Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología Agropecuaria ISSN: 2448-6620

CRECIMIENTO INICIAL DEL CULTIVO DE ZANAHORIA (*Daucus carota* L.) EN RESPUESTA A LA BIOFERTILIZACIÓN CON *Rhizobium*

Solís Zebadúa Stephanie[1]; Sarmiento Megchum Erick Fabián[1]; Rincón Rosales Reiner[1]; Rincón Molina Clara Ivette[1]; Manzano Gómez Luis Alberto[1,2]; Gen Jiménez Adriana[1]; Maldonado Gómez Julio César[1]; Rincón Molina Francisco Alexander[1]

[1]Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Laboratorio de Ecología Genómica y Agricultura Regenerativa. Carretera Panamericana km 1080, Boulevares. 29050. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. (M19270398@tuxtla.tecnm.mx, M19270426@tuxtla.tecnm.mx, reiner.rr@tuxtla.tecnm.mx, clara.rm@tuxtla.tecnm.mx, D14270281@tuxtla.tecnm.mx, D10270415@tuxtla.tecnm.mx). [2]3R Biotec S.A. de C.V., Departamento de Investigación y Desarrollo. Colonia Centro, 233. 29000 Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. (D14270281@tuxtla.tecnm.mx)

RESUMEN

La agricultura moderna se enfrenta al reto de aumentar la producción de alimentos y, al mismo tiempo, reducir su impacto ambiental. En este contexto, el uso de bacterias rizobiales como probióticos vegetales representa una alternativa sostenible para mejorar la nutrición de los cultivos. Este estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de tres cepas nativas de *Rhizobium* (*R. calliandrae*, *R. mayense* y *R. jaguaris*) en el crecimiento inicial de la zanahoria (*Daucus carota* L.) en condiciones de invernadero. Las plantas de zanahoria (cv. Nantes Scarlet) se cultivaron en suelo con alta disponibilidad de macronutrientes y propiedades fisicoquímicas favorables. Se evaluaron ocho tratamientos, incluyendo combinaciones de inoculantes bacterianos con y sin fertilizante químico, un control con fertilizante químico y un control negativo. Los resultados preliminares a los 11 días después del trasplante revelaron diferencias significativas en la altura de las plantas. Las plantas más altas se encontraron en los tratamientos con inoculación de *Rhizobium* sola y en el control negativo, ambos superando al control con fertilizante químico. Los resultados sugieren que las cepas rizobiales promovieron el crecimiento inicial, posiblemente al aumentar la disponibilidad de micronutrientes y modular los mecanismos de absorción de nutrientes de la planta. El estudio respalda el uso de la biofertilización con rizobios como estrategia para reducir el uso de insumos químicos en el cultivo de zanahoria y mejorar el desarrollo temprano de la planta.

Palabras clave: *Probiótico vegetale, absorción de nutrientes, agricultura sostenible, interacciones planta-microorganismo.*

INTRODUCCIÓN

La agricultura actual se encuentra sometida a una doble presión: sostener el incremento de la producción alimentaria y, simultáneamente, reducir los impactos ecológicos derivados de los sistemas agrícolas intensivos. En este contexto, la biofertilización y la biofortificación mediadas por inoculantes microbianos han adquirido relevancia como herramientas biotecnológicas orientadas a mejorar el desempeño agronómico, la eficiencia nutrimental y la calidad de los cultivos. Entre los microorganismos de interés, las bacterias del género *Rhizobium* han sido ampliamente estudiadas por su papel en la fijación simbiótica de nitrógeno en leguminosas; sin

embargo, también se ha documentado su capacidad para promover el crecimiento de especies no leguminosas mediante mecanismos como la producción de fitohormonas, la movilización de nutrientes y la mejora en los procesos de absorción vegetal (Biswas et al., 2000; Flores-Félix et al., 2013).

La zanahoria (*Daucus carota* L.) es una hortaliza de raíz con importancia agronómica, alimentaria y nutricional a escala global, principalmente por su contenido de compuestos carotenoides, entre ellos el beta caroteno. No obstante, su desarrollo y productividad pueden verse afectados por el agotamiento progresivo del suelo, los desequilibrios nutrimentales y la baja disponibilidad de elementos esenciales. Diversos estudios han señalado que la incorporación de bacterias benéficas puede mejorar la biodisponibilidad de fósforo, micronutrientes y otros elementos involucrados en el metabolismo vegetal, lo cual favorece el crecimiento y la eficiencia fisiológica del cultivo (Kumar et al., 2019; Belimov et al., 2020).

El presente estudio evalúa el efecto de tres cepas nativas de *Rhizobium* sobre el desarrollo inicial de zanahoria en condiciones de invernadero. La investigación en curso se centra en parámetros de crecimiento y fertilidad del suelo, con miras a evaluar el impacto en la calidad nutricional del cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las pruebas de biofertilización en plantas de zanahoria se realizaron en el invernadero del Centro de Investigación y Transferencia de Tecnología San Lorenzo, perteneciente al Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuícola y Forestal, ICAMEX. El sitio experimental se localiza en el Conjunto SEDAGRO S/N, Rancho San Lorenzo, C.P. 52140, Metepec, Estado de México, con coordenadas geográficas 19°14'26.3" Norte y 99°35'14.1" Oriente.

Las plantas se obtuvieron a partir de semillas de zanahoria (*Daucus carota*) variedad Nantes Scarlet, adquiridas de la empresa Caloro®, ubicada en Guadalajara, Jalisco. El lote presentó 90% de germinación, 99% de pureza y tratamiento previo con Thiram. Las cepas bacterianas *Rhizobium calliandrae* LBP2-1, *Rhizobium mayense* NSJP1-1 y *Rhizobium jaguaris* SJP1-2 procedieron de la colección de cepas del Laboratorio 1 de Ecología Genómica y Agricultura Regenerativa del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Estas cepas fueron aisladas originalmente de nódulos radicales de *Calliandra grandiflora* (Rincón-Rosales et al., 2013) y se han caracterizado por su potencial como promotoras del crecimiento vegetal; además, sus genomas indican ausencia de rasgos asociados con toxicidad o patogenicidad para humanos, plantas y ambiente (Gen-Jiménez et al., 2023). Las semillas de zanahoria var. Nantes Scarlet fueron sembradas en bandejas de polietileno de 200 cavidades, con apertura de 2.3 × 1.8 cm, altura de 4.2 cm, base de 1.9 cm y capacidad volumétrica aproximada de 13 mL por celda. Como sustrato de propagación se utilizó una mezcla de Peat moss con agrolita

en proporción 1:2 v/v, con el propósito de favorecer aireación, retención de humedad y emergencia uniforme de las plántulas.

Las cepas bacterianas fueron reactivadas en medio YM durante 24 horas a 140 rpm y posteriormente escaladas en el mismo medio bajo condiciones de agitación. Se evaluaron ocho tratamientos: T1, *R. calliandrae*; T2, *R. mayense*; T3, *R. jaguaris*; T4, *R. calliandrae* más fertilizante; T5, *R. mayense* más fertilizante; T6, *R. jaguaris* más fertilizante; T7, fertilizante triple 19 como control positivo; y T8, control negativo. Cada tratamiento incluyó 24 repeticiones, para un total de 192 unidades experimentales.

Diez días antes del trasplante, el suelo hortícola fue desinfectado con 1.5 L del fungicida PREVICUR® Energy por maceta. Previamente, las macetas fueron hidratadas con 1 L de agua corriente para alcanzar aproximadamente 75% de saturación, conforme al análisis de capacidad de retención de agua. Las plantas fueron trasplantadas 29 días después de la germinación en bolsas de polietileno de 50 cm de altura y 30 cm de ancho, con 4 kg de sustrato hortícola por unidad experimental. En los tratamientos bacterianos T1 a T6, las raíces fueron inoculadas por inmersión durante 20 minutos en caldo YM ajustado a una densidad óptica de D.O.600 = 0.2, equivalente aproximadamente a 10^7 UFC/mL. Las plantas se distribuyeron bajo un diseño completamente al azar y se regaron con 1 L de agua corriente cada siete días.

La primera biofertilización se realizó 12 días después del trasplante mediante aplicación anillada de 10 mL por planta. La variable altura fue registrada un día antes de dicha aplicación, correspondiente a 11 días después del trasplante y 49 días después de la siembra. El fertilizante utilizado fue Poly-Feed® GG vegetativo 19-19-19 + M.E., el cual, de acuerdo con la ficha técnica para zanahoria, se diluyó a razón de 10 g por litro de agua para su aplicación por fertirriego.

El análisis fisicoquímico del suelo hortícola fue realizado por el laboratorio de suelos del Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuícola y Forestal, ICAMEX. Dicho análisis permitió caracterizar las propiedades texturales, químicas y de fertilidad inicial del sustrato utilizado durante el experimento.

Los datos fueron analizados mediante análisis de varianza, ANOVA, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. La comparación de medias se efectuó mediante la prueba de Tukey con $p < 0.05$, utilizando el software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las semillas de zanahoria germinaron entre los 9 y 11 días posteriores a la siembra, lo que indica una alta viabilidad del material vegetal y una emergencia compatible con el comportamiento fenológico esperado para esta especie. Este resultado coincide con lo descrito por Vega-Rojas et al. (2012) en el análisis de crecimiento de híbridos de zanahoria. Entre los factores que condicionan la germinación de esta hortaliza se encuentran la temperatura, la humedad relativa y la disponibilidad de agua para iniciar el proceso de imbibición de la semilla. Durante el periodo de germinación, la temperatura promedio fue de 19.4 °C y la humedad relativa alcanzó 70.8%, condiciones bajo las cuales se obtuvo 99% de germinación.

Estos valores son congruentes con lo reportado por Sousa-Pereira et al. (2008), quienes indicaron que la temperatura óptima para la germinación de zanahoria variedad Brasília se aproxima a 20 °C, con porcentajes de germinación de 85%. Los mismos autores señalaron que temperaturas elevadas, cercanas a 35 °C, reducen drásticamente la germinación hasta valores cercanos a 27%, lo cual evidencia que el estrés térmico durante esta etapa puede comprometer el establecimiento inicial del cultivo.

Otros factores que pueden modificar la respuesta germinativa incluyen el lote de semilla, el momento de producción, la variedad y el orden de las umbelas de las cuales fueron recolectadas las semillas (Paparella et al., 2024; Nongthombam et al., 2025). Adicionalmente, un sustrato con baja compactación y una profundidad de siembra adecuada favorecen la velocidad y uniformidad de emergencia, debido a que disminuyen la resistencia mecánica sobre la raíz primaria, el hipocótilo y los cotiledones en desarrollo. En este sentido, profundidades cercanas a 1 o 2 cm suelen ser favorables para diversas especies hortícolas, mientras que la compactación excesiva o las siembras profundas pueden retrasar o impedir la emergencia, afectando la morfología temprana de la plántula (Weaver, 1980; Wilson y Thurling, 1996).

El análisis fisicoquímico (tabla 1) del suelo hortícola mostró un pH de 7.5. La composición textural fue de 84% de arena, 8% de arcilla y 8% de limo, por lo que el suelo se clasificó como areno franco. Asimismo, la densidad aparente fue de 0.87 g/cm³, valor asociado con suelos de baja compactación y con características favorables para el desarrollo radical. Estas condiciones son relevantes para el cultivo de zanahoria, ya que la formación de una raíz pivotante recta, uniforme y de buena calidad comercial requiere suelos con adecuada aireación, drenaje y baja resistencia mecánica.

Un pH de 7.5 corresponde a una condición moderadamente alcalina, la cual puede limitar la disponibilidad de micronutrientes esenciales como hierro, manganeso, zinc y cobre (Gupta et al., 2008). En suelos alcalinos, la

presencia de carbonatos de calcio, fosfatos de calcio y grupos hidroxilo favorece la precipitación o inmovilización de estos elementos, reduciendo su disponibilidad para las plantas (Szeląg-Sikora et al., 2019). Asimismo, la disponibilidad de metales como hierro y aluminio puede modificarse bajo estas condiciones, con posibles efectos sobre la absorción nutrimental (Riaz et al., 2020; Martínez-Soto et al., 2022).

La textura areno franca favorece la aireación y el drenaje, factores que reducen la compactación y facilitan el crecimiento de raíces pivotantes. Seljåsen et al. (2012) y Añez y Espinoza (2002) reportaron respuestas favorables de zanahoria en suelos con predominancia de arena o características franco arenosas. Sin embargo, los suelos arenosos también pueden presentar menor contenido de algunos micronutrientes, como hierro, debido a procesos de lixiviación y baja capacidad de retención de ciertos elementos (Szeląg-Sikora et al., 2019).

Cuadro 1. Propiedades fisicoquímicas del suelo para cultivos hortícolas.

Parámetro	Método	Resultado	Interpretación	Rango óptimo zanahoria	Cita
pH	1:2 suelo/agua	7.5	Medianamente alcalino	6.0 – 6.8	Seljåsen et al., 2012; Kumar et al., 2023
% Arena	Bouyoucos	84%	Areno franco	40 – 85%	Seljåsen et al., 2012; Rohwer, 2021
% Arcilla		8%		5 – 20%	
% Limo		8%		10 – 30%	
Densidad aparente	Probeta	0.87 g/cm^3	Suelos orgánicos		

La cantidad de carbono orgánico fue de 1.93% y la materia orgánica de 3.33%, valores clasificados como medios de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 y compatibles con los intervalos recomendados para zanahoria. La capacidad de intercambio catiónico fue de 48.68 meq/100 g, mientras que los contenidos de nitrógeno total, fósforo, potasio, calcio y magnesio se ubicaron en categorías altas o muy altas, tanto con base en la NOM-021-SEMARNAT-2000 como respecto a los requerimientos generales del cultivo (tabla 2).

El valor elevado de capacidad de intercambio catiónico sugiere una alta aptitud del suelo para retener y suministrar cationes esenciales. Este atributo es determinante para la fertilidad edáfica, ya que permite conservar nutrientes como calcio, magnesio y potasio en formas intercambiables, disponibles para la absorción vegetal (Yang et al., 2024). Aunque el pH ligeramente alcalino puede restringir ciertos micronutrientes, una CIC alta puede contribuir a mantener una disponibilidad adecuada de macronutrientes y amortiguar parcialmente pérdidas por lixiviación (Gen-Jiménez et al., 2025).

La materia orgánica cumple funciones centrales en la fertilidad del suelo, la estructura edáfica, la retención hídrica y la dinámica de nutrientes. En niveles moderados, como los observados en este estudio, puede favorecer el crecimiento de zanahoria al mejorar las condiciones físicas y químicas del sustrato, así como la capacidad de retener agua disponible para la planta (Fageria, 2012; Ankenbauer y Loheide, 2017; Minasny y McBratney, 2018; Lal, 2020).

El nitrógeno, fósforo y potasio se encontraron en concentraciones elevadas. El nitrógeno participa en la síntesis de proteínas, ácidos nucleicos, clorofila y compuestos asociados con el metabolismo fotosintético (Fathi, 2022). Sin embargo, en zanahoria, un exceso de nitrógeno puede favorecer crecimiento vegetativo desbalanceado, deformación de raíces pivotantes, ramificación excesiva y reducción de la calidad comercial. El fósforo interviene en la transferencia de energía, la división celular y el crecimiento radical, mientras que el potasio participa en la regulación osmótica, la actividad enzimática y la síntesis de carbohidratos (Fathi y Afra, 2023). Por ello, aunque la alta disponibilidad de estos elementos indica un suelo fértil, su acumulación excesiva o la aplicación adicional de fertilizantes puede inducir antagonismos nutrimentales y disminuir la disponibilidad de micronutrientes esenciales para el desarrollo equilibrado del cultivo (Szeląg-Sikora et al., 2019).

Cuadro2. Fertilidad del suelo hortícola.

Parámetro	Método	Resultado	NOM-021-SEMARNAT-2000	Rango óptimo zanahoria	Cita
Carbono orgánico	Walkley y Black	1.93%	Medio	1.5 – 3.0%	Szeląg-Sikora et al., 2019
Materia orgánica	Walkley y Black	3.33%	Medio	2-5%	Kumar et al., 2023
C.I.C.	Acetato de amonio	48.68 meq/100g	Muy alto	20 – 30 meq/100g	Curtin et al., 2015
Nitrógeno total	Kjeldahl	0.65%	Alto	0.2 – 0.5%	Szeląg-Sikora et al., 2019
Fósforo P_2O_5	Bray I	122.03 ppm	Muy alto		
Potasio (K)	EAA	2956.10 ppm	Muy alto		
Calcio (Ca)	EAA	3119.86 ppm	Muy alto		
Magnesio (Mg)	EAA	2928.00 ppm	Muy alto		

En conjunto, el análisis fisicoquímico indica que el suelo hortícola utilizado posee condiciones favorables de estructura, aireación, materia orgánica y disponibilidad de macronutrientes. Sin embargo, el pH moderadamente alcalino, el predominio de arena y los altos niveles de fertilidad obligan a un manejo nutrimental cuidadoso,

debido a que la adición excesiva de fertilizantes podría inducir desequilibrios iónicos, lixiviación de elementos o deficiencias micronutricionales inducidas.

Los datos sobre la altura de las plantas a los once días después del trasplante muestran diferencias altamente significativas entre los tratamientos. Se muestran tres grupos diferentes, los tratamientos con las cepas inoculadas como el control negativo (1, 2, 3 y 8) muestran las mayores alturas, destacando *R. mayense* con 12.79 cm, seguido por los tratamientos con inoculación bacteriana y fertilización química (4, 5 y 6), y por último, el de menor altura, el tratamiento con fertilizante triple 19 (5.93 cm) (Cuadro 3). La diferencia de altura es muy visible entre tratamientos y se puede observar en la Figura 1.

Cuadro 3. Comparación de la altura de los tratamientos, prueba Tukey HSD ($P \leq 0.05$)

Tratamiento	Altura (cm)
1. Rhizobium calliandrae	11.31 ± 0.4369 A
2. Rhizobium mayense	12.79 ± 0.3336 A
3. Rhizobium jaguaris	12.08 ± 0.4389 A
4. R. calliandrae + fertilizante	8.10 ± 0.2963 B
5. R. mayense + fertilizante	7.87 ± 0.4129 B
6. R. jaguaris + fertilizante	7.75 ± 0.3970 B
7. Fertilizante triple 19	5.93 ± 0.2907 C
8. Control negative	12.5 ± 0.3268 A
Valor – p	0.0000
HSD ($p < 0.05$)	1.60947

Los valores en la misma columna con la misma letra son estadísticamente iguales.

La menor respuesta observada en el tratamiento con fertilización química podría estar relacionada con un exceso de macronutrientes en un suelo que ya presentaba concentraciones elevadas de nitrógeno, fósforo y potasio. La aplicación adicional del fertilizante pudo incrementar la concentración de sales o modificar el equilibrio iónico del sustrato, limitando la absorción de micronutrientes como hierro, zinc y manganeso. La sobrefertilización puede definirse como la aplicación de nutrientes por encima de la capacidad de asimilación de la planta, lo que no necesariamente incrementa la productividad y, por el contrario, puede generar acumulación de sales, antagonismos nutrimentales, alteraciones fisiológicas y afectaciones en la salud vegetal (Monge-Pacheco et al., 2007).

Figura 1. Panorama del comportamiento de zanahoria en los diferentes tratamientos y su altura de las plantas.

Algunas sintomatologías presentes podrían ser causa de dificiencias micronutricionales. La aparición de amarillamiento en las hojas jóvenes (Figura 2, (a)) podría indicar deficiencia de hierro. El hierro, aunque no forma parte de la clorofila, está involucrado en procesos de fotosíntesis que afectan directamente este proceso. Szeląg-Sikora et al., 2019 marcan la deficiencia de manganeso en zanahoria con un crecimiento retardado y reducción en rendimiento. Y por último, la deficiencia de zinc resulta en plantas enanas o de baja estatura, debido a que el zinc en las plantas actúa como estabilizador de proteínas y como cofactor enzimático en la síntesis de auxinas, el cual determina las condiciones de crecimiento y desarrollo de las plantas (Figura 2, (b)).

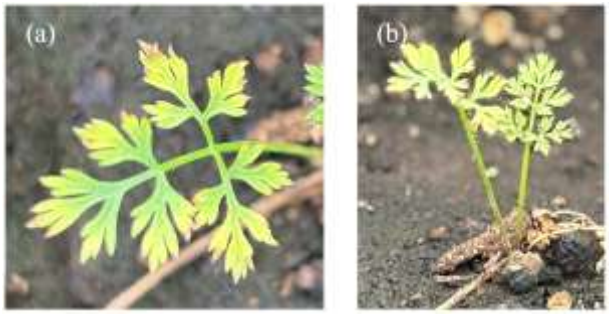

Figura 2. Sintomatologías en plantas con fertilizante químico: (a) amarillamiento en hojas, (b) enanismo.

Los tratamientos que combinaron *Rhizobium* con fertilizante presentaron una respuesta superior al fertilizante aplicado de manera individual, lo cual sugiere que las bacterias pudieron atenuar parcialmente los efectos negativos del desequilibrio nutrimental. Este efecto podría explicarse por mecanismos microbianos como la producción de sideróforos, la liberación de compuestos quelantes, la acidificación localizada de la rizosfera

mediante ácidos orgánicos y la producción de fitohormonas, entre ellas el ácido indolacético. Estos procesos pueden incrementar la disponibilidad de micronutrientes, regular la arquitectura radical y mejorar la eficiencia de absorción por parte de la planta.

Los resultados son coherentes con lo reportado por Flores-Félix et al. (2013), quienes documentaron incrementos en biomasa y altura de zanahoria inoculada con *Rhizobium*. De manera similar, Gen-Jiménez et al. (2023) señalaron que bacterias rizobiales pueden mejorar la absorción de nutrientes y estimular la producción de fitohormonas como auxinas y ácido indolacético, promoviendo procesos de división y elongación celular.
Las plantas con mayor altura, tanto las inoculadas con *Rhizobium* como las pertenecientes al control negativo, se desarrollaron en un sustrato con alta fertilidad, elevada capacidad de intercambio catiónico y contenido adecuado de materia orgánica. Esto indica que las condiciones edáficas por sí mismas fueron suficientes para sostener un crecimiento inicial favorable, incluso en ausencia de fertilización química. Sin embargo, la respuesta de los tratamientos inoculados sugiere que los rizobios podrían contribuir a optimizar la eficiencia fisiológica de la planta, especialmente bajo condiciones donde la disponibilidad de nutrientes es alta pero potencialmente desequilibrada.

La acción promotora de las cepas deberá corroborarse en etapas posteriores del ciclo del cultivo, particularmente mediante la evaluación de rendimiento, calidad morfológica de la raíz y composición nutrimental del órgano cosechado. Se ha documentado que las bacterias rizobiales pueden modular la nutrición vegetal a través de señales químicas, regulación rizosférica y mecanismos genéticos que ajustan la absorción de nutrientes conforme a las demandas fisiológicas de la planta. Esta modulación puede evitar la sobreacumulación de elementos, reducir riesgos de fitotoxicidad, limitar deformaciones morfológicas de la raíz y disminuir la acumulación de metales potencialmente tóxicos como cadmio y cobre, con implicaciones agronómicas y alimentarias relevantes (Biswas et al., 2000; Kumar et al., 2019; Szeląg-Sikora et al., 2019; Belimov et al., 2020; Quiri et al., 2020).

CONCLUSIONES

Los resultados preliminares muestran que la inoculación con cepas de *Rhizobium*, particularmente *R. mayense*, favoreció de manera significativa el crecimiento inicial de *Daucus carota* L. A los 11 días después del trasplante se observaron diferencias estadísticas altamente significativas en la altura de planta entre tratamientos, con valores superiores en las plantas inoculadas únicamente con rizobios y en el control negativo. El tratamiento con *R. mayense* alcanzó una altura promedio de 12.79 ± 0.3336 cm, seguido por el control negativo con 12.5 ± 0.3268 cm y *R. jaguaris* con 12.08 ± 0.4389 cm. En contraste, el tratamiento con fertilización química presentó el menor valor, con 5.93 ± 0.2907 cm. Estos resultados sugieren que las cepas rizobiales pueden contribuir al

crecimiento temprano de zanahoria mediante mecanismos asociados con la modulación de la absorción nutrimental, la movilización de micronutrientes y la regulación fisiológica del cultivo. La respuesta observada también evidencia que, en suelos con alta fertilidad inicial, la aplicación adicional de fertilizantes químicos puede generar efectos desfavorables si no se ajusta a las condiciones nutrimentales del sustrato. En etapas posteriores será necesario evaluar la morfología de la raíz, el rendimiento y el contenido nutrimental del producto cosechado, con el fin de determinar con mayor precisión el efecto agronómico y biofortificante de la inoculación rizobial. En conjunto, la biofertilización con *Rhizobium* representa una estrategia con potencial para fortalecer la sostenibilidad de la producción hortícola y disminuir la dependencia de insumos químicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ankenbauer, K. J., & Loheide, S. P. (2017). The effects of soil organic matter on soil water retention and plant water use in a meadow of the Sierra Nevada, CA. *Hydrological Processes*, 31(4), 891-901. https://doi.org/10.1002/hyp.11070

Añez, B., & Espinoza, W. (2002). Fertilización química y orgánica: efectos interactivos o independientes sobre la producción de zanahoria. Rev. Forest. *Venez*, 46(2), 47-54.

Belimov, A. A., et al. (2020). The role of symbiotic microorganisms, nutrient uptake and rhizosphere bacterial community in response of pea (*Pisum sativum* L.) genotypes to elevated Al concentrations in soil. *Plants*, 9(12), 1801. https://doi.org/10.3390/plants9121801

Biswas, J. C., Ladha, J. K., & Dazzo, F. B. (2000). Rhizobia inoculation improves nutrient uptake and growth of lowland rice. *Soil Science Society of America Journal*, 64(5), 1644-1650. https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6451644x

Curtin, D., Fraser, P. M., & Beare, M. H. (2015). Loss of soil organic matter following cultivation of long-term pasture: effects on major exchangeable cations and cation exchange capacity. *Soil Research*, 53(4), 377-385. https://doi.org/10.1071/SR14173

Fageria, N. K. (2012). Role of soil organic matter in maintaining sustainability of cropping systems. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 43(16), 2063-2113. https://doi.org/10.1080/00103624.2012.697234

Fathi, A. (2022). Role of nitrogen (N) in plant growth, photosynthesis pigments, and N use efficiency. *Agrisost*, 28, 1-8. https://doi.org/10.5281/zenodo.7143588

Fathi, A., & Afra, J. M. (2023). Plant Growth and Development in Relation to Phosphorus: A review. Bulletin of the University of Agricultural Sciences & Veterinary Medicine Cluj-Napoca. *Agriculture*, 80(1), 1-7. https://doi.org/10.15835/buasvmcn-agr:2022.0012

Flores-Félix, J. D., et al. (2013). Use of *Rhizobium leguminosarum* as a potential biofertilizer for *Lactuca sativa* and *Daucus carota* crops. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 176(6), 876-882. https://doi.org/10.1002/jpln.201300116

Gen-Jiménez, A., et al. (2023). Enhance of tomato production and induction of changes on the organic profile mediated by *Rhizobium* biofortification. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1235930. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1235930

Gen-Jiménez, A., et al. (2025). Bacterias Rizosféricas y Endófitas con Potencial PGPB Aisladas del Cultivo de Maíz (*Zea mays* L.) en Chiapas, México. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 43. https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v43i.2002

Gupta, N., Kening, W., & Liang, Z. (2008). Influence of iron-deficiency on the photosynthetic efficiency and antioxidant metabolism of an Indian mustard cultivar. *Journal of Plant Nutrition*, 31(5), 779-795.

Kumar, A., et al. (2019). Role of rhizobia for sustainable agriculture: lab to land. In Plant Growth Promoting Rhizobacteria for Agricultural Sustainability: From Theory to Practices (pp. 129-149). *Springer Nature*.

Kumar, N., Bharose, R., & Thomas, T. (2023). Response of Different Combination Levels of NPK and FYM on Physicochemical Properties of Inceptisol Soil at Prayagraj District, Uttar Pradesh, India under Cultivation of Carrot (*Daucus carota*). *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(18), 321-326.

Lal, R. (2020). Soil organic matter and water retention. *Agronomy Journal*, 112(5), 3265-3277. https://doi.org/10.1002/agj2.20282

Martínez-Soto, R. A., et al. (2022). Effects of different land-use systems on soil physicochemical properties of a chernozem in northeast México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 25(3), 1-15.

Minasny, B., & McBratney, A. B. (2018). Limited effect of organic matter on soil available water capacity. *European Journal of Soil Science*, 69(1), 39-47. https://doi.org/10.1111/ejss.12475

Monge-Pacheco, E., et al. (2007). Efecto de la sobrefertilización nitrogenada en la calidad de las manzanas.

Nongthombam, A., et al. (2025). Study on Growth and Yield Performance of Various Carrot Varieties. *SSRN* 5284715. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5284715

Paparella, A., et al. (2024). Challenges and opportunities in the sustainable improvement of carrot production. *Plants*, 13(15), 2092. 10.3390/plants13152092

Riaz, M. U., et al. (2020). Fate of micronutrients in alkaline soils. In Resources are used efficiently in agriculture (pp. 577-613). Springer.

Rincón-Rosales, R., et al. (2013). *Rhizobium calliandrae* sp. nov., *Rhizobium mayense* sp. nov. and *Rhizobium jaguaris* sp. nov., rhizobial species nodulating the medicinal legume *Calliandra grandiflora*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 63(Pt_9), 3423-3429. https://doi.org/10.1099/ijs.0.048249-0

Rohwer, C. L. (2021). Carrot yield and shape altered by seeding rate and raised beds in clay-loam soil. *HortScience*, 56(6), 722-729. 10.21273/HORTSCI15823-21

Seljåsen, R., et al. (2012). Effects of genotype, soil type, year and fertilisation on sensory and morphological attributes of carrots (*Daucus carota* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92(8), 1786-1799. https://doi.org/10.1002/jsfa.5548

Sousa-Pereira, R. A., et al. (2008). Germinação e vigor de sementes de cenoura armazenadas em ambiente refrigerado. *Ciência e Agrotecnologia*, 32(5), 1400-1406.

Szeląg-Sikora, A., et al. (2019). Impact of integrated and conventional plant production on selected soil parameters in carrot production. *Sustainability*, 11(20), 5612. https://doi.org/10.3390/su11205612

Vega Rojas, T., et al. (2012). Análisis del crecimiento de cinco híbridos de zanahoria (*Daucus carota* L.) mediante la metodología del análisis funcional. *Agronomía costarricense*, 36(2), 29-46.

Weaver, K. N. (1980). Field emergence of calabrese and onion seedlings in response to compaction treatments on the soil surface or at seed depth. *Journal of Horticultural Science*, 55(4), 325-332. https://doi.org/10.1080/00221589.1980.11514941

Wilson, C. E., & Thurling, N. (1996). Effect of sowing depth and water potential on seedling emergence of Lupinus species. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 36(4), 463-471. https://doi.org/10.1071/EA9960463

Yang, M., et al. (2024). Effects of balancing exchangeable cations Ca, Mg, and K on the growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.) based on increased soil cation exchange capacity. *Agronomy*, 14(3), 629. https://doi.org/10.3390/agronomy14030629