

Efecto de Lixiviado de Vermicompost Enriquecido con *Trichoderma Viride* en el Crecimiento del Tomate

Effect of Vermicompost Leachate Enriched with *Trichoderma Viride* on Tomato Growth

Velásquez-Chávez, T.E.¹; Servín-Prieto, A.J.² ✉, Hernández-López, M.³; Vásquez-Corral, M.H.⁴; Juárez-Hernández, J.M.⁵

Datos de Adscripción:

¹ Velásquez Chávez, Tania Elizabeth
TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.

ROR ID: <https://ror.org/00davry38>

ROR ID: <https://ror.org/04bjtbt12>

tania.vc@itslerdo.edu.mx

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7788-1786>

² ✉ Servín Prieto, Alan Joel

TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.

ROR ID: <https://ror.org/00davry38>

ROR ID: <https://ror.org/04bjtbt12>

alan.sp@itslerdo.edu.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5534-7875>

³ Hernández López, Mónica

TecNM: Instituto Tecnológico de Torreón. Torreón, Coahuila. México.

ROR ID: <https://ror.org/00davry38>

monicahlop@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6249-127X>

⁴ Vásquez Corral, Marcial Humberto

TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.

ROR ID: <https://ror.org/00davry38>

ROR ID: <https://ror.org/04bjtbt12>

marcial.vc@itslerdo.edu.mx

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0722-0369>

⁵ Juárez Hernández, José María

TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.

ROR ID: <https://ror.org/00davry38>

ROR ID: <https://ror.org/04bjtbt12>

jose.jh@itslerdo.edu.mx

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5790-651X>

Resumen - El cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*) es de gran importancia económica en México; sin embargo, su producción enfrenta limitaciones asociadas al uso intensivo de agroquímicos y a la incidencia de patógenos del suelo. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto del enriquecimiento del lixiviado de vermicompost con *Trichoderma viride* sobre el crecimiento y desarrollo de plántulas de tomate, como una alternativa sostenible en la agricultura. La metodología consistió en la inoculación del hongo en lixiviado previamente esterilizado y su aplicación en semillas de tomate bajo condiciones controladas. Posteriormente, las plántulas fueron establecidas en invernadero y evaluadas mediante parámetros fisiológicos y de crecimiento, incluyendo contenido de clorofila, peso fresco, peso seco y contenido de nitrógeno. Se compararon tres tratamientos: lixiviado con hongo (LH), lixiviado sin hongo (LS) y un control con agua (SA). Los resultados mostraron que el tratamiento LH presentó valores significativamente superiores en todas las variables evaluadas, destacando un mayor contenido de clorofila (0.7205 µg/mg), mayor biomasa fresca (0.6283 g),

mayor peso seco (0.0613 g) y mayor contenido de nitrógeno (1.69%). El tratamiento LS mostró valores intermedios, mientras que el control (SA) presentó los valores más bajos. Estos hallazgos evidencian que la combinación de lixiviado de vermicompost con *Trichoderma viride* genera un efecto sinérgico que favorece la actividad fotosintética, la absorción de nutrientes y la acumulación de biomasa en plantas de tomate. Se concluye que este bioinsumo representa una alternativa viable para reducir el uso de agroquímicos y promover sistemas agrícolas más sostenibles.

Palabras Clave: Agricultura sostenible, Biofertilizantes, Crecimiento vegetal, Tomate, *Trichoderma viride*

Abstract - Tomato (*Solanum lycopersicum*) cultivation is of great economic importance in Mexico; however, its production faces limitations associated with the intensive use of agrochemicals and the incidence of soilborne pathogens. In this context, the present study aimed to evaluate the effect of enriching vermicompost leachate with *Trichoderma viride* on the growth and development of tomato seedlings, as a sustainable alternative in agriculture. The methodology consisted of inoculating the fungus into previously sterilized leachate and applying it to tomato seeds under controlled conditions. Subsequently, the seedlings were established in a greenhouse and evaluated using physiological and growth parameters, including chlorophyll content, fresh weight, dry weight, and nitrogen content. Three treatments were compared: leachate with fungus (LH), leachate without fungus (LS), and a control with water (SA). The results showed that the LH treatment exhibited significantly higher values in all evaluated variables, notably a higher chlorophyll content (0.7205 µg/mg), greater fresh biomass (0.6283 g), greater dry weight (0.0613 g), and higher nitrogen content (1.69%). The LS treatment showed intermediate values, while the control (SA) presented the lowest values. These findings demonstrate that the combination of vermicompost leachate with *Trichoderma viride* generates a synergistic effect that promotes photosynthetic activity, nutrient absorption, and biomass accumulation in tomato plants. It is concluded that this bio-input represents a viable alternative for reducing the use of agrochemicals and promoting more sustainable agricultural systems.

Keywords: Biofertilizers, Plant growth, Sustainable agriculture, Tomato, *Trichoderma viride*

I. INTRODUCCIÓN

La integración de enmiendas orgánicas e inoculantes microbianos ha surgido como una estrategia sostenible para mejorar la productividad de los cultivos y minimizar la dependencia de fertilizantes sintéticos. Específicamente, la combinación del lixiviado de vermicompost rico en nutrientes con la actividad biológica de *Trichoderma viride* ofrece un enfoque prometedor para optimizar el desarrollo fisiológico y bioquímico de las plantas (Ashour et al., 2023). Si bien el lixiviado de vermicompost proporciona una fuente concentrada de nutrientes esenciales derivados de residuos orgánicos mineralizados (Alabi et al., 2023), la colonización secundaria por *Trichoderma viride* mejora la tolerancia al estrés y promueve el crecimiento a través de complejos mecanismos de biocontrol (Metwally & Soliman, 2023). Investigaciones recientes indican que dicha fortificación microbiana puede aumentar significativamente la arquitectura de los brotes y la biomasa radicular, compensando eficazmente las deficiencias en la absorción de nutrientes en condiciones de crecimiento sub-óptimas (Azarmi et al., 2011). Además, se ha demostrado que la interacción sinérgica entre lixiviados bio-orgánicos e inoculantes fúngicos mejora la eficiencia fotosintética y la acumulación total de biomasa en diversos cultivos de solanáceas (Charoenrak et al., 2019; Sachdev et al., 2018). Sin embargo, la respuesta fisiológica específica de las plántulas de tomate a la aplicación combinada de lixiviado fortificado con *Trichoderma* sigue sin investigarse a fondo, en particular en lo que respecta a su potencial para mitigar las limitaciones de nutrientes en contextos ambientales fluctuantes (Arthur et al., 2012; Chinsamy et al., 2014).

El tomate (*Solanum lycopersicum*) es un cultivo hortícola de gran importancia económica y global, especialmente en México, donde es originario y tiene una alta demanda internacional (Long, 1995; Razifard et al., 2020). Sin embargo, su cultivo intensivo a menudo depende de agroquímicos, lo que conlleva degradación ambiental, problemas de salud del suelo y riesgos para la salud humana (Aktar et al., 2009; Shaikh et al., 2025). Los cultivos de tomate son altamente susceptibles a diversas enfermedades bacterianas, fúngicas y virales, por lo que un manejo integrado y sostenible resulta crucial (Savary et al., 2019). En respuesta a los desafíos que plantean las prácticas agrícolas convencionales, existe un creciente interés en alternativas sostenibles que mejoren la productividad de los cultivos a la vez que preservan el equilibrio ecológico (Calvo et al., 2014; Foley et al., 2011).

Los microorganismos eficientes y los hongos del suelo, como los del género *Trichoderma*, se han revelado como prometedores agentes de control biológico y promotores del crecimiento vegetal (Guzmán-Guzmán et al., 2025; Martínez et al., 2023). *Trichoderma viride*, en particular, es reconocido por sus múltiples beneficios, que incluyen el antagonismo directo contra patógenos vegetales, la secreción de enzimas que degradan la pared celular y la estimulación de la producción de fitohormonas, lo que conduce a un mejor crecimiento de las plantas y una mayor absorción de nutrientes (Abdenaceur et al., 2022; Ren et al., 2025). Se ha demostrado que previene enfermedades como la marchitez por *Fusarium* en el tomate y mejora la tolerancia a diversos tipos de estrés (Hasna et al., 2025; Sehim et al., 2023). Paralelamente, el lixiviado de vermicompost, un biofertilizante líquido rico en nutrientes y microorganismos beneficiosos, ofrece

un excelente complemento a los inoculantes microbianos (Jiang et al., 2023; Loera-Muro et al., 2021). Se ha demostrado que su aplicación favorece el desarrollo radicular, aumenta la resistencia a enfermedades y mejora la calidad de los frutos del tomate (Koskey et al., 2023). Por lo tanto, la combinación de *Trichoderma viride* y lixiviado de vermicompost representa un enfoque sinérgico para potenciar el vigor y la resiliencia de las plantas de forma sostenible. A pesar de los beneficios conocidos de estos componentes individuales, los efectos específicos del lixiviado de vermicompost enriquecido con *Trichoderma viride* sobre el crecimiento y las características fisiológicas del tomate requieren una mayor investigación.

Este estudio tuvo como objetivo enriquecer el lixiviado de vermicompost con *Trichoderma viride* y evaluar su impacto en la germinación de semillas y el posterior desarrollo de la planta de tomate, centrándose en parámetros físicos y químicos clave. Nuestra hipótesis fue que el lixiviado de vermicompost enriquecido promovería significativamente el crecimiento y el rendimiento fisiológico del tomate.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

2.1 Identificación de *Trichoderma* aislado de suelos de la Comarca Lagunera

Para la identificación del hongo, se extrajo ADN genómico utilizando el método CTAB (Doyle y Doyle, 1990). Se utilizaron los cebadores universales ITS1 (5'-TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3') e ITS4 (5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3') para abarcar el bloque estructural ITS1-5.8S-ITS2. Los productos de PCR se purificaron utilizando el kit Wizard® Genomic DNA Purification Kit (Promega) y posteriormente se enviaron a McLAB (San Francisco, CA, EE. UU.) para su secuenciación.

Las secuencias obtenidas se compararon mediante BLAST (NCBI) (<http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>) para determinar la identidad taxonómica de la cepa (Jha et al., 2012; Weisburg et al., 1991).

2.2 Preparación del inóculo

El inóculo de *Trichoderma viride* se preparó inicialmente mediante el cultivo del hongo en placas de agar PDA (39 g L⁻¹) en cajas Petri. Tras 5–7 días de incubación a 30 °C para asegurar una esporulación óptima, se adicionaron 10 mL de agua destilada estéril suplementada con Tween 80® al 0.1% sobre la superficie de las colonias con micelio en crecimiento activo. La mezcla se homogeneiza con vortex durante 30 segundos, para de esta manera asegurar la dispersión uniforme de los conidios. Posteriormente, se realizaron diluciones seriales en agua estéril con Tween 80® al 0.1%, hasta alcanzar una dilución apropiada (10⁻³) (Abreo et al., 2025).

La cuantificación y estandarización de los conidios se llevaron a cabo por triplicado mediante microscopía óptica utilizando una cámara de Neubauer de 0.1 mm de profundidad. Se contabilizaron los conidios presentes en los cinco cuadros secundarios del cuadrante central, determinando la concentración madre. Con base en esto, se inoculó el lixiviado de vermicompost previamente esterilizado, ajustando el volumen

para alcanzar una concentración de inoculación de al menos 1×10^6 conidios/mL (Bandara & Kang, 2024). Finalmente se establecieron tres tratamientos: lixiviado de vermicompost inoculado con *Trichoderma viride* (LH), lixiviado de vermicompost sin inoculación fúngica (LS) y un control con agua (SA).

2.3 Efectos sobre el crecimiento del tomate

Las semillas de tomate (*Solanum lycopersicum*) se desinfectaron con una solución de hipoclorito de sodio al 10 % (v/v) durante 5 minutos y se enjuagaron con agua destilada estéril. Posteriormente, las semillas se inocularon durante 1 hora en las suspensiones correspondientes en vasos de precipitados de 50 mL. El diseño experimental fue completamente al azar con tres tratamientos (LH, LS, SA). La unidad experimental consistió en una cavidad individual de la charola de germinación. Se sembraron doce semillas por tratamiento, las cuales correspondieron a 12 repeticiones biológicas independientes, en las charolas que contenían turba estéril y se trasladaron a casas sombra comerciales.

Después de 20 días, las plántulas se cosecharon. Se evaluaron las 12 repeticiones biológicas por tratamiento, analizando un número total de 36 muestras para la longitud de la planta y de la raíz, los pesos fresco y seco, y el contenido total de clorofila determinado de acuerdo con Zhang & Huang, 2013.

Por otro lado, debido a la cantidad de tejido requerida, para la determinación de la concentración de nitrógeno mediante el método Kjeldahl, se seleccionaron 5 repeticiones biológicas por tratamiento, lo que representó un total de 15 muestras analizadas.

2.4 Análisis estadístico

Los diferentes parámetros de desarrollo vegetal (longitud de raíz, número de raíces laterales, peso de raíz y parte aérea) se analizaron bajo un diseño experimental completamente al azar. Se aplicó un análisis estadístico mediante ANOVA seguido de una prueba de comparación de medias de Tukey (HSD) con un nivel de significancia de $P = 0.05$. Los análisis se realizaron utilizando el software Prism versión 8.0.2.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La secuencia de la región ITS obtenida se sometió a un análisis de homología mediante BLAST en la base de datos del NCBI para asignar la taxonomía al hongo. Los resultados mostraron que TD_1 presentó una homología del 97,92 % con *Trichoderma viride* (No. de acceso PQ282598.1).

Tabla 1

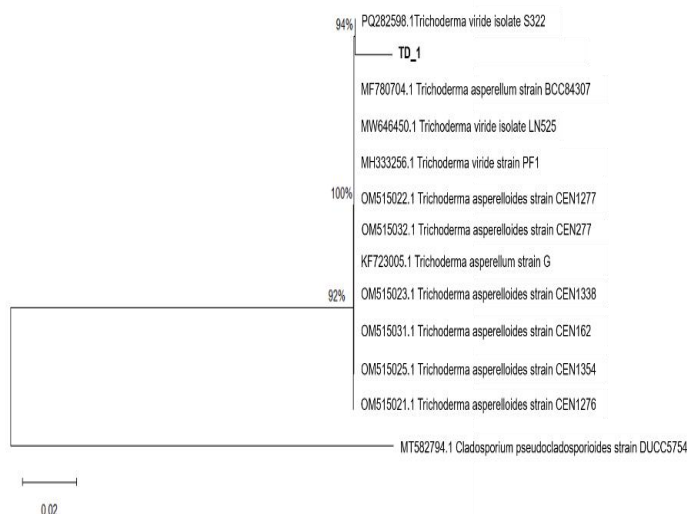
Identificación molecular por región ITS

ID cepa	Aislamiento	Taxon	Identidad	bp	NCBI Acceso
TD_1	suelo	<i>Trichoderma viride</i>	97.92 %	776	PQ282598.1

La secuencia de la región ITS se utilizó para crear el árbol de unión vecinal (Neighbor-Joining Tree). TD_1 se agrupó con *Trichoderma viride* isolate S322 (Figura 1).

Figura 1.

Neighbor-Joining Tree basados en la secuencia parcial ITS. El árbol muestra la relación de la cepa TD_1 con hongos estrechamente relacionados, recuperadas de GenBank. Los valores sobre cada nodo son porcentajes de bootstrap obtenidos a partir de 1000 réplicas.



Se evaluaron también los efectos de la inoculación con la cepa aislada de *Trichoderma viride* sobre el crecimiento y la composición foliar de plántulas de tomate a los 20 días posteriores a la germinación, en comparación con un control sin inocular (Figura 2).

Figura 2

Efecto de la inoculación de *Trichoderma viride* en el crecimiento de plántulas de *Solanum lycopersicum*. Fotografías de plántulas de *Solanum lycopersicum* de 20 días de edad cultivadas en turba estéril a sin hongo (Control). Plantas de *Solanum lycopersicum* cultivadas con b solo lixiviado, c lixiviado con *Trichoderma viride*.



El contenido de clorofila en las plantas de tomate mostró variaciones significativas entre los tratamientos evaluados, mostradas en la figura 3a. El tratamiento con lixiviado con hongo (LH) presentó los valores más altos, con un promedio de 0.7205 $\mu\text{g}/\text{mg}$, mientras que el tratamiento con lixiviado sin hongo (LS) registró un promedio intermedio de 0.6518 $\mu\text{g}/\text{mg}$, mientras que el tratamiento con solo agua (SA) mostró los valores más bajos,

con un promedio de 0.5979 µg/mg. Los resultados obtenidos en este estudio permiten evidenciar de manera consistente el papel benéfico del lixiviado con hongo (LH) en el crecimiento y funcionamiento fisiológico de las plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*). La superioridad del tratamiento LH sobre LS y SA sugiere que la inoculación del hongo en el lixiviado genera una sinergia que promueve procesos fisiológicos clave, como la fotosíntesis, la absorción nutrimental y la acumulación de biomasa.

En primer lugar, el incremento significativo del contenido de clorofila en el tratamiento LH puede atribuirse a la capacidad de los hongos benéficos para modular el metabolismo vegetal a través de la producción de fitohormonas, la mejora de la absorción mineral y la estimulación de rutas de señalización asociadas a la tolerancia al estrés (Contreras-Cornejo et al., 2009). Estudios previos muestran que hongos como *Trichoderma spp.*, y micorrizas arbusculares mejoran la concentración de clorofila mediante la optimización de la disponibilidad de nutrientes esenciales, como nitrógeno, hierro y magnesio, los cuales son componentes estructurales fundamentales del complejo clorofílico (Harman et al., 2004; Roupheal et al., 2015). Por lo tanto, la mayor acumulación de clorofila observada en LH refleja una fisiología foliar más activa y eficiente.

El contenido foliar de nitrógeno presentó el mismo patrón observado en las demás variables. El tratamiento LH registró el mayor promedio con 1.69%, seguido del tratamiento LS con 1.16%. El tratamiento SA presentó los valores más bajos, con un promedio de 1.10% visto en la tabla de la figura 3b.

Los resultados del contenido de nitrógeno refuerzan esta tendencia. El mayor porcentaje en el tratamiento LH indica que la presencia del hongo pudo mejorar la mineralización del nitrógeno orgánico del lixiviado o bien facilitar mecanismos de absorción como la expresión de transportadores de nitratos y amonio (Ahemad & Kibret, 2014). Además, se ha documentado que ciertos hongos incrementan el volumen radical explorado, lo que permite que las plantas capten nitrógeno con mayor eficiencia, incluso en suelos o sustratos con disponibilidad nutrimental limitada (Smith & Read, 2008).

Un aspecto relevante es que el tratamiento LS, si bien mostró valores inferiores a LH, superó sistemáticamente al tratamiento SA. Esto sugiere que el lixiviado, aun sin hongo, aporta ciertos nutrientes y compuestos orgánicos que favorecen el crecimiento vegetal, tal como se ha reportado en el uso de lixiviados de compost y extractos orgánicos (Aziz et al., 2026; Shu et al., 2022). Sin embargo, la brecha entre LS y LH subraya la importancia del componente microbiano, puesto que la biotransformación llevada a cabo por el hongo genera metabolitos y procesos bioquímicos adicionales que potencian los efectos del lixiviado.

Por otro lado, el desempeño del tratamiento con solo agua (SA) destaca la relevancia de los aportes nutrimentales y microbianos para el desarrollo vegetal. Las plantas tratadas únicamente con agua carecieron de nutrientes disponibles y de estimulación microbiana, lo cual limitó tanto el crecimiento como la actividad fisiológica. Este resultado coincide con investigaciones donde tratamientos sin bio-insumos presentan menor biomasa, menor

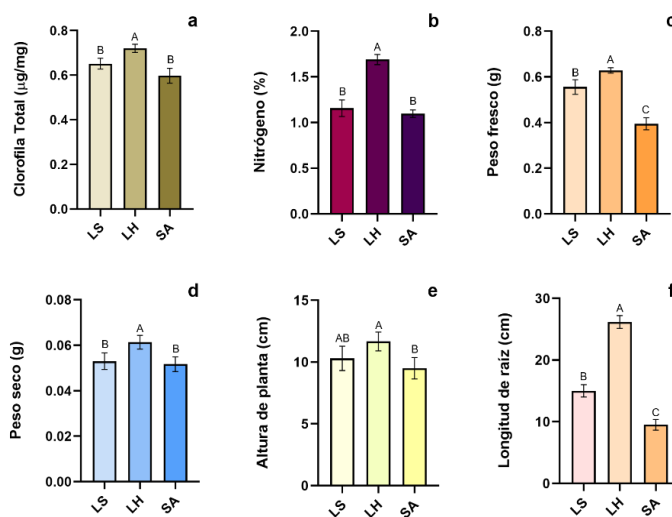
contenido de clorofila y menor capacidad de absorción nutrimental (Berruti et al., 2016).

El peso fresco total de las plantas presentó diferencias notorias entre los tratamientos. Plasmado en la figura 3c, el tratamiento LH obtuvo el valor promedio más alto (0.6283 g), seguido por el tratamiento LS con 0.5557 g. Al final, el tratamiento SA mostró el menor peso fresco, con un promedio de 0.3947 g.

En el peso seco, el tratamiento LH también mostró el valor promedio más elevado (0.0613 g), ligeramente superior al tratamiento LS (0.0530 g) y al tratamiento SA (0.0517 g). Aunque las diferencias entre tratamientos fueron menos acentuadas que en el peso fresco, se mantiene una tendencia consistente en la que LH supera a los demás tratamientos. Estos valores son mostrados en la figura 3d. En cuanto a la biomasa, tanto el peso fresco como el peso seco evidenciaron incrementos en el tratamiento LH. Esto concuerda con investigaciones donde microorganismos promotores del crecimiento vegetal (PGPM, por sus siglas en inglés) mejoran la proliferación radicular, aumentan la capacidad de absorción nutrimental y estimulan la síntesis de compuestos relacionados con el crecimiento, como auxinas, giberelinas y compuestos derivados del metabolismo secundario (Contreras-Cornejo et al., 2015; Vinale et al., 2008). La mayor biomasa fresca podría deberse a una retención hídrica más eficiente o a un sistema radical más robusto, mientras que la biomasa seca incrementada sugiere una mayor acumulación de tejidos estructurales y compuestos orgánicos, lo cual está directamente relacionado con el metabolismo anabólico estimulado por PGPM (Jasim, 2021).

Figura 3

Análisis estadístico del efecto de la inoculación con lixiviado solo (LS), lixiviado con *Trichoderma viride* (LH) y solo agua (SA) sobre a) clorofila total, b) nitrógeno, c) peso fresco, d) peso seco, e) altura de planta y f) longitud de raíz. Los valores representan la media ± desviación estándar. Para el nitrógeno (N), los datos corresponden a 5 plantas por tratamiento; para los demás parámetros (altura de la planta, peso seco, longitud de la raíz, clorofila total), los datos corresponden a 12 plantas por tratamiento. Los valores con la misma letra en cada columna no presentan diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$).



Tras 20 días de evaluación en plantas de tomate, se observaron variaciones notables en el desarrollo vegetativo según el tipo de tratamiento aplicado (LH, LS y SA). El tratamiento LH (Lixiviado con *Trichoderma viride*) promovió el mayor crecimiento radicular, alcanzando una longitud máxima de 27.0 cm y un promedio de 21.5 cm. Este desempeño supera considerablemente al tratamiento LS (Lixiviado solo), que registró un promedio de 15.0 cm. Por su parte, el tratamiento SA (solo agua) presentó el desarrollo más errático y el promedio más bajo de los tres grupos (14.5 cm), lo que sugiere que la adición de *Trichoderma* potencia significativamente la elongación de las raíces en comparación con el uso de lixiviado simple o agua. En cuanto a la altura de la planta, la tendencia de superioridad del tratamiento LH se mantuvo, con un promedio de 11.67 cm. Los tratamientos LS y SA mostraron resultados inferiores, con promedios de 10.5 cm y 9.5 cm respectivamente. Es relevante notar que, mientras en el grupo SA las medidas fueron más uniformes pero bajas, el tratamiento LH no solo incrementó la longitud de la raíz, sino que también se correlacionó con un vigor aéreo superior.

Los resultados obtenidos a los 20 días después del establecimiento mostraron que el tratamiento LH presentó las mayores medias tanto en longitud de raíz (21.5 cm) como en altura de planta (11.7 cm), lo que indica un mejor desarrollo inicial de las plantas de tomate. El crecimiento temprano del sistema radical es un indicador importante del vigor de las plántulas, debido a que una mayor elongación de la raíz favorece la absorción de agua y nutrientes, permitiendo un mejor desarrollo vegetativo durante las etapas iniciales del cultivo. Estudios recientes han señalado que la promoción del crecimiento radical en tomate está directamente relacionada con un incremento en la eficiencia fisiológica y nutricional de las plantas (Cervantes-Vázquez et al., 2021; Vani Obrzut et al., 2021).

Asimismo, diversos autores han reportado que factores biológicos y fisiológicos pueden estimular significativamente el crecimiento de raíces en tomate, favoreciendo el establecimiento temprano del cultivo (Alaguero-Cordovilla et al., 2021). El uso de *Trichoderma spp.*, no solo mejora la arquitectura de la raíz, sino que induce una reprogramación metabólica en la planta que optimiza la captura de nitrógeno y fósforo, elementos presentes en el lixiviado. Esto explica por qué el grupo LH superó en un 43% la longitud radicular del grupo LS; el hongo actúa como un catalizador que permite a la planta aprovechar de manera más eficiente la carga orgánica del lixiviado (Zin & Badaluddin, 2020). En este sentido, la regulación hormonal y la actividad de microorganismos promotores del crecimiento vegetal pueden incrementar la biomasa y la arquitectura radical, repercutiendo positivamente en el crecimiento aéreo de la planta (Azami et al., 2011).

Por otra parte, el tratamiento SA presentó las menores medias tanto en longitud de raíz (14.5 cm) como en altura de planta (9.5 cm), lo que podría indicar una menor estimulación fisiológica durante la etapa inicial de desarrollo. Se ha documentado que condiciones desfavorables o tratamientos con baja capacidad de estimulación pueden limitar el crecimiento vegetativo y radical del

tomate, afectando procesos metabólicos relacionados con la elongación celular y la acumulación de biomasa.

El tratamiento LS mostró valores intermedios en ambas variables evaluadas, con medias de 15.0 cm en raíz y 10.5 cm en altura de planta, lo que sugiere un efecto moderado sobre el crecimiento inicial. Resultados similares han sido reportados en investigaciones donde diferentes bioestimulantes o tratamientos agrícolas generan respuestas variables dependiendo de la disponibilidad de nutrientes, actividad fisiológica y adaptación de las plántulas al ambiente de crecimiento, la interacción raíz-*Trichoderma* modula la expresión de genes relacionados con las giberelinas y citoquininas, lo que se traduce en un mayor desarrollo del tallo y área foliar en plántulas de tomate (Vindas-Reyes et al., 2024).

IV. CONCLUSIONES

En conclusión, el lixiviado de vermicompost enriquecido con *Trichoderma viride* demostró ser una alternativa biotecnológica eficaz para promover el crecimiento y desarrollo fisiológico de las plántulas de tomate, al incrementar significativamente variables como el contenido de clorofila, el porcentaje de nitrógeno foliar, la biomasa fresca y seca, así como la longitud de raíz y la altura de planta. Los resultados obtenidos evidencian que la combinación del lixiviado con el hongo genera un efecto sinérgico capaz de mejorar la absorción y aprovechamiento de nutrientes, estimular procesos metabólicos relacionados con la fotosíntesis y favorecer un mayor vigor vegetal durante las etapas iniciales del cultivo.

Además, el desarrollo radicular observado en el tratamiento inoculado sugiere una mayor capacidad de adaptación y establecimiento de las plantas, lo que podría reflejarse en una mejor productividad bajo condiciones de cultivo. Aunque el lixiviado sin inoculación también presentó efectos benéficos en comparación con el control, la incorporación de *Trichoderma viride* potenció notablemente la respuesta fisiológica de las plantas, resaltando la importancia de los microorganismos promotores del crecimiento vegetal en la agricultura sostenible. En este sentido, el uso de este bioinsumo representa una estrategia viable para disminuir la dependencia de fertilizantes y agroquímicos sintéticos, contribuyendo a la conservación del suelo y al desarrollo de sistemas de producción más sustentables y amigables con el ambiente.

Finalmente, se recomienda continuar con investigaciones en condiciones de campo y durante ciclos completos de producción para evaluar su efecto sobre el rendimiento, la calidad del fruto y la tolerancia de las plantas frente a estrés biótico y abiótico.

V. AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Lerdo por las facilidades otorgadas para la realización de nuestro proyecto de investigación, tanto en el laboratorio para llevar a cabo los análisis como en el área de vermicompostaje para llevar a cabo las pruebas de los sustratos ensayados. Agradecemos profundamente a las autoridades, docentes y personal del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Dgo., por el acceso a sus

instalaciones y equipos, así como por el invaluable apoyo técnico y logístico proporcionado a lo largo de todo el proyecto. Sin su colaboración y disposición, este trabajo no hubiera sido posible. El Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Dgo., ha demostrado ser una institución comprometida con el avance del conocimiento científico y la formación de profesionales capaces de enfrentar los desafíos actuales en el campo de la investigación y desarrollo tecnológico. Estamos profundamente agradecidos por su apoyo y esperamos poder continuar en futuros proyectos.

VI. REFERENCIAS

- Abdenaceur, R., Farida, B., Mourad, D., Rima, H., Zahia, O., & Fatma, S.-H. (2022). Effective biofertilizer *Trichoderma* spp. Isolates with enzymatic activity and metabolites enhancing plant growth. *International Microbiology*, 25(4), 817-829. <https://doi.org/10.1007/s10123-022-00263-8>
- Abreo, E., Gómez Álvarez, M. I., & Gamboa Morillo, H. (2025). *Protocolo para la producción masiva de Trichoderma spp en medio sólido*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). <https://hdl.handle.net/11324/23385>
- Ahemad, M., & Kibret, M. (2014). Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective. *Journal of King Saud University – Science*, 26(1), 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2013.05.001>
- Aktar, W., Sengupta, D., & Chowdhury, A. (2009). Impact of pesticides use in agriculture: Their benefits and hazards. *Interdisciplinary Toxicology*, 2(1), 1-12. <https://doi.org/10.2478/v10102-009-0001-7>
- Alabi, O. D., Arthur, G. D., Coopoosamy, R. M., Naidoo, K. K., Mbanjwa, S. T., & Tshapha, L. P. (2023). Vermicompost Leachate a Viable Bio-stimulant for Tomato Growth and Yield (*Solanum lycopersicum*). *Indian Journal Of Agricultural Research*, (Of). <https://doi.org/10.18805/IJARE.AF-750>
- Alaguero-Cordovilla, A., Sánchez-García, A. B., Ibáñez, S., Albacete, A., Cano, A., Acosta, M., & Pérez-Pérez, J. M. (2021). An auxin-mediated regulatory framework for wound-induced adventitious root formation in tomato shoot explants. *Plant, Cell & Environment*, 44(5), 1642-1662. <https://doi.org/10.1111/pce.14001>
- Arthur, G. D., Aremu, A. O., Kulkarni, M. G., & Staden, J. V. (2012). Vermicompost Leachate Alleviates Deficiency of Phosphorus and Potassium in Tomato Seedlings. *HortScience*, 47(9), 1304-1307. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.47.9.1304>
- Ashour, H. A., Esmail, S. E. A., & El-Attar, A. B. (2023). Effect of different nitrogen forms and bio-treatments on the growth and seed yield of downy safflower (*Carthamus lanatus*). *Advances in Horticultural Science*, 37(2), 185-196. <https://doi.org/10.36253/ahsc-12938>
- Azarmi, R., Hajieghrari, B., & Giglou, A. (2011). Effect of *Trichoderma* isolates on tomato seedling growth response and nutrient uptake. *African Journal of Biotechnology*, 10, 5850-5855. <https://doi.org/10.5897/AJB10.1600>
- Aziz, M. A., Majrashi, M. A., & Husain, A. (2026). Compost Amendments Enhance Crop Productivity and Yield for Sustainable Agriculture: A Global Meta-Analysis. *Processes*, 14(7), 1102. <https://doi.org/10.3390/pr14071102>
- Bandara, A. Y., & Kang, S. (2024). *Trichoderma* application methods differentially affect the tomato growth, rhizomicrobiome, and rhizosphere soil suppressiveness against *Fusarium oxysporum*. *Frontiers in Microbiology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1366690>
- Berruti, A., Lumini, E., Balestrini, R., & Bianciotto, V. (2016). Arbuscular Mycorrhizal Fungi as Natural Biofertilizers: Let's Benefit from Past Successes. *Frontiers in Microbiology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01559>
- Calvo, P., Nelson, L., & Kloepper, J. W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, 383(1), 3-41. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>
- Cervantes-Vázquez, T. J. Á., Valenzuela-García, A. A., Cervantes-Vázquez, M. G., Guzmán-Silos, T. L., Fortiz, E. L., Rangel, P. P., & Rueda-Puente, E. O. (2021). Morphophysiological, Enzymatic, and Elemental Activity in Greenhouse Tomato Saladette Seedlings from the Effect of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria. *Agronomy*, 11(5), 1008. <https://doi.org/10.3390/agronomy11051008>
- Charoenrak, P., Chamswarn, C., Intanoo, W., & Keawprasert, N. (2019). THE EFFECTS OF VERMICOMPOST MIXED WITH TRICHODERMA ASPERELLUM ON THE GROWTH AND PYTHIUM ROOT ROT OF LETTUCES. *GEOMATE Journal*, 17(61), 215-221.
- Chinsamy, M., Kulkarni, M. G., & Staden, J. V. (2014). Vermicompost Leachate Reduces Temperature and Water Stress Effects in Tomato Seedlings. *HortScience*, 49(9), 1183-1187. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.49.9.1183>
- Contreras-Cornejo, H. A., Macías-Rodríguez, L., Cortés-Penagos, C., & López-Bucio, J. (2009). *Trichoderma virens*, a plant beneficial fungus, enhances biomass production and promotes lateral root growth through an auxin-dependent mechanism in Arabidopsis. *Plant Physiology*, 149(3), 1579-1592. <https://doi.org/10.1104/pp.108.130369>

- Contreras-Cornejo, H. A., Macías-Rodríguez, L., Vergara, A. G., & López-Bucio, J. (2015). Trichoderma Modulates Stomatal Aperture and Leaf Transpiration Through an Absciscic Acid-Dependent Mechanism in Arabidopsis. *Journal of Plant Growth Regulation*, 34(2), 425-432. <https://doi.org/10.1007/s00344-014-9471-8>
- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O'Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., ... Zaks, D. P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478(7369), 337-342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>
- Guzmán-Guzmán, P., Etesami, H., & Santoyo, G. (2025). Trichoderma: A multifunctional agent in plant health and microbiome interactions. *BMC Microbiology*, 25(1), 434. <https://doi.org/10.1186/s12866-025-04158-2>
- Harman, G. E., Howell, C. R., Viterbo, A., Chet, I., & Lorito, M. (2004). Trichoderma species—Opportunistic, avirulent plant symbionts. *Nature Reviews. Microbiology*, 2(1), 43-56. <https://doi.org/10.1038/nrmicro797>
- Hasna, M. K., Paul, N. R., Haque, M. M., Bir, Md. S. H., Ali, Md. A., & Chong, K. P. (2025). Biocontrol efficacy of Trichoderma asperellum against fusarium wilt in tomato plants by induction of the host defense genes. *Discover Plants*, 2(1), 136. <https://doi.org/10.1007/s44372-025-00224-1>
- J. J. Doyle and J. L. Doyle, "Isolation of Plant DNA from Fresh Tissue," Focus, Vol. 12, No. 1, 1990, pp. 13-15. - References—Scientific Research Publishing. (s. f.). Recuperado 23 de enero de 2026, de <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=633608>
- Jasim, S. (2021). -Based Products and their Widespread Use in Agriculture. *AACE Clinical Case Reports*, 7(1), 1.
- Jha, B., Gontia, I., & Hartmann, A. (2012). The roots of the halophyte Salicornia brachiata are a source of new halotolerant diazotrophic bacteria with plant growth-promoting potential. *Plant and Soil*, 356(1), 265-277. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0877-9>
- Jiang, X., Lu, C., Hu, R., Shi, W., Zhou, L., Wen, P., Jiang, Y., & Lo, Y. M. (2023). Nutritional and microbiological effects of vermicompost tea in hydroponic cultivation of maple peas (Pisum sativum var. Arvense L.). *Food Science & Nutrition*, 11(6), 3184-3202. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3299>
- Koskey, G., Avio, L., Turrini, A., Sbrana, C., & Bàrberi, P. (2023). Biostimulatory effect of vermicompost extract enhances soil mycorrhizal activity and selectively improves crop productivity. *Plant and Soil*, 484(1), 183-199. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05783-w>
- Loera-Muro, A., Troyo-Diéguez, E., Murillo-Amador, B., Barraza, A., Caamal-Chan, G., Lucero-Vega, G., & Nieto-Garibay, A. (2021). Effects of Vermicompost Leachate versus Inorganic Fertilizer on Morphology and Microbial Traits in the Early Development Growth Stage in Mint (Mentha spicata L.) And Rosemary (Rosmarinus officinalis L.) Plants under Closed Hydroponic System. *Horticulturae*, 7(5). <https://doi.org/10.3390/horticulturae7050100>
- Long, J. (1995). De tomates y jitomates en el siglo XVI. *Estudios de Cultura Náhuatl*, 25, 239-252.
- Martinez, Y., Ribera, J., Schwarze, F. W. M. R., & De France, K. (2023). Biotechnological development of Trichoderma-based formulations for biological control. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 107(18), 5595-5612. <https://doi.org/10.1007/s00253-023-12687-x>
- Metwally, R. A., & Soliman, S. A. (2023). Alleviation of the adverse effects of NaCl stress on tomato seedlings (Solanum lycopersicum L.) by Trichoderma viride through the antioxidative defense system. *Botanical Studies*, 64(1), 4. <https://doi.org/10.1186/s40529-023-00368-x>
- Razifard, H., Ramos, A., Della Valle, A. L., Bodary, C., Goetz, E., Manser, E. J., Li, X., Zhang, L., Visa, S., Tieman, D., van der Knaap, E., & Caicedo, A. L. (2020). Genomic Evidence for Complex Domestication History of the Cultivated Tomato in Latin America. *Molecular Biology and Evolution*, 37(4), 1118-1132. <https://doi.org/10.1093/molbev/msz297>
- Ren, L., Lv, J., Zhang, F., Dou, B., Li, L., Wang, Y., & Zhang, Y. (2025). Integrated fertilization with organic manure and Trichoderma enhances wheat productivity and soil nutrient availability. *Frontiers in Plant Science*, 16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1687216>
- Rouphael, Y., Franken, P., Schneider, C., Schwarz, D., Giovannetti, M., Agnolucci, M., Pascale, S. D., Bonini, P., & Colla, G. (2015). Arbuscular mycorrhizal fungi act as biostimulants in horticultural crops. *Scientia Horticulturae, Biostimulants in Horticulture*, 196, 91-108. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.002>
- Sachdev, S., Singh, A., & Singh, R. P. (2018). Optimization of culture conditions for mass production and bio-formulation of Trichoderma using response surface methodology. *3 Biotech*, 8(8), 360. <https://doi.org/10.1007/s13205-018-1360-6>
- Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S. J., Esker, P., McRoberts, N., & Nelson, A. (2019). The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature*

Ecology & Evolution, 3(3), 430-439.
<https://doi.org/10.1038/s41559-018-0793-y>

Sehim, A. E., Hewedy, O. A., Altammar, K. A., Alhumaidi, M. S., & Abd Elghaffar, R. Y. (2023). Trichoderma asperellum empowers tomato plants and suppresses Fusarium oxysporum through priming responses. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1140378.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1140378>

Shaikh, I. R., Shaikh, P. R., Nomaan, M. H., & Shaikh, R. R. (2025). Soil Contamination by Heavy Metals and Pesticides: A Critical Review of Toxicological Mechanisms, Sustainable Remediation Strategies, and One Health Implications. *International Journal of Plant & Soil Science*, 37(12), 290-317.
<https://doi.org/10.9734/ijpss/2025/v37i125893>

Shu, X., He, J., Zhou, Z., Xia, L., Hu, Y., Zhang, Y., Zhang, Y., Luo, Y., Chu, H., Liu, W., Yuan, S., Gao, X., & Wang, C. (2022). Organic amendments enhance soil microbial diversity, microbial functionality and crop yields: A meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 829, 154627.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154627>

Smith, S. E., & Read, D. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-370526-6.X5001-6>

Vani Obrzut, V., Mógor, Á. F., Mazaro, S. M., Mógor, G., Vani Obrzut, V., Mógor, Á. F., Mazaro, S. M., & Mógor, G. (2021). Initial growth, production in consecutive years and biochemical changes on tomato cultivars in organic system with application of *Bacillus subtilis*. *Idesia (Arica)*, 39(2), 47-55. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292021000200047>

Vinale, F., Sivasithamparam, K., Ghisalberti, E. L., Marra, R., Woo, S. L., & Lorito, M. (2008). *Trichoderma*–plant–pathogen interactions. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(1), 1-10.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.07.002>

Vindas-Reyes, E., Chacón-Cerdas, R., & Rivera-Méndez, W. (2024). Trichoderma Production and Encapsulation Methods for Agricultural Applications. *AgriEngineering*, 6(3), 2366-2384.
<https://doi.org/10.3390/agriengineering6030138>

Weisburg, W. G., Barns, S. M., Pelletier, D. A., & Lane, D. J. (1991). 16S ribosomal DNA amplification for phylogenetic study. *Journal of Bacteriology*, 173(2), 697-703. <https://doi.org/10.1128/jb.173.2.697-703.1991>

Zhang, Z., & Huang, R. (2013). Analysis of Malondialdehyde, Chlorophyll Proline, Soluble Sugar, and Glutathione Content in *Arabidopsis* seedling. *Bio-Protocol*, 3(14). <https://doi.org/10.21769/BioProtoc.817>

Zin, N. A., & Badaluddin, N. A. (2020). Biological functions of *Trichoderma* spp. For agriculture applications. *Annals of Agricultural Sciences*, 65(2), 168-178.
<https://doi.org/10.1016/j.aoas.2020.09.003>

No.	Rol	Descripción
1	Conceptualización [Conceptualization]	Tania Elizabeth Velásquez Chávez
2	Curación de datos [Data curation]	José María Juárez Hernández
3	Análisis formal [Formal analysis]	Alan Joel Servín Prieto
4	Obtención de fondos [Funding acquisition]	Alan Joel Servín Prieto
5	Investigación [Investigation]	Tania Elizabeth Velásquez Chávez, Mónica Hernández López y Alan Joel Servín Prieto
6	Metodología [Methodology]	Tania Elizabeth Velásquez Chávez
7	Administración del proyecto [Project administration]	Tania Elizabeth Velásquez Chávez, Mónica Hernández López y Alan Joel Servín Prieto
8	Recursos [Resources]	Tania Elizabeth Velásquez Chávez
9	Software [Software]	Marcial Humberto Vásquez Corral
10	Supervisión [Supervision]	Mónica Hernández López
11	Validación [Validation]	José María Juárez Hernández
12	Visualización [Visualization]	Marcial Humberto Vásquez Corral
13	Redacción - borrador original [Writing – original draft]	Mónica Hernández López
14	Redacción - revisión y edición [Writing – review & editing]	Tania Elizabeth Velásquez Chávez