

Selección de *Streptomyces* sp. para enfrentar el estrés biótico y abiótico en *Nicotiana tabacum* L.

Selection of *Streptomyces* sp. to cope with biotic and abiotic stress in *Nicotiana tabacum* L.

Milagro García-Bernal^{1,3} , Ricardo Medina-Marrero¹ , Yeny Morales-Moreno¹ , Ubaldo Álvarez-Hernández² , Bernardo Murillo-Amador³ , José Manuel Mazón-Suástegui^{3*} 

¹Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Centro de Bioactivos Químicos. Carretera a Camajuaní km 5.5, S/N, CP. 54830. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

²Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Carretera a Camajuaní km 5.5 S/N, CP. 54830. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

³Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR). Av. Instituto Politécnico Nacional 195. Colonia Playa Palo de Santa Rita Sur, CP. 23096. La Paz, B.C.S. México.

*Autor de correspondencia: jmazon04@cibnor.mx

Artículo científico

Recibido: 11 de diciembre 2025

Aceptado: 16 de julio 2026

RESUMEN. El cambio climático intensifica los efectos del estrés biótico y abiótico en el crecimiento y la productividad de las plantas; siendo la sequía y la salinidad dos inductores abióticos relevantes que afectan la productividad agrícola. Se evaluó la actividad antagonista de *Streptomyces* sp. (Cepas B8, EA2, CB14, CD24) frente a hongos fitopatógenos aislados de plantas de tabaco (*Nicotiana tabacum* L.), su tolerancia *in vitro* a diferentes concentraciones de cloruro de sodio (NaCl), pH y polietilenglicol-600 (PEG) y su efecto en la germinación de semillas de *N. tabacum* L. Los resultados del bioensayo *in vitro* mostraron un amplio espectro antagonista contra *Fusarium* spp. y *Phytophthora nicotianae* que afectan el cultivo del tabaco. Todas las cepas de actinomicetos crecieron bajo diferentes condiciones de estrés (NaCl, pH, y PEG). Los resultados obtenidos respecto a los parámetros de germinación de las semillas de tabaco indican que el mejor tratamiento fue *Streptomyces* sp. CD24, ya que estimuló la tasa de germinación, la energía germinativa y el índice de velocidad de germinación. Las cepas de *Streptomyces* spp. constituyen una alternativa novedosa para mantener e incrementar el crecimiento y la productividad del cultivo de tabaco, a fin de aliviar y mitigar los efectos del estrés por salinidad y sequía.

Palabras clave: Actinomicetos, tabaco, estrés por salinidad y sequía, actividad antagonista.

ABSTRACT. Climate change intensifies the effects of biotic and abiotic stress on plant growth and productivity; drought and salinity are two relevant abiotic inducers that affect agricultural productivity. The antagonistic activity of *Streptomyces* sp. (strains B8, EA2, CB14, CD24) against phytopathogenic fungi isolated from tobacco plants (*Nicotiana tabacum* L.) was evaluated, as well as its *in vitro* tolerance to different concentrations of sodium chloride (NaCl), pH, and polyethylene glycol-600 (PEG), and its effect on the germination of *N. tabacum* L. seeds. The results of the *in vitro* bioassay showed a broad antagonistic spectrum against *Fusarium* spp. and *Phytophthora nicotianae*, which affect tobacco crops. All actinomycetes strains grew under different stress conditions (NaCl, pH, and PEG). The results obtained regarding tobacco seed germination parameters indicate that the best treatment was *Streptomyces* sp. CD24, as it stimulated the germination rate, germination energy, and germination speed index. *Streptomyces* spp. strains constitute a novel alternative to maintain and increase the growth and productivity of tobacco crops, in order to alleviate and mitigate the effects of salinity and drought stress.

Keywords: Actinomycetes, tobacco, salinity and drought stress, antagonistic activity.

Como citar: García-Bernal M, Medina-Marrero R, Morales-Moreno Y, Álvarez-Hernández U, Murillo-Amador B, Mazón-Suástegui JM (2026) Selección de *Streptomyces* sp. para enfrentar el estrés biótico y abiótico en *Nicotiana tabacum* L.. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 13(3): e4984. DOI: 10.19136/era.a13n3.4984.

INTRODUCCIÓN

La asociación de plantas con bacterias benéficas favorece la absorción y la asimilación de nutrientes y mejora su tolerancia al estrés biótico y abiótico (Compant *et al.* 2019). Entre los factores que limitan la producción agrícola, el estrés abiótico es uno de los más relevantes (Wuana y Okieimen 2011), incluyendo el estrés por sequía, que afecta el crecimiento y la productividad de las plantas. El déficit hídrico reduce la división y el alargamiento celular de la planta, limita su potencial hídrico, induce el cierre estomático y daña la maquinaria fotosintética, limitando la fotosíntesis (Sati *et al.* 2023). Por otro lado, el estrés por salinidad en las plantas se produce por una acumulación excesiva de sal en el suelo, que activa mecanismos homeostáticos para contrarrestar el desequilibrio causado por la sal en exceso. Esta activación implica la activación de varios componentes de señalización, incluyendo la vía de la sensibilidad excesiva a la sal (SOS), la vía del ácido abscísico (ABA), las especies reactivas del oxígeno (ROS) y la señalización del estrés osmótico, como respuesta fisiológica para mitigar los efectos nocivos de la salinidad (Rai *et al.* 2023).

En la agricultura se emplean los bioestimulantes para mejorar el desarrollo y crecimiento de los cultivos al incrementar su tolerancia al estrés biótico o abiótico (Dalal *et al.* 2019), contribuyendo además a reducir el uso intensivo de fertilizantes químicos y sus impactos negativos al ambiente (Veobides-Amador *et al.* 2018). Entre ellos, las actinobacterias son el mayor grupo de microorganismos productores de antibióticos y otras sustancias bioactivas (López-Reyes *et al.* 2024), lo que las convierte en una alternativa prometedora para promover el crecimiento vegetal y mejorar la eficiencia de los cultivos. Su creciente aplicación en la agricultura se debe a su capacidad para interactuar beneficiosamente con la rizosfera de la planta (Yadav *et al.* 2018). Por ello, las actinobacterias pueden estimular el crecimiento de las plantas en condiciones de estrés biótico y abiótico, a través de mecanismos como la producción de sideróforos (Terra *et al.* 2021), fitohormonas (Ntemafack *et al.* 2022), enzimas (Díaz-Díaz *et al.* 2022), ácidos orgánicos y fijación de nitrógeno (Fatmawati *et al.* 2019), y la solubilización de fosfatos (Manullang y Chuang 2020), entre otros.

El cultivo del tabaco (*Nicotiana tabacum* L.) tiene gran importancia debido a su alto consumo y valor económico, además de poseer reconocimiento internacional por su calidad (Calero *et al.* 2019). A nivel mundial se busca incrementar su rendimiento mediante el uso de bioproductos de origen natural que permitan satisfacer las necesidades nutricionales de este cultivo, así como obtener niveles adecuados de rendimiento y calidad de sus productos, y con ello lograr reemplazar o minimizar la utilización de fertilizantes químicos (Martínez y Dibut 2012). El objetivo del presente estudio fue seleccionar cepas de *Streptomyces* sp. para dilucidar su potencial como agentes bioestimulantes, en la germinación de semillas de *N. tabacum* L. bajo estrés inducido por salinidad y sequía

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló en el Laboratorio de Microbiología del Centro de Bioactivos Químicos, de la Universidad Central de Las Villas, localizado en Santa Clara, Villa Clara, Cuba (Coordenadas 22.4462° LN, 79.8946° LO).

Aislamiento de hongos fitopatógenos

Los hongos fitopatógenos fueron aislados de la raíz y de la base del tallo de plantas de tabaco *N. tabacum* L., con síntomas de necrosis, pudrición de raíces y tallos, y marchitez generalizada. Se realizaron cortes de tejido de 1 cm², que fueron desinfectados con hipoclorito de sodio al 5% durante 30 s, lavados dos veces con agua destilada estéril y secados con papel de filtro estéril previo a su siembra en placa con agar-agua y cloranfenicol para inhibir la presencia de bacterias. Las placas se incubaron a 28-30 °C durante 48 h y al observar la presencia de hongos, éstos fueron sembrados en APD (agar papa-dextrosa), y se incubaron a 28-30 °C durante 72 h. Tras la observación de crecimiento micelial abundante se realizó un estudio microscópico para identificar el agente causal. A fin de observar las estructuras reproductivas (microconidios, macroconidios, clamidosporas), se utilizó una suspensión de esporas preparada con agua destilada estéril y azul de tripán como tinción (Murugan *et al.* 2020). Enseguida se tomaron y se colocaron muestras en portaobjetos y se observaron al microscopio a 40X, seguido de resiembra en APD e incubación a 28-30 °C para luego conservarlos a 4 °C hasta su utilización.

Actividad antagonica *in vitro* de cepas de *Streptomyces* sp. frente a hongos fitopatogénicos

Las cepas B8, EA2, CB14 y CD24 de *Streptomyces* sp., fueron previamente aisladas de la rizosfera, endófito, sedimento y rizosfera, respectivamente y caracterizadas por Díaz-Díaz *et al.* (2022). A fin de determinar *in vitro* su capacidad antagonista frente a los fitopatógenos ya descritos, éstas se sembraron en placas Petri con ACA (agar-caseína-almidón) a un pH 7 y se incubaron durante siete días a 28 °C para propiciar su crecimiento, esporulación, y producción de metabolitos secundarios. Antes de realizar el ensayo de antagonismo, los hongos fitopatogénicos fueron sembrados en APD e incubados por tres días a temperatura de 28 °C.

El reto de las cepas *Streptomyces* sp. (B8, EA2, CB14 y CD24) frente a los hongos fitopatogénicos se realizó en placas de Petri (diámetro 90 mm) con medio de cultivo APD (Olowe *et al.* 2022). Se colocó un disco de 6 mm de diámetro de micelio del hongo fitopatogénico correspondiente en el centro de la placa. Ese disco fue tomado del crecimiento en placa de Petri inoculada con suspensión micelial en medio de cultivo APD. En los bordes de cada placa se colocaron dos discos con micelio de la cepa de actinomiceto a evaluar. También en el control, se sembraron discos de 6 mm de diámetro del hongo fitopatogénico respectivo al centro de placas de APD sin actinomicetos. Todas las placas se incubaron durante siete días a 28 °C y se midió para cada interacción hongo fitopatogénico-actinomiceto el diámetro del área de inhibición resultante (Misk y Franco 2011). El porcentaje de inhibición del crecimiento radial (PICR) para cada interacción hongo fitopatogénico-actinomiceto para el crecimiento micelial (CM), propuesto por Misk y Franco (2011), se calculó mediante:

$$PICR(\%) = \frac{CM(hongo) - CM(hongo - actinomiceto)}{CM(hongo)} \times 100$$

Preparación de suspensiones de esporas y determinación del número de esporas

Las cepas de actinomicetos se inocularon en medio de cultivo ACA durante 5-7 días a 28 °C. Se añadió glicerol al 20% para facilitar el raspado de esporas. Las suspensiones de esporas se colocaron en tubos Falcon estériles de 50 mL, previa filtración con algodón absorbente estéril. Posteriormente

se realizaron diluciones en agua destilada estéril y se determinó la densidad óptica para estimar la carga microbiana.

Tolerancia de cepas de actinomicetos al estrés abiótico

Para determinar tolerancia de las cepas ensayadas al estrés producido por variaciones de pH, salinidad o sequía se utilizó el medio Gauze No. 1 con diferentes concentraciones de hidrogeniones, cloruro de sodio (NaCl) y polietilenglicol-600 (PEG), respectivamente. Se inoculó por triplicado la superficie del medio con 10 µL de cada cepa con una carga aproximada de 1×10^8 esporas mL⁻¹, se incubó a 28 °C durante 7 días y se registró el crecimiento para cada condición de estrés abiótico evaluada (Zhang *et al.* 2023).

Efecto de las cepas *Streptomyces* spp. en la germinación *in vitro* de *N. tabacum* L.

Se aplicó un diseño experimental completamente al azar, con cuatro tratamientos bacterianos basados en las cepas B8, EA2, CB14 y CD24 de *Streptomyces* sp., y agua destilada como control C, con tres réplicas por tratamiento y 20 semillas por réplica.

Desarrollo experimental

Se utilizó el método de germinación en placas Petri para evaluar el efecto de las cepas de actinobacterias (B8, EA2, CB14, y CD24) sobre la germinación de *N. tabacum* L., utilizando semillas de la variedad H-2000, propiedad del Instituto de Investigaciones del Tabaco, Cuba. Antes del estudio experimental se realizó una prueba de germinación aplicando la metodología ISTA (2014). Las semillas se desinfectaron con hipoclorito de sodio al 1.5% (15 min), lavado con alcohol al 70% (5 min) y múltiples lavados con agua destilada estéril, y secado subsecuente de las semillas en cabina de seguridad biológica (Collado *et al.* 2013).

Posteriormente, las semillas se sumergieron durante 30 min en una suspensión de esporas de actinomicetos (T1: B8, T2: EA2, T3: CB14 y T4: CD24) con una carga bacteriana de 10^8 UFC mL⁻¹ y fueron secadas al aire. Se utilizaron semillas inmersas en agua estéril como grupo control no tratado (C). Las semillas se colocaron en placas Petri conteniendo papel de filtro estéril doble humedecido, a razón de 20 semillas en cada placa y tres réplicas por grupo experimental bacteriano (T) y control (C), e incubadas en la oscuridad a 24 °C. Para determinar las cepas de actinomicetos capaces de incrementar la germinación de semillas de tabaco en condiciones de estrés abiótico, se humedeció el papel filtro con soluciones de NaCl a 100 mmol L⁻¹ y de PEG al 10%. Grupos no tratados con ninguna cepa de actinomiceto fueron igualmente retados con las soluciones de NaCl y PEG, y sirvieron como tratamientos control. Diariamente, los tratamientos (B8, EA2, CB14 y CD24) fueron aplicados en cada placa (1 mL) y agua destilada estéril para el tratamiento control (C).

Variables de Germinación

Durante 14 días se observó y registró la germinación, considerando germinada una semilla cuando la radícula alcanzó un valor cercano a 1 mm de longitud. Al concluir ese periodo, se evaluaron las siguientes variables de respuesta:

$$\text{Porcentaje de germinación (PG): } PG = \frac{\text{semillas germinadas}}{\text{semillas totales}} \times 100$$

Índice de velocidad de germinación (IVG) (Ranal y Santana 2006): $IVG = \sum \left(\frac{n_i}{t_i} \right)$

Dónde: n_i = número de semillas germinadas del día primero al último; t_i = tiempo en días (desde el día de siembra hasta el final de la evaluación).

$$\text{Tiempo medio de germinación (TMG) (Bacchetta et al. 2008): } TMG = \frac{(x_1 d_1) + (x_2 d_2) + \dots + (x_{14} d_{14})}{X_{14}};$$

$$TMG = \frac{\sum (x_i d_i)}{X_{14}}$$

Dónde: x_1, x_2, x_{14} son semillas germinadas (d 1, 2, ..., 14); $d_1, d_2, \dots, d_{14}$ son días de incubación, y X_{14} es el número total de semillas germinadas al día 14 y conclusión del experimento, cuando se realizó el conteo final de las semillas germinadas.

$$\text{Energía germinativa (EG): } EG = \frac{\text{semillas germinadas en el periodo pico de la germinación}}{\text{semillas analizadas}} \times 100$$

$$\text{Tasa de germinación (TG) (Hartmann y Kester 2001): } TG = \frac{n_1}{t_1} + \frac{n_2}{t_2} + \dots + \frac{n_{10}}{t_7}$$

Dónde: $n_1, n_2, \dots, n_{10}$ es el número de semillas germinadas en los tiempos $t_1, t_2, \dots, t_7$.

Análisis estadístico

Se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) y al encontrar diferencia significativa entre tratamientos, se incluyó una prueba de comparación múltiple de medias (Tukey HSD; $P \leq 0.05$). Para estos análisis se utilizó el programa estadístico Statistica v. 10.0 para Windows (StatSoft 2011)

RESULTADOS

Se evaluaron *in vitro* cuatro cepas de *Streptomyces* sp. (B8, EA2, CB14 y CD24), mediante ensayos de cultivo dual frente a varias especies de hongos fitopatógenos aislados de plantas de tabaco *N. tabacum* L. Entre las especies fitopatogénicas estudiadas se incluyeron cuatro cepas de *Fusarium* spp., dos aisladas del tallo del tabaco y dos aisladas de la raíz, así como dos cepas de *Phytophthora nicotianae*, aisladas de la raíz. En la Tabla 1 se muestran las sintomatologías observadas en las plantas de tabaco seleccionadas y los hongos fitopatógenos asociados a esos síntomas.

Tabla 1. Hongos fitopatógenos aislados de la raíz y la base del tallo de plantas de tabaco *Nicotiana tabacum* L., colectadas con evidencia de lesiones, necrosis y marchitez generalizada.

Síntoma	Tejido examinado	Hongo fitopatógeno
Marchitez	Raíz	<i>Fusarium</i> sp. 1
Pudrición del tallo	Raíz, tallo	<i>Fusarium</i> sp. 2
Necrosis en tallo	Raíz, tallo	<i>Fusarium</i> sp. 3
Pudrición de raíz	Raíz, tallo	<i>Fusarium</i> sp. 4
Pudrición de raíz	Raíz, cuello de raíz	<i>Phytophthora nicotianae</i> 1
Marchitez	Tallo	<i>Phytophthora nicotianae</i> 2

Todas las cepas de actinomicetos estudiadas, tuvieron una actividad antagonista de amplio espectro frente a hongos patógenos (*Fusarium* spp. y *P. nicotianae*) aislados de plantas de tabaco, mostrando una actividad inhibitoria en el rango del 2.68 al 100%. La cepa CD24 reveló la mayor actividad antifúngica (100%) frente a la cepa 1 de *P. nicotianae* y 97.17% contra la cepa 3 de *Fusarium* spp., seguido por EA2 (97.04%) frente a la cepa 2 de *P. nicotianae*; mientras que B8 mostró la menor actividad antifúngica (2.68%) contra la cepa 3 de *Fusarium* spp., y 8.19% contra la cepa 4 de *Fusarium* spp., seguido por CD24 (12.22%) frente a la cepa 2 de *Fusarium* spp. (Figura 1).

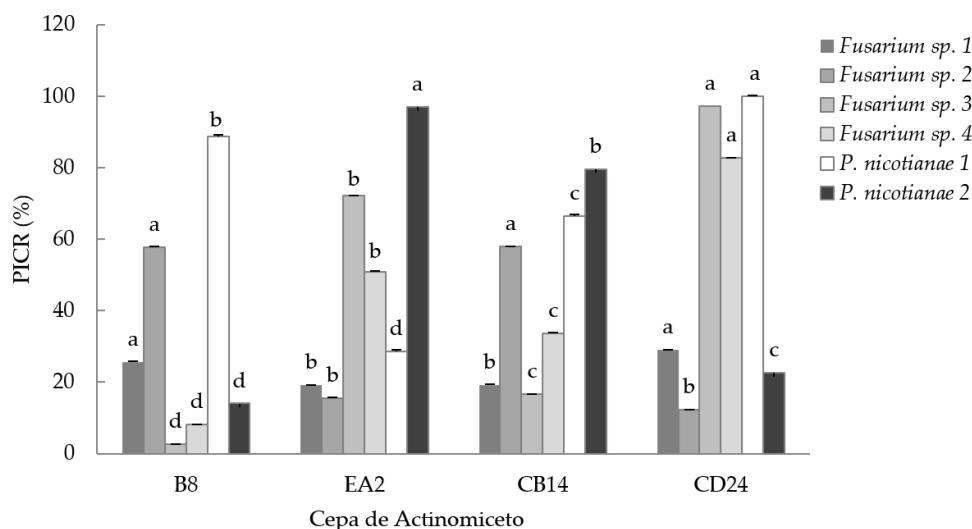


Figura 1. Actividad antagonística de las cepas B8, EA2, CB4 y CD24 de *Streptomyces* sp. frente a hongos fitopatógenos aislados de plantas de tabaco *Nicotiana tabacum* L., en función del porcentaje de inhibición del crecimiento radial (PICR). Letras distintas indican diferencia estadística significativa ($P < 0.05$).

Todas las cepas que se sembraron en medio Gauze No. 1 en presencia de diferentes concentraciones de NaCl (50-400 mmol mL⁻¹) fueron capaces de crecer en todas las concentraciones de NaCl evaluadas (Tabla 2). En la investigación, las cepas evaluadas crecieron bien en todas las concentraciones de PEG evaluadas (0-10%), destacándose las cepas B8 y EA2 por su crecimiento abundante a la más alta concentración evaluada. Estos resultados indican que las cepas B8 y EA2 tienen una potencial aplicabilidad como bioinoculantes naturales y eco-amigables, para aliviar el estrés por sequía en diversas especies vegetales, incluyendo la especie objetivo del presente estudio, que son los cultivares de *N. tabacum* L, un recurso de vital importancia para la economía nacional de Cuba y de otros países latinoamericanos productores de tabaco. Las cepas de *Streptomyces* sp. evaluadas crecieron a un pH de 2 a 10, destacándose las cepas B8 y EA2 por su crecimiento abundante.

Los resultados correspondientes a la evaluación de los efectos de las cepas estudiadas B8, EA2, CB14 y CD24, en condiciones normales y de estrés por salinidad y por sequía sobre el porcentaje de germinación, tasa de germinación, energía germinativa, índice de velocidad de germinación y tiempo medio de germinación para las semillas de *N. tabacum* L., se muestran en la Tabla 3 y Figura 2. Los mejores resultados en función de la germinación de semillas de tabaco en condiciones normales, correspondió al grupo tratado con la cepa CD24 de *Streptomyces* sp. con un porcentaje de

germinación del 90% y una tasa de germinación de 5.2% día⁻¹. Por el contrario, aquellos tratamientos en los que se obtuvo un menor porcentaje y tasa de germinación corresponden a la cepa EA2 (73.3 y 4.0% día⁻¹) y al grupo control (C) sin actinomicetos (75.5 y 4.2% día⁻¹), tal como se presenta en la Tabla 3 y Figura 2.

Tabla 2. Crecimiento de las cepas B8, EA2, CB14 y CD24 de actinomicetos del género *Streptomyces*, bajo diferentes condiciones de estrés.

	Cepa			
	B8	EA2	CB14	CD24
NaCl %	Estrés salino			
50	++	±	±	++
100	++	±	±	±
200	++	±	±	±
400	++	±	±	±
PEG %	Estrés por sequía			
2	++	±	±	±
5	++	±	±	±
10	++	++	±	±
pH				
6	++	++	±	±
7	++	++	±	±
8	++	++	±	±
10	++	++	±	±

++ crecimiento abundante, ± crecimiento escaso, - ausencia de crecimiento.

Tabla 3. Efecto de las cepas B8, EA2, CB14 y CD24 de actinomicetos del género *Streptomyces*, en la germinación *in vitro* de semillas de tabaco *Nicotiana tabacum* L. en condiciones normales y de estrés.

Condición	Cepa	Parámetros			
		PG (%)	EG (%)	IVG	TMG (d)
Normal	B8	82.2 ^{ab}	77.7 ^{ab}	1.7 ^{abc}	5.0 ^a
	EA2	73.3 ^b	68.8 ^{bc}	1.5 ^c	5.2 ^a
	CB14	84.4 ^{ab}	76.6 ^{abc}	1.8 ^{ab}	5.1 ^a
	CD24	90.0 ^a	78.8 ^a	1.9 ^a	4.8 ^a
	Control	75.5 ^b	67.7 ^c	1.6 ^{bc}	5.2 ^a
NaCl 100mM	B8	61.1 ^b	61.2 ^{ab}	1.3 ^b	6.5 ^a
	EA2	61.1 ^b	61.8 ^{ab}	1.3 ^b	6.5 ^a
	CB14	58.8 ^b	58.7 ^b	1.2 ^b	4.8 ^b
	CD24	80.0 ^a	75.5 ^a	1.7 ^a	4.9 ^b
	Control	33.3 ^c	25.5 ^c	0.7 ^c	5.1 ^b
PEG 10%	B8	88.8 ^a	83.3 ^a	1.9 ^a	4.7 ^a
	EA2	86.6 ^a	81.1 ^a	1.8 ^a	4.2 ^a
	CB14	78.8 ^{ab}	72.2 ^{ab}	1.6 ^{ab}	4.8 ^a
	CD24	81.1 ^{ab}	77.7 ^{ab}	1.7 ^{ab}	4.4 ^a
	Control	70.0 ^b	65.5 ^b	1.5 ^b	4.3 ^a

PG %: porcentaje de germinación, EG: energía germinativa, IVG: índice de velocidad de germinación, TMG: tiempo medio de germinación. Letras iguales dentro de una misma columna indica valores estadísticamente iguales (Tukey $P \leq 0.05$).

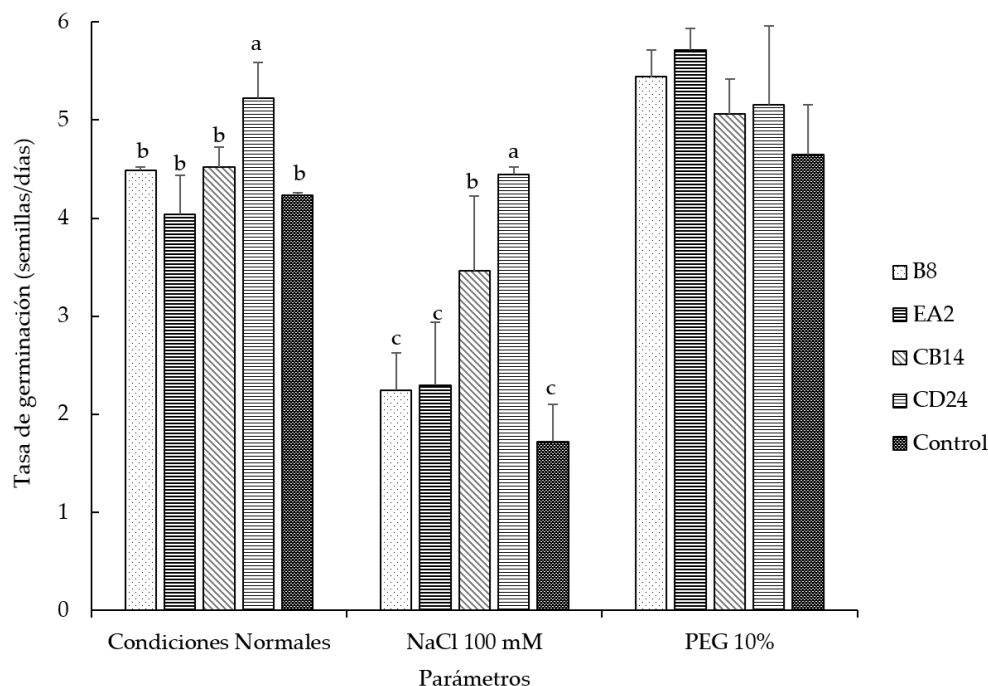


Figura 2. Efecto de tratamientos basados en cepas de *Streptomyces* sp. (B8, EA2, CB4 y CD24) y control (Agua destilada estéril) en la tasa de germinación, de semillas de tabaco *Nicotiana tabacum* L. Letras distintas indican diferencia estadística significativa ($P < 0.05$).

Con relación a la energía germinativa y al índice de velocidad de germinación, los mejores resultados se observaron en el grupo experimental tratado con la cepa de *Streptomyces* sp. CD24, con valores de 78.8 y 1.9%, respectivamente. Estos valores fueron significativamente superiores a los observados en el grupo tratado con EA2 (68.8 y 1.5%, respectivamente) y en el grupo control (67.7 y 1.6%, respectivamente), tal como puede observarse en la Tabla 3. No se registraron diferencias significativas entre grupos experimentales con respecto al tiempo medio de germinación (TMG), pero el grupo tratado con la cepa CD24 presentó el menor valor de TMG (4.8 días). Bajo las condiciones de salinidad evaluadas, el empleo de cepas de actinomicetos estimuló el porcentaje de germinación de las semillas de tabaco, con diferencias significativas con relación al grupo control (C) no tratado, destacándose el tratamiento con la cepa *Streptomyces* sp. CD24 con un PG de 80%. Con relación a la TG, el grupo tratado con esta cepa CD24, mostró diferencias significativas con relación a los demás grupos tratados y al grupo control. El grupo control sin aplicación de actinomicetos presentó el valor menor de TG (4.4). Con respecto a la EG, el grupo tratado con CD24 mostró diferencias significativas con respecto al grupo tratado con CB14 y al grupo control, y derivado de su aplicación se obtuvo el valor mayor de energía germinativa (75.5%).

El IVG del grupo tratado con CD24 fue estadísticamente superior (1.9) con respecto a los demás grupos experimentales. En condiciones de salinidad, los grupos tratados con CD24, CB14 y el control C, mostraron valores de TMG inferiores (4.9, 4.8 y 5.1), respectivamente.

El experimento de estrés por sequía se simuló utilizando suelos suplementados con 10% (p/v) PEG, y en este caso hubo diferencias significativas con respecto al porcentaje de germinación entre los grupos tratados con las cepas EA2 y B8. Con relación a la TG y al TMG, no hubo diferencias

significativas entre grupos experimentales, siendo los grupos tratados con las cepas B8 y EA2 los de mejor desempeño con relación a la TG. El TMG fue superior en los grupos tratados con las cepas CB14 y B8. Con relación a los parámetros de EG e IVG, las cepas B8 y EA2 mostraron diferencias significativas con respecto al grupo control no tratado.

DISCUSIÓN

La sequía y la salinización del suelo están aumentando a nivel global, provocando reducciones en el rendimiento y la productividad de los cultivos. En este contexto, los bioestimulantes juegan un papel beneficioso ya que interactúan positivamente con las plantas, mejorando su eficiencia nutricional y tolerancia al estrés biótico y abiótico (De-Souza *et al.* 2015). Además, reduce el uso de agroquímicos, contribuye al desarrollo y la consolidación de una agricultura más eficiente, productiva, sostenible y menos contaminante (Meena *et al.* 2025). El uso de actinobacterias en la agricultura se ha incrementado debido a su amplia distribución en las plantas, ya que están presentes en la rizosfera y como endófitos. En un estudio realizado por Díaz-Díaz *et al.* (2022), se demostró que este grupo de microorganismos tiene capacidad para mejorar el cultivo del frijol *Phaseolus vulgaris*.

Las enfermedades de las plantas causadas por hongos patógenos son responsables de importantes pérdidas de cosechas en todo el mundo (Petkova *et al.* 2022). En la presente investigación los hongos aislados en las plantas de tabaco muestreadas que presentaron síntomas, correspondieron al grupo de *Phytophthora nicotianae* y *Fusarium* spp. Entre los patógenos fúngicos, aquellos que contienen quitina como *Fusarium solani*, *Rhizoctonia solani* y *Alternaria solani*, inducen daños en el tabaco como la pudrición de la raíz y el tallo y dejan manchas de color marrón (Raza *et al.* 2013). Del mismo modo, la enfermedad comúnmente conocida como “pata prieta” cuyo agente causal es el fitopatógeno del suelo *P. nicotianae* Breda de Haan, es considerada como la principal problemática fitosanitaria del cultivo del tabaco (*N. tabacum* L.), debido a las grandes pérdidas económicas que provoca (Toledo 2014). Al respecto, Sosa-Sánchez *et al.* (2022), en un estudio enfocado a *N. tabacum*, caracterizaron en medio de cultivo PDA, aislamientos de *Fusarium* spp. con pigmentación variable de blanco cremoso y violeta, en colonias de textura algodonosa y bordes regulares, además de la formación de macroconidios de tamaño equiparable. Petkova *et al.* (2022) evaluaron la cepa *Streptomyces kudriavzevii* YSW1, la cual demostró actividad antifúngica contra patógenos del tabaco, como *A. solani* pathovar. tobacco, *R. solani* y *F. solani* pathovar. phaseoli.

Las enfermedades transmitidas por el suelo y causadas por bacterias u hongos ocurren con frecuencia en los cultivos agrícolas y las enfermedades vasculares como la marchitez bacteriana del tabaco, la pata prieta y la pudrición de la raíz son frecuentes en el tabaco. La pata prieta y marchitez bacteriana del tabaco dos de las principales enfermedades transmitidas por el suelo y causadas por *P. nicotianae* y *R. solanacearum*, respectivamente (Ma *et al.* 2018). Estas enfermedades causan graves pérdidas económicas, lo que resulta en el agotamiento de los nutrientes, la necrosis de la raíz, la marchitez de la hoja y la reducción del vigor de crecimiento (Wei *et al.* 2024). Esto indica que es prioritario buscar nuevas alternativas biológicas y eco-amigables para disminuir el uso de productos químicos sintéticos y, por lo tanto, atenuar estos problemas de manera efectiva.

Varios estudios han demostrado el potencial de las actinobacterias del género *Streptomyces* contra una amplia diversidad de hongos patógenos del suelo (Díaz-Díaz *et al.* 2022, 2023). Singh *et al.* (2016) evaluaron la actividad antifúngica de 80 cepas de actinobacterias frente a *C. truncatum*, *F. oxysporum*, *M. phaseolina* y *S. rolfii*, destacándose la cepa ACITM-1 de *Streptomyces* spp. por su acción inhibitoria del crecimiento micelial de todos los agentes patogénicos evaluados. Los miembros de este género son de gran interés como inoculantes microbianos debido a su amplio metabolismo secundario, ya que producen más del 70% de los productos naturales utilizados actualmente en medicina y en agricultura (Alam *et al.* 2022). Estas sustancias pueden inhibir el crecimiento de microorganismos patógenos a través de múltiples mecanismos antibióticos y enzimáticos, que pueden degradar la pared celular o inducir una mayor resistencia del huésped (Le *et al.* 2021).

Existen varias especies de *Streptomyces* que han sido registradas como productos comerciales (Vurukonda *et al.* 2018). En la actualidad se comercializan algunas formulaciones obtenidas a partir de especies de *Streptomyces*, como por ejemplo Mycostop® y Actinovate®, los cuales se han explotado comercialmente durante mucho tiempo. Mycostop® (cepa K61 de *S. griseoviridis*) y Actinovate®, elaborado a partir de la cepa *S. lydicus* WYEC 108 con actividad antifúngica frente a *Pythium ultimum* y *R. solani*, tienen esas capacidades antifúngicas, además de que pueden promover el crecimiento y la productividad de las plantas (Vurukonda *et al.* 2018).

Se sabe que las actinobacterias pueden ser utilizadas como bioinoculantes, siendo una alternativa ecológica a los fertilizantes químicos, para mitigar factores de estrés como pH, salinidad, temperatura y sequía en diversos cultivos (Chen *et al.* 2018). Con ese antecedente, y con el fin de evaluar los potenciales beneficios de la aplicación de las cepas B8, EA2, CB14 y CD24 de *Streptomyces* sp., seleccionadas por su actividad promotora del crecimiento en cultivos afectados por la salinidad, sequía y pH, se realizó un estudio de rangos de NaCl y PEG tolerados por estos microorganismos, así como del valor óptimo de pH para su crecimiento. Los resultados indican la naturaleza halotolerante de las cepas actinobacterianas estudiadas y confirman su capacidad para soportar diversos niveles de estrés por salinidad, destacándose la cepa B8 de *Streptomyces* sp., que tuvo un crecimiento abundante con 400 mmol mL⁻¹ de NaCl. García-Bernal *et al.* (2015) demostraron que tres cepas de *Streptomyces* sp. (N7, RL8 y V4) aisladas de sedimentos marinos mostraron un buen crecimiento a concentraciones de 0 a 10% de NaCl, con excepción de la cepa RL8 que requirió una concentración de NaCl mayor de 0.6%. El PEG se ha utilizado ampliamente para estudiar la respuesta de los cultivos ante el estrés hídrico durante la etapa de germinación (Basu *et al.* 2010). La capacidad de diversas bacterias para crecer en este medio de cultivo determina su capacidad para sobrevivir y crecer en ambientes con baja disponibilidad de agua (Bhatt *et al.* 2015). Mientras que Marasco *et al.* (2012) reportaron que todas las bacterias evaluadas durante su estudio toleraron concentraciones de 10 y 20% de PEG.

El pH influye tanto en la supervivencia como en el crecimiento de los microorganismos. El rango de pH en el cual crecen las bacterias del suelo es de 4 a 9, siendo el óptimo de 6.5 a 7.5 (Akond *et al.* 2016). Krishnan y Sampath-Kumar (2015) informaron sobre el crecimiento de varias cepas de *Streptomyces* a valores de pH entre 4.3 y 7.3, mientras que, Ripa *et al.* (2009) reportaron que *Streptomyces werraensis*, *S. luteogriseus* y *S. pseudovenezuelae* crecieron a un pH de 11, lo cual puede ser ventajoso para favorecer el crecimiento de las plantas en ambiente alcalino. En otro estudio con

cepas de actinomicetos, García-Bernal *et al.* (2015) reportaron que las cepas RL8, N7 y V4 aisladas de sedimentos marinos, tuvieron un comportamiento similar a diferentes valores de pH, y no mostraron crecimiento a valores de 1 a 3, pero crecieron a valores de pH superiores a 3.

El tabaco es un cultivo comercial de la mayor relevancia y valor en el mundo (Budzianowski 2015). Sin embargo, los recientes cambios climáticos han intensificado las condiciones de sequía y salinidad, lo que dificulta considerablemente el cultivo de esta planta (Chaudhry y Sidhu 2022). Muchas bacterias pertenecientes al género *Streptomyces* tienen aplicación agrícola como agentes de control biológico (Pacios-Michelena *et al.* 2021), lo cual coincide con los resultados de la presente investigación.

Se sabe que varias especies endófitas de *Streptomyces*, como *S. rimosus*, *S. viridis* y *S. olivaceoviridis*, producen ácido indol acético (AIA), lo que favorece el crecimiento de las plantas hospedantes al aumentar la germinación de sus semillas, así como la elongación y el peso seco de sus raíces (Khamna *et al.* 2010). Estudios previos realizados por García-Bernal *et al.* (2025) mostraron que las cepas EA2 y B8 de *Streptomyces* sp. pudieron producir AIA a concentraciones de 8.31 y 4.15 $\mu\text{g mL}^{-1}$ respectivamente, lo que sugiere un potencial bioactivo para dichas cepas de actinobacterias. Estudios de Cinkocki *et al.* (2021) reportan que los actinomicetos endófitos productores de AIA, incluidos *Streptomyces atrovirens*, *S. olivaceoviridis*, *S. rimosus*, *S. rochei* y *S. viridis*, mejoraron significativamente la germinación de las semillas, la elongación de la raíz y el crecimiento, en plantas de nabo *Brassica napus* L. Esto confirma que una cantidad importante de actinomicetos del género *Streptomyces* tiene un efecto positivo en la germinación de las semillas de diferentes especies vegetales, debido a la morfología de su micelio, que le permite colonizar rápidamente las plantas y producir metabolitos secundarios beneficiosos en gran cantidad (Boruta 2021).

La salinidad es por igual, un factor condicionante en la germinación de las semillas. En suelo salino, las plantas están bajo un elevado riesgo de mortalidad asociado al estrés y otros factores abióticos relacionados (Kumar *et al.* 2022). La salinidad inhibe la germinación de las semillas de dos maneras, ya sea causando la inhibición completa si el nivel de salinidad supera el límite de tolerancia de la especie, o bien, retrasando el proceso germinativo hasta que la concentración de sal en el suelo pueda disminuir y resultar tolerable (Ungar 1995). Es ampliamente conocido que las etapas más críticas en el ciclo biológico de los cultivos son la germinación y el establecimiento de las plántulas, de manera tal que solo aquellas que son capaces de superar la primera fase pueden sobrevivir en terrenos salinos (Donohue *et al.* 2010). Esto significa que aun cuando la salinidad reduce por lo general el porcentaje de germinación, la tolerancia al estrés salino varía con la especie y es el resultado de la combinación de diversos factores, como la luz, la temperatura y la humedad (Noe y Zedler 2000).

Es conocido que los actinomicetos producen varias sustancias que contribuyen al crecimiento de las plantas, incluyendo fitohormonas, enzimas hidrolíticas y metabolitos secundarios (Liu *et al.* 2019). Durante la germinación, las reservas de alto peso molecular en los órganos de almacenamiento de la semilla se convierten en formas transportables hacia los tejidos metabolizados y en crecimiento, donde se utilizan para producir energía y sucesos sintéticos (Ma *et al.* 2017). Los principales tipos de estas reservas de almacenamiento en las semillas son el almidón y las proteínas, cuya conversión a formas transportables es acompañada por la activación de

enzimas hidrolíticas, incluyendo amilasas y proteasas. Las amilasas incrementan la disponibilidad de asimilación del almidón mediante su hidrólisis en glucosa (Fatema *et al.* 2017). Los otros grupos de enzimas son proteasas que desempeñan un papel muy relevante durante la germinación, en la movilización de proteínas almacenadas en las semillas como aminoácidos libres, que se utilizan para construir las proteínas y enzimas necesarias para el embrión en crecimiento (Ashraf *et al.* 1995). Por otro lado, los microorganismos productores de enzimas hidrolíticas desempeñan un rol crucial en la descomposición de materia orgánica y mineralización de nutrientes, actuando como coadyuvantes y promotores del crecimiento de las plantas. En un estudio enfocado a esta temática, realizado por Díaz-Díaz *et al.* (2022), se demostró que las cepas utilizadas en la investigación produjeron enzimas extracelulares con acción celulolítica, quitinolítica y proteolítica.

CONCLUSIONES

Los bioestimulantes actinobacterianos son efectivos para acelerar los tiempos de germinación y promueven la agricultura sostenible al reducir la dependencia (uso y abuso) de fertilizantes y pesticidas químicos. Derivado de los bioensayos realizados, se concluye que los mejores resultados se obtuvieron con la cepa CD24 de *Streptomyces* sp., ya que jugó un papel significativo en la atenuación del estrés por salinidad y sequía, así como en la germinación de semillas de tabaco *Nicotiana tabacum* L. Esta cepa puede considerarse un bioestimulante eco-amigable con gran potencialidad para la práctica de una agricultura sustentable, y su aplicación podría tener beneficios de gran alcance para otras especies de interés agrícola.

AGRADECIMIENTOS

El estudio fue financiado por el Proyecto Sectorial de Ciencia, Tecnología e Innovación “Salud Animal y Vegetal” (PSSAV) 2024-2026, Cuba, titulado “Desarrollo de un novedoso agente bioestimulante para el crecimiento de plántulas de *Nicotiana tabacum* L.” en semilleros, código PS223my003-139, cuyo responsable académico es RMM. Se agradece el apoyo de Marlen Casanova González y René Dionisio Cupull-Santana, adscritos al Centro de Bioactivos Químicos (UCLV-Cuba).

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

Akond MA, Jahan MN, Sultana N, Rahman F (2016) Effect of temperature, pH and NaCl on the isolates of actinomycetes from straw and compost samples from Savar, Dhaka, Bangladesh. American Journal of Microbiology and Immunology 1(2): 10-5.

- Alam K, Mazumder A, Sikdar S, Zhao YM, Hao J, Song C, Wang Y, Sarkar R, Islam S, Zhang Y, Li A (2022) *Streptomyces*: The biofactory of secondary metabolites. *Frontiers in Microbiology* 13: 968053. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.968053>
- Ashraf MY, Azmi AR, Khan AH, Naqvi SSM (1995) Alpha-amylase and protease activities of wheat seedling grown under water stress conditions. *Biological Sciences – PJSIR* 38(11-12): 430-434.
- Bacchetta G, Bueno Sánchez A, Fenu G, Jiménez-Alfaro B, Mattana E, Piotto B, Virevaire M (2008) *Conservación ex situ* de plantas silvestres. Ed. Jardín Botánico Atlántico, Principado de Asturias – La Caixa. 375p.
- Basu S, Roychoudhury A, Saha PP, Sengupta DN (2010) Comparative analysis of some biochemical responses of three indica rice varieties during polyethylene glycol-mediated water stress exhibits distinct varietal differences. *Acta Physiologiae Plantarum* 32: 551-563. <https://doi.org/10.1007/s11738-009-0432-y>
- Bhatt RM, Selvakumar G, Upreti KK, Boregowda P (2015) Effect of biopriming with *Enterobacter* strains on seed germination and seedling growth of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) under osmotic stress. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences* 85(1): 63-69. <https://doi.org/10.1007/s40011-014-0333-8>
- Boruta T (2021) A bioprocess perspective on the production of secondary metabolites by *Streptomyces* in submerged co-cultures. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 37: 171. <https://doi.org/10.1007/s11274-021-03141-z>
- Budzianowski J (2015) Tobacco against ebola virus disease. *Przegląd Lekarski* 72(10): 567–571.
- Calero A, Quintero E, Pérez Y, Oliviera D, Peña K (2019) Influencia de dos bioestimulantes en el comportamiento agrícola del cultivo del tabaco (*Nicotiana tabacum* L.). *Revista de la Facultad de Ciencias* 8(1): 31-44. <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v8n1.73546>
- Chaudhry S, Sidhu G (2022) Climate change regulated abiotic stress mechanisms in plants: a comprehensive review. *Plant Cell Reports* 41: 1–31. <https://doi.org/10.1007/s00299-021-02759-5>
- Chávez-González M, Arredondo Valdés R, Ascacio Valdés JA, Govea Salas M, Ilyina A (2021) Application of *Streptomyces* antimicrobial compounds for the control of phytopathogens. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 5: 696518. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.696518>
- Chen Y, Zhou D, Qi D, Gao Z, Xie J, Luo Y (2018) Growth promotion and disease suppression ability of a *Streptomyces* sp. CB-75 from banana rhizosphere soil. *Frontiers in Microbiology* 8: 2704. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02704>
- Cinkocki R, Lipkova N, Javorekova S, Petrova J, Makova J, Medo J, Ducsay L (2021) The impact of growth-promoting streptomycetes isolated from rhizosphere and bulk soil on oilseed rape (*Brassica napus* L.) growth parameters. *Sustainability* 13(10): 5704. <https://doi.org/10.3390/su13105704>
- Collado R, Veitia N, Bermúdez-Caraballoso I, García LR, Torres D, Romero C, Rodríguez Lorenzo JL, Angenon G (2013) Efficient in vitro plant regeneration via indirect organogenesis for different common bean cultivars. *Scientia Horticulturae* 153: 109-116. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.02.007>
- Compant S, Samad A, Fais H, Sessitsch A (2019) 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>
- Dalal A, Bourstein R, Haish N, Shenhar I, Wallach R, Moshelion M (2019) Dynamic physiological phenotyping of drought-stressed pepper plants treated with ‘productivityenhancing’ and ‘survivability-enhancing’ biostimulants. *Frontiers in Plant Science* 905(10): 2-3. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00905>

- De-Souza R, Ambrosini A, Passaglia LMP (2015) Plant growth promoting bacteria as inoculants in agricultural soils. *Genetics and Molecular Biology* 38: 401-419. <https://doi.org/10.1590/S1415-475738420150053>
- Díaz-Díaz M, Bernal-Cabrera A, Trapero A, Jiménez-González A, Medina-Marrero R, Cupull-Santana RD, Águila-Jiménez E, Agustí-Brisach C (2023) Biocontrol of root rot complex disease of *Phaseolus vulgaris* by *Streptomyces* sp. strains in the field. *Crop Protection* 165: 106164. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2022.106164>
- Díaz-Díaz M, Bernal-Cabrera A, Trapero A, Medina-Marrero R, Sifontes-Rodríguez S, Cupull-Santana RD, García-Bernal M, Agustí-Brisach C (2022) Characterization of actinobacterial strains as potential biocontrol agents against *Macrophomina phaseolina* and *Rhizoctonia solani*, the main soil-borne pathogens of *Phaseolus vulgaris* in Cuba. *Plants* 11: 645. <https://doi.org/10.3390/plants11050645>
- Donohue K, Rubio de Casas R, Burghardt L, Kovach K, Willis CG (2010) Germination, post germination adaptation, and species ecological ranges. *Annual review of ecology, evolution, and systematics* 41(1): 293-319. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102209-144715>
- Fatema, Khan ZH, Khan, ND, Mular SM (2017) Determination of amylase activity from germinated *Syzygium cumini* seed (jamun). *International Journal of Applied Research* 3(1): 573-575.
- Fatmawati U, Meryandini A, Nawangsih AA, Wahyudi AT (2019) Screening and characterization of actinomycetes isolated from soybean rhizosphere for promoting plant growth. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity* 20: 2970-2977. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d201027>
- García-Bernal M, Campa-Córdova ÁI, Saucedo PE, González MC, Marrero RM, Mazón-Suástegui JM (2015) Isolation and *in vitro* selection of actinomycetes strains as potential probiotics for aquaculture. *Veterinary world* 8(2): 170 <https://doi.org/10.14202/vetworld.2015.170-176>
- García-Bernal M, Medina-Marrero R, Cuevas-Hernández L, Álvarez-Hernández U, Ojeda-Silvera CM, Batista-Sánchez D, Mazón-Suástegui JM (2025) Actinomicetos promueven crecimiento en plántulas de *Nicotiana tabacum* L. *Terra Latinoamericana* 43: 1-11. e1981. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.1981>
- Hartmann H, Kester F (2001) *Propagación de plantas, principios y prácticas*. Editorial Continental. México. 760p.
- ISTA (2010) Rules proposals for the International Rules for Seed Testing 2010 Edition. OM Rules Proposals for the International Rules for Seed Testing 2010 Edition.doc. Approved by ECOM Decision. No.498. International Seed Testing Association. Bassersdorf, Switzerland: ISTA.
- Khamna S, Yokota A, Peberdy JF, Lumyong S (2010) Indole-3-acetic acid production by *Streptomyces* sp. isolated from some thai medicinal plant rhizosphere soils. *Euro Asian Journal of Biological Science* 4: 23-32. <https://doi.org/10.5053/ejobios.2010.4.0.4>
- Krishnan A, Sampath-Kumar S (2015) Optimization of alpha amylase extracted from marine actinomycetes-*Streptomyces gancidicus* ASD-KT852565. *International Research Journal of Pharmacy* 6: 729-882 35. <https://doi.org/10.7897/2230-8407.0610142>
- Kumar A, Gautam RD, Singh S, Chauhan R, Kumar A, Singh S (2022) Comparative study of the effects of different soluble salts on seed germination of wild marigold (*Tagetes minuta* L.). *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants* 31: 100421. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2022.100421>
- Le KD, Kim J, Nguyen HT, Yu NH, Park AR, Lee CW, Kim JC (2021) *Streptomyces* sp. JCK-6131 protects plants against bacterial and fungal diseases via two mechanisms. *Frontiers in Plant Science* 12: 726266. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.726266>
- Liu D, Yan R, Fu Y, Wang X, Zhang J, Xiang W (2019) Antifungal, plant growth-promoting, and genomic properties of an endophytic actinobacterium *Streptomyces* sp. NEAU-S7GS2. *Frontiers in Microbiology* 10: 2077. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02077>

- López-Reyes PK, De la Torre-Zavala S, Cortés-González MM, Galán-Wong LJ, Avilés-Arnaut H (2024) Biological control of *Streptomyces* sp. PR69 against *Phytophthora capsici* and its growth-promoting effects on plants. *Horticulturae* 10: 1365. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10121365>
- Ma Z, Bykova NV, Igamberdiev AU (2017) Cell signaling mechanisms and metabolic regulation of germination and dormancy in barley seeds. *The Crop Journal* 5(6): 459–77. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2017.08.007>
- Ma L, Zhang HY, Zhou XK, Yang CG, Zheng SC, Duo L, Mo MH (2018) Biological control tobacco bacterial wilt and black shank and root colonization by bioorganic fertilizer containing bacterium *Pseudomonas aeruginosa* NXHG29. *Applied Soil Ecology* 129: 136–144. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.05.011>
- Manullang W, Chuang H (2020) *Streptomyces* sp. mitigates abiotic stress response and promotes plant growth. *Journal of Plant Protection Research* 60(3): 263–274. <https://doi.org/10.24425/jppr.2020.133955>
- Marasco R, Rolli E, Ettoumi B, Vigani G, Mapelli F, Borin S, Abou-Hadid AF, El-Behairy UA, Sorlini C, Cherif A, Zocchi G, Daffonchio D (2012) A drought resistance promoting microbiome is selected by root system under desert farming. *PloS One* 7(10): e48479. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0048479>
- Martínez-Viera R, Dibut A. (2012) Biofertilizantes bacterianos. Editorial científico técnica, La Habana, Cuba. 279p.
- Meena DC, BIRTHAL PS, Kumara TK (2025) Biostimulants for sustainable development of agriculture: a bibliometric content analysis. *Discover Agriculture* 3(1): 2. <https://doi.org/10.1007/s44279-024-00149-5>
- Misk A, Franco C (2011) Biocontrol of chickpea root rot using endophytic actinobacteria. *BioControl* 56(5): 811–822. <https://doi.org/10.1007/s10526-011-9352-z>
- Murugan L, Krishnan N, Venkataravanappa V, Saha S, Mishra AK, Sharma BK, Rai AB (2020) Molecular characterization and race identification of *Fusarium oxysporum* f. Sp. *Lycopersici* infecting tomato in India. *3 Biotech* 10(11): 486. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02475-z>
- Noe GB, Zedler JB (2000) Differential effects of four abiotic factors on the germination of salt marsh annuals. *American Journal of Botany* 87(11): 1679–1692. <https://doi.org/10.2307/2656745>
- Ntemafack A, Ahmed S, Kumar A, Chouhan R, Kapoor N, Bharate SB, Hassan QP, Gandhi G (2022) Plant growth promoting potential of butyl isobutyl phthalate and *Streptomyces* sp. from *Rumex dentatus* on rice. *Applied Microbiology and Biotechnology* 106: 2603–2617. <https://doi.org/10.1007/s00253-022-11862-w>
- Olowe OM, Nicola L, Asemoloye MD, Akanmu AO, Sobowale AA, Babalola OO (2022) Characterization and antagonistic potentials of selected rhizosphere *Trichoderma* species against some *Fusarium* species. *Frontiers in Microbiology* 13: 985874. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.985874>
- Pacios-Michelena S, Aguilar González C N, Alvarez-Perez OB, Rodríguez-Herrera R, Petkova M, Petrova S, Spasova-Apostolova V, Naydenov M (2022) Tobacco plant growth-promoting and antifungal activities of three endophytic yeast strains. *Plants* 11: 751. <https://doi.org/10.3390/plants11060751>
- Rai GK, Mishra S, Chouhan R, Mushtaq M, Chowdhary AA, Rai PK, Kumar RR, Kumar P, Perez-Alfocea F, Colla G (2023) Plant salinity stress, sensing, and its mitigation through WRKY. *Frontiers in Plant Science* 14: 1238507. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1238507>
- Ranal MA, Santana DG (2006) How and why to measure the germination process? *Brazilian Journal of Botany* 29: 1–11. <https://doi.org/10.1590/S0100-84042006000100002>
- Raza M, Ghazanfar MU, Hussain M, Iqbal Z, Iftikhar Y (2013) Pathogenic and non-pathogenic fungi isolated from soil and roots of tobacco. *Pakistan Journal of Phytopathology* 25: 95–100.
- Ripa F, Nikkon F, Zaman S, Khondkar P (2009) Optimal conditions for antimicrobial metabolites production from a new *Streptomyces* sp. RUPA-08PR isolated from bangladeshi soil. *Mycobiology* 37(3): 211–214. <https://doi.org/10.4489/MYCO.2009.37.3.211>

- Sati D, Pande V, Pandey SC, Samant M (2023) Recent advances in PGPR and molecular mechanisms involved in drought stress resistance. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 23: 106-124. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00724-5>
- Singh C, Parmar RS, Kumar A, Jadon P (2016) Characterization of actinomycetes against phytopathogenic fungi of *Glycine max* (L.). *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research* 9(1): 216-219.
- Sosa-Sánchez O, Romero-Bastidas M, Silva-Pupo JJ, Gaibor-Fernández R, Rodríguez-Rodríguez S, Ceiro-Catasú W (2022) Caracterización cultural-morfométrica como herramienta para la identificación de *Fusarium* spp., asociado a *Nicotiana tabacum* L. *Agronomía Costarricense* 46(1): 111-128. <https://doi.org/10.15517/rac.v46i1.49872>
- Statsoft (2011) STATISTICA User's Guide. Version 8. SAS Inst., Cary, NC. USA. 1098p.
- Terra L, Dyson P, Ratcliffe N, Castro HC, Vicente ACP (2021) Biotechnological potential of *Streptomyces* siderophores as new antibiotics. *Current Medicinal Chemistry* 28(7): 1407-1421. <https://doi.org/10.2174/0929867327666200510235512>
- Toledo V (2014) Compatibilidad del control biológico de *Trichoderma* frente a fungicidas utilizados en el cultivo del tabaco. *CUBA TABACO*. 15(1): 3-9.
- Ungar IA (1995) Seed germination and seed-bank ecology in halophytes. In: Kigel J, Galili G (eds) *Seed development and germination*. Marcel Dekker, Inc. New York. pp. 599-628.
- Veobides-Amador H, Guridi-Izquierdo F, Vázquez-Padrón V (2018) Las sustancias húmicas como bioestimulantes de plantas bajo condiciones de estrés ambiental. *Cultivos Tropicales* 39(4): 102-109
- Vurukonda SSKP, Giovanardi D, Stefani E (2018) Plant growth promoting and biocontrol activity of *Streptomyces* spp. as endophytes. *International Journal of Molecular Sciences*. 19(4): 952. <https://doi.org/10.3390/ijms19040952>
- Wei C, Liang J, Wang R, Chi L, Wang W, Tan J, Shi H, Song X, Cui Z, Xie Q, Cheng D, Wang X (2024) Response of bacterial community metabolites to bacterial wilt caused by *Ralstonia solanacearum*: a multi-omics analysis. *Frontiers in Plant Science* 14: 1339478. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1339478>
- Wuana RA, Okieimen FE (2011) Heavy metals in contaminated soils: A review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *International Scholarly Research Notices* 402647: 20. <https://doi.org/10.5402/2011/402647>
- Yadav AN, Verma P, Kumar S, Kumar V, Kumar M, Sugitha TC, Singh BP, Saxena AK, Dhaliwal HS (2018) Actinobacteria from rhizosphere: molecular diversity, distributions, and potential biotechnological applications. In: Singh BP, Kumar-Gupta V, Kumar-Passari A (eds) *New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering*. Elsevier. pp. 13-41. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63994-3.00002-3>
- Zhang H, Bai X, Han H, Han L (2023) Stress-resistance and growth-promoting characteristics and effects on vegetable seed germination of *Streptomyces* sp. strains isolated from wetland plant rhizospheres. *Current Microbiology* 80: 190. <https://doi.org/10.1007/s00284-023-03297-x>