



Abanico Microbiano. Enero-Diciembre 2025; 1:1-23. <https://doi.org/10.21929/abanicomicrobiano/2025.1>

Artículo Original. Recibido: 06/01/2025. Aceptado: 27/05/2025. Publicado: 02/06/2025. Clave: 2025-1.

<https://www.youtube.com/watch?v=RburpuJrCng>

## Consortio tripartito de hongo-levadura-bacteria mejora el desempeño agronómico en el crecimiento temprano del maíz

Tripartite fungus-yeast-bacteria consortium improves agronomic performance in early maize growth



Zelaya-Molina Lily<sup>1ID</sup>, Chávez-Díaz Ismael\*<sup>1ID</sup>, Reynoso-Santos Roberto<sup>2ID</sup>,  
Gayosso-Barragán Odilón<sup>3ID</sup>, Chávez-Aguilar Griselda<sup>3ID</sup>, Bautista-Ramírez  
Edgardo<sup>4ID</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Recursos Genéticos. Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. <sup>2</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Centro de Chiapas. Ocozocoautla, Chiapas, México. <sup>3</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria Agricultura Familiar. Ojuelos, Jalisco, México. <sup>4</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. E-mail: zelaya.lily@inifap.gob.mx, reynoso.roberto@inifap.gob.mx, gayosso.odilon@inifap.gob.mx, chavez.griselda@inifap.gob.mx, bautista.edgardo@inifap.gob.mx. \*Correspondence autor: refzaid@gmail.com

### RESUMEN

La formulación y evaluación de consorcios microbianos representa un reto clave para el desarrollo de tecnologías agrícolas sostenibles. Este estudio evaluó la capacidad de consorcios microbianos para promover el crecimiento de maíz en etapas tempranas mediante una metodología *in vitro* rápida y eficiente. Se compararon cuatro métodos de germinación para identificar el más adecuado para evaluar el efecto de microorganismos fúngicos. Se evaluó la compatibilidad de las cepas fúngicas con bacterias y levaduras previamente aisladas para conformar consorcios por compatibilidad. Mediante el método seleccionado se evaluó la eficacia de los consorcios y se caracterizaron los mecanismos de acción del consorcio sobresaliente. El sistema de germinación en rollos de papel fue ideal para estudios de promoción de crecimiento vegetal (PCV) con hongos al obtener plántulas manipulables con arquitectura similar a las germinadas en condiciones naturales. Se obtuvieron trece consorcios de las combinaciones compatibles. El consorcio tripartito: *Aureobasidium* sp. VFRB, *Clavispora* sp. Y35 y *Pantoea* sp. CanP2-19b mejoró significativamente la tasa de germinación, la arquitectura de las plantas y la acumulación de biomasa. A nivel funcional, el hongo mostró capacidad para movilizar nutrientes y producir sideróforos; la levadura una alta producción de indoles, y la bacteria habilidad para solubilizar fósforo y potasio. Estos hallazgos respaldan el potencial agrobiotecnológico del consorcio para su integración en tecnologías orientadas a optimizar el establecimiento del cultivo de maíz. Asimismo, el estudio destaca la utilidad de los ensayos de germinación como herramientas clave en la bioprospección de microorganismos PCV, aportando información relevante para el desarrollo de prácticas agrícolas sostenibles.

**Palabras clave:** Diseño de consorcios, pruebas de compatibilidad, pruebas de germinación, levaduras promotoras de crecimiento vegetal, arquitectura vegetal.



## ABSTRACT

The formulation and evaluation of microbial consortia remain key challenges in developing sustainable agricultural technologies. This study assessed the potential of microbial consortia to promote early-stage maize growth using a rapid and efficient *in vitro* approach. Four germination methods were compared to identify the most suitable for evaluating fungal effects. The compatibility of fungal strains with previously isolated bacteria and yeasts was analyzed to formulate consortia based on mutual compatibility. The selected method was used to evaluate consortium efficacy, and the functional mechanisms of the most effective combination were characterized. The between-paper germination system proved optimal for plant growth promotion (PGP) studies with fungi, as it produced handleable seedlings displaying architecture closely resembling field-grown plants. Thirteen treatments were developed from compatible strain combinations. Among them, the tripartite consortium composed of *Aureobasidium* sp. VFRB, *Clavispora* sp. Y35, and *Pantoea* sp. CanP2-19b significantly enhanced germination rates, seedling architecture, and biomass accumulation. Functionally, the fungus mobilized nutrients and produced siderophores; the yeast exhibited high indole production; and the bacterium effectively solubilized phosphorus and potassium. These results highlight the agrobiotechnological potential of this consortium for use in technologies that improve maize establishment. Additionally, the study underscores the value of germination assays as essential tools in the bioprospecting of plant growth-promoting microorganisms, contributing to the advancement of sustainable agriculture.

**Keywords:** Consortia design, compatibility test, germination test, plant growth promoting yeast, plant architecture.

## INTRODUCCIÓN

Los consorcios microbianos que comprenden diversos grupos filogenéticos han demostrado capacidades superiores al optimizar los procesos relacionados a la nutrición, el desarrollo y la salud vegetal, comparados con las poblaciones individuales. Esta característica los coloca como una alternativa promisoría con potencial significativo para incrementar la productividad agrícola, conservar y promover la biodiversidad edáfica (Maciag *et al.*, 2023). Estos consorcios multifacéticos refuerzan la diversidad de rutas metabólicas en el suelo, lo que resulta en la promoción de crecimiento vegetal, la inducción de resistencia sistémica, la supresión de enfermedades y el incremento en la tolerancia a factores abióticos, que en última instancia, incrementan la productividad de los cultivos (Luziatelli *et al.*, 2023). Comúnmente, estos consorcios consisten en varias bacterias promotoras de crecimiento vegetal (BPCV); mientras que en otros casos, se componen de hongos promotores de crecimiento vegetal (HPCV) que, de forma similar a las bacterias, promueven el desarrollo vigoroso de la planta. Aunque menos comunes, en algunos casos se han estudiado levaduras promotoras de crecimiento vegetal (LPCV); a pesar de su presencia limitada en estudios científicos, algunas evidencias sugieren su excelente utilidad como biofertilizantes y estimulantes vegetales (Carvajal *et al.*, 2024).

Las etapas de germinación y el desarrollo temprano de la plántula juegan un rol crucial para lograr una óptima densidad de plantas por unidad de área, lo que asegura un rendimiento favorable del cultivo (Mandić *et al.*, 2023). Durante estas etapas, una compleja red de procesos regulatorios, influenciados por los reguladores de crecimiento, la disponibilidad de nutrientes y las asociaciones simbióticas, impactan



significativamente tanto a la germinación como al desarrollo de la plántula (Xue *et al.*, 2021). No obstante, estos procesos pueden ser interrumpidos por factores de estrés abiótico, deficiencias nutrimentales y la presencia de fitopatógenos, dando como resultado una germinación pobre, la disminución del vigor y el rendimiento reducido (Khaeim *et al.*, 2022).

La región de La Frailesca en Chiapas se caracteriza por la agricultura y la ganadería como actividades intensivas, en donde se incluyen la producción de maíz, frijol, café y cacahuate. No obstante, el excesivo uso de agroquímicos ha conducido a la degradación de la fertilidad de los suelos. Esto ha causado el abandono de las tierras de cultivo y el cambio de uso de suelo forestal en suelos agrícolas. En respuesta, la asociación sin fines de lucro “The Nature Conservancy” ha financiado proyectos colaborativos con el INIFAP para establecer sistemas agroforestales como una alternativa de restauración de suelos degradados. Entre estas estrategias de recuperación, se realizaron estudios encaminados al diagnóstico del estatus fitosanitario de los suelos, resultando en la identificación de varias cepas tanto fitopatógenas como benéficas de hongos (Chávez-Díaz *et al.*, 2022). Adicionalmente, se aislaron bacterias y levaduras con capacidades promotoras de crecimiento vegetal, que exhibieron habilidades fisiológicas capaces de influenciar positivamente la fertilidad del suelo (Resendiz-Venado *et al.*, 2022). Estos estudios también han demostrado la capacidad antagónica de estos hongos, bacterias y levaduras contra agentes causales de enfermedades vegetales. Además, se evidenció su potencial para incrementar el crecimiento vegetal, lo que derivó en la formulación de consorcios basados en su compatibilidad (Gayosso-Barragán *et al.*, 2023; Resendiz-Venado *et al.*, 2022). Los microorganismos derivados de estos estudios (principalmente bacterias) han sido evaluados en condiciones *in vitro* y en campo. No obstante, debido a las limitantes en tiempo y recursos, hay una crítica necesidad de implementar metodologías prácticas y eficientes para evaluar consorcios multi cepa. Esto hace necesario contar con técnicas capaces de predecir de manera confiable sus efectos sobre el rendimiento de los cultivos, con el objetivo de acelerar el desarrollo y la formulación de bioinoculantes eficaces para una agricultura sostenible.

Las pruebas de germinación en laboratorio, han probado ser excelentes predictores del rendimiento de diferentes genotipos vegetales, facilitando la exploración de tratamientos que mejoran los procesos fisiológicos tanto en las semillas como en las plántulas, por lo que promueven el desarrollo de estrategias que aseguren el establecimiento del cultivo en campo (Calvillo-Aguilar *et al.*, 2023; Khaeim *et al.*, 2022; Xue *et al.*, 2021). Con base en estos antecedentes, el presente estudio aborda la integración de cepas fúngicas a consorcios previos de bacterias y levaduras formulados por compatibilidad con la finalidad de reforzarlos, y evalúa su efectividad usando un método adaptado *in vitro* diseñado para predecir robustamente el rendimiento agronómico del maíz durante sus etapas tempranas.



## MATERIAL Y MÉTODOS

### Cepas microbianas, inóculos y material vegetal

Se usaron cepas bacterianas aisladas de La Frailesca, Chiapas, durante los años 2021 y 2022. Las cepas fúngicas comprendieron a *Aureobasidium* sp. VFRB, aislado de frijol; *Cordyceps* sp. SVD y *Trichoderma* sp. SVA, aislados de suelos de selva; *Purpureocillium* sp. BOF, aislado de suelo forestal; y *Trichoderma* sp. LCCG, aislado de plantas de cacahuate, todos previamente identificados por morfometría y métodos moleculares (Chávez-Díaz *et al.*, 2022). Se usaron consorcios microbianos preformulados. El consorcio 2021 conformado de *Stenotrophomonas* sp. LIMN, *Rhizobium* sp. WFRFC, y *Enterobacterium* sp. LCMG. El consorcio 2022, conformado por *Pantoea* sp. CanP2-19b, *Pseudomonas* sp. 37L, and *Pseudomonas* sp. P1.1-2b (Ruiz-Ramírez *et al.*, 2024). El consorcio E1 integrado por las bacterias del consorcio 2021 al que se adicionó la bacteria *Serratia* sp. 385 aislada de jales mineros (Zelaya-Molina *et al.*, 2016), mientras que el consorcio E2 incluía a *Pantoea* sp. CanP2-19b y a la levadura *Clavispora* sp. Y35, aislada de maíces cónicos del estado de Hidalgo (Zelaya-Molina *et al.*, 2021). La capacidad promotora de crecimiento vegetal de todos los microorganismos ya era conocida, con excepción de *Aureobasidium* sp. VFRB. Los cultivos fúngicos se mantuvieron en medio agar papa y dextrosa (PDA) a  $26 \pm 2^\circ\text{C}$  hasta la formación de conidios, estos se colectaron y se ajustó la concentración a  $1 \times 10^4$  conidios/mL usando un hematocitómetro. Las cepas de bacterias y la levadura, fueron cultivadas sobre medio agar triptona de soja (TSA), se suspendieron en agua estéril para alcanzar una turbidez óptica acorde al 0.5 en la escala McFarland. Para obtener los extractos crudos, los microorganismos se cultivaron en caldo triptona de soja (TSB) por 9 días a  $28 \pm 2^\circ\text{C}$  en agitación constante, y posteriormente filtrados con papel Whatman No. 4 para remover la biomasa celular. En el experimento, las plantas fueron inoculadas con 10 mL de suspensión celular o extracto crudo, dependiendo del experimento. Para los consorcios, se combinaron volúmenes iguales de cada microorganismo a las concentraciones descritas para obtener el volumen final necesario. Como modelo vegetal se emplearon las semillas del maíz híbrido INIFAP H391, cultivado en Tepatitlán de Morelos durante el ciclo primavera-verano del 2023.

### Selección de un método de germinación asistida por hongos

Se evaluaron cuatro métodos para germinar el maíz con la finalidad de identificar la técnica más efectiva para producir semillas manejables que permitiesen colectar datos. Los métodos incluyeron: germinación entre rollos de papel (BP), germinación en cajas de acrílico (AB) (Calvillo-Aguilar *et al.*, 2023), germinación en camas de turba (PM) y de arena (SN). Cada método incluyó 10 semillas como unidad experimental inoculadas con propágulos de *Aureobasidium* sp. VFRFB (X1) o con extracto crudo del hongo (X2), como se describió anteriormente. Se consideraron cuatro replicas, las cuales se dispusieron en un arreglo de bloques aleatorizados. Después de 15 días de incubación a  $26 \pm 2^\circ\text{C}$



con fotoperiodos de 14:10 h luz:oscuridad y fotoperiodos de 6000 lux en una cámara bioclimática, las semillas manejables se evaluaron con base en la elongación, crecimiento normal similar al desarrollo en suelo, y la facilidad con la que se removía el sustrato. Adicionalmente, se registro la longitud de planta, el peso fresco y seco para determinar el método óptimo para el estudio. Estas características facilitan la manipulación para asegurar la exactitud en los análisis subsecuentes.

### Pruebas de compatibilidad entre hongo, bacteria y levadura

Se establecieron confrontaciones en cultivo dual por triplicado entre hongos y bacterias de forma individual sobre placas Petri conteniendo PDA con la finalidad de evaluar la compatibilidad o incompatibilidad en las interacciones. Los cultivos duales se incubaron a  $26\pm 2^{\circ}\text{C}$  en oscuridad. Después de 7 días, se realizaron subcultivos de la línea de confrontación para evaluar el efecto de un microorganismo sobre otro. Se estructuró una escala de evaluación arbitraria basada en las observaciones para evaluar las interacciones: (+1) indicó el efecto bactericida del hongo o la levadura; (0) indicó la coexistencia entre el hongo y la bacteria o la levadura sobre el medio sin causar daño uno al otro, lo que significó compatibilidad; (-1) indico un efecto fungicida exhibido por la bacteria o la levadura en cuestión. Los valores decimales entre 0 y +1, indicaron un gradiente bacteriostático, mientras que aquellos entre 0 y -1 indicaron un gradiente fungistático. Las combinaciones compatibles en las pruebas, fueron usadas como consorcios en los experimentos subsecuentes. En el caso de *Trichoderma* sp. SVA, exhibió un efecto bacteriostático bajo contra dos de las bacterias del consorcio 2021. Sin embargo, el tratamiento se incluyó con base en el interés científico de observar el efecto sobre la planta de los metabolitos generados durante la interacción. Los tratamientos aparecen en la tabla 1.

**Tabla 1. Tratamientos basados en la compatibilidad entre Hongo, Bacteria y Levadura.**

Tratamiento	Hongo	Bacteria/Levadura
T1		Control
T2		-
T3		<i>Pantoea</i> sp. CanP2-19b
T4		<i>Clavispora</i> sp. Y35
T5	<i>Aureobasidium</i> sp. VFRB	<i>Pseudomonas</i> sp. 37L
T6		<i>Pseudomonas</i> sp. IngP1.1-2b
T7		Consortium 2022
T8		Consortium E2
T9		-
T10		<i>Stenotrophomonas</i> sp. LIMN
T11	<i>Trichoderma</i> sp. SVA	<i>Clavispora</i> sp. Y35
T12		<i>Pseudomonas</i> sp. IngP1.1-2b
T13		Consortium 2021

Control: Plantas no inoculadas. Consorcio 2021 comprendido por LIMN, WFRFC y LCGM. Consorcio 2020 comprendido por CanP2-19b, 37L y IngP1.1-2b. Consorcio E2 comprendido por Y35 and CanP2-19b.



## **Efecto de los hongos y consorcio sobre el desempeño de plántulas de maíz**

De acuerdo con el método de germinación seleccionado, se organizaron 25 semillas como unidad experimental por tratamiento y se inocularon con suspensiones de conidios fúngicos ( $1 \times 10^4$  conidios/mL), ya sea de forma individual o en combinación con bacterias y la levadura. Los tratamientos se establecieron conforme a los formulados en la Tabla 1; cada tratamiento constó de cuatro repeticiones dispuestas en bloques aleatorizados. El experimento se repitió en dos ocasiones. En los grupos control, el inóculo fue sustituido por agua destilada estéril. El experimento se llevó a cabo en una cámara bioclimática durante 18 días a  $26 \pm 2$  °C, con una humedad relativa del 60% y un fotoperiodo de 14:10 h luz:oscuridad, con una intensidad luminosa de 6000 Lux. Al finalizar, se registró el porcentaje de germinación, longitud de la plúmula, longitud de la raíz, número de raíces secundarias, peso fresco y peso seco de la plúmula y la raíz.

## **Rasgos promotores del crecimiento vegetal en el consorcio hongo-levadura-bacteria**

Se evaluaron características promotoras del crecimiento vegetal para explicar la efectividad del consorcio tripartita. La fijación de nitrógeno se determinó en medio libre de nitrógeno, considerando como cepas positivas aquellas que presentaron un cambio de color a amarillo ( $\text{NH}_4^+$ ) o azul ( $\text{NO}_3^-$ ) (Baldani *et al.*, 2014). La solubilización de fosfato y potasio se evaluó mediante la formación de halos amarillentos en medios NBRIP-BPB y Aleksandrow-BPB, (Mehta & Nautiyal, 2001; Parmar & Sindhu, 2019). La movilización de zinc se identificó por la presencia de zonas claras en medio enriquecido con Zn (Kamran *et al.*, 2017), y la producción de sideróforos se detectó mediante halos amarillo-naranja en Agar-CAS (Schwyn & Neilands, 1987). La tolerancia a la salinidad y al estrés hídrico se determinó a través de la producción de biomasa microbiana en medios con salinidad elevada o baja actividad de agua (Arminjon & Lefort, 2025; Liu *et al.*, 2022). La producción de indoles se evaluó cultivando los microorganismos en agar YPD (agar extracto de levadura, peptona y dextrosa) suplementado con L-triptófano. Tras 7 días de incubación, se añadieron 10 mL de reactivo de Salkowski (35% HCl, 0.5 M  $\text{FeCl}_3$ ), y una coloración rosada-rojiza indicó un resultado positivo (Gordon & Weber, 1951; Szkop *et al.*, 2012). Los medios fueron inoculados con  $1 \times 10^4$  conidios/mL en el caso de los hongos, y suspensiones celulares con una turbidez de 0.5 unidades de McFarland para levaduras y bacterias. Las respuestas se registraron como intensa (+++), media (++) , baja (+) o negativa (-).

## **Procesamiento de datos y análisis estadístico**

Los datos de compatibilidad, plántulas manejables para la selección del método y características promotoras del crecimiento vegetal se analizaron mediante una prueba de Chi-cuadrada, seguida de una prueba F de Fisher para determinar los niveles de significancia. Los datos de longitud de plántula, peso fresco y peso seco se transformaron utilizando logaritmo en base 10. Tras confirmar que se cumplían los



supuestos estadísticos, los datos se sometieron a un análisis de varianza de dos vías, seguido de una prueba post hoc de Tukey. Las gráficas se generaron a partir de los datos crudos. Para evaluar el efecto de los hongos solos o en consorcio con bacterias y levaduras, se calculó el índice de respuesta (RR, por sus siglas en inglés) para determinar el impacto de la inoculación sobre la germinación de semillas. El índice de respuesta se determinó mediante la fórmula  $RR = (\ln(Xa/Xb) * 100)$ , donde Xa representa los datos del tratamiento experimental y Xb corresponde al promedio del grupo control (semillas sin inoculación fúngica ni bacteriana) (Luo *et al.*, 2022). Estos datos, así como los datos crudos correspondientes a la arquitectura radical y acumulación de biomasa, fueron sometidos a un análisis de varianza de dos vías, seguido de una prueba de Tukey para la separación de medias. Los experimentos se repitieron al menos en dos ocasiones, y los datos fueron analizados de forma conjunta. Todo el procesamiento de datos y análisis estadísticos se realizó utilizando el software R versión 4.3.1 (R Core Team, 2024) y RStudio versión 2023.06.0 Build 421 (RStudio Team, 2024).

## RESULTADOS

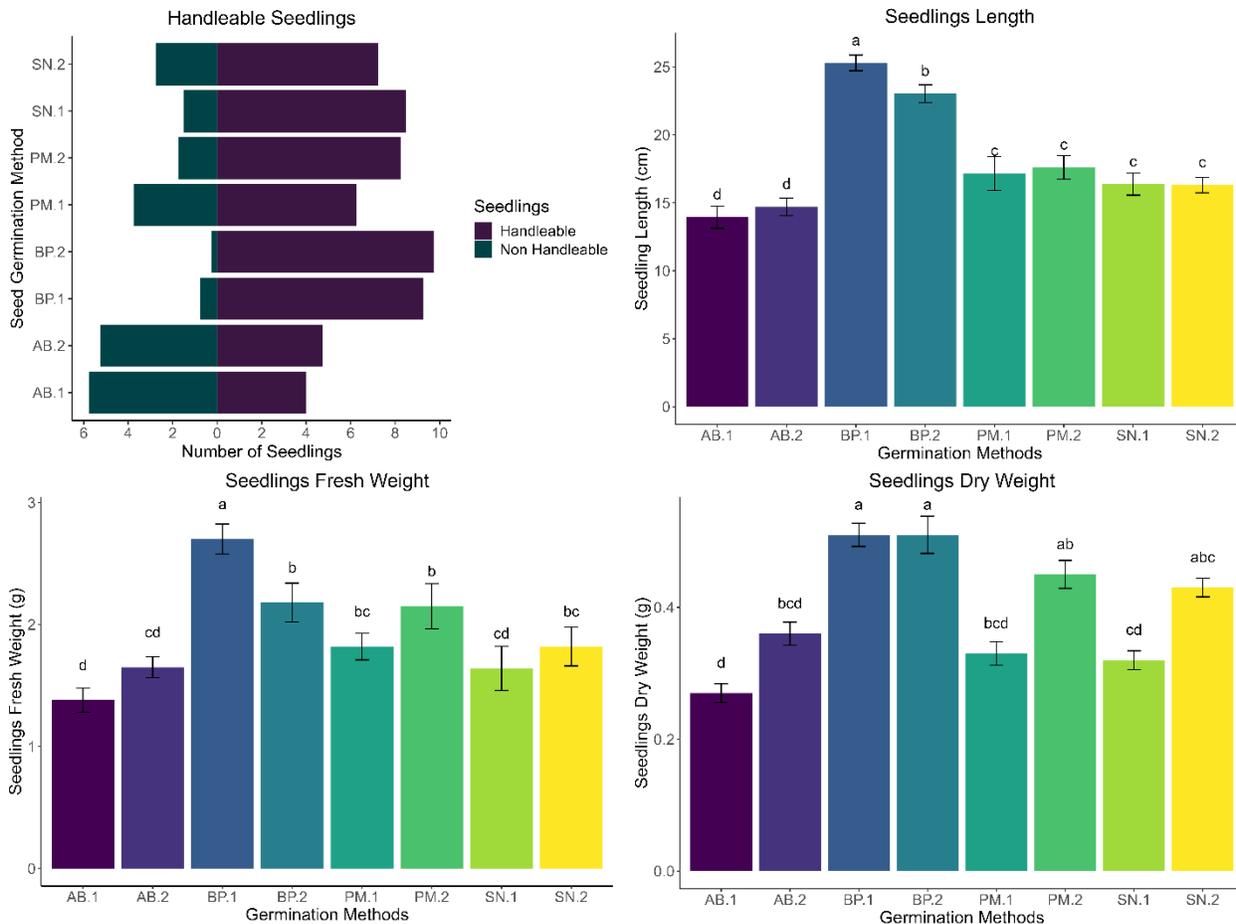
### Selección del método de germinación asistida por hongos

Entre los métodos de germinación asistida por hongos, el método entre papel produjo el mayor número de plántulas manejables, con mayor longitud, peso fresco y peso seco, independientemente de si se utilizó inóculo con propágulos o extracto crudo (BP.1 y BP.2). En contraste, el método de germinación en cajas de acrílico (AB.1 y AB.2) generó plántulas deformadas y difíciles de manipular (Figura 1). Por otro lado, los métodos PM.1, PM.2, SN.1 y SN.2 produjeron plántulas con residuos de sustrato adheridos que resultaron difíciles de eliminar. Además, en el método PM se observó crecimiento micelial sobre la superficie de los semilleros. Las plántulas mostraron diferencias visuales evidentes, observándose un desarrollo ligeramente superior en aquellas inoculadas con suspensiones de conidios en comparación con las tratadas con los extractos crudos libres de células (Figura 2).

### Compatibilidad entre hongos, bacterias y levaduras, y diseño de tratamientos

La cepa *Aureobasidium* sp. VFRB mostró compatibilidad con las tres cepas bacterianas que conforman el Consorcio 2022, así como con la levadura incluida en el Consorcio E2. La cepa *Trichoderma* sp. SVA presentó un leve efecto bacteriostático contra las bacterias del Consorcio 2021, pero mostró compatibilidad con cepas independientes como *Pseudomonas* sp. IngP1.1-2b, *Stenotrophomonas* sp. LIMN y la levadura *Clavispora* sp. Y35. En contraste, *Trichoderma* sp. LCCG, *Purpureocillium* sp. BOF y *Cordyceps* sp. SVD mostraron compatibilidad con menos de tres cepas bacterianas. La levadura *Clavispora* sp. Y35 presentó un gradiente de actividad bacteriostática contra bacterias como *Enterobacterium* sp. LCMG, *Pseudomonas* sp. IngP1.1-2b y *Serratia* sp. 385. Mientras tanto, las cepas bacterianas *Pseudomonas* sp. 37L, *Rhizobium* sp. WFRFC y

*Stenotrophomonas* sp. LIMN ejercieron cierto grado de actividad antagonica contra la levadura (Figura 3). Con base en estos resultados, se definieron 13 tratamientos que se emplearon en la experimentación subsecuente (Tabla 1).

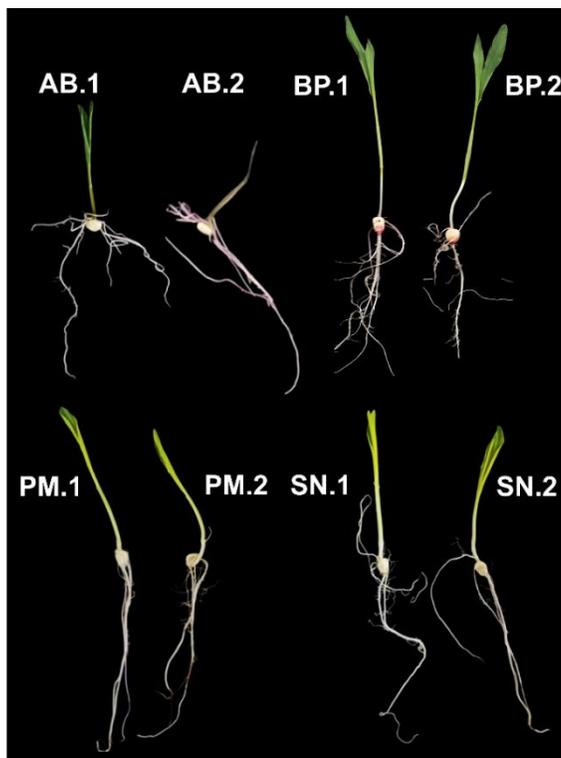


**Figura 1. Desempeño de los métodos de germinación asistida por hongos utilizando inóculo fúngico y extracto crudo.** Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas (n=10; prueba de Chi-cuadrada y prueba de Fisher,  $p \leq 0.01$  para plántulas viables; ANOVA de dos vías y prueba de Tukey,  $p \leq 0.01$  para longitud de plántula, peso fresco y peso seco). AB: Método en caja de acrílico; BP: Método entre papel; PM: Método en semillero de turba; SN: Método en semillero de arena. X.1: inoculado con suspensión celular microbiana; X.2: enmendado con extracto crudo (libre de células).

### Efecto del inóculo hongo-bacteria-levadura sobre la germinación de semillas de maíz

Los resultados indican que los mejores radios de respuesta en la germinación de semillas se obtuvieron con la combinación de *Aureobasidium* sp. VFRB con el Consorcio E2, así como con la levadura inoculada de forma independiente *Clavispora* sp. Y35, incrementando las tasas de germinación hasta en un 6% y 5.5%, respectivamente. En contraste, *Trichoderma* sp. SVA redujo las tasas de germinación tanto cuando se aplicó de manera individual como al ser inoculado en combinación con *Pseudomonas* sp. IngP1.1-2b o *Stenotrophomonas* sp. LIMN, observándose disminuciones que oscilaron

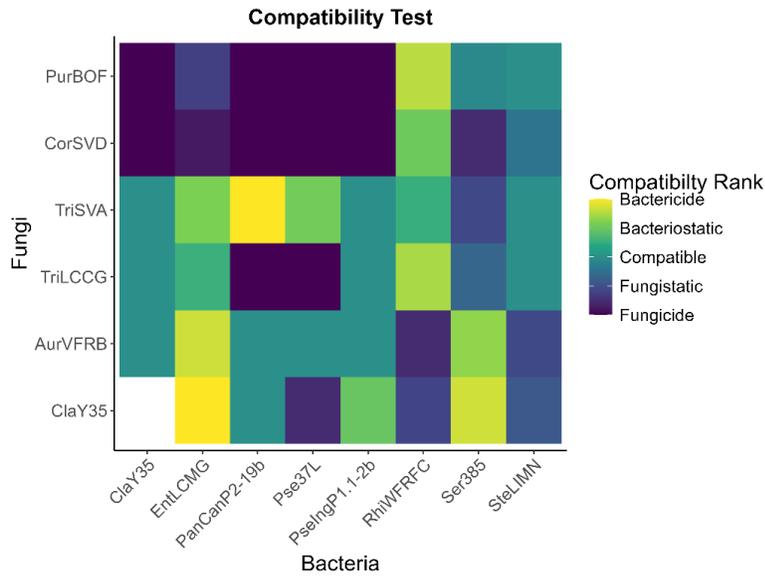
entre 1.3% y 12% en comparación con las plantas control, excepto cuando se combinó con la levadura Y35 (Figura 4).



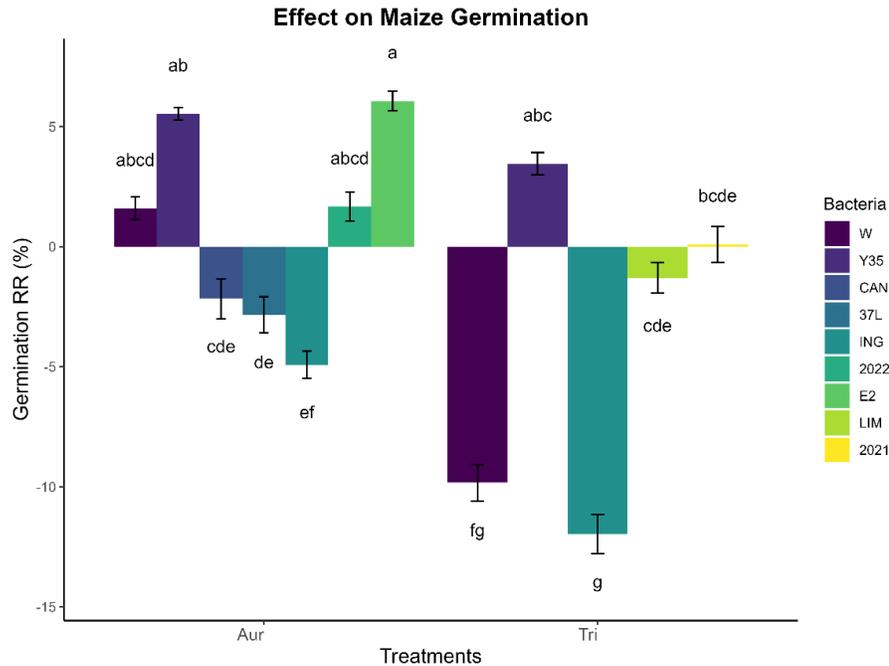
**Figura 2. Plántulas de maíz obtenidas mediante germinación asistida por el hongo *Aureobasidium* sp. VFRB.** Las imágenes muestran plántulas representativas seleccionadas a partir de un consenso de 40 observaciones. AB: Método en caja acrílica; BP: Método entre papel; PM: Método en semillero de turba; SN: Método en semillero de arena. X.1: inoculado con suspensión celular microbiana; X.2: enmendado con extracto crudo (libre de células).

### **Efecto del inóculo hongo-bacteria-levadura sobre la arquitectura de plántulas de maíz**

La plúmula de las plántulas se vio principalmente favorecida en los tratamientos que contenían *Aureobasidium* sp. VFRB en combinación con bacterias del género *Pseudomonas*, como *Pseudomonas* sp. 37L, *Pseudomonas* sp. EngP1.1-2b y el Consorcio 2022, que incluye ambas junto con *Pantoea* sp. CanP2-19b. En presencia de *Pseudomonas* sp. 37L, la plúmula aumentó hasta en un 30.26%. En cambio, *Trichoderma* sp. SVA, cuando se aplicó de forma individual, provocó una reducción en la longitud de la plúmula en comparación con las plantas control. Sin embargo, al combinarse con *Pseudomonas* sp. IngP1.1-2b, favoreció el crecimiento en un 24.5% respecto a las plantas control (Tabla 2).



**Figura 3. Mapa de calor de los niveles de compatibilidad en las interacciones entre hongos y bacterias aislados de La Frailesca, Chiapas, y la levadura.** Los datos representan el promedio de tres repeticiones. (n=6; prueba de Chi-cuadrada, prueba de Fisher,  $p \leq 0.01$ ).



**Figura 4. Radios de respuesta en la germinación de semillas tras la inoculación con hongos solos o en combinación con bacterias y la levadura.** Las barras representan el promedio de cuatro repeticiones (n = 25; ANOVA de dos vías, prueba de Tukey  $p \leq 0.01$ ). W: Agua destilada; Aur: *Aureobasidium* sp. VFRB; Tri: *Trichoderma* sp. SVA; CAN: *Pantoea* sp. CanP2-19b; Y35: *Clavispora* sp. Y35; 37L: *Pseudomonas* sp. 37L; ING: *Pseudomonas* sp. IngP1.1-2b; 2022: Consorcio 2022 (CAN + 37L + ING); E2: Consorcio E2 (CAN + Y35); LIM: *Stenotrophomonas* sp. LIMN; 2021: Consorcio 2021 (LIMN + WFRFC + LCGM).



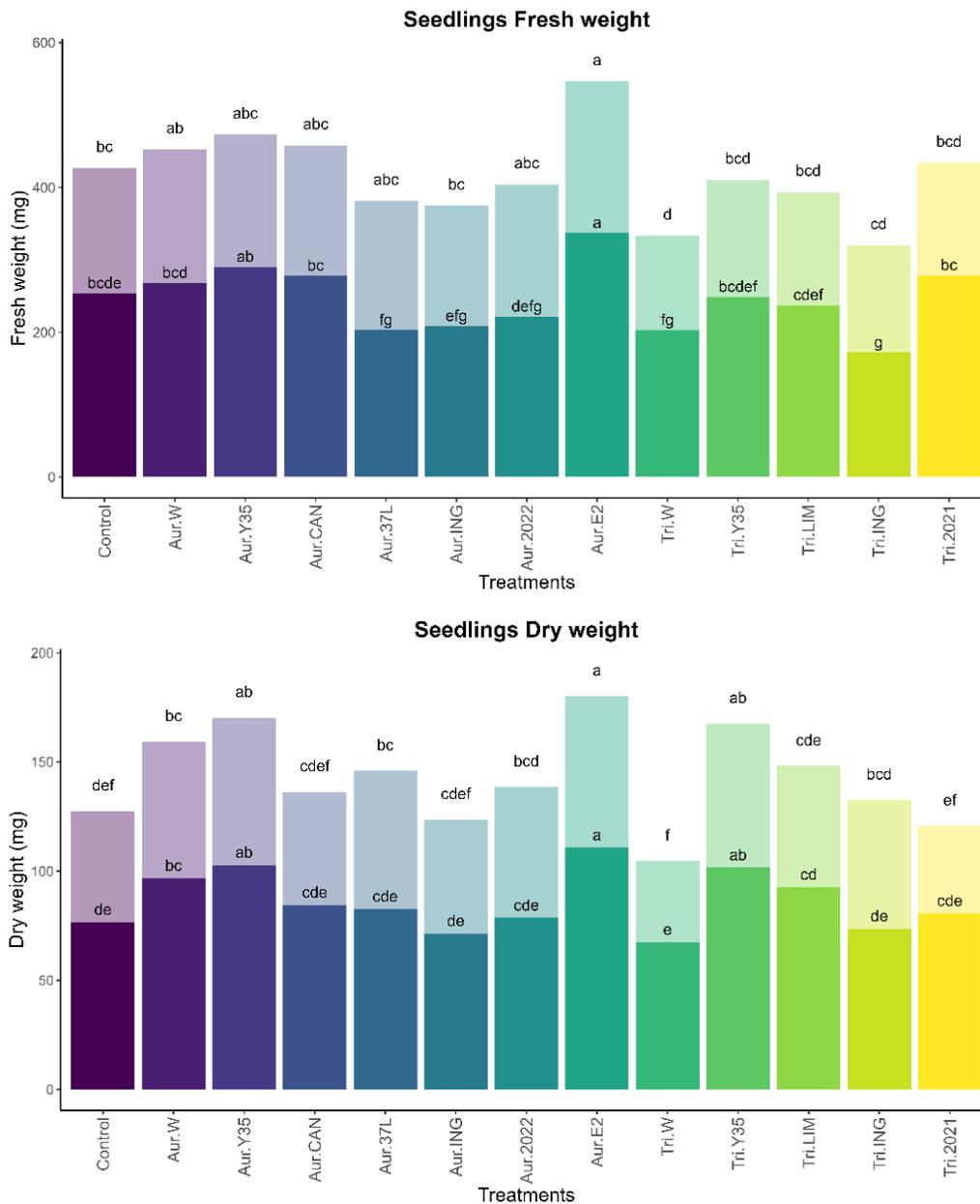
## Acumulación de biomasa en plántulas de maíz en respuesta a la inoculación con hongos, bacterias y levaduras

En general, los tratamientos mostraron efectos positivos reflejado en un mayor incremento en el peso seco en comparación con el peso fresco. Destaca la combinación del hongo *Aureobasidium* sp. VFRB, la levadura *Clavispora* sp. Y35 y la bacteria *Pantoea* sp. CanP2-19b, la cual mejoró significativamente la acumulación de biomasa. En relación con las plántulas control, el peso seco de la raíz aumentó en un 44.63% y el de la plúmula en un 36.23%, mientras que el peso fresco de la raíz se incrementó en un 32.92% y el de la plúmula en un 20.76%. En contraste, los tratamientos que incluyeron al hongo *Trichoderma* sp. SVA provocaron una reducción sustancial en el peso fresco de las plántulas, con disminuciones de hasta 24.69% en la plúmula y 32.31% en las raíces. Sin embargo, cuando *Trichoderma* sp. SVA se combinó con *Clavispora* sp. Y35 o *Stenotrophomonas* sp. LIMN, el peso seco de la raíz aumentó significativamente en un 32.69% y 20.99%, respectivamente, mientras que el peso seco de la plúmula se incrementó en un 29.51% y 9.01%, en comparación con las plantas control (Figura 5).

**Tabla 2. Respuesta en la arquitectura de plántulas de maíz ante la inoculación con hongos, bacterias y levaduras**

Hongo	Bacteria/Levadura	Largo de Plumula (cm)		Largo de Raíz (cm)			No. Raíces Secundarias			
	Control	88.13	d	-	128.93	e	-	4.7	h	-
	-	97.67	c	+10.3%	141.63	bcd	+9.4%	6.82	e	+37%
	ClaY35	96.73	c	+9.3%	153.47	a	+17.4%	9.54	a	+71%
	PanCAN	92.44	cd	+4.8%	143.88	b	+11%	8.66	b	+61%
AurVFRB	Pse37L	119.27	a	+30.3%	135.47	cde	+5%	5.57	g	+17%
	PseING	107.5	b	+19.9%	134.31	e	+4.1%	6	f	+27%
	Con2022	111.87	b	+23.9%	135.33	cde	+4.9%	7.66	d	+49%
	ConE2	98.73	c	+11.36%	160.8	a	+22.1%	9.94	a	+75%
	-	73.44	e	-18.2%	113.94	f	-12.4%	4.47	h	+0.8%
	ClaY35	92.94	cd	+5.3%	142.63	bc	+10.1%	6.91	e	+39%
TriSVA	SteLIMN	89.19	d	+1.2%	135.13	cde	+4.7%	6.15	f	+27%
	PseING	112.6	ab	+24.5%	130.33	e	+1.1%	6.93	e	+39%
	Con2021	78.2	e	-12%	139.93	bcd	+8.2%	8.19	c	+56%

Para cada variable, los valores seguidos de la misma letra no presentan diferencias significativas ( $n = 25$ ; ANOVA de dos vías, prueba de Tukey  $p \leq 0.01$ ). La tercera columna muestra el porcentaje de radio de respuesta de las plántulas para cada variable en presencia de microorganismos, en relación con las plantas control. El experimento se realizó en dos ocasiones y los datos de ambos ensayos se analizaron de forma conjunta. AurVFRB: *Aureobasidium* sp. VFRB; TriSVA: *Trichoderma* sp. SVA; Control: Plántulas no inoculadas; ClaY35: *Clavispora* sp. Y35; PanCAN: *Pantoea* sp. CanP2-19b; Pse37L: *Pseudomonas* sp. 37L; PseING: *Pseudomonas* sp. IngP1.1-2b; Con2022: Consorcio 2022 (PanCAN + Pse37L + PseING); ConE2: Consorcio E2 (PanCAN + ClaY35); SteLIM: *Stenotrophomonas* sp. LIMN; Con2021: Consorcio 2021 (SteLIM + RhiWFRFC + EntLCGM).

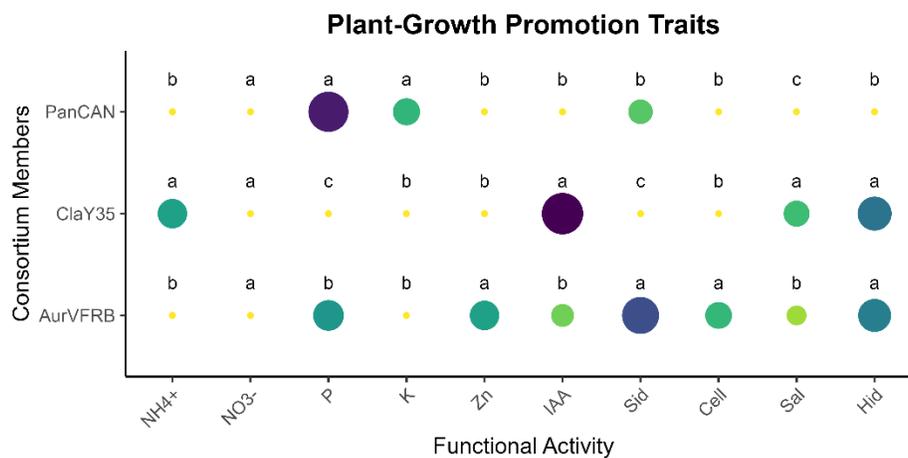


**Figura 5. Acumulación de biomasa en plántulas expresada como peso fresco y seco en respuesta a la inoculación con hongos solos o en combinación con bacterias y una levadura.** Las barras brillantes representan el peso fresco o seco de la raíz; las barras atenuadas representan el peso fresco o seco de la plúmula. Las barras muestran el promedio de cuatro repeticiones (n = 25; ANOVA de dos vías, prueba de Tukey  $p \leq 0.05$ ). W: Agua destilada; Aur: *Aureobasidium* sp. VFRB; Tri: *Trichoderma* sp. SVA; CAN: *Pantoea* sp. CanP2-19b; Y35: *Clavisporea* sp. Y35; 37L: *Pseudomonas* sp. 37L; ING: *Pseudomonas* sp. IngP1.1-2b; 2022: Consorcio 2022 (CAN + 37L + ING); E2: Consorcio E2 (CAN + Y35); LIM: *Stenotrophomonas* sp. LIMN; 2021: Consorcio 2021 (LIMN + WFRFC + LCGM).



## Características promotoras del crecimiento vegetal en el consorcio hongo-levadura-bacteria

Los tres microorganismos que conforman el consorcio presentaron niveles e intensidades diferenciales en la expresión de características promotoras del crecimiento vegetal. *Aureobasidium* sp. VFRB mostró el mayor número de rasgos benéficos, siendo la producción de sideróforos su característica más destacada, mientras que los rasgos restantes se expresaron con intensidad media o baja. *Clavispora* sp. Y35 presentó una alta capacidad para la producción de indoles y fue la única cepa capaz de generar un positivo para  $\text{NH}_4^+$ . En contraste, *Pantoea* sp. CanP2-19b exhibió la mayor capacidad de solubilización de fósforo (Figura 6).



**Figura 6. Perfil enzimático e intensidad de las características promotoras del crecimiento vegetal expresadas por los miembros del consorcio tripartita.** El tamaño de las burbujas representa la intensidad de expresión de los rasgos promotores del crecimiento vegetal. Las burbujas seguidas de letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas ( $n = 6$ ; prueba de Chi-cuadrada, prueba de Fisher  $p \leq 0.05$ ).

## DISCUSIÓN

La agricultura asistida por microorganismos está cobrando relevancia, particularmente en cultivos básicos como el maíz, debido a su importancia para la soberanía alimentaria en diversos países (Guzmán *et al.*, 2025; Zelaya-Molina *et al.*, 2024). El proceso de bioprospección permite el desarrollo de formulaciones efectivas mediante el uso de agentes microbianos nativos y ayuda a predecir su eficiencia de colonización e impacto en el fenotipo vegetal (Sethi, 2024; dos Reis *et al.*, 2024; Agbowuro *et al.*, 2021). Para fortalecer este proceso, es esencial contar con métodos de evaluación consistentes que permitan distinguir los efectos de los tratamientos y tomar decisiones informadas sobre la selección de agentes individuales promotores del crecimiento vegetal, consorcios microbianos o estrategias de manejo (Calvillo-Aguilar *et al.*, 2023).



La mayoría de los métodos estandarizados se enfocan en evaluar la germinación en respuesta a agroquímicos, extractos naturales o PGPR en condiciones *in vitro*, con el objetivo de evaluar directamente la interacción entre microorganismos y plantas, excluyendo otros factores que pudiesen interferir (Calvillo-Aguilar *et al.*, 2023; Mandić *et al.*, 2023). Esto permite observar si el microorganismo puede mejorar la aptitud biológica inherente de la planta (Khaeim *et al.*, 2022; Xue *et al.*, 2021). En este estudio se evaluaron cuatro métodos diferentes de germinación (cajas de acrílico, entre papel, camas de turba y camas de arena) para identificar el más adecuado para producir plántulas de maíz manipulables, permitiendo así la recolección de datos sólidos que orienten la selección de consorcios microbianos óptimos. Las plántulas inoculadas con suspensiones conidiales mostraron un desarrollo superior en comparación con aquellas tratadas con extractos crudos, probablemente debido a la interacción y el proceso de colonización generado por el hongo promotor de crecimiento vegetal. Dicha colonización favorece respuestas adaptativas a las condiciones ambientales y estimula la producción de metabolitos benéficos que mejoran la fisiología de la planta (Hossain *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2024).

El método de germinación en rollos de papel produjo plántulas manipulables con micelio fácilmente removible; aunque las puntas radicales eran propensas a romperse, este método superó a los demás en todos los criterios evaluados. En contraste, las camas de turba y arena provocaron la adherencia del sustrato a las raíces debido al crecimiento micelial, dificultando el manejo de las plántulas. Además, la esporulación observada en estos sustratos podría incrementar el riesgo de contaminación de la cámara de crecimiento. Las cajas de acrílico produjeron plántulas con desarrollo deficiente y morfología irregular (Figura 2). Estos resultados indican que el método de Calvillo-Aguilar *et al.* (2023) es adaptable para evaluar no solo bacterias y levaduras, sino también otros microorganismos como hongos, facilitando la evaluación directa de las respuestas fisiológicas del cultivo frente a agentes promotores del crecimiento vegetal.

El diseño de consorcios microbianos con fines agrícolas requiere investigación exhaustiva. Esto implica comprender las interacciones entre los microorganismos que conforman el consorcio, ya que su persistencia, viabilidad tras la aplicación, capacidad de colonización y atributos fisiológicos dependen crucialmente de estas interacciones (Maciag *et al.*, 2023; Prigigallo *et al.*, 2023). Los cultivos duales *in vitro* proporcionan un método de evaluación eficiente para determinar si estos microorganismos pueden coexistir en un mismo entorno, siendo una herramienta clave en la formulación de consorcios microbianos sintéticos (Tabacchioni *et al.*, 2021). Aunque los ensayos de compatibilidad en cultivos duales simplifican los factores ambientales complejos que influyen en el establecimiento microbiano, permiten identificar eficazmente incompatibilidades fundamentales. En este estudio, se observó una marcada actividad fungistática de *Clavispora* sp. Y35, *Pseudomonas* sp. IngP1.1-2b, *Pseudomonas* sp. 37L y *Pantoea* sp. CanP2-19b contra los hongos *Purpureocillium*



sp. BOF y *Cordyceps* sp. SVD. Esta selección preliminar evitó destinar recursos a combinaciones cuya coexistencia espacial inicial no era probable.

Con base en estos principios, se establecieron consorcios compuestos por hongos, bacterias y la levadura. Sin embargo, en el caso del tratamiento T13, se pasó por alto la acción bacteriostática de *Trichoderma* sp. SVA contra *Rhizobium* sp. WFRFC y *Enterobacterium* sp. LCMG (incluidos en el consorcio 2021). La decisión de incluir este tratamiento respondió al interés científico por explorar los efectos de una interacción parcialmente incompatible y observar su impacto al entrar en contacto con la planta. Esta elección se respaldó en la presencia de diversos metabolitos involucrados en la interacción bacteriostática, los cuales podrían aportar beneficios a la planta (Tabacchioni *et al.*, 2021). Aunque *Trichoderma* sp. SVA es un hongo promotor del crecimiento vegetal, limitó el desarrollo de plántulas de maíz cuando se aplicó solo, lo que subraya la necesidad de realizar pruebas de germinación, ya que algunas cepas de *Trichoderma* pueden ser específicas de ciertos cultivos o incluso perjudiciales para otros (Bailey *et al.*, 2006). De forma interesante, en combinación con el Consorcio 2021 (a pesar de sus efectos bacteriostáticos), las bacterias parecieron estabilizar el sistema, mejorando el desarrollo radicular y restaurando los niveles de germinación y biomasa comparables al control.

Numerosos estudios han demostrado que la asociación temprana entre microorganismos y semillas mejora las tasas de germinación, la arquitectura vegetal y otros rasgos agronómicos (Calvillo-Aguilar *et al.*, 2023; Cardarelli *et al.*, 2022). Los microorganismos emplean mecanismos como la producción de reguladores del crecimiento, secreción de compuestos volátiles y actividad enzimática para estimular el desempeño temprano del cultivo (Metwally *et al.*, 2022). Aunque estas capacidades son deseables en los microorganismos promotores del crecimiento vegetal (MPCV), es crucial realizar pruebas de germinación para evaluar la interacción entre el cultivo y los MPCV, ya que algunos de ellos podrían presentar efectos adversos (Luziatelli *et al.*, 2023). El resultado de la interacción (ya sea beneficiosa o perjudicial para el cultivo) depende de la velocidad, intensidad y duración de los mecanismos expresados tanto por el microorganismo promotor como por la planta. Una dinámica equilibrada entre la actividad del MPCV y la respuesta de la planta es esencial para establecer una asociación simbiótica positiva (Chávez-Díaz & Zavaleta-Mejía, 2019).

La arquitectura vegetal está determinada por factores genéticos y ambientales. Durante el desarrollo temprano del cultivo, la presencia de MPCV impacta directamente sobre una compleja red regulatoria, desencadenando una expresión génica diferencial que altera procesos como el metabolismo del fósforo, la formación de azúcares, la regulación del crecimiento y el metabolismo lipídico (Chen *et al.*, 2021). En nuestro estudio, casi todos los consorcios influyeron significativamente en la arquitectura de las plántulas de maíz. En particular, la asociación hongo-levadura-bacteria (*Aureobasidium* sp. VFRV, *Clavispora* sp. Y35, *Pantoea* sp. CanP2-19b) dio lugar a plantas con sistemas radiculares



más extensos y robustos, plúmulas discretas y relaciones favorables entre peso fresco y seco (Tabla 2, Figura 5). Resultados similares se reportaron en un estudio con el consorcio bacteriano nativo de maíz variedad K-25, compuesto por *Lysinibacillus* sp. ZM1 y *Paenibacillus dendritiformis* ZM2, el cual mejoró la germinación y la arquitectura de las plántulas, incluyendo el sistema radicular y la plúmula. En contraste, las semillas tratadas con antibióticos para eliminar bacterias nativas mostraron una reducción significativa en estos parámetros, destacando el papel crucial de los microorganismos nativos en el desarrollo temprano del maíz (Pal *et al.*, 2022). Otro estudio reveló que la inoculación con un consorcio compuesto por los hongos *Serendipita indica* y *Rhizophagus intraradices*, junto con la bacteria *Azotobacter chroococcum*, permitió que las plantas de maíz mantuvieran un desarrollo óptimo bajo estrés hídrico sin alteraciones importantes en la estructura de hojas o raíces. Esta combinación microbiana promovió el crecimiento vegetativo, incrementó la biomasa, favoreció el balance osmótico y sostuvo la regulación de la actividad enzimática antioxidante (Tyagi *et al.*, 2023). Hasta donde sabemos, la mayoría de los estudios sobre consorcios microbianos en maíz se han centrado en combinaciones de bacterias y hongos promotores del crecimiento. Sin embargo, un estudio en fresa demostró que un consorcio compuesto por el hongo *Claroideoglomus claroideum*, la levadura *Naganishia albida* y la bacteria *Burkholderia caledonica* influyó significativamente en la fisiología del cultivo. Las plantas inoculadas mostraron mayor acumulación de biomasa, contenido relativo de agua y niveles de clorofila, lo cual se correlacionó con una mayor actividad del sistema antioxidante y mayores rendimientos de fruto, incluso bajo estrés hídrico (Pérez-Moncada *et al.*, 2024).

La influencia de los microorganismos sobre la arquitectura de la rizosfera y la filosfera está mediada por diversos metabolitos involucrados en la red de comunicación entre el microorganismo y la planta. Estos metabolitos también participan en procesos biogeoquímicos y determinan la dinámica poblacional asociada al cultivo (Wu *et al.*, 2023). Por esta razón, los rasgos asociados con la promoción del crecimiento vegetal son altamente deseables en los microorganismos que integran un consorcio. En este estudio, *Clavispora* sp. Y35 mostró una elevada capacidad de producción de indoles, *Pantoea* sp. CanP2-19b presentó una destacada capacidad solubilizadora de fósforo y *Aureobasidium* sp. VFRB demostró un alto potencial para la producción de sideróforos, entre otros rasgos (Figura 6). En conjunto, estas tres características son fundamentales para optimizar el desempeño del maíz al mejorar la disponibilidad de nutrientes en el suelo y contribuir a una mayor salud y rendimiento del cultivo (Marzban *et al.*, 2016; de Oliveira-Paiva *et al.*, 2024; Luo *et al.*, 2024). La levadura *Clavispora* sp. ha sido reportada como parte de la microbiota nativa del maíz criollo mexicano y como una excelente productora de indoles (Ramos-Garza *et al.*, 2023). Nuestro grupo de investigación ha contribuido a documentar la capacidad promotora de crecimiento de esta levadura en maíz (Resendiz-Venado *et al.*, 2022; Calvillo-Aguilar *et al.*, 2023), y el presente estudio



se suma a la creciente evidencia que respalda a *Clavispora* sp. como agente promotor del crecimiento vegetal. El género *Pantoea* está ampliamente distribuido y comúnmente asociado con cultivos de cereales. Aunque algunas especies son fitopatógenas, otras han demostrado un notable potencial como promotoras de crecimiento y salud vegetal debido a su capacidad para fijar nitrógeno, solubilizar fósforo, sintetizar sideróforos y producir indoles, lo cual puede inducir cambios fisiológicos benéficos en las plantas (Lv *et al.*, 2022). El género fúngico *Aureobasidium* se considera controversial debido a su capacidad de presentar morfología tipo levadura en ciertas condiciones (Slepecky & Starmer, 2009). No obstante, la cepa VFRV ha mantenido consistentemente un crecimiento filamentososo desde su aislamiento. *Aureobasidium* ha sido utilizado principalmente como agente de control biológico, gracias a su producción de una amplia gama de enzimas líticas, sideróforos y compuestos volátiles (Di Francesco *et al.*, 2023). Este estudio destaca varios rasgos asociados con la promoción del crecimiento vegetal; sin embargo, no se descarta que otros mecanismos no evaluados también contribuyan a los efectos observados en las plántulas de maíz. En conjunto, el hongo *Aureobasidium* sp. VFRFB, la levadura *Clavispora* sp. Y35 y la bacteria *Pantoea* sp. CanP2-19b fueron bioprospectados como un consorcio con fuerte potencial para apoyar el desarrollo del maíz durante sus etapas tempranas de crecimiento.

## CONCLUSIONES

El consorcio sintético compuesto por *Aureobasidium* sp. VFRB, *Clavispora* sp. Y35 y *Pantoea* sp. CanP2-19b (consorcio hongo-levadura-bacteria) demostró un alto potencial agrobiotecnológico, mejorando significativamente las tasas de germinación, la arquitectura de las plántulas y la acumulación de biomasa. De manera similar, la combinación hongo-levadura (*Aureobasidium* sp. VFRFB y *Clavispora* sp. Y35) arrojó resultados favorables. En contraste, *Trichoderma* sp. SVA, cuando se aplicó de forma individual, afectó negativamente el desarrollo de las plántulas, lo que resalta la importancia de contar con un protocolo de bioprospección bien estructurado que incluya pruebas de germinación para evaluar la compatibilidad entre los agentes promotores del crecimiento vegetal y las semillas del cultivo.

El método de germinación en rollos de papel demostró ser una herramienta valiosa para la bioprospección microbiana, al permitir el desarrollo de plántulas de maíz con una arquitectura comparable a la de plantas cultivadas en campo. Entre sus ventajas destacan la generación de plántulas fácilmente manipulables, su adaptabilidad para evaluar bacterias, levaduras y hongos, así como la diferenciación clara entre los efectos del genotipo vegetal y las interacciones microbianas.

En conjunto, este estudio resalta la relevancia de las pruebas de germinación en la bioprospección de MPCV y respalda el uso de consorcios microbianos como una estrategia sostenible para mejorar la productividad agrícola y la salud del suelo.



## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen sinceramente a “The Nature Conservancy” por el financiamiento del proyecto con número SIGI-INIFAP 8454534578, titulado “Desarrollo de la Evaluación del Sistema Agroforestal Maíz-Inga como Alternativa para la Recuperación de Suelos Degradados en La Frailesca, Chiapas”. Asimismo, expresamos nuestro agradecimiento a nuestros técnicos, Zoe Resendiz Venado y Esmeralda Plascencia Ulloa, por sus valiosas contribuciones a esta investigación.

## REFERENCIAS

AGBOWURO G, Ayeyo ME, Emecho TS. 2021. The use of microbial inoculants in crop production for food security sustainability. *Adv. J. Grad. Res.* 10:33-40.  
<https://doi.org/10.21467/ajgr.10.1.33-40>

ARMINJON L, Lefort F. 2025. Quick *in vitro* screening of PGPMs for salt tolerance and evaluation of induced tolerance to saline stress in tomato culture. *Microorganisms.* 13: 246. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13020246>

BAILEY BA, Bae H, Strem MD, Roberts DP, Thomas SE, Crozier J, Samuels GJ, Choi IY, Holmes KA. 2006. Fungal and plant gene expression during the colonization of cacao seedlings by endophytic isolates of four *Trichoderma* species. *Planta.* 224:1449-1464.  
<https://doi.org/10.1007/s00425-006-0314-0>

BALDANI JI, Reis VM, Videira SS, Boddey LH, Baldani VLD. 2014. The art of isolating nitrogen-fixing bacteria from non-leguminous plants using N-free semi-solid media: a practical guide for microbiologists. *Plant Soil.* 384:413-431.  
<https://doi.org/10.1007/s11104-014-2186-6>

CALVILLO-AGUILAR FF, Cruz-Cárdenas CI, Chávez-Díaz IF, Sandoval-Cancino G, Ruiz-Ramírez S, Bautista-Ramírez E, Ramos-Garza J, Hernández-Rodríguez CH, Zelaya-Molina LX. 2023. Germination test for the evaluation of plant-growth promoting microorganisms. *J. Microbiol. Methods.* 207, e106708.  
<https://doi.org/10.1016/j.mimet.2023.106708>

CARDARELLI M, Woo SL, Roupheal Y, Colla G. 2022. Seed Treatments with microorganisms can have a biostimulant effect by influencing germination and seedling growth of crops. *Plants.* 11, e259. <https://doi.org/10.3390/plants11030259>

CARVAJAL M, Godoy L, Gebauer M, Catrileo D, Albornoz F. 2024. Screening for indole-3-acetic acid synthesis and 1-aminocyclopropane-carboxylate deaminase activity in soil yeasts from Chile uncovers *Solicoccozyma terreia* as an effective plant growth promoter. *Plant Soil.* 496:83–93. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-05906-x>



CHÁVEZ-DÍAZ IF, Plascencia-Ulloa E, Resendiz-Venado Z, Zelaya-Molina LX, Reynoso-Santos R, Chávez-Aguilar G. 2022. Biodiversidad fúngica asociada a suelos como medida de calidad fitosanitaria: Caso de estudio. *Rev. Int. Universo Agroaliment.* 2:29-33.

<https://www.lasallebajio.edu.mx/documents/agroalimentario/06%20V2%20Universo%20Agroalimentario%20Ed.%206%20feb-abri%202022.pdf?20250513204706>

CHÁVEZ-DÍAZ IF, Zavaleta-Mejía E, 2019. Molecular communication in the pathosystem *Capsicum* species -*Phytophthora capsici*. *Mex. J. Phytopathol.* 37.

<https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.1901-3>

CHEN W, Ye T, Sun Q, Niu T, Zhang J. 2021. Arbuscular mycorrhizal fungus alters root system architecture in *Camellia sinensis* L. as revealed by RNA-Seq analysis. *Front. Plant Sci.* 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.777357>

DE OLIVEIRA-PAIVA CA, Bini D, de Sousa SM, Ribeiro VP, dos Santos FC, de Paula Lana UG, de Souza FF, Gomes EA, Marriel IE. 2024. Inoculation with *Bacillus megaterium* CNPMS B119 and *Bacillus subtilis* CNPMS B2084 improve P-acquisition and maize yield in Brazil. *Front. Microbiol.* 15.

<https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1426166>

DI FRANCESCO A, Zajc J, Stenberg JA, 2023. *Aureobasidium* spp.: Diversity, Versatility, and Agricultural Utility. *Horticulturae.* 9, e59.

<https://doi.org/10.3390/horticulturae9010059>

DOS REIS GA, Martínez-Burgos WJ, Pozzan R, Pastrana Puche Y, Ocán-Torres D, de Queiroz Fonseca Mota P, Rodrigues C, Lima Serra J, Scapini T, Karp SG, Socol CR. 2024. Comprehensive review of microbial inoculants: agricultural applications, technology trends in patents, and regulatory frameworks. *Sustainability.* 16, e8720.

<https://doi.org/10.3390/su16198720>

GAYOSSO-BARRAGÁN O, Chávez-Aguilar G, Reynoso-Santos R, Chávez-Díaz IF, Zelaya-Molina LX, Alcalá-Rico JSGJ. 2023. Efecto de la inoculación de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en maíz de temporal en el altiplano semiárido de México. *Cienc. Tecnol. Agropecu.* 11:156.

[https://www.somecta.org.mx/wp-content/uploads/2023/08/Memorias\\_Somecta.pdf](https://www.somecta.org.mx/wp-content/uploads/2023/08/Memorias_Somecta.pdf)

GORDON SA, Weber RP. 1951. Colorimetric Estimation of indoleacetic Acid. *Plant Physiol.* 26:192–195. <https://doi.org/10.1104/pp.26.1.192>

GUZMÁN M del PR, Díaz IFC, Molina LXZ. 2025. “Reflexions on the role, diversity, conservation and management of the genetic microbial resources in Agriculture”. *Curr. Res. Microb. Sci.* 8, e100365. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2025.100365>



HOSSAIN MM, Sultana F, Hossain MM, Sultana F. 2020. Application and mechanisms of plant growth promoting fungi (PGPF) for phytostimulation, in: organic agriculture. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.92338>

KAMRAN S, Shahid I, Baig DN, Rizwan M, Malik KA, Mehnaz, S., 2017. Contribution of zinc solubilizing bacteria in growth promotion and zinc content of wheat. *Front. Microbiol.* 8. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02593>

KHAEIM H, Kende Z, Jolánkai M, Kovács GP, Gyuricza C, Tarnawa Á. 2022. Impact of temperature and water on seed germination and seedling growth of maize (*Zea mays* L.). *Agronomy.* 12, e397. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020397>

LIU X, Wang Z, Xiao J, Zhou X, Xu Y. 2022. Osmotic stress tolerance and transcriptome analysis of *Gluconobacter oxydans* to extra-high titers of glucose. *Front. Microbiol.* 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.977024>

LUO D, Shi J, Li M, Chen J, Wang T, Zhang Q, Yang L, Zhu N, Wang Y. 2024. Consortium of phosphorus-solubilizing bacteria promotes maize growth and changes the microbial community composition of rhizosphere soil. *Agronomy.* 14, e1535. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071535>

LUO M, Shi Z, Yang S, Zhang M, Wu S, Zhang M. 2022. Mycorrhizal types regulated the responses of biomass in different plant organs to N addition. *Agronomy.* 12, e2357. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102357>

LUZIATELLI F, Nobili A, Nardilli F, Ruzzi M. 2023. Importance of microbial exo-metabolites as postbiotics for sustainable agriculture. *Open Access J. Microbiol. Biotechnol.* 8:1-4. <https://doi.org/10.23880/oajmb-16000257>

LV L, Luo J, Ahmed T, Zaki HEM, Tian Y, Shahid MS, Chen J, Li B. 2022. Beneficial effect and potential risk of pantoea on rice production. *Plants.* 11, e2608. <https://doi.org/10.3390/plants11192608>

MACIAG T, Koziel E, Rusin P, Otulak-Koziel K, Jafra S, Czajkowski R. 2023. Microbial consortia for plant protection against diseases: more than the sum of its parts. *Int. J. Mol. Sci.* 24, e12227. <https://doi.org/10.3390/ijms241512227>

MANDIĆ V, Krnjaja V, Simić A, Petričević M, Gogić M, Brankov M, Stanojković A. 2023. Effect of pH on germination and seedling growth of maize. *Biotechnol. Anim. Husb.* 39:195-203. <https://doi.org/10.2298/BAH2302195M>

MARZBAN A, Ebrahimipour G, Karkhane M, Teymouri M. 2016. Metal resistant and phosphate solubilizing bacterium improves maize (*Zea mays*) growth and mitigates metal accumulation in plant. *Biocatal. Agric. Biotechnol.* 8:13–17. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2016.07.005>



MEHTA S, Nautiyal CS. 2001. An Efficient Method for Qualitative screening of phosphate-solubilizing bacteria. *Curr. Microbiol.* 43:51–56.

<https://doi.org/10.1007/s002840010259>

METWALLY RA, Abdelhameed RE, Soliman SA, Al-Badwy AH. 2022. Potential use of beneficial fungal microorganisms and c-phycoerythrin extract for enhancing seed germination, seedling growth and biochemical traits of *Solanum lycopersicum* L. *BMC Microbiol.* 22, e108. <https://doi.org/10.1186/s12866-022-02509-x>

PAL G, Kumar K, Verma A, Verma SK. 2022. Seed inhabiting bacterial endophytes of maize promote seedling establishment and provide protection against fungal disease. *Microbiol. Res.* 255, e126926. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126926>

PARMAR P, Sindhu SS. 2019. The novel and efficient method for isolating potassium solubilizing bacteria from rhizosphere soil. *Geomicrobiol. J.* 36:130-136.

<https://doi.org/10.1080/01490451.2018.1514442>

PÉREZ-MONCADA UA, Santander C, Ruiz A, Vidal C, Santos C, Cornejo P. 2024. Design of microbial Consortia Based on Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Yeasts, and Bacteria to Improve the biochemical, nutritional, and physiological status of strawberry plants growing under water deficits. *Plants.* 13, e1556.

<https://doi.org/10.3390/plants13111556>

PRIGIGALLO MI, Staropoli A, Vinale F, Bubici G. 2023. Interactions between plant-beneficial microorganisms in a consortium: *Streptomyces microflavus* and *Trichoderma harzianum*. *Microb. Biotechnol.* 16:2292-2312. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14311>

RAMOS-GARZA J, Aguirre-Noyola JL, Bustamante-Brito R, Zelaya-Molina LX, Maldonado-Hernández J, Morales-Estrada AI, Resendiz-Venado Z, Palacios-Olvera J, Angeles-Gallegos T, Terreros-Moysen P, Cortés-Carvajal M, Martínez-Romero E. 2023. Mycobiota of Mexican maize landraces with auxin-producing yeasts that improve plant growth and root development. *Plants.* 12, e1328.

<https://doi.org/10.3390/plants12061328>

RESENDIZ-VENADO Z, Zelaya-Molina LX, Chávez-Díaz IF, Chávez-Aguilar G, Reynoso R, Cruz-Cárdenas CI, Bautista-Ramírez E. 2022. Rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal aisladas de suelos rizosféricos de la región de la frailesca, Chiapas. *Cienc. Tecnol. Agropecu.* 10:45–52.

<https://www.somecta.org.mx/wp-content/uploads/2023/01/Memoria-SOMECTA-2022.pdf>

R Core Team. 2024. R: A language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing. <https://www.R-project.org/>

RStudio Team. 2024. RStudio: Integrated development environment for R. RStudio, PBC.

<https://www.posit.co/products/open-source/rstudio/>



RUIZ-RAMÍREZ S, Zelaya-Molina LX, Hernández-Martínez R, Chávez-Díaz IF, Aranda-Lara U, Reynoso-Santos R, Chávez-Aguilar G, Valdez-Hernández MÁ. 2024. *Stenotrophomonas* sp. LIMN, *Enterobacter* sp. LCMG, and *Rhizobium* sp. WFRFC: a bacterial consortium in the production of *Zea mays* L. under different agronomic management practices. *Agro Product*. <https://doi.org/10.32854/agrop.v17i9.3030>

SCHWYN B, Neilands JB. 1987. Universal chemical assay for the detection and determination of siderophores. *Anal. Biochem*. 160:47-56. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(87\)90612-9](https://doi.org/10.1016/0003-2697(87)90612-9)

SETHI SK. 2024. Bioprospecting of endophytic diazotrophic microbes in sustainable agriculture: Review and prospects. *Res. J. Biotechnol*. 19:128-137. <https://doi.org/10.25303/1907rjbt1280137>

SLEPECKY RA, Starmer WT. 2009. Phenotypic plasticity in fungi: a review with observations on *Aureobasidium pullulans*. *Mycologia*. 101:823–832. <https://doi.org/10.3852/08-197>

SZKOP M, Sikora P, Orzechowski S. 2012. A novel, simple, and sensitive colorimetric method to determine aromatic amino acid aminotransferase activity using the Salkowski reagent. *Folia Microbiol*. 57:1-4. <https://doi.org/10.1007/s12223-011-0089-y>

TABACCHIONI S, Passato S, Ambrosino P, Huang L, Caldara M, Cantale C, Hett J, Del Fiore A, Fiore A, Schlüter A, Sczyrba A, Maestri E, Marmioli N, Neuhoﬀ D, Nesme J, Sørensen SJ, Aprea G, Nobili C, Presenti O, Giovannetti G, Giovannetti C, Pihlanto A, Brunori A, Bevivino A. 2021. Identification of beneficial microbial consortia and bioactive compounds with potential as plant biostimulants for a sustainable agriculture. *Microorganisms*. 9, e426. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9020426>

TYAGI J, Mishra A, Kumari S, Singh S, Agarwal H, Pudake RN, Varma A, Joshi NC. 2023. Deploying a microbial consortium of *Serendipita indica*, *Rhizophagus intraradices*, and *Azotobacter chroococcum* to boost drought tolerance in maize. *Environ. Exp. Bot*. 206, e105142. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105142>

WANG Q, Zhang X, Xie Q, Tao J, Jia Y, Xiao Y, Tang Z, Li Q, Yuan M, Bu T. 2024. Exploring plant growth-promoting traits of endophytic fungi isolated from *Ligusticum chuanxiong* hort and their Interaction in plant growth and development. *J. Fungi*. 10, e713. <https://doi.org/10.3390/jof10100713>

WU D, Wang W, Yao Y, Li H, Wang Q, Niu B. 2023. Microbial interactions within beneficial consortia promote soil health. *Sci. Total Environ*. 900, e165801. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165801>



XUE X, Du S, Jiao F, Xi M, Wang A, Xu H, Jiao Q, Zhang X, Jiang H, Chen J, Wang M. 2021. The regulatory network behind maize seed germination: effects of temperature, water, phytohormones, and nutrients. *Crop J.* 9:718-724.

<https://doi.org/10.1016/j.cj.2020.11.005>

ZELAYA-MOLINA LX, Chávez-Díaz IF, Ramos-Garza J, Fajardo-Franco ML, Hernández-Rodríguez C. 2024. Agriculture assisted by microbial genetic resources: current and future scenarios. *Curr. Res. Microb. Sci.* 6, e100222.

<https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100222>

ZELAYA-MOLINA LX, Hernández-Soto LM, Guerra-Camacho JE, Monterrubio-López R, Patiño-Siciliano A, Villa-Tanaca L, Hernández-Rodríguez C. 2016. Ammonia-oligotrophic and diazotrophic heavy metal-resistant *Serratia liquefaciens* strains from pioneer plants and mine tailings. *Microb. Ecol.* 72:324-346. <https://doi.org/10.1007/s00248-016-0771-3>

ZELAYA-MOLINA LX, Sanchez-Lima AD, Arteaga-Garibay RI, Bustamante-Brito R, Vásquez-Murrieta MS, Martínez-Romero E, Ramos-Garza J. 2021. Functional characterization of culturable fungi from microbiomes of the “conical cobs” mexican maize (*Zea mays* L.) landrace. *Arch. Microbiol.* 204, e57. <https://doi.org/10.1007/s00203-021-02680-1>