB, Norman, DJ, Paret, M., Sharma, A., Momol, TM, Allen, C., Huang, Q., Miller, SA, Shadman-Adolpho, S., Evans-Goldner, L., Liu, Z., Bulluck, R., Cardwell, K., & Fajardo, JE (2024). Plan de recuperación para *Ralstonia solanacearum* raza 3 biovar 2 (filotipo IIB, secuvans 1 y 2) causante de la podredumbre parda de la papa, la marchitez bacteriana del tomate y la marchitez del sur del geranio. *Plant Health Progress*, 25 (1), 98–139. <https://doi.org/10.1094/php-03-23-0027-rp>
- Ghorai, AK, Dutta, S. y Roy Barman, A. (2022). Diversidad genética de *Ralstonia solanacearum* que causa marchitez bacteriana vascular en diferentes regiones agroclimáticas de Bengala Occidental, India. *PloS One*, 17 (9), e0274780. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0274780>
- Hernández-Amador, E., Montesdeoca-Flores, D. T., & Luis-Jorge, J. C. (2026). *Bacillus* as premier biocontrol agents: Mechanistic insights, strategic application, and future regulatory landscapes in sustainable agriculture. *Plants*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/plants15030516>
- Ileri, D. F. (2020). *Effects of inorganic fertilizer on tomato - bacterial wilt interactions in high tunnel tomato varieties*. International Centre of Insect Physiology and Ecology.
- Karačić, V., Miljković, D., Marinković, J., Ignjatov, M., Milošević, D., Tamindžić, G., & Ivanović, M. (2024). *Bacillus* species: Excellent biocontrol agents against tomato

- diseases. *Microorganisms*, 12(3), 457.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms12030457>
- Karim, Z., Hossain, M., & Begum, M. (2018). Ralstonia solanacearum: A Threat to Potato Production in Bangladesh. *Fundamental and Applied Agriculture*, 3(1), 1.
<https://doi.org/10.5455/faa.280361>
- Khan, A. R., Mustafa, A., Hyder, S., Valipour, M., Rizvi, Z. F., Gondal, A. S., Yousuf, Z., Iqbal, R., & Daraz, U. (2022). Bacillus spp. as Bioagents: Uses and Application for Sustainable Agriculture. *Biology*, 11(12), 1763.
<https://doi.org/10.3390/biology11121763>
- Morris, S. J., & Blackwood, C. B. (2024). The ecology of soil biota and their function. En *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry* (pp. 275–302). Elsevier.
- Sagar, A., Yadav, S. S., Sayyed, R. Z., Sharma, S., & Ramteke, P. W. (2022). Bacillus subtilis: A multifarious plant growth promoter, biocontrol agent, and bioalleviator of abiotic stress. En *Bacilli in Climate Resilient Agriculture and Bioprospecting* (pp. 561–580). Springer International Publishing.
- Tsotetsi, T., Nepthali, L., Malebe, M., & Tugizimana, F. (2022). Bacillus for plant growth promotion and stress resilience: What have we learned? *Plants*, 11(19), 2482.
<https://doi.org/10.3390/plants11192482>
- Vailleau, F., & Genin, S. (2023). Ralstonia solanacearum: An arsenal of virulence strategies and prospects for resistance. *Annual Review of Phytopathology*, 61, 25–47. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-021622-104551>
- Vasques, N. C., Nogueira, M. A., & Hungria, M. (2024). Increasing application of multifunctional Bacillus for biocontrol of pests and diseases and plant growth promotion: Lessons from Brazil. *Agronomy (Basel, Switzerland)*, 14(8), 1654.
<https://doi.org/10.3390/agronomy14081654>
- Wang, Z., Luo, W., Cheng, S., Zhang, H., Zong, J., & Zhang, Z. (2023). Ralstonia solanacearum - A soil borne hidden enemy of plants: Research development in management strategies, their action mechanism and challenges. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1141902. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1141902>
- Zhang, N., Wang, Z., Shao, J., Xu, Z., Liu, Y., Xun, W., Miao, Y., Shen, Q., & Zhang, R. (2023). Biocontrol mechanisms of Bacillus: Improving the efficiency of green agriculture. *Microbial Biotechnology*, 16(12), 2250–2263.
<https://doi.org/10.1111/1751-7915.14348>