

Efecto de la humedad relativa y la temperatura sobre la marchitez bacteriana en plantas de jitomate causada por la infección de *Ralstonia solanacearum* en diferentes concentraciones

Victor Hugo Guadarrama-Pérez^{1*} , Victor Rivelino Juárez-González^{1,2} , Oscar Guadarrama-Pérez³ , Elian Yuritzi Alegría-Herrera³ , José Luis Rivera-Corona³ , Jesús Hernández-Romano^{3**} 

¹Dirección de Posgrado en Ciencias en Biotecnología, Universidad Politécnica del Estado de Morelos, Jiutepec, Morelos, México. CP.62550. ²Departamento de Medicina Molecular y Bioprocesos, Instituto de Biotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad 2001, Col. Chamilpa. ³Dirección de Ingeniería en Tecnología Ambiental y Biotecnología, Universidad Politécnica del Estado de Morelos, Jiutepec, Morelos, México. CP.62550.

Email de autores para correspondencia: *vguadarrama@upemor.edu.mx;
**jhernandez@upemor.edu.mx

Recibido: 21 septiembre 2025. **Aceptado:** 22 junio 2026

RESUMEN

La marchitez bacteriana (MB) causada por *Ralstonia solanacearum* es una de las enfermedades de mayor incidencia en el cultivo de jitomate. En este estudio se evaluó la influencia de la concentración del inóculo bacteriano, la temperatura y la humedad relativa sobre la progresión de la MB en plantas de jitomate cultivadas en invernadero. Se establecieron dos condiciones experimentales: un bioespacio (1) con techo plástico y un cubo (2) transparente instalado al interior del bioespacio, lo que generó diferencias significativas en la humedad relativa y la temperatura. Se aplicaron diferentes concentraciones bacterianas (10^5 , 10^6 , 10^7 y 10^8 UFC/mL) al pie de tallo de cada planta y se registró la progresión de la enfermedad mediante la proporción de folíolos marchitos y una escala de severidad asociada. Paralelamente, se monitorearon la temperatura y la humedad relativa. Los resultados mostraron que las concentraciones más altas del inóculo bacteriano (10^7 y 10^8 UFC/mL) incrementaron la severidad de la MB. Sin embargo, se observó que el microclima generado dentro del cubo —con mayores niveles de temperatura y humedad relativa— promovió una progresión aparente más alta de la enfermedad y un colapso (pérdida de la vertical o doblamiento del tallo) frecuente de la planta comparado con el bioespacio. En conclusión, la MB en jitomate está asociada a la densidad del inóculo bacteriano durante la infección y se podría ver afectada por las condiciones ambientales, siendo la

temperatura y la humedad relativa factores clave aparentes en la progresión de la enfermedad. Estos hallazgos resaltan la necesidad de integrar el manejo ambiental en las estrategias de control de *R. solanacearum* sobre la MB en sistemas de producción de jitomate en invernadero.

Palabras clave: *Ralstonia solanacearum*; bacterias fitopatógenas; virulencia; patogenicidad; marchitez bacteriana.

ABSTRACT

Bacterial wilt (BW), caused by *Ralstonia solanacearum*, is one of the most devastating and widespread diseases affecting tomato production. This study investigated the effects of bacterial inoculum concentration and environmental conditions on the development of bacterial wilt in greenhouse-grown tomato plants. Two experimental environments were compared: an open greenhouse biospace with a plastic roof and a transparent acrylic cube placed inside it. The cube created a distinct microclimate with significantly higher temperature and relative humidity. Four inoculum concentrations (10^5 , 10^6 , 10^7 , and 10^8 CFU/mL) were tested by soil drenching. Disease progression was assessed by measuring the percentage of wilted leaflets and using a standardized severity scale, while temperature and relative humidity were continuously monitored. Results showed that higher inoculum concentrations (10^7 and 10^8 CFU/mL) led to greater disease severity. However, the most striking effect was observed in the microclimate cube, where elevated temperature and relative humidity significantly accelerated disease progression, resulting in earlier symptom expression, faster wilting, and higher rates of plant collapse (loss of turgidity and stem lodging) compared to plants in the open biospace. In conclusion, while initial inoculum density strongly influences bacterial wilt severity in tomatoes, environmental conditions, particularly temperature and relative humidity, are critical apparent factors of disease progression. These findings underscore the importance of integrating microclimate management into control strategies for *Ralstonia solanacearum* in protected tomato cultivation systems.

Keywords: *Ralstonia solanacearum*; phytopathogenic bacteria; virulence; pathogenicity; bacterial wilt.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de jitomate tiene gran importancia económica en México, ya que se ubica entre los principales productos agrícolas con exportación a nivel mundial, con un valor de producción

anual de 4200 millones de dólares para el año 2024 [1]. Este cultivo genera empleos directos e indirectos en toda la cadena productiva, desde el campo hasta la agroindustria, y contribuye de manera significativa al desarrollo regional en

estados como Jalisco, Michoacán, Sinaloa, Veracruz, Sonora y Chihuahua. Además, el jitomate es una de las hortalizas con mayor valor de exportación, especialmente hacia los Estados Unidos y Canadá, lo que se traduce en una importante entrada de divisas y en el fortalecimiento de la balanza agroalimentaria nacional [1, 2].

Ralstonia solanacearum es un fitopatógeno que forma parte del “complejo de especies *R. solanacearum* (RSSC)”, conformado por las especies *R. solanacearum*, *R. pseudosolanacearum* y *R. syzygii*. Este conjunto de especies presenta alta variabilidad genómica y se distribuye ampliamente en climas tropicales y subtropicales, y es considerado como una de las bacterias fitopatógenas más devastadoras en la agricultura global. *R. solanacearum* se considera el segundo patógeno bacteriano más devastador para plantas económicamente importantes, afectando a más de 250 especies vegetales, especialmente a cultivos de solanáceas como el jitomate y la papa [3]. Se estima que, a nivel mundial, la presencia de *R. solanacearum* en cultivos de jitomate puede ocasionar pérdidas de rendimiento entre el 30% y el 100% [4]. Si bien en México no existen datos acerca de las pérdidas generadas, sí los hay en cuanto a incidencia en los estados de Sinaloa, Estado de México y Morelos [5, 6].

R. solanacearum inicia su infección a través de heridas o aberturas naturales en las raíces de la planta, colonizando los vasos xilemáticos y desplazándose en el sistema vascular hasta alcanzar los tallos, y en algunos casos también

las hojas [7]. Una vez que coloniza el xilema, tiene la capacidad de formar biopelículas que obstruyen el flujo del agua y nutrientes, lo que genera síntomas de marchitez bacteriana (MB) severa [5]. Además, *R. solanacearum* produce enzimas que degradan la pared celular de la planta, como celulasas, pectinasas y proteasas, y utiliza el sistema de secreción tipo III (T3SS) para inyectar proteínas efectoras (factores de virulencia) en las células vegetales, suprimiendo las defensas inmunitarias del hospedero [8].

Algunos autores han evaluado la capacidad de infección del RSSC en hospederos como el jitomate, la papa o el tabaco, y la severidad de los síntomas frente a diferentes cepas o especies, mostrando que existen cepas más agresivas capaces de inducir los síntomas de la MB más rápido que otras [9, 10]. Además, diferentes estudios han utilizado al RSSC como un modelo clave en el área de patogénesis vegetal debido a su amplia distribución, persistencia ambiental y enorme diversidad genética [11-13]. Si bien existen algunos estudios acerca de cómo las variables ambientales como la temperatura y la humedad relativa pueden afectar la expresión de algunos genes de la planta en laboratorio [14, 15], los ensayos experimentales en escala de invernadero son necesarios, ya que presentan condiciones similares a las reales para el cultivo de jitomate en este sistema. En el presente trabajo, se evaluó el efecto de la concentración bacteriana del inóculo de infección, así como la posible asociación de la temperatura y la humedad relativa sobre la progresión de la MB

causada por *R. solanacearum* en plantas de jitomate cultivadas en invernadero bajo dos condiciones distintas.

METODOLOGÍA

Cepa, crecimiento e inoculación

La cepa de *R. solanacearum* se aisló en el municipio de Coatlán del Río, una de las zonas más cálidas en el Estado de Morelos, en un invernadero cuyas plantas de jitomate presentaban síntomas de MB [5]. Para el inóculo de infección, se preparó un cultivo líquido de 24 h (que presenta la fase de crecimiento exponencial) en medio NBY a 28 °C y a una agitación de 200 rpm [16]. Posteriormente, el cultivo se centrifugó y el pellet se resuspendió en una solución nutritiva optimizada (HydroTomato2020, ver anexo 1) para el cultivo de jitomate, hasta alcanzar un valor de densidad óptica de 0.100 ± 0.005 medida a 600 nm, la cual equivale a una concentración de aproximadamente 1×10^8 UFC/mL. Se hicieron diluciones decimales seriadas para las concentraciones bacterianas de 1×10^5 , 1×10^6 y 1×10^7 UFC/mL. Cada planta se inoculó en la raíz (al pie de tallo) con 50 mL de la dilución correspondiente y de la solución madre (1×10^8 UFC/mL). Se aplicaron 4 dosis bacterianas distintas en el bioespacio: 5×10^6 (inoculada con 50 mL de la solución bacteriana de 1×10^5 UFC/mL), 5×10^7 (inoculada con 50 mL de la solución bacteriana de 1×10^6 UFC/mL), 5×10^8 (inoculada con 50 mL de la solución bacteriana de 1×10^7 UFC/mL) y 5×10^9 UFC (inoculada con 50 mL de la solución

bacteriana de 1×10^8 UFC/mL), Por cuestiones de disponibilidad de espacio, en el cubo se aplicaron del mismo modo sólo las dos concentraciones más altas: 5×10^8 (inoculada con 50 mL de la solución bacteriana de 1×10^7 UFC/mL) y 5×10^9 UFC (inoculada con 50 mL de la solución bacteriana de 1×10^8 UFC/mL)), también por disponibilidad de espacio, la N para el bioespacio fue de 20 para cada tratamiento, mientras que para el cubo, la N fue de 10.

Material vegetal, infección, condiciones de cultivo y medición de la MB

Se utilizaron plantas de jitomate de la marca Harris Moran, variedad “El Cid” [17]. Las plantas presentaban entre 15 y 25 hojas (foliolos) al ser inoculadas. Cada planta se encontraba en una bolsa plástica de cultivo, con tezontle de tamaño de partícula menor a 2 mm. El tezontle es una roca volcánica que sirve como sustrato inerte para brindar soporte en sistemas de riego semihidropónicos. Todas las plantas fueron regadas con solución Hydrotomato2020 (anexo1) utilizando un sistema de riego automático.

Las plantas se cultivaron bajo dos condiciones: 1) en un bioespacio con paredes de malla anti-áfidos y techo de plástico que bloquea el 40% de la radiación solar (de acuerdo con las especificaciones del fabricante). Se establecieron cinco grupos de veinte plantas cada uno, cada planta se inoculó con 50 mL de la correspondiente suspensión bacteriana; las plantas se distribuyeron al azar en cinco

bloques. Cada grupo fue sometido a uno de los cinco inóculos bacterianos antes mencionados, y se añadió un sexto grupo que fungió como control negativo en el cual no se aplicó la solución bacteriana. 2) La segunda condición fue un cubículo (cubo) construido con una sola pieza de plástico transparente ($2.2 \times 1.3 \times 4.1$ m) que se instaló en el interior del bioespacio y se selló a nivel del suelo con arena de tezontle. En su interior se colocaron dos grupos de diez plantas, inoculados con 5×10^9 y 5×10^8 UFC, respectivamente. Para ambas condiciones, las plantas fueron numeradas para su identificación y se colocaron dataloggers de la marca Onset Hobo (modelo U12-011) para registrar la temperatura y humedad relativa. Las condiciones de luz fueron dadas por los intervalos de noche y día durante el experimento.

La progresión de la MB se evaluó diariamente entre las 8:00-9:00 h, registrando el número de folíolos marchitos y se calculó el porcentaje de MB por cada planta. La severidad se clasificó en una escala de 0 a 5, donde 0 = sin MB; 1 = 1–25%; 2 = 25–50%; 3 = 50–75%; 4 = 75–100%; y 5 = planta colapsada. Posteriormente, se calculó el promedio por cada tratamiento por día. Utilizando los datos anteriores, se construyó una matriz en Microsoft Excel y con ayuda de Rstudio (versión 2025.05.1) se determinó el índice de correlación de Spearman.

Análisis estadístico

Para las pruebas de efecto del tamaño del

inóculo bacteriano sobre la progresión de la marchitez y la determinación de diferencias entre las variables ambientales registradas en bioespacio y cubo, se realizaron pruebas de comparación múltiple de Sidak, con un valor de alfa de 0.05, utilizando el software Prism Graphpad (versión de prueba).

Monitoreo de datos ambientales

Las variables ambientales de humedad relativa y temperatura del aire se registraron cada 15 minutos mediante los dataloggers en cada condición. A partir de estos datos, se calcularon los promedios de temperatura y humedad relativa mínima y máxima, identificando los valores extremos diarios durante veinte días. Además, se obtuvieron los promedios globales, diurnos (08:00–19:45 h) y nocturnos (19:45–8:00 h), considerando el promedio diario de cada variable a lo largo del experimento. Los datos obtenidos durante el experimento se registraron como las siguientes variables ambientales: temperatura máxima promedio (TMp), temperatura global promedio (TGp), temperatura mínima promedio (Tmp), temperatura nocturna promedio (Tnp), temperatura diurna promedio (Tdp). De igual manera, para la humedad relativa, se registraron: humedad relativa máxima promedio (HrMp), humedad relativa global promedio (HrGp), humedad relativa mínima promedio (Hrmp), humedad relativa nocturna promedio (Hrnp) y humedad relativa diurna promedio (Hrdp).

RESULTADOS

Se evaluó la progresión de la MB en dos condiciones distintas; en una de ellas, identificada como “bioespacio”, las plantas se encontraban dentro de un invernadero donde la temperatura y humedad relativa variaron directamente de las condiciones ambientales. En la otra condición, denominada el “cubo”, la temperatura y la humedad relativa aumentaron debido a la cubierta plástica. En el bioespacio se observó una progresión de la MB acelerada cuando se aplicaron 5×10^8 y 5×10^9 UFC; la aplicación de 5×10^7 UFC produjo un nivel de severidad media y 5×10^6 UFC una severidad baja (Figura 1A). En el cubo se evaluaron solo los inóculos de 5×10^9 y 5×10^8 UFC, ambas concentraciones produjeron un nivel de daño similar y en algunos casos superior comparado con el bioespacio a las mismas concentraciones (Figura 1B).

Se identificaron tres fenotipos durante el experimento: a) plantas sanas o que presentaron síntomas de MB parcial (S-MP) (Figura 2A), b) plantas que presentaron MB total (100% de los folíolos marchitos) sin colapsar (MTSC) (Figura 2B) y c) plantas colapsadas (C) (Figura 2C). En el bioespacio, los fenotipos preponderantes fueron los de MTSC y C para los inóculos de 5×10^9 y 5×10^8 UFC, respectivamente, mientras que a bajas concentraciones el fenotipo S-MP incrementó considerablemente. Por otro lado, el cubo presentó casi por completo el fenotipo C en las dos inoculaciones utilizadas (Figura 2D).

Se consideraron algunas variables del experimento en función de características de distribución en el invernadero, grado de daño y concentración del inóculo de infección, tales

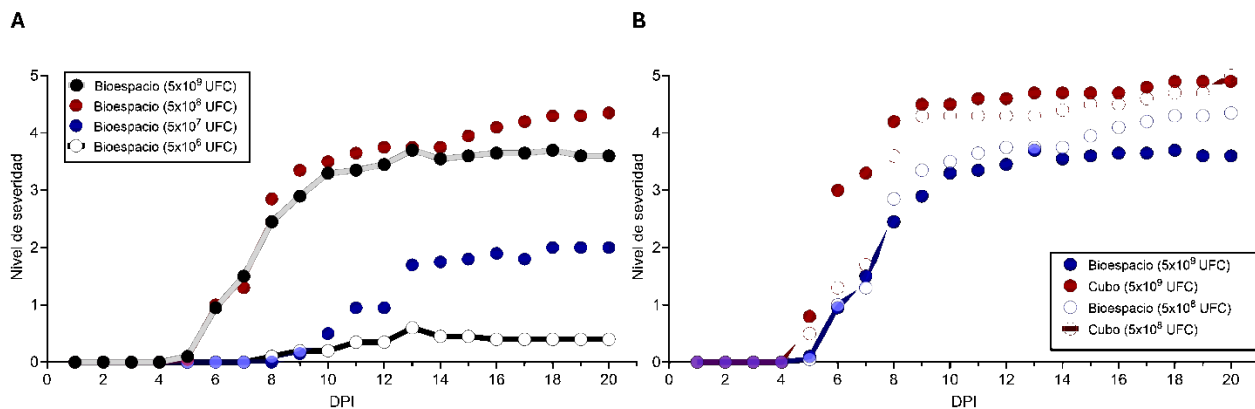


Figura 1. Nivel de severidad durante la progresión de la marchitez bacteriana (MB) en plantas de jitomate bajo dos condiciones experimentales. (A) plantas del bioespacio inoculadas con 50 mL de una solución de *Ralstonia solanacearum* a diferentes concentraciones (10^5 , 10^6 , 10^7 y 10^8 UFC/mL). (B) Plantas del bioespacio y del cubo inoculadas con 50 mL de una solución de *R. solanacearum* a concentraciones de 10^7 y 10^8 UFC/mL. Los valores representan el promedio del nivel de severidad de MB por día postinfección (DPI).

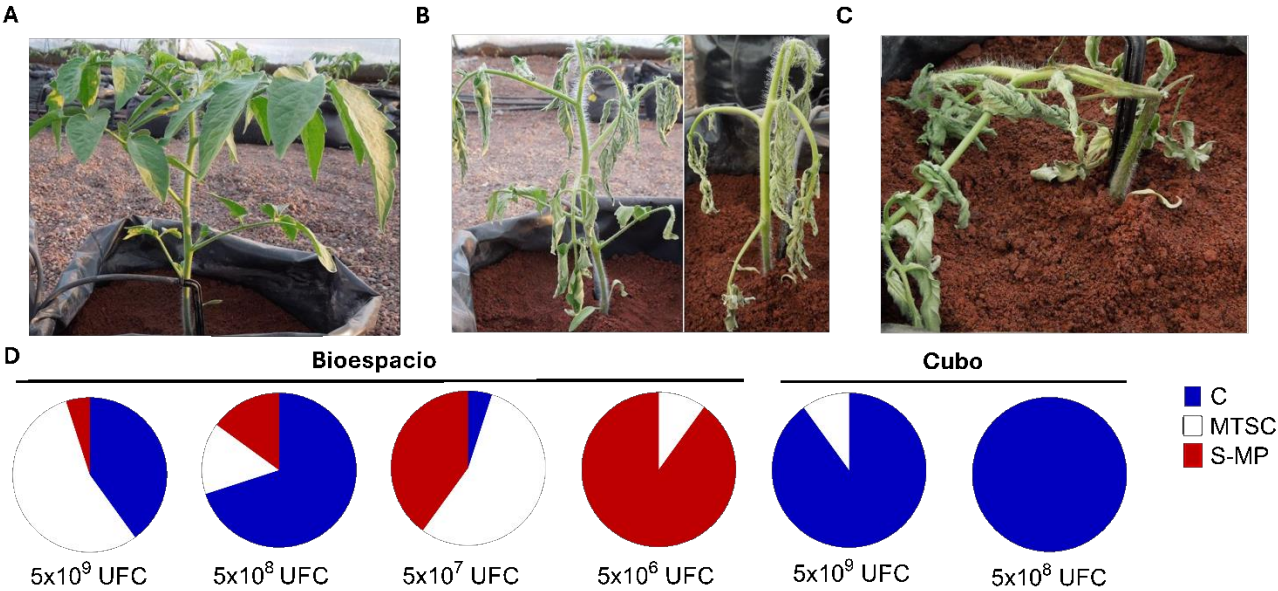


Figura 2. Fenotipos observados en plantas de jitomate después de 20 días de exposición a *R. solanacearum*. (A) Plantas sanas o con marchitez parcial (S-MP). (B) Plantas con marchitez total sin colapso (MTSC). (C) Plantas colapsadas (C). (D) Distribución de fenotipos en el bioespacio y el cubo según la concentración de inóculo.

como: el número de planta, la localización de la planta (bioespacio o cubo), el día del comienzo de la MB, el día en que la planta presentó el 100% de los síntomas de MB, la diferencia entre ambos (Progresión MB), el grado de MB, si la planta presentó colapso (Doblamiento del tallo) y la concentración. El análisis mostró una relación entre el inicio y el final de la MB

($r_s=0.7795$), así como la relación entre el fin de la MB y la progresión de la MB ($r_s=0.7312$). Además, de manera esperada, el análisis mostró una correlación positiva entre el grado de MB y el colapso de la planta ($r_s=0.5197$). Sin embargo, no se encontró correlación entre la concentración de la bacteria y la progresión de la MB (Figura 3).

	No. planta	Espacio	Inicio MB	Fin MB	Progresión MB	Grado MB	Colapso	Concentración
No. planta	1	0.4083	0.019892389	-0.06647	-0.12670647	0.143246	0.489285	-0.86614571
Espacio	0.408305	1	-0.214070241	-0.3968	-0.39393344	0.250178	0.405356	0
Inicio MB	0.019892	-0.2141	1	0.779591	0.142903068	0.138806	-0.17654	-0.146150846
Fin MB	-0.06647	-0.3968	0.779591491	1	0.731266582	0.031966	-0.35572	-0.143888616
Progresión MB	-0.12671	-0.3939	0.142903068	0.731267	1	-0.10066	-0.36988	-0.068217063
Grado MB	0.143246	0.2502	0.138806468	0.031966	-0.10065818	1	0.519731	-0.024684044
Colapso	0.489285	0.4054	-0.1765414	-0.35572	-0.36987833	0.519731	1	-0.250801027
Concentración	-0.86615	0	-0.146150846	-0.14389	-0.06821706	-0.02468	-0.2508	1

Figura 3. Matriz de correlación de Spearman entre variables experimentales: inicio y fin de la MB, progresión, grado de severidad, colapso, concentración bacteriana y condición de cultivo. Los valores de correlación se representan mediante una escala de color (rojo, positiva; azul, negativa).

Para cada planta se analizó el efecto del tamaño del inóculo bacteriano sobre el daño causado por la infección de *R. solanacearum*. Desde el contexto de la progresión de la MB, se contabilizó el día del inicio de los síntomas, el día en que la planta presentó MTSC y la diferencia entre ambos. La mayoría de las plantas comenzaron con los síntomas de MB entre los días 4 y 7 después de haber sido expuestas a *R. solanacearum*, y presentaron MTSC alrededor del día 10, lo que indica que la progresión de la MB de S-MP a MTSC se dio principalmente entre 3 y 5 días después de que los síntomas iniciaron (Figura 4A). Además, se analizó el efecto del tamaño de inóculo bacteriano sobre el desarrollo de MTSC; en el bioespacio no se observaron diferencias significativas entre los inóculos de 5×10^8 y 5×10^9 UFC en el día en que las plantas

presentaron MTSC (alrededor del día 10); sin embargo, una planta expuesta a 5×10^9 UFC no desarrolló marchitez. Utilizando un inóculo de 5×10^6 UFC se observó un retardo en alcanzar la MTSC en comparación con los inóculos de 5×10^9 , 5×10^8 y 5×10^7 UFC ($p=0.0022$, $p=0.008$ y $p=0.0037$, respectivamente) y un incremento en el número de plantas que no desarrollaron marchitez, que fueron 7 y 14 en los grupos expuestos a 5×10^7 y 5×10^6 UFC, respectivamente (Figura 4B). Cuando se comparó el desarrollo temporal de MTSC entre las plantas del bioespacio y las del cubo a inóculos de 5×10^9 y 5×10^8 UFC, se observó un desarrollo más temprano de la MTSC en el cubo, la diferencia en el desarrollo de MTSC fue estadísticamente significativa para el inóculo de 5×10^9 ($p=0.037$) pero no para el inóculo de 5×10^8 ($p=0.211$) (Figuras 4C y 4D).

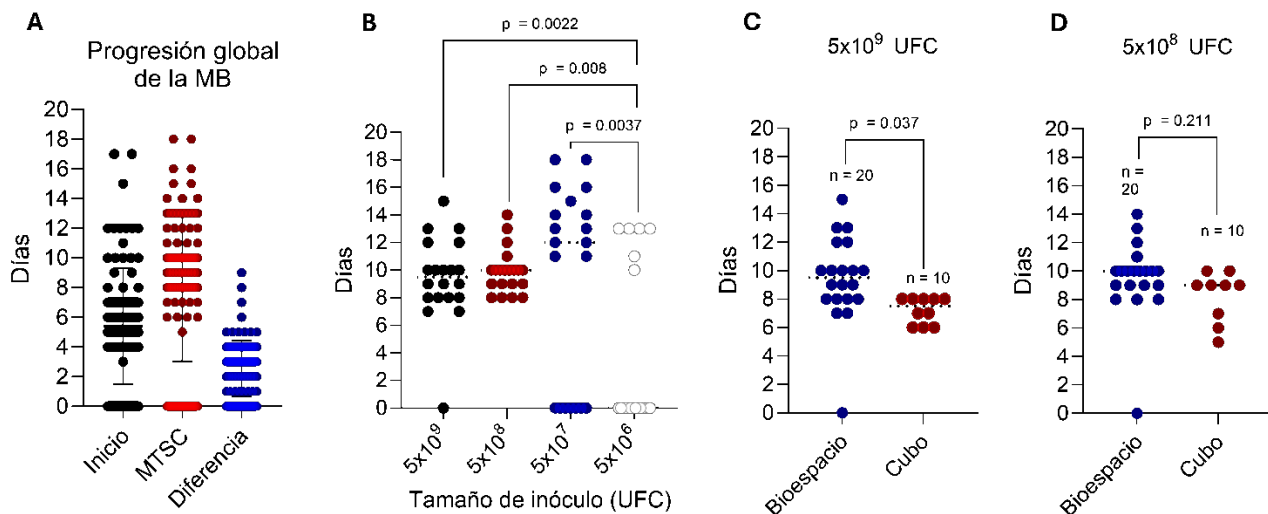


Figura 4. Efecto del tamaño del inóculo bacteriano sobre la progresión de la marchitez. (A) Días de inicio de síntomas y en los que se alcanzó la marchitez total sin colapso (MTSC) en las 100 plantas expuestas a *R. solanacearum* en el bioespacio, las plantas en cero nunca enfermaron. (B) Diferencias en el desarrollo temporal de MTSC en el bioespacio, en función del inóculo aplicado. (C) Comparación del inicio de la marchitez entre el bioespacio y el cubo con un tamaño de inóculo de 5×10^9 o de 5×10^8 UFC (D). Se muestran los valores de p de una prueba de comparación múltiple de Sidak utilizando un valor de alfa de 0.05.

Se observaron diferencias significativas en las variables de temperatura y humedad relativa entre ambas condiciones. Por ejemplo, las temperaturas con mayor variación fueron TMp, TGp y Tdp; con variaciones que van de 4 a 7 °C entre cada condición. Mientras que las temperaturas con menor variación fueron Tmp y Tnp, con variaciones de alrededor de 2 °C (Figura 5A). Por otro lado, todas las humedades relativas (HrMp, HrGp, Hrmp, Hrnp y Hrdp) fueron ampliamente superiores en la condición del cubo, ya que se observaron diferencias de 30 a 40% respecto a las del bioespacio (Figura 5B).

DISCUSIÓN

En el bioespacio, las plantas inoculadas con altas concentraciones bacterianas mostraron una elevada incidencia de marchitez bacteriana (MB), desarrollaron marchitez generalizada en toda la planta y presentaron un alto porcentaje de colapso. En contraste, a concentraciones

bajas de inóculo se registró un bajo grado de colapso y grado medio de desarrollo de MB. Estos hallazgos coinciden con estudios previos que reportan que la densidad inicial de la bacteria en el suelo o sustrato puede estar asociada con el grado del colapso vegetal [9, 10]. Los resultados de este estudio sugieren que un inóculo bacteriano menor o igual a 5×10^6 UFC no puede provocar marchitez en las plantas durante los primeros 20 días, que fue el tiempo que duró el experimento, y el nivel de severidad mostró un comportamiento asintótico.

En el cubo se observó una progresión acelerada en comparación con el bioespacio utilizando los mismos tamaños de inóculo. Este efecto sugiere que la diferencia en la temperatura y la humedad relativa en ambas condiciones puede favorecer la colonización bacteriana y la obstrucción vascular, tal como se ha documentado en otros hospederos [7]. En experimentos posteriores hemos observado que

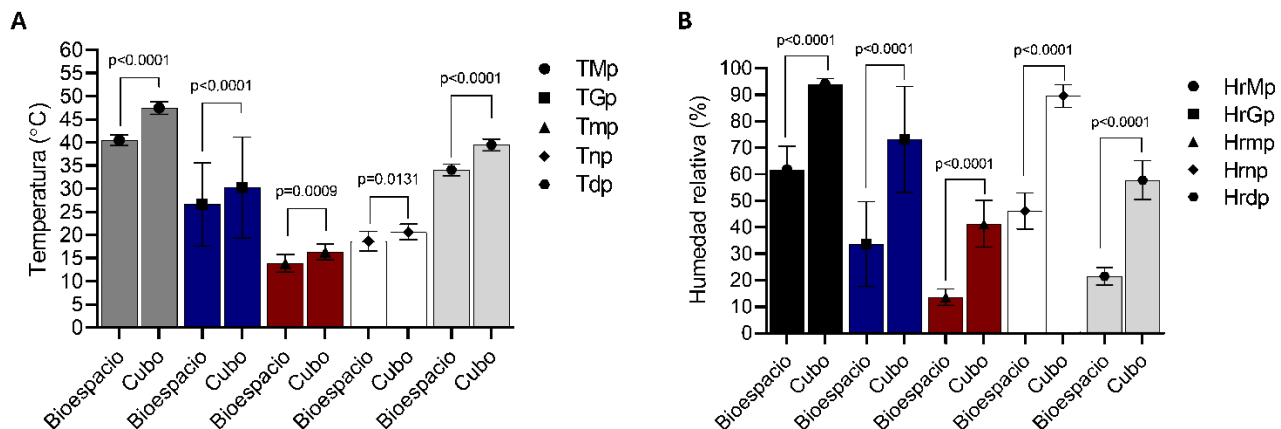


Figura 5. Variables ambientales registradas en bioespacio y cubo. (A) temperatura máxima (TMp), global (TGp), mínima (Tmp), nocturna (Tnp) y diurna (Tdp) promedio. (B) Humedad relativa máxima (HrMp), global (HrGp), mínima (Hrmp), nocturna (Hrnp) y diurna (Hrdp) promedio. Se muestran los valores de p de una prueba de comparación múltiple de Sidak utilizando un valor de alfa de 0.05.

condiciones de alta temperatura y elevada humedad relativa pueden inducir un estado de estrés fisiológico en la planta; sin embargo, en ausencia de inoculación con *R. solanacearum* no se presentan síntomas asociados a marchitez ni a estrés hídrico (Anexo 2, datos no publicados). El análisis estadístico mostró que el inicio de los síntomas y el desarrollo de MTSC estuvieron fuertemente correlacionados, al igual que la severidad de los síntomas con el colapso de la planta, lo que refuerza la utilidad de estos parámetros para evaluar la progresión de la enfermedad, e incluso ofrecen la posibilidad de evaluar la virulencia de distintas cepas de *R. solanacearum* en experimentos controlados.

Un aspecto relevante fue la ausencia de correlación significativa entre el tamaño de inóculo bacteriano y la progresión de la marchitez, lo que sugiere que, bajo condiciones ambientales favorables para el patógeno, el microclima podría superar el efecto de la dosis inicial de inóculo con tamaño de inóculo igual o superior a 1×10^7 UFC. Sin embargo, es necesario realizar más estudios con diseños experimentales robustos que permitan identificar los efectos directos de las variables ambientales sobre la incidencia, la progresión y la severidad de la MB. Algunos estudios sugieren que las enfermedades vegetales causadas por fitopatógenos bacterianos suelen agravarse en condiciones de alta temperatura y humedad [18, 19]. Esto respalda la hipótesis de que las variables ambientales, en particular la temperatura y la humedad relativa, son factores críticos en la epidemiología de *R.*

solanacearum y deben considerarse en estrategias de manejo y control [20].

Aunque los resultados obtenidos indican que las variaciones en humedad y temperatura no incrementaron significativamente el porcentaje de incidencia de la enfermedad, esto no implica que dichos factores carezcan de relevancia epidemiológica. En este sentido, si bien las condiciones ambientales evaluadas no promovieron un mayor número de infecciones, podrían influir en la progresión del patógeno una vez establecida la infección. Desde el punto de vista agronómico y fitopatológico, este efecto es relevante, ya que una mayor severidad se traduce en pérdidas económicas más significativas, incluso con niveles de incidencia constantes. Por lo anterior, se sugiere que los métodos de control que reduzcan la población bacteriana por debajo de concentraciones críticas que favorecen la infección podrían ser efectivos sin necesidad de erradicar la bacteria fitopatógena.

En resumen, los resultados obtenidos mostraron que la concentración bacteriana del inóculo de *Ralstonia solanacearum* influyó directamente en la manifestación de la MB. No obstante, la humedad relativa y la temperatura afectaron aparentemente la progresión y la severidad de los síntomas. Específicamente, la humedad relativa que mostró una mayor variación entre cada una de las condiciones. Esta variable podría tener un efecto sobre la progresión de la MB. Sin embargo, es necesario investigar esta hipótesis con un diseño experimental robusto que permita analizar su relación directa con la progresión y el grado de la enfermedad en

condiciones controladas.

CONCLUSIÓN

La progresión y severidad de la marchitez bacteriana en jitomate no dependen únicamente de la concentración inicial del inóculo, sino que posiblemente están influenciadas por las variables ambientales, ya que el microclima generado en el cubo —con mayor temperatura y humedad relativa— favoreció una progresión y una severidad aparentemente más altas que en el bioespacio, aun con las mismas dosis bacterianas de inóculo. Estos resultados sugieren que la interacción entre el tamaño del inóculo y valores altos de temperatura y humedad relativa podrían favorecer el desarrollo prematuro de la enfermedad.

En conjunto, los hallazgos resaltan la importancia de controlar las condiciones de cultivo en invernadero como una medida preventiva frente a la marchitez bacteriana. Además, aportan evidencia experimental sobre cómo la temperatura y la humedad relativa actúan como factores clave en la dinámica de infección de *R. solanacearum*, información que puede servir como base para diseñar estrategias integrales de manejo en sistemas de control para la producción de jitomate en invernadero.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran la ausencia de conflicto de interés.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de

Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por las becas otorgadas, y a la Universidad Politécnica del Estado de Morelos (UPEMor) por los recursos otorgados para la realización del presente proyecto de investigación.

REFERENCIAS

- [1]. Gobierno de México. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Base de datos disponible en: https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/
- [2]. Zhu M, Guan Z, Wu F. An Overview of the U.S. Tomato Industry. Tomato proceedings, 2013; 28-32. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Aline-Coelho-Frasca/publication/263589711_ti13_proceedings/links/0f31753b54fc71d552000000/ti13-proceedings.pdf#page=24
- [3]. Paudel S, Dobhal S, Alvarez AM, Arif M. Taxonomy and phylogenetic research on *Ralstonia solanacearum* species complex: A complex pathogen with extraordinary economic consequences. Pathogens, 2020; 9(11):886. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/pathogens9110886>
- [4]. Genin S, Denny TP. Pathogenomics of the *Ralstonia solanacearum* species complex. Annu Rev Phytopathol, 2012; 50:67–89. Disponible en: <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-081211-173000>
- [5]. Hernández-Romano J, Ramírez-Rojas S,

Ydrac-Morales CJ. First report of *Ralstonia solanacearum* causing tomato bacterial wilt in Mexico. New Dis Rep, 2012; 26:22. Disponible en: <https://doi.org/10.5197/j.2044-0588.2012.026.022>

[6]. Garcia-Estrada RS, Marquez-Zequera I, Osuna-Garcia LA, Tovar-Pedraza JM, Cruz-Lachica I. Disease Note Diseases Caused by Bacteria and Phytoplasmas First Report of *Ralstonia pseudosolanacearum* Causing Wilt Disease in Tomato (*Solanum lycopersicum*) Plants in Mexico. Plant Disease, 2023; 107(7): 2212 Disponible en: <https://doi.org/10.1094/PDIS-08-22-1838-PDN>

[7]. Lowe-Power TM, Khokhani D, Allen C. How *Ralstonia solanacearum* Exploits and Thrives in the Flowing Plant Xylem Environment. Trends Microbiol, 2018; 26(11):929–42. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0966842X18301379>

[8]. Guadarrama-Pérez VH, Juárez-González VR, Guadarrama-Pérez O, Alegría-Herrera EY, Rivera-Corona JL, Hernández-Romano J, *et al*. Mecanismos involucrados en el sistema tripartita planta-bacteria-fago de *Ralstonia solanacearum*. Alianzas y Tendencias BUAP, 2025; 10(37): 64-83. Disponible en: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15081485>

[9]. Lewis Ivey ML, Jimenez Madrid AM, Daunay MC, Shah DA. Evaluation of tomato, eggplant and pepper accessions for resistance to *Ralstonia solanacearum* species complex (RSSC) strains from Louisiana. Eur J Plant

Pathol, 2021; 159:279–93. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10658-020-02160-0>

[10]. Li X, Liu Y, Cai L, Zhang H, Shi J, Yuan Y. Factors affecting the virulence of *Ralstonia solanacearum* and its colonization on tobacco roots. Plant Pathol, 2017; 66:1345–56. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/PPA.12675>

[11]. de Pedro-Jové R, Puigvert M, Sebastià P, Macho AP, Monteiro JS, Coll NS, *et al*. Dynamic expression of *Ralstonia solanacearum* virulence factors and metabolism-controlling genes during plant infection. BMC Genomics, 2021; 22:1–18. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1186/s12864-021-07457-w>

[12]. Yan J, Li P, Wang X, Zhu M, Shi H, Yu G, *et al*. RasI/R Quorum Sensing System Controls the Virulence of *Ralstonia solanacearum* Strain EP1. Appl Environ Microbiol, 2022; 88(15): e00325-22. Disponible en: <https://doi.org/10.1128/aem.00325-22>

[13]. Yang L, Wei Z, Li S, Xiao R, Xu Q, Ran Y, *et al*. Plant secondary metabolite, daphnetin reduces extracellular polysaccharides production and virulence factors of *Ralstonia solanacearum*. Pestic Biochem Physiol 2021; 179:104948. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.PESTBP.2021.104948>

[14]. Evtushenko LI, Takeuchi M. The Family Microbacteriaceae. In: Dworkin, M., Falkow,

S., Rosenberg, E., Schleifer, KH., Stackebrandt, E. (eds) The Prokaryotes. Springer, New York, NY, 2006: 1020-1098. Disponible en: https://doi.org/10.1007/0-387-30743-5_43

[15]. Vegetable seeds company lead by farmers for farmers - HM Clause. Disponible en: <https://www.hmclause.com/>

[16]. Yang S, Cai W, Shen L, Wu R, Cao J, Tang W, *et al*. Solanaceous plants switch to cytokinin-mediated immunity against *Ralstonia solanacearum* under high temperature and high humidity. Plant Cell Environ, 2022; 45:459–78. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/PCE.14222>

[17]. Álvarez B, López MM, Biosca EG. *Ralstonia solanacearum* Facing Spread-Determining Climatic Temperatures, Sustained Starvation, and Naturally Induced Resuscitation of Viable but Non-Culturable Cells in Environmental Water. Microorganisms 2022; 10(12): 2503. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/MICROORGANISMS>

[10122503](https://doi.org/10.1007/0-387-30743-5_43)

[18]. Cardenas Gomez K, Narino Rojas D, Alice James S, Franco Ortega S, Harper AL, Friman V-P. The Epidemiology and Management of *Ralstonia solanacearum* and *Ralstonia pseudosolanacearum* in Central and Northern Europe. Plant Health Cases 2024. Disponible en: <https://doi.org/10.1079/PLANTHEALTHCASES.2024.0028>

[19]. Álvarez B, López MM, Biosca EG. Biocontrol of the Major Plant Pathogen *Ralstonia solanacearum* in Irrigation Water and Host Plants by Novel Waterborne Lytic Bacteriophages. Front. Microbiol. 2019; 10: 02813. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02813>

[20]. Kumar D, Mukhopadhyay R. Climate change and plant pathogens: Understanding dynamics, risks and mitigation strategies. Plant Pathol. 2025; 74(1): 59–68. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/ppa.14033>

Anexo1

Formulación de la solución nutritiva HydroTomato2020 para el cultivo semihidropónico de jitomate en invernadero:

Compuesto	Concentración
Ca(NO ₃) ₂ •4H ₂ O	1.03 g/L
CuSO ₄ •5H ₂ O	0.08 mg/L
FeNaEDTA	10 mg/L
H ₃ BO ₃	2.5 mg/L
K ₂ SO ₄	0.27 g/L
KH ₂ PO ₄	0.14 g/L
KNO ₃	0.01 g/L
MgSO ₄ •7H ₂ O	0.44 g/L
MnSO ₄ •4H ₂ O	2.5 mg/L
Na ₂ MoO ₄ •2H ₂ O	0.12 mg/L
ZnSO ₄ •7H ₂ O	0.5 mg/L

Anexo2

Se muestra el fenotipo de plantas de jitomate cultivadas en un invernadero con condiciones de baja luminosidad (de acuerdo con las especificaciones del material utilizado para la cubierta del invernadero), alta humedad y temperatura similares a las producidas en el “cubo” (Figura 1SA). Las plantas que crecen en condiciones de alta humedad y temperatura presentan un crecimiento similar comparadas con plantas donde la humedad y temperatura son similares a las condiciones ambientales (Figura 1SB).

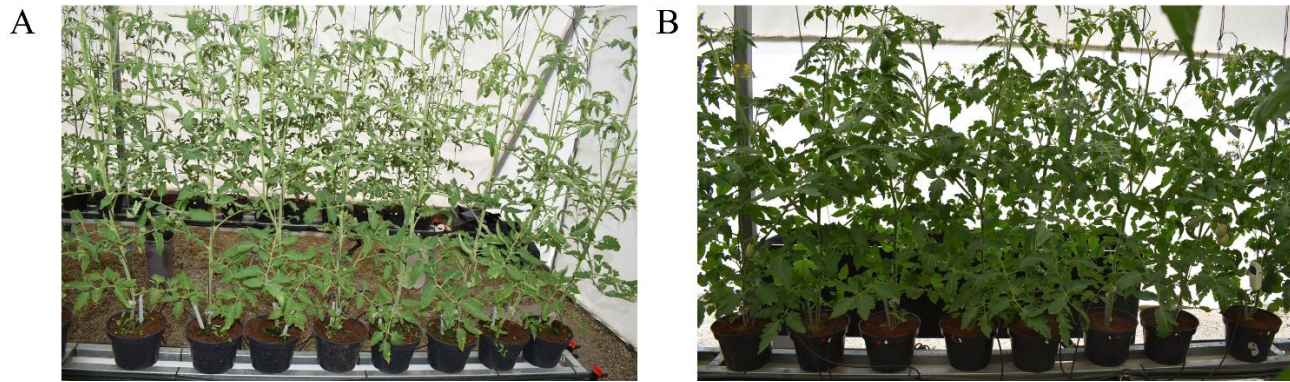


Figura 1S. Fenotipos de plantas de jitomate crecidas en ausencia de *R. solanacearum* en condiciones de alta humedad relativa y temperatura (A), así como en condiciones de humedad relativa y temperatura similares a las ambientales (B).