

## Bacterias Nativas como Alternativa Sostenible en el Rendimiento de Chile Serrano Native Bacteria as a Sustainable Alternative for Serrano Pepper Yield

J. Guadalupe Luna-Ortega<sup>1</sup> , Tomás Juan Álvaro Cervantes-Vázquez<sup>2\*</sup> ,  
David Antonio Zúñiga-Gracia<sup>1</sup> , Pablo Preciado-Rangel<sup>3</sup> , J. Isabel Márquez-Mendoza<sup>4</sup> ,  
Aaron David Lugo-Palacios<sup>2</sup> y Miguel Ángel Gallegos-Robles<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Politécnica de la Región Laguna. Calle Sin Nombre s/n, Ejido Santa Teresa. 27942 San Pedro, Coahuila, México; (J.G.L.O.), (D.A.Z.G.).

<sup>2</sup> Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Agricultura y Zootecnia. Carretera Gómez Palacio-Tlahualilo km 35, Venecia. 35110 Tlahualilo, Durango, México; (T.J.A.C.V.), (M.A.G.R.), (A.D.L.P.).

<sup>3</sup> Instituto Tecnológico de Torreón. Carretera Torreón-San Pedro km 7.5, ejido Ana. 27170 Torreón, Coahuila, México; (P. P. R.).

<sup>4</sup> Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna. Periférico Raúl López Sánchez, Colonia Valle Verde. 27054 Torreón, Coahuila, México; (J. I. M. M.).

\* Autor para correspondencia: alvaro87tomas@hotmail.com

### RESUMEN

El fruto de chile (*Capsicum annuum* L.) es ampliamente consumido por su riqueza en nutrientes y propiedades beneficiosas para la salud, lo que lo convierte en un componente esencial de una dieta saludable. A pesar de sus beneficios, los sistemas de producción convencionales pueden causar problemas ecológicos, incluyendo la emisión de gases de efecto invernadero y la exacerbación de la salinidad del suelo. Esto resalta la necesidad de adoptar prácticas de cultivo sostenibles. Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar el impacto de la bioinoculación con cepas nativas de *Bacillus velezensis*, *Bacillus subtilis* y *Azospirillum brasilensis*, en el rendimiento y contenido de compuestos bioactivos de los frutos de chile serrano en la Comarca Lagunera. La bioinoculación con cepas nativas, combinada con una reducción del 50% en la fertilización química, tuvo respuestas similares a los obtenidos con la fertilización química completa en peso de fruto con 6.07 g y 6.15 g respectivamente, en cuanto a rendimiento 33 Mg ha<sup>-1</sup> y 32 Mg ha<sup>-1</sup>, cantidad de fenoles 6.27 mg AG 100 g<sup>-1</sup> BF y 6.56 mg AG 100 g<sup>-1</sup>, vitamina C 0.82 mg g<sup>-1</sup> BF y 1.10 mg g<sup>-1</sup> BF mientras para capsaicina 269.25 µg g<sup>-1</sup> de BS y 274.75 µg g<sup>-1</sup> de BS correspondientemente. Los resultados obtenidos evidencian que esta metodología puede ser una alternativa sostenible, permitiendo disminuir el uso de fertilizantes químicos y promoviendo la salud del suelo con la bioinoculación de bacterias nativas, las cuales fueron efectivas al estar adaptadas a factores de estrés abióticos.

**Palabras clave:** biofertilizantes, capsaicina, fitohormonas.

### SUMMARY

The chili fruit (*Capsicum annuum* L.) is widely consumed for its rich nutrient content and health benefits, making it an essential component of a healthy diet. Despite these benefits, conventional production systems can cause ecological issues, including greenhouse gas emissions and increased soil salinity. This highlights the need for sustainable farming practices. This research evaluated the impact of bioinoculation with native strains of *Bacillus velezensis*, *Bacillus subtilis*, and *Azospirillum brasilensis*, on the yield and bioactive compound content of serrano chili fruits in the Comarca Lagunera. Bioinoculation with native strains, combined with a 50% reduction in chemical fertilization, produced similar results to those obtained with full chemical fertilization in terms of fruit weight with 6.07 g and 6.15 g respectively, in terms of yield 33 Mg ha<sup>-1</sup> and 32 Mg ha<sup>-1</sup>, amount of phenols 6.27 mg AG 100 g<sup>-1</sup> BF and 6.56 mg AG 100 g<sup>-1</sup>, vitamin C 0.82 mg g<sup>-1</sup> BF and 1.10 mg g<sup>-1</sup> BF while for capsaicin 269.25 µg g<sup>-1</sup> of BS and 274.75 µg g<sup>-1</sup> of BS in the same order. The results demonstrate



#### Cita recomendada:

Luna-Ortega, J. G., Cervantes-Vázquez, T. J. A., Zúñiga-Gracia, D. A., Preciado-Rangel, P., Márquez-Mendoza, J. I., Lugo-Palacios, A. D., & Gallegos-Robles, M. A. (2025). Bacterias Nativas como Alternativa Sostenible en el Rendimiento de Chile Serrano. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-9. e2156. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2156>

Recibido: 31 de octubre de 2024.

Aceptado: 3 de diciembre de 2024.

Artículo. Volumen 43.

Abril de 2025.

Editor de Sección:

Dr. José Luis García-Hernández

Editor Técnico:

Dr. Fermín Pascual Ramírez



**Copyright:** © 2025 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

that this methodology can be a sustainable alternative, allowing for a decrease in chemical fertilizer use while promoting soil health through the bioinoculation of native bacteria, which are effective when adapted to abiotic stress factors.

**Index words:** *biofertilizers, capsacin, fitohormones.*

## INTRODUCCIÓN

El fruto de chile (*Capsicum annum* L.) contiene proteínas, carbohidratos, fibras, lípidos y sales minerales como calcio (Ca), fósforo (P) y hierro (Fe) (Gou *et al.*, 2020); además, se le conocen propiedades antioxidantes, hipocolesterolémicas e inmunosupresoras (Sanati, Razavi y Hosseinzadeh, 2018), por ello se le considera parte de una dieta saludable. Por estas razones es cultivado a nivel mundial, lo que genera alta derrama económica. En México, en el periodo de 2018 a 2023 la producción incrementó en 12%, los principales estados productores fueron Chihuahua, Sinaloa y Zacatecas, el volumen de producción en el año 2023 fue de 3 681 061 Mg ha<sup>-1</sup> (SIAP, 2024).

La Comarca Lagunera es un territorio que abarca porciones de los estados de Coahuila y Durango (al norte de México), reconocida como productora de vegetales a pesar de contar con problemas de salinidad en suelo, altas temperaturas atmosféricas y baja disponibilidad de agua (Andrade-Sifuentes *et al.*, 2020). El clima de la región es seco y se le considera una zona semidesértica con base en la clasificación de Köppen modificado por García (2004). La producción del fruto de chile en la Comarca Lagunera durante 2023 fue de 43% de la producción total de los estados de Coahuila y Durango (SIAP, 2024).

Se ha encontrado que los sistemas de producción convencional de chile, pueden generar problemas ecológicos como la generación de gases de efecto invernadero por el uso de fertilizantes inorgánicos (Zhai *et al.*, 2023) y exacerbar el problema de salinidad en suelo (Liu *et al.*, 2023). Esto ha llevado a buscar formas de producción sostenible y ecológica, un ejemplo de ello es la aplicación de microorganismos conocidos como biofertilizantes, los cuales son ecológicamente amigables y se componen principalmente de células vivas de microbios seleccionados que aportan nutrientes a las plantas a través de su sistema radicular (Wang *et al.*, 2025). A estos biofertilizantes se les conoce como rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal, que colonizan las raíces, estimulan el crecimiento vegetal y aumentan la absorción de nutrientes del suelo (Lugtenberg y Kamilova, 2009; Raffi y Charyulu, 2021). Uno de los principales problemas de la efectividad de los biofertilizantes, es que fueron desarrollados en entornos específicos y, por tanto, su desempeño está condicionado por el tipo de cultivo, el suelo y las condiciones ambientales (Zambrano-Mendoza, Sangoquiza-Caiza, Campaña y Yáñez, 2021). Para avanzar en la sustentabilidad agrícola, es crucial investigar y desarrollar microorganismos que se adapten a condiciones edafoclimáticas extremas y puedan ser utilizados como biofertilizantes en estos ambientes (Armenta-Bojórquez *et al.*, 2010). Basado en lo anterior, el objetivo de este trabajo consistió en determinar el impacto de la bioinoculación con cepas nativas de *Bacillus velezensis*, *Bacillus subtilis* y *Azospirillum brasilensis* en rendimiento y contenido de compuesto bioactivos de los frutos de chile serrano en la Comarca Lagunera, México.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Localización del Estudio

El experimento se llevó a cabo en el campo experimental de la Facultad de Agricultura y Zootecnia de la Universidad Juárez del Estado de Durango (FAZ-UJED), ubicada en el ejido Venecia, municipio de Gómez Palacio, Durango (25° 78' N, 103° 34' E), dentro de la Comarca Lagunera de Durango, con 1110 m de altitud. Esta zona se caracteriza por precipitaciones medias anuales de 248.4 mm con temperaturas promedio máximas de 20.5 °C (CONAGUA, 2024).

### Tipo de Suelo del Estudio

Los suelos del área experimental son de aluvión, tipo Aridisol, con un contenido pobre de materia orgánica (1.3); pH poco alcalino (7.75) y ricos en carbonatos, y conductividad eléctrica poco elevada de 3.3 dS m<sup>-1</sup>, los cuales son valores típicos de la Comarca Lagunera (Cervantes-Vázquez *et al.*, 2018).

## Manejo del Cultivo

Se utilizó la semilla de Chile serrano Camino Real F1 (Semillas Harris Moran Mexicana®), el fruto es de madurez intermedia, posee larga vida de anaquel, gran tamaño y amplia adaptabilidad a distintas regiones. La germinación se realizó en charolas de 200 cavidades utilizando como sustrato una mezcla de Peat Moss y vermiculita con relación 2:1. Posteriormente, se cubrió el almácigo con un plástico negro manteniendo una humedad relativa de 44% y temperaturas de  $22 \pm 3$  °C medido con un higrómetro análogo (Tyler®, Alemania). A los 22 DDS, después de identificar cuatro hojas verdaderas, las plántulas de Chile se trasplantaron en camas de siembra con distancia entre plantas de 40 cm, con espacio entre surcos de 0.7 cm y densidad de 35 500 plantas ha<sup>-1</sup>. Se regó dos veces por semana considerando una evapotranspiración media del 60% (tanque evaporímetro tipo A) con ayuda de un sistema de riego por goteo por cintilla (espacio entre gotero de 30 cm), con un gasto de 2.5 L h<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup> lineal. Como control preventivo de plagas y enfermedades se aplicó bioinsecticida comercial EAUBA-HIPER (MICRO VIDA™, México). Se cosecharon los primeros frutos de Chile a los 68 DDT, seleccionando 20 frutos por tratamiento que mostraran un color verde uniforme (Vázquez-García, Ramírez, Mata, Ariza y Alia, 2010).

## Biofertilizantes

Se diseñó un tratamiento de biofertilizante (VSA) con base en una mezcla de tres bacterias nativas promotoras del crecimiento vegetal (*Bacillus velezensis*, *Bacillus subtilis* y *Azospirillum brasilensis*) aisladas en estudios previos en la comarca lagunera y evaluadas por su potencial agronómico a través de variables bromatológicas, nutraceuticas y de rendimiento (Rodríguez-Hernández et al., 2020; González-Salas et al., 2021). La reactivación de las cepas fue en medio de enriquecimiento YPG fuente de carbono antes de que se efectuara la bioinoculación de las plántulas en semillero. Las condiciones de incubación consistieron en agitación continua (120 rpm) y una temperatura de 30 °C durante 36 horas para alcanzar la máxima fase logarítmica (Andrade-Sifuentes et al., 2020), la concentración del cultivo microbiológico se determinó midiendo 1 mL de las cepas reactivadas a una longitud de onda de 540 nm utilizando un espectrómetro uv-visible (Hach®, DR500), realizando la lectura de absorbancia por triplicado en comparación con un líquido NFB (medio de cultivo libre de nitrógeno) con medio YPG y un control con medio ácido málico sin bacterias hasta ajustar a  $1 \times 10^8$  UFC mL<sup>-1</sup> de cada bacteria (Sangoquiza, Viera y Yáñez, 2018). Después se procedió a bioinocular las plántulas de Chile a los 22 días después de la siembra (DDS), se sumergió el cepellón en 100 mL de PBS estéril (Solución salina tamponada con fosfato) el día del trasplante a una concentración de  $1 \times 10^8$  UFC mL<sup>-1</sup> por planta.

## Fertilización Química

La fertilización química sugerida aplicada en el cultivo de Chile fue de 220-108-00: N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O, (Macías-Rodríguez et al., 2013), Las fuentes de nitrógeno y fósforo para los tratamientos químicos fueron urea (46-0-0) y fosfato monoamónico (MAP; 11-52-0), respectivamente. Para la fertilización nitrogenada se aplicó en tres partes iguales (seis días después del trasplante, floración y cuando los frutos tenían una longitud de 5 cm) y la fertilización fosfatada se aplicó en su totalidad en la primera escarda después del trasplante.

## Diseño Experimental y Tratamientos

Se evaluaron cinco tratamientos, 220FQ = fertilización química sugerida al 100% (Macías-Rodríguez et al., 2013); VSA = mezcla de biofertilizantes (*Bacillus velezensis*, *Bacillus subtilis* y *Azospirillum brasilensis*) a una concentración de  $1 \times 10^8$  UFC mL<sup>-1</sup> de cada bacteria; 110FQ+VSA = fertilización química con 110-54-00 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K (50% de fertilizante químico) más mezcla de biofertilizantes; 110FQ = fertilización química con 110-54-00 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K (50% de fertilizante químico). Cada unidad experimental fue de 17.5 m<sup>2</sup> (7 × 2.5 m) con 17 plantas por surco, bajo un diseño de bloques al azar con tres repeticiones por tratamiento, obteniéndose un total de 15 unidades experimentales.

## Variables en Planta y Calidad de Fruto

Las variables evaluadas en planta fueron altura de planta, diámetro de tallo y volumen de raíz, se analizaron 5 plantas de la parte central por tratamiento a los 125 DDT. La altura de planta se midió en cm con ayuda de un flexómetro (Truper®, México) y el diámetro de tallo en cm (calibrador analógico Truper®, México). Para el volumen de raíz se lavaron las raíces con agua para eliminar los agregados de suelo, posteriormente se sumergieron a una probeta de 500 ml llena hasta 200 ml y se registró el volumen desplazado en cm<sup>3</sup> (Díaz-Vargas, Ferrera-Cerrato, Almaraz-Suárez y Alcántar-González, 2001). Finalmente se pesó la raíz en fresco (g) con una báscula digital (Ohaus®, Suiza).

La cosecha se realizó cuando los frutos mostraron un color verde uniforme, realizando el primer corte a los 68 ddt y posteriormente se dieron 3 cortes, para cada corte se tomó al azar 4 frutos por planta, de las 5 plantas evaluadas previamente de la parte central de cada tratamiento, teniendo un total de 20 frutos por tratamiento. Después de la cosecha, los frutos seleccionados se trasladaron al laboratorio y se procedió a registrar el peso fresco de cada fruto de chile (g) mediante una báscula digital (Ohaus®, Suiza), el diámetro y longitud de fruto fresco (cm) se midió con un calibrador analógico (Truper®, México).

### Contenido Fenólico Total

Se seleccionaron al azar cinco frutos de chile serrano por tratamiento y se lavaron con agua corriente del grifo para eliminar impurezas y luego liofilizadas durante 10 días. Se seleccionaron 100 mg de tejido vegetal liofilizado y se pulverizó manualmente con mortero y se almacenaron a -18°C en tubos Eppendorf. El extracto se obtuvo del sobrenadante después de 5 minutos a 25 °C a una velocidad de 3000 rpm centrifuga POWERSPIN HX 6 (UNICO®) de la mezcla del material liofilizado más 5 mL de metanol (80%) en tubos plásticos con rosca (López-Martínez *et al.*, 2016). Se determinó utilizando el método descrito por Esparza-Rivera, Stone, Stushnof, Pilon y Kendall (2006), que se basa en añadir reactivo de Folin-Ciocalteu (Singleton, Orthofer y Lamuela, 1999) al extracto metanólico, posterior adición de carbono de sodio y calentamiento en baño maría a 45 °C. La absorbancia de la solución se leyó a 765 nm en un espectrofotómetro HACH 4000 (HACH®, USA). Se calculó el contenido fenólico mediante una curva de calibración utilizando ácido gálico (Sigma) como estándar. Los resultados se registraron en mg de equivalente de ácido gálico (AG) por 100 g<sup>-1</sup> de base fresco (BF), todos los análisis se realizaron por triplicado.

### Contenido de Vitamina C

La determinación del contenido de vitamina C (mg g<sup>-1</sup> PF) se realizó por triplicado, pesando 10 g de pulpa obtenida de la trituración de fruto de chile serrano con ayuda de una licuadora (Oster®, USA.), con el método descrito por Doner y Hicks (1981). Las muestras se filtraron y se inyectaron en un equipo de cromatografía líquido de alto rendimiento (HPLC, Varian ProStar inc.®, USA) con detector UV-Vis (Prostar Varian Inc.®, USA). Se utilizó una columna de Amina de 10 cm y un serpentín de inyección de 20 L<sup>-1</sup>.

### Contenido de Capsaicina

Se cuantificó mediante una adaptación del método de Cisneros-Pineda *et al.* (2007), con ayuda de una curva de absorbancia para capsaicina. La absorbancia de los extractos metanólicos de las muestras se midió a 273 nm en un espectrofotómetro HACH 4000 (HACH®, USA). Las pruebas se realizaron por triplicado y se expresó en µg g<sup>-1</sup> de BS (base seca).

### Análisis Estadístico

Los datos obtenidos para cada variable fueron sometidos a análisis de varianza mediante el paquete estadístico SAS (SAS Institute, 1999) y para la comprobación de medias se realizó la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Variables en Planta

Las variables analizadas en planta afectadas por los tratamientos fueron volumen de raíz y peso fresco de raíz (Cuadro 1). El volumen y el peso fresco de raíz mostraron diferencia estadística significativa, el tratamiento con la mezcla de biofertilizantes más el 50% de la dosis recomendada de fertilizante químico (110FQ+VSA), fue superior en un 25% y 56% para el volumen y peso fresco de raíz respectivamente, en comparación con el tratamiento 220FQ (100% dosis recomendada de fertilizante químico). Los biofertilizantes comúnmente utilizados en la agricultura son el *A. brasilense* y *B. subtilis* por la función de fijar biológicamente el nitrógeno y solubilizar fosfatos (Suhag, 2016), así como aumentar la superficie de absorción de las raíces, lo cual, ha sido demostrado, incrementa significativamente la altura de plantas (Gamboa-Angulo *et al.*, 2020; Turchetto *et al.*, 2023).

**Cuadro 1. Comparación de medias de variables en planta de chile serrano.**  
**Table 1. Comparison of means of variables of plant serrano pepper.**

| Tratamiento | Volumen de raíz      | Diámetro de tallo | Altura de planta | Peso fresco de raíz |
|-------------|----------------------|-------------------|------------------|---------------------|
|             | g                    | cm <sup>3</sup>   | cm               | g                   |
| 220FQ       | 19.70 c <sup>†</sup> | 1.01 a            | 45.44 a          | 17.54 b             |
| VSA         | 31.15 b              | 1.07 a            | 44.47 a          | 22.44 ab            |
| 110FQ+VSA   | 44.90 a              | 1.23 a            | 46.95 a          | 25.95 a             |
| 110FQ       | 17.70 c              | 1.07 a            | 43.61 a          | 19.44 b             |
| DMS         | 4.64                 | 0.24              | 8.80             | 7.14                |
| CV          | 8.20                 | 11.27             | 9.75             | 35.65               |

<sup>†</sup> Medias con letras iguales en columnas no son significativas (Tukey  $P \leq 0.05$ ). \* = significativa, ns = no significativa según Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

<sup>†</sup> Means with equal letters in columns are not significant (Tukey  $P \leq 0.05$ ). \* = significant, ns = not significant according to Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

Aunque la biomasa de la raíz es importante para la absorción de nutrientes como el nitrógeno (Iversen, Bridgham y Kellogg, 2010), es más adecuado atribuir el déficit de este nutrimento a un aumento en la captura de nitrógeno (inmovilización biológica) por las bacterias presentes en el suelo (Zhu, Vivanco y Manter, 2016). Además, estos resultados se deben al efecto inhibitorio del fertilizante químico en la colonización de los biofertilizantes ya que las bacterias tienen dificultades para usar los nutrientes que se encuentran en los fertilizantes sintéticos agrícolas (Reid *et al.*, 2021), es posible que por esta razón no se encontraron diferencias en la altura de planta y diámetro de tallo, sugiriendo aplicar una dosificación química mínima sin afectar el desarrollo fisiológico de la planta de chile serrano.

### Calidad Comercial en Fruto

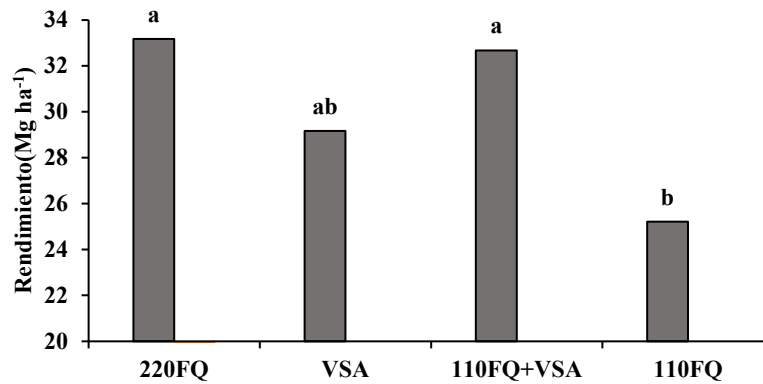
El tratamiento 220FQ tuvo el mayor efecto en la longitud (6.56 cm), diámetro (1.77 cm) y peso fresco (6.15 g) de fruto de chile serrano respectivamente (Cuadro 2), siendo similar a los tratamientos VSA y 110FQ+VSA. Para la longitud, diámetro y peso por fruto de chile serrano, los tratamientos VSA y 110FQ+VSA fueron superiores al tratamiento FH y 110FQ en un 14, 21 y 11% respectivamente. Estudios demuestran que el diámetro de chile tiene una correlación positiva con el peso de chile (Díaz-Pérez, Muy y Mascorro, 2007; Vázquez-García *et al.*, 2010). Se observó que los rendimientos fueron superiores con el tratamiento de 220FQ (33.17 Mg ha<sup>-1</sup>) y similar a 110FQ+VSA (32.67 Mg ha<sup>-1</sup>) (Figura 1). Los tratamientos con menores rendimientos fueron el FH

**Cuadro 2. Comparación de medias de variables biofísicas por fruto fresco de chile serrano.**  
**Table 2. Comparison of means of biophysics variables of serrano pepper.**

| Tratamientos | Longitud            | Diámetro | Peso   |
|--------------|---------------------|----------|--------|
|              | ----- cm -----      |          |        |
| 220FQ        | 6.56 a <sup>†</sup> | 1.74 a   | 6.15 a |
| VSA          | 6.11 a              | 1.59 b   | 5.97 a |
| 110FQ+VSA    | 6.27 a              | 1.66 ab  | 6.07 a |
| 110FQ        | 5.08 b              | 1.37 c   | 5.26 b |
| DMS          | 1.07                | 0.11     | 0.29   |
| CV           | 8.96                | 3.42     | 2.52   |

<sup>†</sup> Medias con letras iguales en columnas no son significativas (Tukey  $P \leq 0.05$ ). \* = significativa, ns = no significativa según Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

<sup>†</sup> Means with equal letters in columns are not significant (Tukey  $P \leq 0.05$ ). \* = significant, ns = not significant according to Tukey ( $P \leq 0.05$ ).



**Figura 1. Efectos de los tratamientos sobre el rendimiento en frutos de chile serrano.** FQ = fertilización química; FH = bioestimulantes comercial; VSA = mezcla de biofertilizantes; 110FQ+VSA = fertilización química al 50% más mezcla de biofertilizantes y 110FQ = fertilización química al 50%. Letras diferentes en las barras indican diferencia significativa con  $P \leq 0.05$

**Figure 1. Effects of treatments on the yield of serrano peppers.** FQ = chemical fertilization; FH = commercial biostimulants; VSA = mixture of biofertilizers; 110FQ+VSA = 50% chemical fertilization plus mixture of biofertilizers; 110FQ = 50% chemical fertilization. Different letters in the bars indicate significant difference with  $P \leq 0.05$ .

(26.29 Mg ha<sup>-1</sup>) y 110FQ (25.21 Mg ha<sup>-1</sup>), ambos fueron inferiores a los tratamientos 220FQ Y 110FQ+VSA en un 22%. Se ha comprobado que la bioinoculación con biofertilizantes más fertilizantes químicos mejoran los indicadores fisiomorfológicos, así como la calidad y rendimiento de frutos de chile (Sharma, Sharma, Delta y Kaushik, 2022; Vakili-Ghartavol, Babaei y Karimi, 2023). Los resultados mostraron que los tratamientos con binóculo (*Bacillus velezensis*, *Bacillus subtilis* y *Azospirillum brasilenses*) aseguraron el suministro nutricional de las plantas, porque las bacterias nativas están adaptadas a factores de estrés abióticos y bióticos por consecuencia de millones de años de evolución (Niehus, Picot, Oliveira, Mitri y Foster, 2017), lo que les permite la liberación gradual de los bioestimulantes de crecimiento y nutrientes vegetativos esenciales.

### Compuestos Bioactivos

Los tratamientos tuvieron efecto en el contenido de fenoles, vitamina C y capsaicina del fruto de chile serrano (Cuadro 3). El mayor contenido de fenoles en el fruto fresco (6.56 mg AG 100 g<sup>-1</sup> PF) fue en las plantas de chile con la fertilización química al 100% (220FQ), estadísticamente fue similar a los tratamientos bioinoculados (VSA; 110FQ+VSA). La concentración total de fenoles varió de 5.08 a 6.56 mg AG 100 g<sup>-1</sup> de PF, estos valores son

**Cuadro 3. Comparación de medias de compuestos bioactivos de fruto de chile serrano.**

**Table 3. Comparison of means of bioactive compounds of serrano pepper.**

| Tratamientos | Fenoles                      | Vitamina C            | Capsaicina               |
|--------------|------------------------------|-----------------------|--------------------------|
|              | mg AG 100 g <sup>-1</sup> BF | mg g <sup>-1</sup> BF | µg g <sup>-1</sup> de BS |
| 220FQ        | 6.56 a†                      | 1.10 a                | 274.75 a                 |
| VSA          | 6.11 ab                      | 0.55 b                | 160.00 b                 |
| 110FQ+VSA    | 6.27 a                       | 0.82 ab               | 269.25 a                 |
| 110FQ        | 5.08 b                       | 0.55 b                | 140.25 c                 |
| DMS          | 1.15                         | 0.39                  | 6.12                     |
| CV           | 9.61                         | 26.49                 | 1.45                     |

† Medias con letras iguales en columnas no son significativas (Tukey  $P \leq 0.05$ ). \* ns = significativa y no significativa según Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

† Means with equal letters in columns are not significant (Tukey  $P \leq 0.05$ ). \* ns = significant and not significant according to Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

similares a los reportados para el chile serrano por otros autores, con 568 mg AG 100 g<sup>-1</sup> de PS y 219.84 a 840.95 µg AG g<sup>-1</sup> PF correspondientemente (Álvarez-Parrilla, de la Rosa, Amarowicz y Shahidi, 2011; Domínguez-Martínez, Meza, Osorio, Proal y Gallardo, 2014). El tratamiento 220FQ fue el que afectó el mayor contenido de vitamina C (1.10 mg g<sup>-1</sup> PF), siendo estadísticamente similar al tratamiento 110FQ+VSA (0.82 1.10 mg g<sup>-1</sup> PF). Con respecto al tratamiento 220FQ, el contenido de vitamina C, fue inferior en un 50% en el tratamiento VSA. El contenido de vitamina C obtenido para chile serrano es similar a lo reportado por Preciado-Rangel *et al.* (2019) con valores de hasta 1.06 mg g<sup>-1</sup> P. Para la capsaicina se reportaron valores dentro del rango del chile serrano de acuerdo con Álvarez-Parrilla *et al.* (2011). El mayor contenido de capsaicina se encontró con los tratamientos de 220FQ (274.75 µg g<sup>-1</sup> de BS) y 110FQ+VSA (269.25 µg g<sup>-1</sup> de BS), fueron superior hasta en un 56% al tratamiento FH. Los capsaicinoides están presentes hasta en un 90% de los chiles y están relacionados a la pungencia (Brouk y Fishman, 2016), lo cual es una característica importante para el sabor (Zhang *et al.*, 2023) algunos estudios demuestran que es una característica que se ve afectada por factores como el ambiente o ante un estrés biótico durante el crecimiento de la planta (Valadez-Sánchez *et al.*, 2016; Rathnayaka, Kondo, Sathya, Nemoto y Matsushima, 2021). Aunado a esto, la capsaicina tiene propiedades antiinflamatorias, analgésicas, antimicrobianas y anticancerígenas (Popelka, Jevinová, Šmejkal y Roba, 2017). Los tratamientos con mayor contenido de fenoles, vitamina C y capsaicina fueron el 220FQ y el 110FQ+VSA, esto se atribuye a la suficiencia de nutrimentos como el nitrógeno y el potasio en el caso del primero, lo que se atribuye a la actividad de las bacterias nativas promotoras del crecimiento al solubilizar dichos elementos (Preciado-Rangel *et al.*, 2019).

## CONCLUSIONES

La bioinoculación con cepas nativas de *Bacillus velezensis*, *Bacillus subtilis* y *Azospirillum brasilensis* en combinación con la fertilización química al 50% de la dosis recomendada tuvo mayor peso y volumen de raíz; rendimiento y cantidad de fenoles, vitamina C y capsaicina, similar a la obtenida con la fertilización química completa; demostrando un método sostenible para producción de chile serrano, para poder disminuir hasta en un 50% los niveles de fertilización química promoviendo la salud de suelo.

## DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

## CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

## DISPONIBILIDAD DE DATOS

No aplicable.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

## FINANCIACIÓN

No aplicable.

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: M.A.G.R. Metodología: M.A.G.R. y D.A.Z.G. Software: A.D.L.P. y J.I.M.M. Validación: J.G.L.O., D.A.Z.G. y M.A.G.R. Análisis formal: P.P.R. Investigación: T.J.A.C.V. Recursos: M.A.G.R. Curación de datos: A.D.L.P. Escritura, preparación del borrador original: D.A.Z.G. y T.J.A.C.V. Escritura, revisión y edición: T.J.A.C.V. Visualización: T.J.A.C.V. Supervisión: P.P.R. Administración del proyecto: M.A.G.R. Adquisición de fondos: M.A.G.R.

## AGRADECIMIENTOS

No aplicable.

## LITERATURA CITADA

- Álvarez-Parrilla, E., de la Rosa, L. A., Amarowicz, R., & Shahidi, F. (2011). Antioxidant activity of fresh and processed jalapeño and serrano peppers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(1), 163-173. <https://doi.org/10.1021/jf103434u>
- Andrade-Sifuentes, A., Fortis-Hernández, M., Preciado-Rangel, P., Orozco-Vidal, J. A., Yescas-Coronado, P., & Rueda-Puente, E. (2020). *Azospirillum brasilense* and solarized manure on the production and phytochemical quality of tomato fruits (*Solanum lycopersicum* L.). *Agronomy*, 10(12), 1-22. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121956>
- Armenta-Bojórquez, A. D., García-Gutiérrez, C., Camacho-Báez, J. R., Apodaca-Sánchez, M. Á., Gerardo-Montoya, L., & Nava-Pérez, E. (2010). Biofertilizantes en el desarrollo agrícola de México. *Ra Ximhai*, 6(1), 51-56.
- Brouk, M., & Fishman, A. (2016). Antioxidant properties and health benefits of date seeds. In K. Kristbergsson, S. Ötles, (Eds.). *Functional properties of traditional foods. Integrating food science and engineering knowledge into the food chain* (pp. 233-240). Boston, Massachusetts, USA: Springer.
- Cervantes-Vázquez, T. J. A., Fortis-Hernández, M., Trejo-Escareño, H. I., Vázquez-Vázquez, C., Gallegos-Robles, M. Á., & García-Hernández, J. L. (2018). Fertilización química y orgánica en la producción de sandía en el norte de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 20, 1-13. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i20.996>
- Cisneros-Pineda, O., Torres-Tapia, L. W., Gutiérrez-Pacheco, L. C., Contreras-Martín, F., González-Estrada, T., & Peraza-Sánchez, S. R. (2007). Capsaicinoids quantification in chili peppers cultivated in the state of Yucatan, Mexico. *Food Chemistry*, 104(4), 1755-1760. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.10.076>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2024). Climatología por estado. Consultado el 4 de octubre, 2024, desde <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=dgo>
- Díaz-Pérez, J. C., Muy-Rangel, M. D., & Mascorro, A. G. (2007). Fruit size and stage of ripeness affect postharvest water loss in bell pepper fruit (*Capsicum annuum* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87(1), 68-73. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2672>
- Díaz-Vargas, P., Ferrera-Cerrato, R., Almaraz-Suárez, J. J., & Alcántar-González, G. (2001). Inoculación de bacterias promotoras de crecimiento en lechuga. *Terra Latinoamericana*, 19(4), 327-335.
- Doner, L. W., & Hicks, K. B. (1981). High-performance liquid chromatographic separation of ascorbic acid, erythorbic acid, dehydroascorbic acid, dehydroerythorbic acid, diketogulonic acid, and diketogluconic acid. *Analytical Biochemistry*, 115(1), 225-230. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(81\)90550-9](https://doi.org/10.1016/0003-2697(81)90550-9)
- Domínguez-Martínez, I., Meza-Márquez, O. G., Osorio-Revilla, G., Proal-Nájera, J., & Gallardo-Velázquez, T. (2014). Determination of capsaicin, ascorbic acid, total phenolic compounds and antioxidant activity of *capsicum annuum* L. var. serrano by mid infrared spectroscopy (mid-ftir) and chemometric analysis. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*, 57, 133-142. <https://doi.org/10.1007/s13765-013-4295-y>
- Esparza-Rivera, J. R., Stone, M. B., Stushnof f, C., Pilon-Smith, E., & Kendall, P. A. (2006). Effects of ascorbic acid applied by two hydrocooling methods on physical and chemical properties of green leaf lettuce stored at 5 °C. *Journal of Food Science*, 71(3), 270-276. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.tb15653.x>
- Gamboa-Angulo, J., Ruíz-Sánchez, E., Alvarado-López, C., Gutiérrez-Miceli, F., Ruíz-Valdiviezo, V. M., & Medina-Dzul, K. (2020). Efecto de biofertilizantes microbianos en las características agronómicas de la planta y calidad del fruto del chile xcat'ik (*Capsicum annuum* L.). *Terra Latinoamericana*, 38(4), 817-826. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.716>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Distrito Federal, México: Universidad Autónoma de México.
- González-Salas, U., Gallegos-Robles, M. Á., Preciado-Rangel, P., García-Carrillo, M., Rodríguez-Hernández, M. G., García-Hernández, J. L., & Guzmán-Silos, T. L. (2021). Effect of organic and inorganic sources of nutrition mixed with biofertilizers on melon fruit production and quality. *Terra Latinoamericana*, 39, 1-10. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.904>
- Gou, J. Y., Suo, S. Z., Shao, K. Z., Zhao, Q., Yao, D., Li, H. P., ... & Rensing, C. (2020). Biofertilizers with beneficial rhizobacteria improved plant growth and yield in chili (*Capsicum annuum* L.). *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 36, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s11274-020-02863-w>
- Iversen, C. M., Bridgham, S. D., & Kellogg, L. E. (2010). Scaling plant nitrogen use and uptake efficiencies in response to nutrient addition in peatlands. *Ecology*, 91(3), 693-707. <https://doi.org/10.1890/09-0064.1>
- Liu, J., Xie, W., Yang, J., Yao, R., Wang, X., & Li, W. (2023). Effect of different fertilization measures on soil salinity and nutrients in salt-affected soils. *Water*, 15(18), 1-15. <https://doi.org/10.3390/w15183274>
- López-Martínez, J. D., Vázquez-Díaz, D. A., Esparza-Rivera, J. R., García-Hernández, J. L., Castruita-Segura, M. A., & Preciado-Rangel, P. (2016). Yield and nutraceutical quality of tomato fruit produced with nutrient solutions prepared using organic materials. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 39(4), 409-414. <https://doi.org/10.35196/rfm.2016.4.409-414>
- Lugtenberg, B., & Kamilova, F. (2009) Plant-growth-promoting rhizobacteria. *Annual Review of Microbiology* 63, 541-556. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.62.081307.162918>
- Macías-Rodríguez, H., Muñoz-Villalobos, J. A., Vega-Piña, A., Velasquez-Valle, M. A., Rivera-Gonzalez, M., & Ezquível-Arriaga, G. (2013). *Cultivo de chile (capsicum annuum L.) en la región lagunera con alternativas de manejo sustentable*. México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Niehus, R., Picot, A., Oliveira, N. M., Mitri, S., & Foster, K.R., (2017). The evolution of siderophore production as a competitive trait. *Evolution*, 71(6), 1443-1455. <https://doi.org/10.1111/evo.13230>
- Popelka, P., Jevinová, P., Šmejkal, K., & Roba, P. (2017). Determination of capsaicin content and pungency level of different fresh and dried chilli peppers. *Folia Veterinaria*, 61(2), 11-16.
- Preciado-Rangel, P., Andrade-Sifuentes, A., Sánchez-Chávez, E., Salas-Pérez, L., Fortis-Hernandez, M., Rueda-Puente, E. O., & García-Hernández, J. L. (2019). Potassium influence the nutraceutical and antioxidant content of serrano hot pepper (*Capsicum annuum* L.). *Agrociencia*, 53, 581-591.

- Raffi, M. M., & Charyulu, P. B. B. N. (2021). Chapter 18 - Azospirillum-biofertilizer for sustainable cereal crop production: Current status. In B. Viswanath (Ed.), *Recent Developments in Applied Microbiology and Biochemistry* (pp. 193-209): Londres, Reino Unido: Academic Press.
- Rathnayaka, R. M. S. M. B., Kondo, F., Prabandaka, S. S., Nemoto, K., & Matsushima, K. (2021). Drought Stress Induced an Increase in the Pungency and Expression of Capsaicinoid Biosynthesis Genes in Chili Pepper (*Capsicum annum* L.). *The Horticulture Journal*, 90(4), 410-419. <https://doi.org/10.2503/hortj.UTD-282>
- Reid, T. E., Kavamura, V. N., Abadie, M., Torres-Ballesteros A., Pawlett, M., Clark, I. M., ... & Mauchline, T. H. (2021). Inorganic Chemical Fertilizer Application to Wheat Reduces the Abundance of Putative Plant Growth-Promoting Rhizobacteria. *Frontiers in Microbiology*, 12, 1-16. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.642587>
- Rodríguez-Hernández, M. G., Gallegos-Robles, M. Á., Rodríguez-Sifuentes, L., Fortis-Hernández, M., Luna-Ortega, J. G., & González-Salas, U. (2020). Cepas nativas de *Bacillus* spp. como una alternativa sostenible en el rendimiento de forraje de maíz. *Terra Latinoamericana*, 38(2), 313-32. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.690>
- Sanati, S., Razavi B. M., & Hosseinzadeh, H. (2018) A review of the effects of *Capsicum annum* L. and its constituent, capsaicin, in metabolic syndrome. *Iranian Journal of Basic Medical Sciences*, 21(5), 439-448. <https://doi.org/10.22038/IJBMS.2018.25200.6238>
- Sangoquiza-Caiza, C. A., Viera-Tamayo, Y., & Yanez-Guzman, C. F. (2018). Biological Response of *Azospirillum* spp. to different types of stress. *Revista Centro Agrícola*, 45(1), 40-46.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2024). *Cierre de la producción agrícola*. Consultado el 07 de octubre de 2024, desde <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- SAS Institute. (1999). *SAS/STAT User guide. Release 8.0*. Cary, NC, USA: SAS Institute Inc.
- Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventos, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagents. *Methods in Enzymology*, 299, 152-178. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1)
- Sharma, M., Sharma, V., Delta, A. K., & Kaushik, P. (2022). Rhizophagus irregularis and nitrogen fixing azotobacter with a reduced rate of chemical fertilizer application enhances pepper growth along with fruits biochemical and mineral composition. *Sustainability*, 14(9), 1-12. <https://doi.org/10.3390/su14095653>
- Suhag, M. (2016). Potential of Biofertilizers to Replace Chemical Fertilizers. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 3(5), 163-167.
- Turchetto, R., Volpi, G., Da Silva, R., Ros, C., Barros, S., Magalhães, J., ... & da Silva, A. P. (2023). Co-inoculation of *Azospirillum* with mycorrhizal fungi in the cultivation of wheat in soils contaminated with copper. *Semina: Ciencias Agrarias*, 44(4), 1571-1586. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2023v44n4p1571>
- Valadez-Sánchez, Y. M., Olivares-Sáenz, E., Vázquez-Alvarado, R. E., Esparza-Rivera, J. R., Preciado-Rangel, P., Valdez-Cepeda, R. D., & García-Hernández, J. L. (2016). Calidad y concentración de capsaicinoides en genotipos de chile Serrano (*Capsicum annum* L.) producidos bajo fertilización orgánica. *Phyton*, 85(1), 21-26.
- Vázquez-García, E., Ramírez-Meraz, M., Mata-Vázquez, H., Ariza-Flores, R., & Alia-Tejagal, I. (2010). Atributos de calidad y vida de anaquel de frutos de cultivares de chile serrano en México. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 33(4), 79-82.
- Vakili-Ghartavol, M., Babaei, K., & Karimi M. A. (2023). The effect of Arghavan biofertilizer on physiological, biochemical and yield parameters of sweet pepper (*Capsicum annum* L.), *Iranian Journal of Plant & Biotechnology*, 18(31), 41-51.
- Wang, N., Zhang, T., Li, Y., Cong, A., Lian, J., & Feng, K. (2025). Integrated application of fertilization increased maize (*Zea mays* L.) yield by improving soil quality, particularly under limited water conditions in a semi-arid sandy area. *Agricultural Water Management*, 309, 109334. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109334>
- Zambrano-Mendoza, J. L., Sangoquiza-Caiza, C. A., Campaña-Cruz, D. F., & Yáñez-Guzmán, C. F. (2021). Use of biofertilizers in agricultural production. *IntechOpen*, 193. <https://doi.org/10.5772/intechopen.98264>
- Zhai, Y., Zhu, Q., Xiao, Y., Chen, J., Hou, M., & Zhu, L. (2023). N<sub>2</sub>O emissions from saline soils in response to organic-inorganic fertilizer application under subsurface drainage. *Water*, 15(16), 1-14. <https://doi.org/10.3390/w15163002>
- Zhang, J., Wang, C., Wang, J., Yang, Y., Han, K., Bakpa, E. P., ... & Xie, J. (2023). Comprehensive fruit quality assessment and identification of aroma-active compounds in green pepper (*Capsicum annum* L.). *Frontiers in Nutrition*, 10(9), 1-18. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1027605>
- Zhu, S., Vivanco, J. M., & Manter, D. K. (2016). Nitrogen fertilizer rate affects root exudation, the rhizosphere microbiome and nitrogen-use-efficiency of maize. *Applied Soil Ecology*, 107, 324-333. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.07.009>