

Influencia de bioestimulantes en el desarrollo morfométrico y la diversidad fúngica rizosférica en maíz (*Zea mays* L.) bajo invernadero

Influence of biostimulants on morphometric growth and rhizospheric fungal diversity in maize (*Zea mays* L.) under greenhouse

Carmen Elena Valle-Castillo¹, Maribel Valdez-Morales², Marco Antonio Magallanes-Tapia²,
Fernando Alberto Valenzuela-Escoboza¹, Ángel Rosario Ceballos-Chávez³, Blanca Elvira López-Valenzuela^{1*}

¹ Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Agricultura del Valle del Fuerte, CP. 81110. Juan José Ríos, Sinaloa, México. contacto@favf.mx; ORCID: 0000-0002-4864-8215; ORCID: 0000-0001-6203-1695; blancaelopezvzla@favf.mx, ORCID: 0000-0001-6383-6145

² CIIDIR-Unidad Sinaloa, Instituto Politécnico Nacional, CP. 81100, Guasave, Sinaloa, México. ORCID: 0000-0002-6812-5905, ORCID: 0000-0001-6340-1133

³ Universidad Tecnológica de la Tarahumara, CP. 33180, Guachochi, Chihuahua, México. ORCID: 0000-0002-8332-0389

*Autor de correspondencia

Resumen

Palabras clave:

Bioestimulantes;
maíz; sustentabilidad.

El maíz (*Zea mays* L.) es un cultivo de importancia global, especialmente en México, donde enfrenta desafíos como el cambio climático, la degradación del suelo y enfermedades fitopatógenas. Este estudio evaluó el efecto de bioestimulantes (*Trichoderma* spp., quitosano y lixiviado de humus) sobre el desarrollo morfométrico y la diversidad fúngica rizosférica en plantas de maíz cultivadas en invernadero. El experimento se diseñó bajo un esquema completamente al azar con nueve tratamientos y nueve repeticiones, que se llevó a cabo durante los ciclos otoño-invierno 2023-2024 y primavera-verano 2024. Los resultados mostraron que la aplicación combinada de bioestimulantes promovió un mayor crecimiento vegetal, aumentó la biomasa y el volumen radicular, y redujo la presencia de hongos patógenos asociados a enfermedades, lo que sugiere que esta estrategia puede mejorar la productividad del maíz en condiciones adversas.

Abstract

Keywords:

Biostimulants; maize;
sustainability.

Maize (*Zea mays* L.) is a globally important crop, particularly in Mexico, where it faces challenges such as climate change, soil degradation, and phytopathogenic diseases. This study evaluated the effect of biostimulants (*Trichoderma* spp., chitosan, and humus leachate) on morphometric growth and rhizosphere fungal diversity in maize plants grown under greenhouse conditions. The experiment was arranged in a completely randomized design with nine treatments and nine replicates and was conducted during the autumn–winter 2023–2024 and spring–summer 2024 seasons. Results showed that the combined application of biostimulants promoted greater plant growth, increased biomass and root volume, and reduced the presence of pathogenic fungi associated with diseases, suggesting that this strategy may enhance maize productivity under adverse conditions.

Recibido: 27 de octubre de 2025

Aceptado: 10 de marzo de 2026

Publicado: 23 de septiembre de 2026

Cómo citar: Valle-Castillo, C. E.; Valdez- Morales, M.; Magallanes-Tapia, M. A.; Valenzuela-Escoboza, F. A.; Ceballos-Chávez, Á. R., & López-Valenzuela, B. E. (2026). Influencia de bioestimulantes en el desarrollo morfométrico y la diversidad fúngica rizosférica en maíz (*Zea mays* L.) bajo invernadero. *Acta Universitaria*, 36(NE-1), e4903. doi: <https://doi.org/10.15174/au.2026.4903>

Introducción

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos más relevantes a nivel mundial debido a su versatilidad, pues es utilizado en la alimentación humana (por ejemplo, tortillas, cereales y harinas), en la alimentación animal (forraje) y en aplicaciones industriales y energéticas (etanol, bioplásticos y adhesivos), entre otros. Además, la producción mundial de cereales depende en gran medida del maíz, el cual ha contribuido de manera significativa al incremento de la producción cerealera global en los últimos años. Actualmente, este cultivo se establece en más de 200 millones de hectáreas, con una producción superior a las 1200 millones de toneladas y un rendimiento promedio cercano a 6 ton ha⁻¹ (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2023).

En México, el estado de Sinaloa se posiciona como el principal productor agrícola, aportando alrededor del 26% del volumen total de la producción nacional, lo que lo convierte en un pilar estratégico tanto para el abastecimiento interno como para la exportación. No obstante, esta relevancia productiva enfrenta desafíos crecientes derivados del cambio climático, como el aumento en la frecuencia de eventos extremos y la degradación del suelo, así como la incidencia de enfermedades ocasionadas por fitopatógenos capaces de provocar pérdidas totales en los cultivos (Cruz-González *et al.*, 2024). Ante este panorama, resulta imperativo desarrollar e implementar estrategias sostenibles que fortalezcan los sistemas agrícolas.

Por su parte, los bioestimulantes se definen como sustancias o microorganismos que son aplicados a las plantas o al suelo para estimular procesos naturales, mejorando la eficiencia en la absorción y el uso de nutrientes, la tolerancia al estrés abiótico y la calidad de los cultivos. Su uso se presenta como una alternativa prometedora, ya que no solo favorecen la absorción de nutrientes y el desarrollo radicular, sino que también potencian los mecanismos naturales de defensa de las plantas frente a estrés biótico y abiótico (Ma *et al.*, 2022).

La caracterización de la comunidad fúngica asociada a las raíces constituye una herramienta clave para comprender los efectos indirectos de los bioestimulantes sobre la sanidad del cultivo. La rizosfera del maíz es un entorno altamente dinámico donde coexisten hongos beneficiosos que promueven el crecimiento y la absorción de nutrientes, así como hongos fitopatógenos responsables de importantes pérdidas económicas (Compant *et al.*, 2019). Sin embargo, existe información limitada sobre cómo los bioestimulantes —especialmente aquellos basados en *Trichoderma*, quitosano y lixiviados orgánicos— influyen en la estructura de la comunidad fúngica rizosférica bajo condiciones controladas de invernadero. Comprender estas interacciones es fundamental para diseñar estrategias de manejo más sostenibles que mejoren la sanidad y el desarrollo del cultivo.

En este contexto, el objetivo del presente estudio fue evaluar la influencia de bioestimulantes sobre el desarrollo morfométrico y la diversidad fúngica rizosférica de plantas de maíz cultivadas en invernadero, con el fin de contribuir a la sostenibilidad y competitividad del sector agrícola en Sinaloa.

Materiales y métodos

Sitio de trabajo

El experimento se llevó a cabo en un invernadero cubierto con material de poliéster, destinado a la producción de plantas, ubicado en Guasave, Sinaloa (25.59128° N, 108.48585° O), durante los ciclos otoño-invierno 2023-2024 (noviembre a febrero) y primavera-verano 2024 (marzo a junio), con una duración de 90 días por ciclo.

La estructura contaba con ventilación natural mediante ventanas laterales que facilitaban la circulación del aire. Las condiciones microclimáticas estuvieron determinadas por los factores ambientales externos de la región.

Material vegetal y sistema de siembra

Se utilizaron semillas de maíz del híbrido DK-4050, sembradas a una profundidad de 3 cm en macetas de polietileno negro de 6 x 20 cm. El sustrato consistió en una mezcla de suelo aluvial, peat-moss y arena, en proporción 2:1:1, con un pH de 6.1. Las plantas se cultivaron en este sustrato sin esterilización previa, con el fin de mantener condiciones similares a las empleadas habitualmente en la producción agrícola. Las dosis de los bioestimulantes se aplicaron de acuerdo con las recomendaciones del fabricante (Tabla 1).

Diseño experimental

Se empleó un diseño completamente al azar con nueve tratamientos y nueve repeticiones, para un total de 81 unidades experimentales, incluyendo un testigo absoluto (agua) y un testigo con fertilización nitrogenada (urea). Cada unidad experimental consistió en una planta de maíz cultivada en una maceta individual. Los tratamientos se aplicaron semanalmente por vía radicular, depositando la solución directamente sobre el sustrato de cada maceta durante los 90 días de duración del experimento. El requerimiento hídrico se cubrió tres veces por semana mediante la aplicación de 150 ml de agua potable por maceta.

Tabla 1. Descripción de tratamientos.

Tratamiento	Descripción
1	3.9×10^8 esporas ml^{-1}
2	250 μl de Quitosano 7.6% (RSCO-NEMA-0903Q-X0010-052-7.6)
3	250 μl de Humus orgánico líquido BIOJAL
4	3.9×10^8 esporas de <i>Trichoderma</i> + 250 μl de Quitosano 7.6% + 250 μl de Humus orgánico líquido BIOJAL
5	3.9×10^8 esporas + 250 μl de Quitosano 7.6%
6	250 μl de Quitosano 7.6% + 250 μl de Humus orgánico líquido BIOJAL
7	3.9×10^8 esporas + 250 μl de Humus orgánico líquido BIOJAL
Agua	150 ml de agua potable
Urea	0.2 g de urea (CAS 57-13-6)

Nota. 1 = *Trichoderma*, 2 = Quitosano, 3 = Lixiviado, 4 = *Trichoderma*+Quitosano+Lixiviado, 5 = *Trichoderma*+Quitosano, 6 = Quitosano+Lixiviado, 7 = *Trichoderma*+Lixiviado.

Fuente: Elaboración propia.

Variables evaluadas

Diámetro y elongación del tallo (EloT)

La evaluación morfológica de las plantas se realizó semanalmente, registrando el diámetro del tallo (cm) mediante un vernier digital (Husky®) y la altura total o elongación del tallo (cm) con una cinta métrica. Las mediciones se efectuaron desde la base del tallo hasta el ápice de la planta, procurando mantener condiciones de iluminación y posición constantes para reducir el error experimental.

Volumen radicular (VolR)

Para la determinación del volumen radicular, las raíces fueron cuidadosamente extraídas y lavadas con agua corriente hasta eliminar completamente el sustrato. Posteriormente, se colocaron sobre papel absorbente para retirar el exceso de humedad superficial. El VolR (ml) se determinó por el método de desplazamiento de líquido, sumergiendo el sistema radicular en una probeta aforada con un volumen conocido de agua y registrando el incremento del nivel del líquido.

Peso seco total (PSF)

El peso seco total se determinó inicialmente registrando el peso fresco del follaje (g) con una balanza digital de precisión (METTLER TOLEDO®). Luego, las muestras se introdujeron en bolsas de papel previamente etiquetadas y se colocaron en un horno de convección forzada (BINDER-FD®) a 70 °C durante 72 h, hasta alcanzar peso constante. Finalmente, se registró el PSF (g) para cada tratamiento.

Caracterización de la diversidad fúngica rizosférica

Se tomaron muestras de raíces de cada tratamiento. Las raíces de maíz se lavaron inicialmente con agua destilada estéril y se cortaron en fragmentos de 1 cm. Posteriormente, se desinfectaron con hipoclorito de sodio al 0.1% y se enjuagaron tres veces con agua destilada estéril, utilizando recipientes estériles durante todo el proceso. Las raíces se colocaron sobre papel secante estéril hasta su completo secado.

Los fragmentos de raíz se sembraron en medio de cultivo específico (PDA) y se incubaron a temperatura ambiente durante 2 d a 7 d. Los diferentes morfotipos de los microorganismos se clasificaron según características macroscópicas como color, forma, textura y tipo de crecimiento (Sánchez-Bautista *et al.*, 2017).

Análisis estadístico

Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) y a una comparación de medias por Tukey ($p \leq 0.05$), utilizando el programa Statistical Analysis System (SAS®) versión 9.1 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

Resultados y discusión

Durante el ciclo otoño-invierno, los tratamientos 4, 5 y el testigo con urea registraron las mayores alturas de planta ($p \leq 0.05$), lo que evidencia un efecto positivo de la combinación de bioestimulantes, comparable al observado con la fuente nitrogenada. En cuanto a la elongación del tallo (EloT), el tratamiento *Trichoderma* + lixiviado (7) presentó el valor más alto, lo que sugiere una posible interacción sinérgica entre los bioestimulantes. Para el diámetro del tallo, los tratamientos 4, 5 y 7 mostraron los mayores valores, indicando una mayor robustez estructural asociada al uso de *Trichoderma* (Csótó et al., 2024). Respecto al volumen radicular (VolR), el tratamiento 7 y el testigo con urea registraron los valores más altos. Finalmente, el peso seco foliar (PSF) fue mayor en el tratamiento 4, correspondiente a la combinación de los tres bioestimulantes evaluados (Tabla 2).

Tabla 2. Valores de variables morfológicas en plantas de maíz (*Zea mays* L.) tratadas con diferentes bioestimulantes en condiciones de invernadero (otoño-invierno 2023-2024).

Tratamientos	AltP (cm)	EloT (cm)	DiaT (cm)	VolR (mL)	PSF (g)
1	79.8±4.41 ^{cd}	29.81±2.35 ^{cd}	0.98±0.1 ^{ab}	20.5±1.52 ^{cd}	2.32±0.11 ^d
2	86.4±3.89 ^{ab}	31.54±2.8 ^b	0.97±0.13 ^{ab}	37.2±2.72 ^a	2.72±0.08 ^{ab}
3	83.1±6.42 ^{ab}	30.15±1.64 ^{bc}	0.92±0.11 ^b	23.1±1.37 ^{bc}	2.9±0.14 ^{ab}
4	91.2±5.91 ^a	31.87±1.12 ^b	1.24±0.15 ^a	25±2.1 ^{bc}	3.1±0.06 ^a
5	89.5±4.64 ^a	31.09±2.74 ^b	1.11±0.19 ^a	29.8±1.73 ^b	2.89±0.09 ^{ab}
6	82.5±5.35 ^c	30.21±2.32 ^{bc}	0.92±0.17 ^b	17.5±1.39 ^d	2.43±0.07 ^{cd}
7	86.1±4.53 ^{ab}	39.98±3.2 ^a	1.11±0.13 ^a	35.6±2.83 ^a	2.65±0.04 ^b
Agua	76.1±3.93 ^d	29.52±1.93 ^{cd}	0.82±0.15 ^c	23.1±1.92 ^{bc}	2.61±0.1 ^b
Urea	90.4±5.14 ^a	30.11±2.53 ^b	0.99±0.17 ^{ab}	34.7±2.33 ^a	2.84±0.08 ^{ab}

Nota. 1 = *Trichoderma*, 2 = Quitosano, 3 = Lixiviado, 4 = *Trichoderma*+Quitosano+Lixiviado, 5 = *Trichoderma*+Quitosano, 6 = Quitosano+Lixiviado, 7 = *Trichoderma*+Lixiviado, AltP = Altura de planta, EloT = Elongación del tallo, DiaT = Diámetro del tallo, VolR = Volumen de raíz, PSF = Peso seco foliar. Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$).
Fuente: Elaboración propia.

Al analizar los efectos de los tratamientos sobre las características de crecimiento de las plantas durante el ciclo primavera-verano, se observó que la altura de planta (AltP) fue mayor en los tratamientos 4, 5 y 6. En cuanto a la elongación del tallo (EloT), el valor máximo se registró en el tratamiento 5, seguido por los tratamientos 2, 3 y 7, lo que confirma la eficacia del tratamiento 5 para promover el crecimiento longitudinal del tallo. Para el diámetro del tallo (DiaT), los tratamientos 4 y 5 presentaron los valores más altos. Respecto al volumen radicular (VolR), este fue significativamente mayor en los tratamientos 5, 6 y el testigo con urea, sin diferencias significativas entre ellos ($p \leq 0.05$). Finalmente, el peso seco foliar (PSF) fue superior en los tratamientos 7 y urea, lo que indica un efecto positivo en la acumulación de biomasa aérea (Tabla 3).

Tabla 3. Valores de variables morfológicas en plantas de maíz (*Zea mays* L.) tratadas con diferentes bioestimulantes en condiciones de invernadero en primavera-verano 2024.

Tratamientos	AltP (cm)	EloT (cm)	DiaT (cm)	VolR (mL)	PSF (g)
1	62.9±7.12 ^{ab}	7.25±1 ^c	0.73±0.01 ^{ab}	13.0±1.2 ^b	0.56±0.03 ^c
2	58.6±6.6 ^b	9.17±1.35 ^{ab}	0.65±0.03 ^{bc}	10.7±1.4 ^b	0.85±0.06 ^{ab}
3	47.4±4.72 ^{bc}	9.11±1.18 ^{ab}	0.66±0.01 ^b	12.9±0.93 ^b	0.84±0.04 ^{ab}
4	68.3±4.78 ^a	7.83±1.02 ^c	0.75±0.02 ^a	11.0±1.12 ^b	0.72±0.02 ^b
5	69.6±4.5 ^a	9.43±0.92 ^a	0.76±0.01 ^a	16.7±1.18 ^a	0.86±0.08 ^{ab}
6	67.4±4.31 ^a	8.86±1.49 ^b	0.70±0.03 ^{ab}	15.0±1.17 ^a	0.83±0.05 ^{ab}
7	56.6±4.94 ^b	9.13±1.08 ^{ab}	0.66±0.01 ^b	11.3±0.91 ^b	0.94±0.08 ^a
Agua	44.4±3.41 ^{bc}	7.51±1.21 ^c	0.59±0.02 ^c	7.5±0.43 ^c	0.39±0.03 ^c
Urea	59.3±5.55 ^b	8.97±1.03 ^b	0.71±0.02 ^{ab}	15.0±0.76 ^a	1.0±0.06 ^a

Nota. 1 = *Trichoderma*, 2 = Quitosano, 3 = Lixiviado, 4 = *Trichoderma*+Quitosano+Lixiviado, 5 = *Trichoderma*+Quitosano, 6 = Quitosano+Lixiviado, 7 = *Trichoderma*+Lixiviado, AltP = Altura de planta, EloT = Elongación del tallo, DiaT = Diámetro del tallo, VolR = Volumen de raíz, PSF = Peso seco foliar. Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$).
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 1 y Figura 2 se observa el volumen radicular de las raíces bajo invernadero en ambos ciclos estudiados.

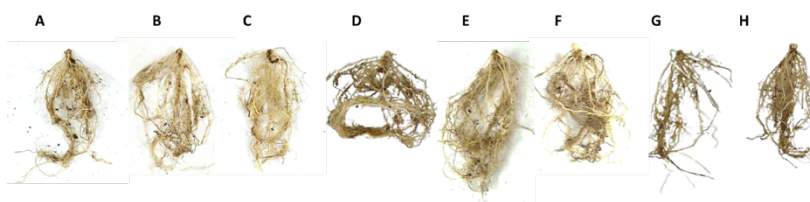


Figura 1. Volumen radicular en plantas de maíz expuestas a bioestimulantes durante otoño-invierno 2024-2025. A) *Trichoderma*, B) Quitosano, C) Lixiviado D) *Trichoderma* + Quitosano, E) *Trichoderma* + Lixiviado, F) *Trichoderma* + Quitosano + Lixiviado, G) Agua, H) Urea.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 2. Volumen radicular en plantas de maíz expuestas a bioestimulantes durante primavera-verano 2024. A) *Trichoderma*, B) Quitosano, C) Lixiviado, D) *Trichoderma* + Quitosano, E) *Trichoderma* + Lixiviado, F) *Trichoderma* + Quitosano + Lixiviado, G) Agua, H) Urea.
Fuente: Elaboración propia.

En conjunto, los resultados obtenidos en ambos ciclos agrícolas muestran que los tratamientos con bioestimulantes —particularmente las combinaciones de *Trichoderma* y quitosano, así como su integración con lixiviado de humus— favorecieron el crecimiento y desarrollo del maíz, lo cual se reflejó en mayores valores de altura de planta (AltP), diámetro del tallo (DiaT) y volumen radicular (VolR). Durante el ciclo otoño-invierno, las mezclas ternarias tendieron a presentar mayores valores de biomasa aérea, mientras que en primavera-verano —bajo condiciones de mayor temperatura y radiación—, los tratamientos simples y binarios mantuvieron respuestas positivas en las variables morfológicas evaluadas. En este sentido, los resultados sugieren el potencial de los bioestimulantes microbianos y orgánicos como alternativas sostenibles para mejorar el desempeño fisiológico y estructural del maíz, aportando evidencia útil para su manejo agronómico en diferentes condiciones estacionales.

Los efectos observados en los tratamientos que incluyeron *Trichoderma* y quitosano podrían estar relacionados con sus mecanismos fisiológicos de acción. *Trichoderma* spp. actúa como promotor del crecimiento vegetal al estimular la producción de fitohormonas, como auxinas y giberelinas, además de mejorar la disponibilidad de nutrientes mediante la solubilización de fósforo y la estimulación del desarrollo radicular (Woo *et al.*, 2023). Por su parte, el quitosano funciona como un elicitor que activa respuestas de defensa y favorece la síntesis de compuestos asociados al crecimiento y a la tolerancia al estrés. La combinación de ambos bioestimulantes podría generar un efecto sinérgico que estimule tanto la expansión del sistema radical como la acumulación de biomasa aérea, lo cual coincide con los mayores valores registrados en variables como AltP, DiaT y VolR.

En la caracterización de la comunidad fúngica asociada a las raíces de maíz durante el ciclo O-I, se identificaron hongos pertenecientes a los géneros *Fusarium*, *Curvularia* y *Penicillium* (Figura 3). La frecuencia de estos géneros varió según el tipo de bioestimulante aplicado, lo que refleja un efecto modulador sobre la microbiota rizosférica. El género *Fusarium* fue el más frecuente en todos los tratamientos, confirmando su papel como componente dominante y persistente de la rizosfera del maíz (Leslie & Summerell, 2020). En contraste, *Curvularia* y *Penicillium* se detectaron con menor frecuencia, principalmente en tratamientos con quitosano y lixiviado.

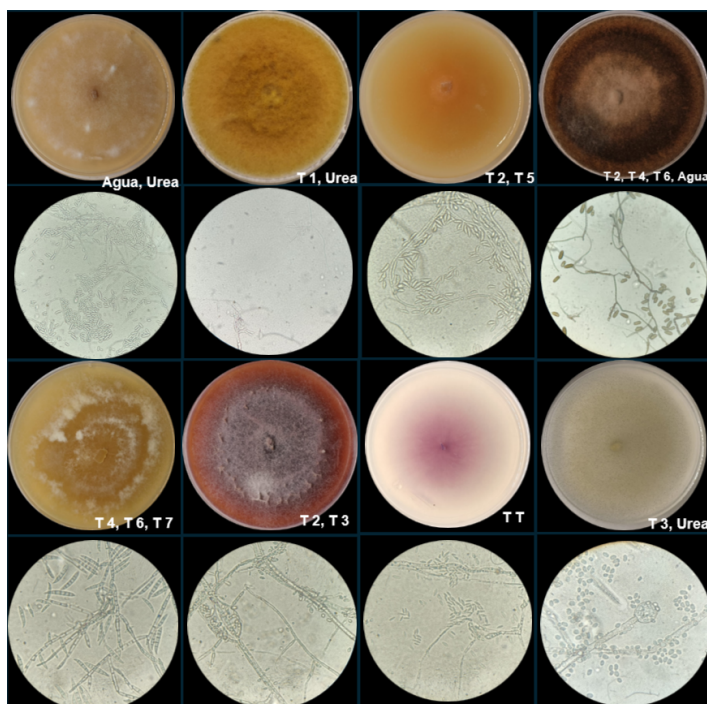


Figura 3. Caracterización cultural y morfológica fúngica en el ciclo O-I 2023-2024.

Nota. T1 = *Trichoderma*, T2 = Quitosano, T3 = Lixiviado, T4 = *Trichoderma*+Quitosano+Lixiviado, T5 = *Trichoderma*+Quitosano, T6 = Quitosano+Lixiviado, T7 = *Trichoderma*+Lixiviado, TT = Todos los tratamientos.

Fuente: Elaboración propia.

El bioestimulante a base de *Trichoderma* mostró únicamente la presencia de *Fusarium*, lo que sugiere un posible efecto competitivo que redujo la diversidad fúngica (Woo *et al.*, 2023). Por su parte, el tratamiento con quitosano promovió una mayor diversidad, mientras que el lixiviado favoreció la presencia de hongos saprobios, posiblemente por el aporte de compuestos orgánicos disponibles (Bernal *et al.*, 2009).

En conjunto, los resultados evidencian que los bioestimulantes pueden influir de manera selectiva en la estructura de la comunidad fúngica rizosférica, modificando la abundancia relativa de géneros con relevancia fitosanitaria y contribuyendo potencialmente al equilibrio microbiológico y la sanidad radicular del cultivo (Compant *et al.*, 2019).

Durante el ciclo P-V, se identificó una mayor diversidad fúngica en la rizosfera de *Zea mays* L., con presencia de los géneros *Alternaria*, *Fusarium*, *Cladosporium*, *Penicillium*, *Curvularia* y *Rhizopus* (Figura 4). Esta variación sugiere que las condiciones del ciclo y los bioestimulantes aplicados influyeron en la estructura microbiana del suelo.

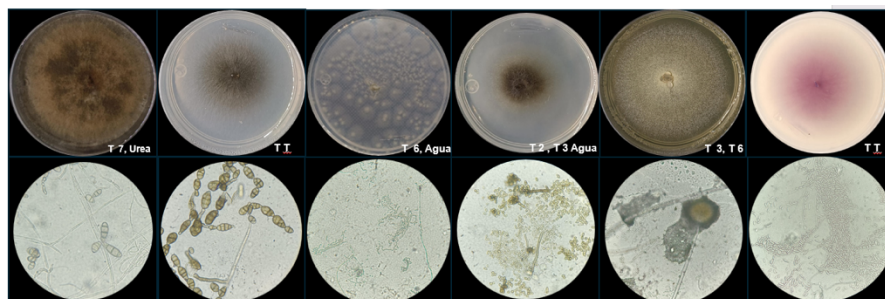


Figura 4. Caracterización cultural y morfológica fúngica en el ciclo P-V 2024.

Nota. T1 = *Trichoderma*, T2 = Quitosano, T3 = Lixiviado, T4 = *Trichoderma*+Quitosano+Lixiviado, T5 = *Trichoderma*+Quitosano, T6 = Quitosano+Lixiviado, T7 = *Trichoderma*+Lixiviado, TT = Todos los tratamientos.

Fuente: Elaboración propia.

Fusarium y *Alternaria* fueron los géneros más frecuentes, reflejando su capacidad de adaptación y persistencia en suelos agrícolas (Nikitin *et al.*, 2023). En los tratamientos con *Trichoderma*, predominó la combinación *Alternaria*–*Fusarium*, indicando posible exclusión competitiva y reducción de diversidad (Woo *et al.*, 2023). El quitosano y el lixiviado promovieron comunidades más diversas, destacando la aparición de *Cladosporium*, *Penicillium* y *Rhizopus*, géneros asociados a ambientes con mayor disponibilidad de materia orgánica (Bernal *et al.*, 2009).

En conjunto, los resultados evidencian que los bioestimulantes modifican selectivamente la composición fúngica rizosférica, promoviendo o restringiendo ciertos géneros, lo que podría influir en la dinámica microbiológica del cultivo de maíz (Compant *et al.*, 2019).

Conclusiones

La combinación de *Trichoderma* y quitosano mostró el mayor efecto positivo en el crecimiento del maíz, favoreciendo variables como la AltP, el diámetro del tallo y el desarrollo radicular, en comparación con otros tratamientos. Asimismo, la aplicación de bioestimulantes se asoció con variaciones en los géneros fúngicos identificados en la rizosfera del cultivo. En conjunto, los resultados sugieren que el uso de estos bioestimulantes puede contribuir al desarrollo del maíz y representar una alternativa sostenible para mejorar su desempeño agronómico en condiciones adversas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) y a las estudiantes Yeraldin Denis Luque Luque y Michelle de Jesús Rivera Chávez por su valiosa colaboración durante la fase experimental de este proyecto.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

Referencias

- Bernal, M. P., Albuquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment: a review. *Bioresource Technology*, 100(22), 5444-5453. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027>
- Compant, S., Samad, A., Faist, H., & Sessitsch, A. (2019). A review on the plant microbiome: ecology, functions, and emerging trends in microbial application. *Journal of Advanced Research*, 19, 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2019.03.004>
- Cruz-González, A., Arteaga-Ramírez, R., Sánchez-Cohen, I., Soria-Ruiz, J., & Monterroso-Rivas, A. I. (2024). Impactos del cambio climático en la producción de maíz en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15(1), e3327. <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i1.3327>
- Csótó, A., Tóth, G., Riczu, P., Zabiák, A., Tarjányi, V., Fekete, E., Karaffa, L., & Sándor, E. (2024). Foliar spraying with endophytic *Trichoderma* biostimulant increases drought resilience of maize and sunflower. *Agriculture*, 14(12), 2360. <https://doi.org/10.3390/agriculture14122360>
- Leslie, J. F., & Summerell, B. A. (2020). *The fusarium laboratory manual* (2a ed.). Wiley-Blackwell.
- Ma, Y., Freitas, H., & Dias, M. C. (2022). Strategies and prospects for biostimulants to alleviate abiotic stress in plants. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1024243. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1024243>
- Nikitin, D. A., Ivanova, E. A., Semenov, M. V., Zhelezova, A. D., Ksenofontova, N. A., Tkachakhova, A. K., & Kholodov, V. A. (2023). Diversity, ecological characteristics and identification of some problematic phytopathogenic *Fusarium* in soil: a review. *Diversity*, 15(1), 49. <https://doi.org/10.3390/d15010049>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2023). *Agricultural production statistics 2010-2023*. <https://www.fao.org/statistics/highlights-archive/highlights-detail/agricultural-production-statistics-2010-2023/en>
- Sánchez-Bautista, A., De León-García, C., Aranda-Ocampo, S., Zavaleta-Mejía, E., Nava-Díaz, C., Goodwin, P. H., & Leyva-Mir, S. G. (2017). Bacterias endófitas de la raíz en líneas de maíces tolerantes y susceptibles a sequía. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 36(1), 35-55. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1710-3>
- Woo, S. L., Hermosa, R., Lorito, M., & Monte, E. (2023). *Trichoderma*: a multipurpose, plant-beneficial microorganism for eco-sustainable agriculture. *Nature Reviews Microbiology*, 21, 312-326. <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00819-5>