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

EFECTO DE *Rhizobium* sp. ACO-34A SOBRE EL CRECIMIENTO INICIAL DE PAPA FIANNA BAJO SALINIDAD INDUCIDA POR NaCl

Sarmiento-Megchum Erick Fabian[1]*; Solís-Zebadúa Stephanie[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, Boulevar, 29050. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. [2]3R Biotec S.A. de C.V., Departamento de Investigación y Desarrollo. Colonia Centro, 233. 29000 Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. * Autor de correspondencia: M19270426@tuxtla.tecnm.mx

RESUMEN

La papa (*Solanum tuberosum* L.) es un cultivo básico cuya productividad se ve limitada por el estrés salino. Las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) constituyen una estrategia sostenible para mejorar la tolerancia bajo estas condiciones. El objetivo del estudio fue evaluar el efecto de la inoculación con *Rhizobium* sp. ACO-34A sobre el crecimiento inicial de papa var. Fianna cultivada en invernadero bajo diferentes concentraciones de NaCl. Se utilizó un diseño factorial 2 × 5, con o sin inoculación y cinco niveles de salinidad, con 14 repeticiones por tratamiento. Los tubérculos se inocularon antes de la siembra y recibieron una biofertilización complementaria a los 15 días después de la siembra. A los 20 días después de la siembra se evaluaron la longitud del tallo, el número de hojas y el diámetro del tallo. La inoculación incrementó significativamente la longitud del tallo y el número de hojas respecto de los tratamientos no inoculados. La longitud del tallo osciló entre 10.71 ± 4.37 y 14.96 ± 2.79 cm, el número de hojas entre 41.57 ± 17.27 y 62.07 ± 16.23 por planta, y el diámetro del tallo entre 0.34 ± 0.09 y 0.45 ± 0.07 cm. La salinidad restringió el diámetro del tallo. Estos resultados indican que *Rhizobium* sp. ACO-34A favorece el crecimiento inicial de papa var. Fianna bajo condiciones de salinidad inducida y respalda su potencial como biofertilizante en sistemas de cultivo con restricciones salinas.

Palabras clave: *Biofertilización, Crecimiento temprano, PGPR, Sostenibilidad agrícola*

INTRODUCCIÓN

La papa (*Solanum tuberosum* L.) es un cultivo básico de gran importancia alimentaria y económica, pero altamente sensible al estrés salino, que limita su productividad al inducir desequilibrios iónicos, estrés osmótico y oxidativo, afectando directamente el crecimiento y el rendimiento (FAO, 2025; Kazimierczak et al., 2019). En México, más del 50 % del territorio presenta características áridas o semiáridas y el 64 % de los suelos están afectados por salinización, lo que agrava esta problemática (SADER, 2021). Desde el marco de la biotecnología agrícola, las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) representan una estrategia sostenible para mitigar la salinidad mediante producción de fitohormonas, regulación del etileno, solubilización de nutrientes y activación de defensas antioxidantes (Mishra et al., 2021). Además, su capacidad de formar biopelículas y colonizar de manera efectiva la rizósfera favorece una interacción estable con las raíces,

incrementando la disponibilidad de nutrientes y mejorando la tolerancia al estrés abiótico (Jaiswal et al., 2021). En particular, *Rhizobium* sp. ACO-34A, aislada de *Agave americana*, ha demostrado tolerancia a NaCl, producción de auxinas, solubilización de fósforo y efectos positivos en distintos cultivos (De la Torre-Ruiz et al., 2016; García-Pérez et al., 2024). Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la inoculación con *Rhizobium* sp. ACO-34A sobre parámetros morfométricos tempranos de *Solanum tuberosum* L. var. Fianna bajo diferentes concentraciones de NaCl.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para este trabajo se emplearon tubérculos de papa (*Solanum tuberosum* L.) var. Fianna, con calibre aproximado de 20 mm de diámetro y estado fisiológico de brotación múltiple. La cepa élite nativa *Rhizobium* sp. ACO-34A, fue obtenida de la colección de cepas del laboratorio 1 de Ecología Genómica y Agricultura Regenerativa (TECNM/ITTG) y reactivada en medio YEM suplementado con Ca^{2+} a temperatura ambiente (22 °C) bajo agitación orbital (140 rpm, 24 h).

El ensayo se realizó en condiciones de invernadero, perteneciente al departamento hortícola del Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuícola y Forestal, Metepec, Estado de México. Este invernadero se localiza a una latitud de 19° 14' N, longitud de 99° 35' O, cuenta con una superficie de 405 m² y presenta una temperatura promedio de 22 °C (Figura 1).

Figura 1. Ubicación geográfica del sitio experimental.

Se estableció un diseño factorial completo [2 x 5] con los factores A: inoculación con cepa rizobiana y B: concentración de NaCl, lo que generó un total de 10 tratamientos (Cuadro 1) evaluados con 14 réplicas por tratamiento, distribuidos bajo un diseño completamente aleatorizado. Cada experimento se realizó en macetas de plástico de 2 L, utilizando 1 kg de sustrato compuesto por 50 % de tepojal y 50 % de suelo franco-arenoso proveniente de una cama de siembra del invernadero utilizado previamente analizado bajo la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 y desinfectado con un fungicida sistémico comercial Previcur® Energy.

Para los tratamientos salinos se establecieron cinco concentraciones de NaCl: 0.00, 42.4, 65.7, 88.8 y 109.5 mM, correspondientes a conductividades eléctricas de 0.39, 4.78, 6.41, 8.95 y 10.23 dS/m en solución preparada con agua corriente.. Para los tratamientos con aplicación de la cepa rizobiana, los tubérculos se inocularon mediante inmersión en una suspensión de *Rhizobium* sp. ACO-34A con DO_{600nm}= 1.0. La siembra se realizó con una densidad de un tubérculo por maceta para todos los tratamientos, a una profundidad de 3-5 cm. El riego se realizó de acuerdo a la capacidad de campo del sustrato adecuado para papa (70%) con 500 mL de agua corriente cada 4 días y fertirriego cada 8 días con fertilizante soluble triple 19 enriquecido con micronutrientes Poly-Feed^{Tm}. El manejo fitosanitario incluyó la aplicación foliar del fungicida sistémico Tecto® 60. Se aplicó una primera biofertilización con la cepa rizobiana a los 15 días después de la siembra usando un volumen de 10 mL por maceta ($DO_{600\ nm}$= 1.0) (Sánchez-Bernal et al., 2008; Flores López, López Delgado & Sotelo Ruiz, 2024).

Cuadro 1. Tratamientos del diseño experimental evaluado.

Tratamiento	Combinación
1	A_1B_1: ACO-34A y 0.00 mM NaCl (+)
2	A_1B_2: ACO-34A y 42.4 mM NaCl
3	A_1B_3: ACO-34A y 65.7 mM NaCl
4	A_1B_4: ACO-34A y 88.8 mM NaCl
5	A_1B_5: ACO-34A y 109.5 mM NaCl
6	A_2B_1: SIN INOCULACIÓN y 0.00 mM NaCl (-)
7	A_2B_2: SIN INOCULACIÓN y 42.4 mM NaCl
8	A_2B_3: SIN INOCULACIÓN y 65.7 mM NaCl
9	A_2B_4: SIN INOCULACIÓN y 88.8 mM NaCl
10	A_2B_5: SIN INOCULACIÓN y 109.5 mM NaCl

(+): tratamiento control positivo; (-): tratamiento control negativo.

A los 20 días después de la siembra (dds), se evaluaron la longitud del tallo, el diámetro del tallo y el número total de hojas por planta. Estas variables constituyen indicadores tempranos del vigor vegetativo y permiten analizar la influencia de la inoculación y la salinidad sobre el crecimiento inicial del cultivo.

Los datos se analizaron mediante ANOVA multifactorial (α= 0,05; $P \leq 0.05$), usando el software de Sistema de Análisis Estadístico STATGRAPHICS Centurion versión XVI.I, considerando como factores la inoculación y la concentración de NaCl, así como su interacción.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El suelo analizado mostró textura areno-franca, pH ligeramente alcalino (7.50), y baja densidad aparente (0.87 g/cm³) (Cuadro 2), condiciones que mejoran la infiltración, reducen el riesgo de compactación y favorecen el movimiento de agua y solutos, por su parte los valores elevados de la capacidad de intercambio catiónico indican alta capacidad para retener cationes como K^+, Ca^{2+} y Mg^{2+}, esenciales para la homeostasis iónica en

cultivos sensibles a la salinidad (Brady & Weil, 2016). El alto contenido de fósforo disponible (122 ppm) y nitrógeno total (0.65 %) coloca al suelo dentro de la categoría de alta fertilidad, lo cual contrasta con estudios de papa bajo suelos de menor calidad, donde la respuesta a la inoculación microbiana se ve enmascarada por limitaciones nutricionales. Además, la presencia de materia orgánica (3.33 %) y carbono orgánico (1.93 %) sugiere un ambiente edáfico con buena capacidad de amortiguamiento, condición que puede potenciar la acción de las PGPR al mejorar la disponibilidad de microelementos y facilitar la colonización rizosférica mediante la formación de biopelículas (Sánchez-Bernal et al., 2008; Jaiswal et al., 2021; Ghidawi et al., 2024). Por tanto, la caracterización del suelo realizada evidenció condiciones óptimas de fertilidad y estructura, aunado a ello, la fertilización realizada durante el ciclo de cultivo con una fórmula balanceada (triple 19 con micronutrientes) permitió reforzar la disponibilidad de nutrientes y mantener un adecuado soporte nutricional en cultivos de papa (Koch et al., 2020), lo que permite inferir que las respuestas observadas en la planta se atribuyen principalmente a efectos de la inoculación y al estrés salino, y no posibles deficiencias de nutrientes en el medio edáfico. Estas propiedades convierten al sustrato en un modelo adecuado con potencial para mantener la productividad en cultivos exigentes como papa (Flores López, López Delgado & Sotelo Ruiz, 2024).

Cuadro 2. Análisis de propiedades físicoquímicas y de fertilidad del suelo.

Parámetro	Resultado	Unidad	Interpretación
pH (1:2 suelo/agua)	7.50	U. pH	Medianamente alcalino
Textura	84 arena, 8 limo, 8 arcilla	%	Areno-franco
Densidad aparente	0.87	g/cm³	Suelos orgánicos, buena porosidad
Materia orgánica	3.33	%	Alta
Carbono orgánico	1.93	%	Adecuado
Nitrógeno total	0.65	%	Alto
Fósforo disponible (P_2O_5)	122.03	ppm	Muy alto
Potasio (K)	2956.10	ppm	Muy alto
Calcio (Ca)	3119.86	ppm	Muy alto
Magnesio (Mg)	2928.00	ppm	Muy alto
Sodio (Na)	337.90	ppm	Medio
Capacidad intercambio catiónico (CIC)	48.68	meq/100 g	Alta

En la longitud de tallo (20 dds), el ANOVA mostró efectos significativos del factor inoculación ($p = 0.0443$) y de la interacción inoculación × salinidad ($p = 0.0168$) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Análisis de varianza de las variables longitud de tallo, número de hojas y diámetro de tallo

Variable	Fuente de variación	SC	gl	CM	F	p-valor
Longitud de tallo	Cepa (A)	70.0071	1	70.0071	4.13	0.0443
	Salinidad (B)	44.0036	1	44.0036	2.59	0.1098
	A × B	99.6036	1	99.6036	5.87	0.0168
	Error total	2068.81	122	16.9574		
	Total (Corr.)	2498.54	139			

Número de hojas	Cepa (A)	2452.83	1	2452.83	7.28	0.0079
	Salinidad (B)	932.575	1	932.575	2.77	0.0986
	A × B	1272.89	1	1272.89	3.78	0.0542
	Error total	41079.6	122	336.718		
	Total (Corr.)	49021.9	139			
Diámetro de tallo	Cepa (A)	0.03457	1	0.034571	3.31	0.0711
	Salinidad (B)	0.06603	1	0.066036	6.33	0.0132
	A × B	0.03889	1	0.038893	3.73	0.0558
	Error total	1.27243	122	0.01043		
	Total (Corr.)	1.57171	139			

De manera complementaria, en el cuadro 4 se presentan las medias y desviaciones estándar de la longitud del tallo, número de hojas y diámetro de tallo para cada combinación de inoculación y salinidad. La longitud del tallo osciló aproximadamente entre 10.71 ± 4.37 y 14.96 ± 2.79 cm, el número de hojas entre 41.57 ± 17.27 y 62.07 ± 16.23, y el diámetro de tallo entre 0.34 ± 0.09 y 0.45 ± 0.07 cm. Estos valores cuantitativos permiten visualizar de manera clara las diferencias en las medias de los parámetros morfométricos entre tratamientos y sintetizar la respuesta morfométrica temprana del cultivo frente al arreglo factorial evaluado.

Cuadroa 4. Medias de parámetros morfométricos tempranos evaluados en plantas de papa (*Solanum tuberosum* L. var Fianna)

Tratamiento	Longitud de tallo (cm)	Número de hojas	Diámetro de tallo (cm)
T1: A_1B_1	14.82 ± 2.61	60.86 ± 8.57	0.44 ± 0.06
T2: A_1B_2	14.96 ± 2.79	62.07 ± 16.23	0.45 ± 0.07
T3: A_1B_3	12.71 ± 5.39	50.86 ± 21.67	0.36 ± 0.13
T4: A_1B_4	11.82 ± 4.18	51.79 ± 19.66	0.39 ± 0.14
T5: A_1B_5	11.43 ± 4.38	46.21 ± 21.80	0.34 ± 0.10
T6: A_2B_1	11.93 ± 4.38	48.07 ± 17.99	0.37 ± 0.09
T7: A_2B_2	11.21 ± 4.37	42.43 ± 20.83	0.36 ± 0.10
T8: A_2B_3	10.71 ± 4.37	41.57 ± 17.27	0.36 ± 0.08
T9: A_2B_4	12.57 ± 4.80	54.07 ± 19.43	0.39 ± 0.13
T10: A_2B_5	12.25 ± 3.44	43.79 ± 12.82	0.34 ± 0.09

En la figura 2 se muestra la interacción de las plantas inoculadas alcanzaron mayor elongación, especialmente en ausencia de estrés y en concentraciones moderadas de NaCl, mientras que en niveles altos de salinidad ambas líneas de tendencia (inoculadas y no inoculadas) tienden a converger. Este patrón sugiere que la cepa *Rhizobium* sp. ACO-34A contribuye a la elongación temprana del tallo, con una respuesta modulada por el nivel de NaCl aplicado. Estudios previos han demostrado que PGPR productoras de auxinas y citoquininas favorecen la división y expansión celular bajo condiciones salinas, prolongando el crecimiento vegetativo inicial (Mishra et al., 2021). En papa, la inoculación con *Bacillus mojavensis* mejoró la altura de planta y biomasa aérea bajo NaCl, en asociación con una mayor actividad antioxidante y un balance hormonal más favorable (Ghidawi et al., 2024). En conjunto, estos antecedentes indican que el comportamiento observado en este

trabajo es consistente con el marco general de regulación hormonal y antioxidante mediada por PGPR bajo estrés salino.

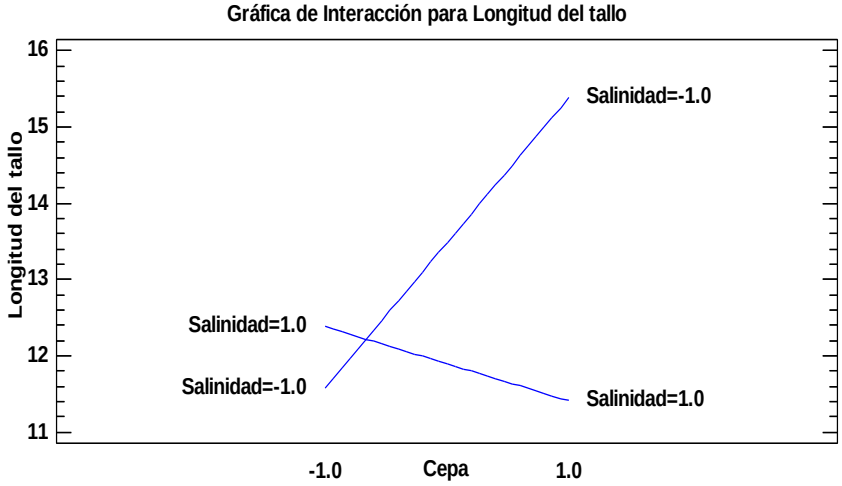

Figura 2. Interacción para la variable de respuesta longitud de tallo.

En el número de hojas (20 dds), la inoculación fue significativa (p = 0.0079), mientras que la interacción mostró una tendencia marginal (p = 0.0542). En la gráfica de interacción (Figura 3) se observa que las plantas inoculadas mantuvieron una ventaja en la formación foliar en casi todos los niveles de NaCl, aunque la brecha se redujo en condiciones de mayor salinidad. Este comportamiento indica que la inoculación con *Rhizobium* sp. ACO-34A favorece el desarrollo temprano de la parte foliar de la planta, incrementando el área fotosintética disponible, en concordancia con lo reportado para otras PGPR. Una mayor producción de hojas en etapas tempranas es fundamental para sostener la fotosíntesis y acumular reservas necesarias para el llenado de tubérculos. En otros cultivos como tomate, la inoculación con *Pseudomonas fluorescens* reguló positivamente genes asociados al desarrollo foliar y tolerancia a estrés (Hanifah et al., 2023). En papa, este tipo de respuesta puede asociarse con la mejora en la relación K^+/Na^+ en los tejidos, lo que permite conservar la integridad celular y retrasar la clorosis foliar (Tahir et al., 2019).

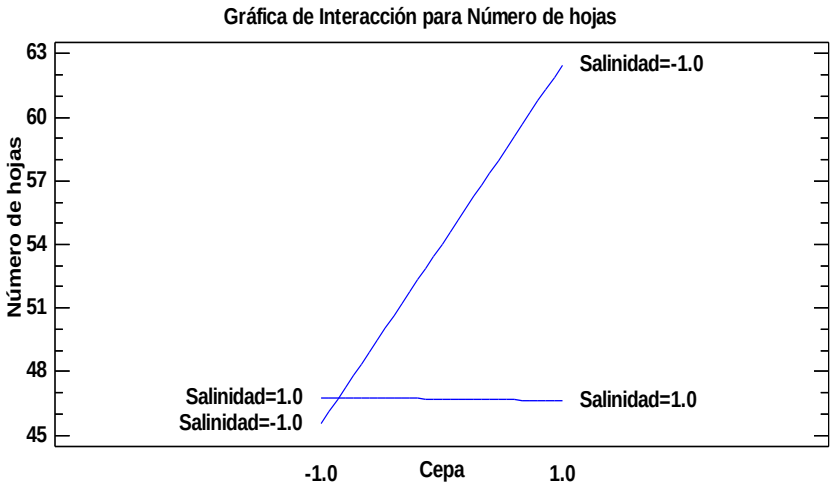

Figura 3. Gráfico de interacción para la variable de respuesta número de hojas

El diámetro de tallo (20 dds) mostró diferencias significativas únicamente por el efecto de la salinidad ($p = 0.0132$). La gráfica de interacción (Figura 4) confirma que, a medida que aumenta la concentración de NaCl, el grosor del tallo disminuye en ambos tratamientos, con diferencias mínimas entre inoculados y no inoculados. Este resultado sugiere que el engrosamiento del tallo es un proceso estructural más tardío, dependiente de la deposición de celulosa y lignina, así como de la expansión radial de células, procesos que son altamente afectados por la acumulación de Na^+ (Shahid et al., 2024). Estudios en papa cv. Alpha evidencian que el aumento de salinidad reduce progresivamente el diámetro del tallo, aun en presencia de fertilización química (Sánchez-Bernal et al., 2008), lo que coincide con los hallazgos de este trabajo.

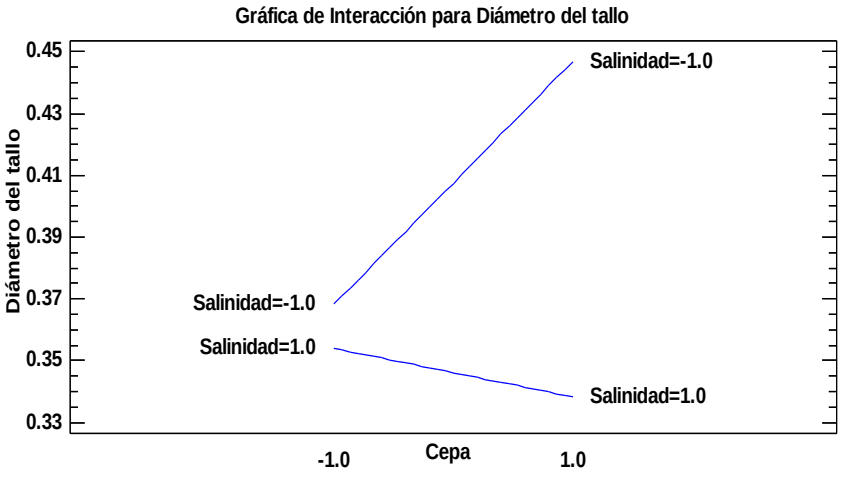

Figura 4. Interacción para la variable de respuesta diámetro de tallo

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten concluir que el suelo utilizado presentó fertilidad elevada y condiciones fisicoquímicas favorables, por lo que las respuestas observadas en papa var. Fianna pueden asociarse principalmente con los efectos de la inoculación y la salinidad inducida. La inoculación con *Rhizobium* sp. ACO-34A favoreció significativamente la elongación del tallo y la emisión de hojas durante el crecimiento inicial, especialmente bajo condiciones sin NaCl añadido y con salinidad moderada. La interacción inoculación × salinidad fue significativa para longitud de tallo, mientras que en número de hojas y diámetro de tallo mostró una tendencia cercana al nivel de significancia. El diámetro de tallo estuvo determinado principalmente por la concentración de NaCl, con una tendencia de reducción asociada al incremento de la salinidad. En conjunto, estos resultados indican que la cepa ACO-34A promueve el crecimiento vegetativo inicial de papa bajo condiciones de salinidad baja a moderada, aunque su efecto tiende a reducirse conforme aumenta la concentración de NaCl. Este comportamiento es compatible con procesos de promoción del crecimiento vegetal atribuidos a PGPR, incluyendo regulación hormonal, mejora de la homeostasis iónica y activación de respuestas antioxidantes. Desde una perspectiva aplicada, estos hallazgos respaldan el potencial de *Rhizobium* sp. ACO-34A como componente de estrategias de biofertilización sostenible en sistemas de cultivo de papa afectados por salinidad y justifican su evaluación posterior en condiciones de campo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson.

De La Torre-Ruiz, N., Ruiz Valdiviezo, V. M., Rincón Molina, C. I., Rodríguez Mendiola, M., Arias Castro, C., Gutiérrez Miceli, F. A., & Rincón Rosales, R. (2016). Effect of plant growth-promoting bacteria on the growth and fructan production of Agave americana L. Brazilian Journal of Microbiology, 47, 587-596. https://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.04.010

FAO (2025). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Base de datos estadísticos de FAOSTAT

Flores López, R., López Delgado, H. A., & Sotelo Ruiz, E. D. (2024). *Tubérculo-semilla de papa en invernadero*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

García-Pérez, L. G., Rincón-Molina, C. I., Martínez-Romero, E., Rogel, M. A., Tapia-Torres, Y., Manzano-Gómez, L. A., Maldonado-Gómez, J. C., Rincón-Molina, F. A., & Rincón-Rosales, R. (2024). Genomic insights and plant growth-promoting potential of rhizobial strains from *Agave americana*. Horticulturae, 10(12), 1370. https://doi.org/10.3390/horticulturae10121370

Ghidawi, J. S, Ghazala, I., Haddar, A., Bouazizi, O., Gargouri Bouzid, R., & Nouri Ellouz, O. (2024). Effect of the Plant Growth-Promoting Bacteria Strain *Bacillus mojavensis* I4 on Potato Growth, Physiology, Tuber Yield, and Quality Under Salt Stress Conditions. *Potato Research*, 1-23. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3883973/v1

Hanifah, N. A. S. binti, Ghadamgahi, F., Ghosh, S., Ortiz, R., Whisson, S. C., Vetukuri, R. R., & Kalyandurg, P. B. (2023). Comparative transcriptome profiling provides insights into the growth promotion activity of *Pseudomonas fluorescens* strain SLU99 in tomato and potato plants. Frontiers in Plant Science, 14, 1141692. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1141692

Jaiswal, S. K., Mohammed, M., Ibny, F. Y., & Dakora, F. D. (2021). Rhizobia as a source of plant growth-promoting molecules: potential applications and possible operational mechanisms. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *4*, 619676. https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.619676

Kazimierczak, R., Średnicka-Tober, D., Hallmann, E., Kopczyńska, K., & Zarzyńska, K. (2019). The impact of organic vs. conventional agricultural practices on selected quality features of eight potato cultivars. Agronomy, 9(12), 799. https://doi.org/10.3390/agronomy9120799

Koch, M., Judd, A., Gutsch, A., & Paul, J.-Y. (2020). The importance of nutrient management for potato (Solanum tuberosum L.). *Potato Research*, 63, 135–152. https://doi.org/10.1007/s11540-019-09431-2

Mishra, P., Mishra, J., & Arora, N. K. (2021). Plant growth promoting bacteria for combating salinity stress in plants: Recent developments and prospects: A review. *Microbiological Research, 252,* 126861. https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126861

SADER. (2021). *Mapa agrícola de afectación por salinidad en México*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Recuperado de https://www.gob.mx/agricultura/acciones-y-programas/mapa-agricola-de-afectacion-por-salinidad-en-mexico

Sánchez-Bernal, E., Ortega Escobar, M., González Hernández, V., Camacho Escobar, M., & Kohashi Shibata, J. (2008). Crecimiento de plantas de papa (*Solanum tuberosum* L.) cv. Alpha, inducido por diversas soluciones salinas. Interciencia, 33(9), 643-650.

Shahid, M., Altaf, M., & Danish, M. (2024). Halotolerant exopolysaccharide-producing *Rhizobium azibense* increases the salt tolerance mechanism in *Phaseolus vulgaris* L. by improving the growth, ion homeostasis, and antioxidant defensive enzymes. *Chemosphere*, 142431. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142431

Tahir, M., Ahmad, I., Shahid, M., Shah, G. M., Farooq, A. B. U., Akram, M., ... & Zakir, A. (2019). Regulation of antioxidant production, ion uptake and productivity in potato (*Solanum tuberosum* L.) plant inoculated with growth promoting salt tolerant *Bacillus* strains. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *178*, 33-42. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.04.027