



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

**EVALUACIÓN DEL EFECTO ANTAGONISTA DE ACTINOMICETOS SOBRE
Moniliophthora roreri Y LA PRODUCCIÓN DE PROMOTORES DEL CRECIMIENTO
VEGETAL**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS AMBIENTALES

PRESENTA:

BIOL. EDUARDO ARTURO CALLES MORENO

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

M.C.A. ROSA MARTHA PADRÓN LÓPEZ

EN CODIRECCIÓN:

DRA. LUCERO VÁZQUEZ CRUZ

VILLAHERMOSA, TABASCO, A 25 FEBRERO DEL 2026

Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Villahermosa, Tabasco, el día 10 del mes 09 del año 2025, el que suscribe Eduardo Arturo Calles Moreno alumno del Programa de Maestría en Ciencias Ambientales con número de matrícula 232G25001 adscrito a la División Académica de Ciencias Biológicas, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autores de la Tesis presentada para la obtención del grado académico Maestro en Ciencias Ambientales y titulada Evaluación del efecto antagonista de actinomicetos sobre *Moniliophthora roreri* y la producción de promotores del crecimiento vegetal dirigida por Rosa Martha Padrón López y Lucero Vázquez Cruz

DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente

Villahermosa, Tabasco a 10 de septiembre del 2025

Nombre y Firma

Eduardo Arturo Calles Moreno





**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



2020
Margarita
Maza

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

FEBRERO 03 DE 2026

**C. EDUARDO ARTURO CALLES MORENO
PAS. DE LA MAESTRIA EN CIENCIAS AMBIENTALES
P R E S E N T E**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 74 al 77 del Cap. IV del Reglamento General de Estudios de Posgrado de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales titulado: **"EVALUACIÓN DEL EFECTO ANTAGONISTA DE ACTINOMICETOS SOBRE MONILIOPTHORA RORERI Y LA PRODUCCIÓN DE PROMOTORES DEL CRECIMIENTO VEGETAL"**, asesorado por la MCA. Rosa Martha Padrón López y Dra. Lucero Vázquez Cruz, sobre el cual sustentará su Examen de Grado, cuyo jurado integrado por el Dr. Eder Ramos Hernández, Dra. Ena Edith Mata Zayas, MCA. Rosa Martha Padrón López, Dr. Wilfrido Miguel Contreras Sánchez y Dr. Miguel Alberto Magaña Alejandro.

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
ESTUDIO EN LA DUDA/ ACCIÓN EN LA FE

UJAT
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

**DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR**



C.c.p. - Expediente del Alumno:
C.c.p. - Archivo



KM 0.5 CARR. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA
Tel. (919) 358-1500 ext. 6400 y 6401. E-mail: dacbiel.dirección@ujat.mx

Usar papel reciclado, economiza energía, evita contaminación y desperdicio de agua y ayuda a conservar los bosques.

www.ujat.mx

Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 10 de septiembre del 2025

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como autores en la producción, creación y/o realización de la obra denominada Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un periodo de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

COLABORADORES

Eduardo Arturo Calles Moreno

Rosa Martha Padrón López

Lucero Vázquez Cruz

TESTIGOS



División Académica de Ciencias Biológicas
DIRECCIÓN

Villahermosa, Tabasco a 30 de enero de 2026

C. EDUARDO ARTURO CALLES MORENO
EGRESADO DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES
PRESENTE

En cumplimiento de los lineamientos de la Universidad, y por instrucciones de la Dirección de Posgrado, se implementó la revisión de los trabajos recepcionales (tesis), a través de la plataforma Turnitin iThenticate para evitar el plagio e incrementar la calidad en los procesos académicos y de investigación que se desarrollan en esta División Académica. Esta revisión se realizó en correspondencia con el Código de Ética de la Universidad, el Reglamento General de Estudios de Posgrado, el Código Institucional de Ética para la Investigación y con los requerimientos para los posgrados registrados en el SNP de la SECIHTI.

Por este conducto, hago de su conocimiento que, con el objetivo de fortalecer y enriquecer el programa de posgrado, se realizó la revisión del documento en la plataforma iThenticate, obteniendo el reporte de originalidad, el índice de similitud y se emitieron las siguientes sugerencias y recomendaciones para dar seguimiento en el documento de tesis del proyecto de investigación: ***Evaluación del efecto antagonista de actinomicetos sobre Monilophthora rozeri y la producción de promotores del crecimiento vegetal.***

OBSERVACIONES:

1. **El índice de similitud general obtenido fue de 02%**, el cual se ubica dentro del estándar de tolerancia de acuerdo a las Políticas y Lineamientos para el uso y manejo del Software Antiplagio de la UJAT. Se demuestra el nivel de originalidad del documento y de la investigación.
2. Aun que el índice de similitud obtenido indica coincidencias con 11 fuentes de consulta (de las cuales el 2% corresponde con fuentes de internet y el <1% con publicaciones), éstas se refieren a frases en las secciones de Introducción Y Marco Teórico (Antecedentes). Lo anterior no demerita el documento de tesis, pero se recomienda al sustentante y a su directora de tesis revisar los párrafos identificados con similitud y



KM 0.5 CARR. VILLAHERMOSA CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA
VILLAHERMOSA, CENTRO, TABASCO, MEX.
Tel: (993) 358-1500 Ext. 5400 e-mail: direccion.dacbiol@ujat.mx

Una mejor calidad económica, energía, cero contaminación y desarrollo de agua y ayuda a conservar los bosques

www.ujat.mx

INDICE DE CONTENIDO

CAPITULO 1: PROTOCOLO DE TESIS	11
1.1 INTRODUCCIÓN	11
1.2 MARCO TEÓRICO	14
Introducción del cacao en el mundo, México y Tabasco.....	14
Producción mundial, nacional y estatal del cacao.	14
Primeros reportes de la moniliasis en el mundo.....	15
Daños causados a la producción del cacao en países con presencia de monilia	15
Estrategias para controlar la moniliasis	16
Características generales de los actinomicetos.....	17
Distribución de las actinobacterias.....	18
Metabolitos secundarios producido por actinobacterias.....	19
Principales mecanismos de antagonismo	20
Actinomicetos como antagonistas de hongos fitopatógenos	22
Incorporación de actinomicetos para el antagonismo de fitopatógenos del cacao y como productores de promotores del crecimiento vegetal.....	23
1.3 JUSTIFICACIÓN	25
1.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	26
1.5 HIPÓTESIS	27
1.6 OBJETIVO GENERAL	28
Objetivos específicos.....	28
1.7 METODOLOGÍA	29
Área de estudio	29
Trabajo de campo	30
Trabajo de laboratorio.....	31
Conservación de cepas.....	34
Detección de enzimas hidrolíticas.	35
Cepa de <i>M. roreri</i>	36
Prueba <i>in vitro</i> de antagonismo de cepas de actinomicetos contra <i>M. roreri</i>	36

Antagonismo frente a otros hongos fitopatógenos	37
Obtención de metabolitos secundarios	37
Efecto del extracto biológico de los metabolitos secundarios en la germinación de las esporas de <i>M. roleri</i>	38
Evaluación de promotores del crecimiento vegetal	40
Análisis estadístico	41
Identificación molecular de cepas de actinomicetos	42
1.8 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	44
1.9 REFERENCIAS CITADAS	45
CAPITULO 2: ARTÍCULO CIENTÍFICO	60
2.1 RESUMEN	61
2.2 SUMMARY	62
2.3 INTRODUCCIÓN	62
2.4 MATERIALES Y MÉTODOS	64
Colecta del suelo rizosférico	64
Microorganismos empleados en el estudio	64
Aislamiento y selección de los estreptomicetos	65
Actividad antagonica de los estreptomicetos	65
Producción de metabolitos bioactivos por fermentación sumergida	66
Efecto de los metabolitos sobre la germinación de las esporas de <i>M. roleri</i>	66
Identificación molecular	67
Análisis Estadístico	67
2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	68
Actividad antagonica preliminar contra <i>M. roleri</i>	68
Actividad antifúngica de los metabolitos bioactivos producidos por <i>Streptomyces</i> sp UJAT54 sobre la germinación de las esporas de <i>M. roleri</i>	71
Identificación molecular	73
2.6 CONCLUSIONES	75

2.7 LITERATURA CITADA	76
CAPITULO 3: RESULTADOS	82
3.1 RESULTADOS NO INCLUIDOS EN EL ARTÍCULO CIENTÍFICO.....	82
Detección de enzimas hidrolíticas	82
Producción de promotores del crecimiento vegetal.....	83
3.2 DISCUSIÓN.....	84
Caracterización e identificación de actinomicetos aislados de rizosfera de cacao	84
Producción de promotores del crecimiento vegetal.....	87
3.3 LITERATURA CITADA	89
4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	94
4.1 CONCLUSIÓN GENERAL	94
4.2 RECOMENDACIONES.....	95
5 ANEXOS	96
Anexo. Área de Estudio.....	96
Anexo. Características macroscópicas y microscópicas de las actinobacterias	96
Anexo 6. Principios bioéticos.....	101
Anexo 7. Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional.....	102

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. DIVISIÓN ACADÉMICA MULTIDISCIPLINARIA DE COMALCALCO (DAMC).....	29
FIGURA 2. EJEMPLOS DE LOS PUNTOS DE MUESTREO.	31
FIGURA 3. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS PARA EL AISLAMIENTO DE ACTINOMICETOS A PARTIR DE LA RIZOSFERA DE CACAO.	32
FIGURA 4. DILUCIONES SERIADAS E INOCULACIÓN EN CAJAS DE PETRI.	32
FIGURA 5. PURIFICACIÓN DE LAS CEPAS DESPUÉS DEL PROCESO DE AISLAMIENTO.....	34
FIGURA 6. PRUEBA DE ANTAGONISMO. EL PUNTO AMARILLO REPRESENTA A <i>M. RORERI</i>. EL PUNTO VERDE REPRESENTA A LOS ACTINOMICETOS.	36
FIGURA 7. DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA PRUEBA DE ANTAGONISMO CONTRA <i>M. RORERI</i>.	37

FIGURA 8. REPRESENTACIÓN DEL PROCESO MEDIANTE EL CUAL SE OBTIENEN LOS METABOLITOS DE LOS ACTINOMICETOS.....	38
FIGURA 9. COSECHA DE ESPORAS DE <i>M. RORERI</i> PARA OBTENER UNA SOLUCIÓN DE ESPORAS LIBRE DE MICELIO.....	39
FIGURA 10. MONTAJE DE LA MICROPLACA PARA LA EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD INHIBITORIA DE LOS EXTRACTOS.....	39
FIGURA 11. ACTIVIDAD ANTAGONISTA DE DIFERENTES CEPAS DE ESTREPTOMICETOS CONTRA <i>M. RORERI</i> . LAS MEDIAS CON LETRAS DIFERENTES DIFIEREN ESTADÍSTICAMENTE ($P < 0.05$). LAS LÍNEAS DE ERROR REPRESENTAN EL VALOR \pm LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR.	69
FIGURA 12. SELECCIÓN DE ESTREPTOMICETOS CON ACTIVIDAD ANTAGONISTA CONTRA <i>M. RORERI</i> POR CONFRONTACIÓN DUAL.....	70
FIGURA 13. EFECTO DEL EB54 SOBRE LA GERMINACIÓN DE LOS CONIDIOS DE <i>M. RORERI</i> . LAS MEDIAS CON LETRAS DIFERENTES DIFIEREN ESTADÍSTICAMENTE ($P < 0.05$). LAS LÍNEAS DE ERROR REPRESENTAN EL VALOR \pm LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR.	72
FIGURA 14. EFECTO INHIBITORIO DEL EB54 DE <i>STREPTOMYCES</i> SP UJAT54 SOBRE LA GERMINACIÓN DE LOS CONIDIOS DE <i>M. RORERI</i> DESPUÉS DE 24 HORAS. A) CONTROL DE LA GERMINACIÓN. B) EFECTO INHIBITORIO SOBRE GERMINACIÓN AL APLICAR 50 μ G/ML DEL EB. CONIDIOS ESFÉRICOS (\rightarrow), OVALADOS (\rightarrow), ELIPSOIDE (\rightarrow), EN GERMINACIÓN (\rightarrow).	73
FIGURA 15. RELACIONES FILOGENÉTICAS ENTRE <i>STREPTOMYCES</i> SP UJAT54 Y OTRAS ESPECIES DE <i>STREPTOMYCES</i> . LOS NÚMEROS EN LOS NODOS REPRESENTAN PORCENTAJES QUE INDICAN LOS NIVELES DE SOPORTE DEL BOOTSTRAP (N = 1000 REMUESTREOS). LA BARRA DE ESCALA REPRESENTA 0,007 SUSTITUCION DE NUCLEÓTIDO POR SITIO.	74
FIGURA 16. HIDROLISIS DE DISTINTAS FUENTES DE CARBONO POR PARTE DE LAS ACTINOBACTERIAS.	82
FIGURA 17. CEPAS FIJADORAS DE NITRÓGENO EN EL MEDIO ASHBY.....	83
FIGURA 18. SOLUBILIZACIÓN DE FOSFATOS POR PARTE DE LOS ACTINOMICETOS EN EL MEDIO SRSM-1.....	84
FIGURA 19. FRUTOS DE CACAO CON DAÑO CAUSADOS POR PLAGAS E INFECCIONES POR HOGOS....	96
FIGURA 20. CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS DE LAS 12 CEPAS DE ACTINOMICETOS AISLADOS DURANTE LA INVESTIGACIÓN.....	97
FIGURA 21. HIFAS EN ESPIRAL EN CEPASDE <i>STREPTOMYCES</i> SP.....	98

FIGURA 22. HIFAS EN CON CADENAS CORTAS Y LARGAS DE CONIDIOS ENCEPAS DE *NOCARDIA SP.* . 99

FIGURA 23. ESTRUCTURAS QUÍSTICAS CON CONIDIOS EN SU INTERIOR OBSERVADAS EN EL MICROCULTIVO DE LA CEPA UJAT-17..... 100

INDICE DE TABLAS

TABLA 1. DATOS OBTENIDOS DURANTE EL MUESTREO..... 30

TABLA 2. COMPOSICIÓN DE LOS MEDIOS DE CULTIVO EMPLEADOS PARA EL AISLAMIENTO Y PURIFICACIÓN DE LOS ACTINOMICETOS..... 33

TABLA 3. COMPOSICIÓN DE LOS MEDIOS DE CULTIVO Y LAS DISTINTAS FUENTES DE CARBONO..... 35

TABLA 4. COMPONENTES PARA CADA UNO DE LOS MEDIOS DE CULTIVO EMPLEADOS EN LAS PRUEBAS QUÍMICAS. 41

TABLA 5. ACTIVIDAD ANTAGONISTA DE *STREPTOMYCES SP* UJAT54 CONTRA DIVERSOS HONGOS FITOPATÓGENOS..... 70

TABLA 6. RESULTADOS DE LA HIDROLISIS GENERADA POR LAS ACTINOBACTERIAS EN DISTINTAS FUENTES DE CARBONO..... 82

TABLA 7. EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE PROMOTORES DEL CRECIMIENTO VEGETAL..... 84

TABLA 8. RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS DE LAS 12 ACTINOBACTERIAS.. 85

TABLA 9 IDENTIFICACIÓN DE LAS CEPAS SECUENCIADAS MEDIANTE DE DATOS DEL NCBI..... 86

CAPITULO 1: PROTOCOLO DE TESIS

1.1 INTRODUCCIÓN

El cacao (*Theobroma cacao* L.) arbusto originario de Centroamérica y Sudamérica, y domesticado en Mesoamérica, es considerado uno de los cultivos perennes bajo sombra más importantes del planeta, ya que representa la principal fuente de ingresos de productores localizados en África, Asia, Centro y Sudamérica (Hipólito-Romero *et al.*, 2017). Pertenece a la familia *Malvaceae*, subfamilia *Sterculioideae*. El cacao crece bajo el dosel de bosques tropicales lluviosos y cuenta con dos especies: *T. cacao* spp (criollo), *T. cacao* spp. *Sphaerocarpum* (forastero) y el cacao trinitario un híbrido resultante de la cruce entre el cacao criollo y el cacao forastero (Dostert *et al.*, 2012).

A partir del fruto del cacao, se obtiene la materia prima para la elaboración del chocolate, lo que lo convierte en un producto de gran importancia desde el punto de vista económico. Según Abad *et al.* (2021) las exportaciones mundiales de cacao en el 2018 ascendieron a 375,571 millones de dólares y los países con mayor producción fueron Costa de Marfil y Ghana. Para el 2020, el 70 % de la producción mundial se generó en África, mientras que América Latina registró tan sólo el 14 % de la producción. Del cacao se derivan pasta, manteca y licor, claves para la elaboración de chocolates y bebidas (Gómez *et al.*, 2019). Entre los beneficios del consumo de estos productos se destacan, para la salud, la disminución de enfermedades cardiovasculares y de desórdenes metabólicos y la acción preventiva contra el cáncer y el sistema nervioso (Martin & Ramos, 2021). A pesar de los aspectos positivos mencionados, el cultivo de cacao enfrenta graves problemas en sus plantaciones que contribuyen a un elevado déficit de rendimiento. Estos factores pueden ser de tipo biótico o abiótico, como patrones erráticos de precipitación, disponibilidad limitada de material de siembra, disminución de la fertilidad del suelo y de la materia orgánica, así como afectaciones por plagas y enfermedades (Ofori *et al.*, 2023; Tosto *et al.*, 2023).

La Organización Internacional del Cacao, (ICCO, por sus siglas en inglés) destaca que la producción mundial de cacao en 2023 se vio afectada por plagas y enfermedades, lo que provocó pérdidas globales en su producción de un 30 a 40 %. Estas enfermedades fueron ocasionadas por fitopatógenos: “escoba de bruja”, causada por *Moniliophthora perniciosa*; “monialisis”, causada por *M. rozeri*; y “la pudrición de la mazorca”, producida por *Phytophthora palmivora* (ICCO, 2025). En el contexto nacional, los factores que afectan la producción de cacao son: el bajo

rendimiento de los cultivos, la edad avanzada de las plantaciones y los altos costos de producción (Albores-Flores, 2015). Para el estado de Tabasco, se ha documentado que los factores limitantes para la producción exitosa del cacao son las plantaciones de edad avanzada y la presencia de moniliasis (Vázquez, 2017).

El bajo rendimiento en los cultivos causado por fitopatógenos como la monilia, ha propiciado que a nivel mundial y nacional se apliquen diversas estrategias o métodos de control de esta enfermedad para evitar los estragos que provoca. Los procedimientos comúnmente empleados para su control son las podas fitosanitarias, el uso de variedades genéticamente resistentes y el empleo de fungicidas (Acebo-Guerrero *et al.*, 2015). Los fungicidas son un grupo químico utilizado en la agricultura y otras industrias para el control de infecciones fúngicas (Sang *et al.*, 2023). El uso constante de estas moléculas químicas provoca daños al ambiente y en la salud de los organismos vivos. Por lo tanto, resulta importante la búsqueda de alternativas amigables con el ambiente que permitan un manejo sanitario efectivo de los cultivos (Terrero-Yépez *et al.*, 2018).

En este sentido, diversos estudios demuestran que el uso de microorganismos como agentes de control biológico, constituye una alternativa amigable con el ambiente y un recurso ecosistémico clave para la producción sostenible de cultivos al propiciar una relación no beneficiosa para los agentes patógenos. Algunos de los microorganismos empleados para este fin son las bacterias y los actinomicetos. Estos últimos pueden ser empleados para cumplir con esta labor de biocontrol, o incluso, en la producción de biofertilizantes (Fernández-Larrea, 2001; Pozo *et al.*, 2006; Corrales-Ramírez *et al.*, 2012 Ayala-Torres *et al.*, 2023; Cao *et al.*, 2023).

Los actinomicetos son semejantes a los hongos por la producción de filamentos y esporas y a las bacterias por su pared celular de peptidoglicano (Salaria *et al.*, 2017). Son un grupo ubicuo y heterogéneo de bacterias grampositivas que comprenden un amplio rango de morfologías y representan del 20 al 60 % de la población microbiana del suelo (Pérez-Corral, *et al.*, 2022). No solo habitan en el suelo, sino que también pueden encontrarse en sustratos como fondos marinos, ríos, lagos y materia orgánica en descomposición (Quiñones-Aguilar, 2018). En especial, se ha reportado que este grupo microbiano se asocia con frecuencia con la rizosfera de las plantas. La rizosfera es una capa del suelo adherida a la superficie de las raíces, en la que se llevan a cabo reacciones químicas en una relación planta-microorganismo asociada al crecimiento de las plantas (Lino-Navarro *et al.*, 2020). En la unión actinomiceto-planta se da una relación simbiótica tipo mutualista, donde la raíz de las plantas exuda carbón, nitrógeno, sideróforos y otros elementos para

la nutrición de los actinomicetos; y los actinomicetos producen antibióticos y enzimas para inhibir el crecimiento de fitopatógenos; además sintetizan fitohormonas como el ácido indol acético (AIA) y solubilizan elementos como el fosfato para la nutrición de las plantas, actuando así como bacterias promotores del crecimiento vegetal (BPCV) (Franco-Correa, 2009; Tistechok *et al.*, 2019).

Es por lo antes mencionado que este trabajo tiene como finalidad aislar actinomicetos a partir de la rizosfera de plantas de cacao, para evaluar el efecto antagonista sobre *M. royeri*, microorganismo causante de la moniliasis; así como para distinguir la producción de promotores del crecimiento vegetal a partir de estas mismas bacterias.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México

1.2 MARCO TEÓRICO

Introducción del cacao en el mundo, México y Tabasco

Se cree que el cacao llegó a México gracias a la migración de personas y a los intercambios de productos entre las sociedades de Mesoamérica y de América del Sur. Los primeros vestigios de esta semilla en nuestro país datan del año 1800 al 1900 a. C.; dichas semillas fueron encontradas en Chiapas y Veracruz (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2021). Una vez que el cacao criollo llegó a Mesoamérica, se convirtió en un cultivo trascendental para las distintas civilizaciones. En el sur de México (Tabasco y Chiapas), los Mokayas y los Olmecas domesticaron, cultivaron y consumieron por primera vez el cacao entre 1500 y 400 a. C. (Barros, 2018). Los Mayas (600 a. C.) son responsables de las primeras plantaciones de cacao criollo y de su difusión; lo integraron en sus actividades culturales, medicinales y comerciales mediante el empleo de “trueques” (Huamanchumo De La Cuba, 2017). Los aztecas (1400 a. C.) conocieron el cacao al interactuar con los mercaderes mayas. Esta civilización adoptó el cultivo y empezó a consumirlo en forma de bebida elaborada con cacao molido, agua y miel a la cual se le llamó xocolatl (Hernández-Gómez *et al.*, 2012).

Para 1502 Cristóbal Colón se convirtió en el primer europeo en interactuar con el cacao y sus semillas en la isla de Guanaja, Honduras, además, recibió a manera de obsequio una copa de chocolate, pero no fue hasta 1528 que el cacao aparece en el viejo continente por primera vez, los españoles conquistadores llevaron muestras de cacao a la realeza (Larios *et al.*, 2024). El cacao empezó a popularizarse en España en forma de bebida. Pero para 1662, el chocolate caliente en sus distintas vertientes se había difundido por toda Europa, principalmente en Alemania, Bélgica, Suiza, Austria, Italia e Inglaterra. Fue en 1753 cuando el cacao es denominado *Theobroma cacao* por Carlos Linneo, derivado del latín “Theobroma” el cual significa “comida de los dioses” (Verna, 2013).

Producción mundial, nacional y estatal del cacao.

Hoy en día, el cacao se produce en 58 países, distribuidos en 4 continentes del mundo: África, América, Asia y Oceanía. A nivel mundial, los países tropicales con mayor producción de cacao son: Costa de Marfil, Ghana, Indonesia, Nigeria, Camerún, Ecuador, Perú, República Dominicana, Colombia y Nueva Guinea. El porcentaje de cosecha en los diferentes continentes está distribuido en 72 % para África, 16 % para América Latina y 12 % para Asia y Oceanía (Avendaño-Arrazate, 2018).

En términos económicos, México es el catorceavo productor a nivel mundial y Tabasco es el estado que más aporta a nivel nacional con 64.3 % de la producción total. La superficie de cosecha en nuestro país se extiende por 58,598 hectáreas y cuenta con un total de 45,000 productores de cacao (*CACAO Mexicano Planeación Agrícola Nacional*, 2017). De acuerdo con la Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Pesca (2024), el cacao posiciona a Tabasco en primer lugar en la producción nacional de sus principales productos. En el estado, la región de la Chontalpa es la zona con mayor producción, donde 9,975 familias campesinas se dedican al cultivo del grano (Cruz-Landero *et al.*, 2015). La producción nacional de cacao cubre solo el 41.22 % del consumo nacional, lo que genera una dependencia de cacao importado de países como Ecuador, Costa de Marfil y Colombia (*Planeación Agrícola Nacional: Cacao Mexicano*, 2017).

Primeros reportes de la moniliasis en el mundo

Ecuador se considera el centro de origen de *M. rozeri*. En 1917, J. B. Rorer fue delegado en Ecuador para investigar el deterioro acelerado de las cosechas de cacao en dicho país. Obtuvo muestras de mazorcas enfermas, que fueron enviadas al Dr. R.E. Smith el quien determinó que el agente causal era un hongo al que denominó monilia (Bailey *et al.*, 2018). Para 1956, la moniliasis había iniciado su dispersión en el continente americano, empezando por Panamá y luego llegando a distintos rincones del continente.

El primer reporte de moniliasis en México se realizó en el 2005, cuando mazorcas deformes y con maduración prematura llamaron la atención de los pobladores de Ignacio Zaragoza, Pichucalco, en el norte de Chiapas. En abril del mismo año, la afectación por monilia se extendió a 1000 hectáreas en los municipios de Pichucalco, Juárez y Ostauacán, en el estado de Chiapas, y en Huimanguillo, Tabasco (Phillips-Mora *et al.*, 2006). A partir de esa fecha, la diseminación de este patógeno en el estado de Tabasco se extendió a los municipios de Comalcalco y Cárdenas, afectando 1,033 hectáreas y en el 2007 la moniliasis ya penetraba en todas las zonas productoras del estado (Torres de la Cruz, 2010).

Daños causados a la producción del cacao en países con presencia de monilia

La moniliasis sólo infecta los frutos durante su desarrollo; los frutos jóvenes son los más susceptibles y sufren necrosis, manchas necróticas y madurez prematura (Torres de la Cruz, 2020). Actualmente, esta enfermedad se distribuye en: Belice, Bolovia, Colombia, Costa Rica, Ecuador, Guatemala, Honduras, Jamaica, México, Nicaragua, Panamá, Perú y Venezuela (EPPO Global Database, 2025).

En Colombia, la pudrición de la mazorca, causada por *M. royeri*, se considera el factor más limitante para la producción del cacao. Su incidencia puede variar entre 8 % y 80 % en las zonas productoras, y las pérdidas registradas oscilan entre 40 % y 100 %. Lo anterior equivale a perder 28,000 toneladas en una producción de 42,000 toneladas (Álvarez *et al.*, 2014; Guillermo & Gil, 2016; Jiménez-Zapata *et al.*, 2023).

Ecuador ha visto mermada la rentabilidad del cultivo de cacao debido a los daños causados por la moniliasis, con detrimento significativo del 60 al 90 % en su producto de 46, 000 a tan sólo 20,000 toneladas (Aguirre, 2019; Anzules *et al.*, 2019).

En México, la situación de la monilia es todavía más agravante, la utilidad de dicho fruto ha experimentado pérdidas del 80 %. En Tabasco se registran reducciones del 43.2 % lo que se traduce en un detrimento de 57 millones 120 mil pesos mexicanos, dado que en toda la superficie del estado se encuentra diseminado este patógeno (Barrón *et al.*, 2014).

Estrategias para controlar la moniliasis

Se han planteado diversas estrategias o métodos para el control de la moniliasis en los cultivos de cacao, entre ellas los controles químicos, culturales, genéticos y biológicos.

El control químico se basa en el uso de sustancias químicas que buscan erradicar o controlar al fitopatógeno objetivo. En el caso específico de la monilia, se trata de un fungicida. Los fungicidas buscan controlar, prevenir y evitar la germinación de las esporas del hongo (Petit *et al.*, 2012). Algunos de los más utilizados son: carbendazin, triadimefon, triadimenol, bitertanol, imazalil, fenarimol, carbosulfato, flutolanil, cobre, azufre, captan, mancozeb y metalaxyl (Ayala-Benítez, 2008). A pesar de la probada efectividad de los fungicidas, su aplicación resulta costosa, lo que disminuye la rentabilidad de los cultivos, ya que se requiere un número excesivo de aplicaciones para lograr una cobertura adecuada. Por otro lado, el uso de sustancias químicas a largo plazo provoca la contaminación del suelo, del aire y del agua, así como perjuicio a los organismos vivos (López *et al.*, 2018).

El control cultural son aquellas labores dirigidas a minimizar la disponibilidad de nutrientes, de refugio y de condiciones que favorecen la proliferación de alguna plaga o fitopatógeno (Benavides *et al.*, 2002). Este tipo de control ha sido ampliamente empleado en México y en distintas partes del continente americano. Las labores han consistido en: control de malezas, mejoramiento del drenaje, poda de árboles de cacao y de árboles de sombra, remoción

semanal de frutos enfermos y cubierta de frutos que están en el suelo con la hojarasca de la plantación cuando el hongo está en fase de esporulación (Torres-de-la-Cruz *et al.*, 2019).

El control genético se refiere a un cultivo que puede manipularse genéticamente para incrementar su resistencia al daño causado por plagas o enfermedades causadas por fitopatógenos. Por ejemplo, se puede seleccionar a un individuo de una población que exprese una característica de interés (Viveros-Viveros *et al.*, 2009). Para el cacao, se reportan los clones ICS-95, CCN-51 e ICS-60, seleccionados por su productividad, resistencia o susceptibilidad a la moniliasis. Particularmente, el clon ICS-95 es el que ha ofrecido los mejores resultados ha ofrecido en cuanto incidencia de la monilia, severidad tanto interna como externa en las mazorcas, por eso, se dice que este clon tiene niveles significativos de resistencia contra *M. rozeri*. (Phillips-Mora *et al.*, 2005; Quintana-Fuentes *et al.*, 2015).

Mediante el uso del control biológico se pretende restaurar el equilibrio ecológico perturbado, empleando organismos vivos o sus metabolitos para eliminar o disminuir los daños causados por organismos perjudiciales (Badii & Abreu, 2006). Para el control de la moniliasis se han usado principalmente hongos y bacterias. Entre los hongos empleados destacan: *Paccilomyces* sp, *Trichoderma* sp, *Colletrotichum* sp, *Botryosphaeria* sp, *Xylaria* sp, *Lasiodiplodio* sp. En cuanto a las bacterias, se ha reportado el uso de *Bacillus* sp y *Pseudomonas* sp. Tanto *Trichoderma* sp como *Bacillus* sp han mostrado actividad antagónica efectiva, tanto al actuar en solitario, como al mezclarse con aceites vegetales, o con productos orgánicos inductores de resistencia y fertilizantes foliares (Contreras & Riaño, 2013; Villamil *et al.*, 2016; Rodríguez, 2021; Guaman *et al.*, 2022).

Características generales de los actinomicetos

Los actinomicetos se describen como bacterias grampositivas poseedoras de ácido murámico en su pared celular, mesofílicas, aerobias, quimiotrofos, saprofitas, con crecimiento miceliar, y formación de esporas (Parija, 2023). Los actinomicetos presentan un micelio radial bien desarrollado, que, de acuerdo con su morfología y función, se divide en dos categorías: micelio de sustrato y aéreo (Hatha *et al.*, 2012).

El micelio de sustrato crece en el medio o en su superficie, sirve para asimilar nutrientes necesarios para el crecimiento de la bacteria, y el micelio aéreo se desarrolla después y sirve para la formación de esporas, o para la formación de micelio portador de esporas. Algunas actinobacterias pueden formar estructuras complejas como: esporas, cadenas de esporas, esporangios y esporangiosporas. Dichas estructuras se desarrollan tras la formación de un

“septum” en la hifa. La forma y disposición de estas estructuras juegan un papel vital en la clasificación de las actinobacterias; por ejemplo, la presencia de una espora no motil es asociada al género *Micromonospora* sp, dos esporas dispuestas en cadena es asociado con *Microbispora* sp y, por último, esporas almacenadas en un esporangio es una característica asociable a *Streptosporangium* sp. Las esporas son liberadas en el ambiente y germinan, produciéndose un tubo germinativo primario que dará paso a la formación de la hifa vegetativa, y posterior a ello, se forma la hifa aérea la cual dará paso a la formación de nuevas esporas que permitirán la reproducción de la actinobacteria (Jose & Jha, 2016; Li *et al.*, 2016; Pérez-Corral *et al.*, 2022; Menezes *et al.*, 2023).

Distribución de las actinobacterias

Los actinomicetos se encuentran ampliamente distribuidos en diferentes hábitats: suelo de rizosfera, suelo hipersalino, piedra caliza, suelo contaminado, minas de carbón, cuevas, agua de mar, desiertos, sedimento marino, manglares, algas, moluscos, esponjas, viseras de insectos y como endófitos de plantas. En cada uno de estos hábitats, los actinomicetos se relacionan con su medio mediante la producción de moléculas bioactivas que facilitan la comunicación, la competencia e interacción con otros microorganismos (Ghorbani-Nasrabadi *et al.*, 2013; Crits-Christoph *et al.*, 2018).

Los actinomicetos que albergan el suelo, por ejemplo, los que se encuentran en bosques tropicales, producen celulasa, una enzima lítica que cataliza la degradación de la celulosa, por lo tanto, las bacterias en los suelos de bosques tropicales juegan un papel fundamental en la descomposición de la materia orgánica (Dorchenkova *et al.*, 2022). Aquellos actinomicetos presentes en la rizosfera de las plantas, como *Frankia* sp., *Streptomyces* sp. y *Nocardia* sp., desempeñan un papel vital mediante la fijación de nitrógeno, lo que favorece el crecimiento de la planta y el aumento de sus defensas mediante antibióticos (Subathra *et al.*, 2022). Bajo las condiciones duras y estresantes de los ambientes hipogeos, como las cuevas, se han hallado actinomicetos del género *Nocardiopsis* sp, *Micromonospora* sp, *Streptomyces* sp y *Pseudonocardia* sp que poseen la capacidad de contrarrestar los efectos adversos de la salinidad, restaurar los suelos degradados e inducir halotolerancia en las plantas (Farda *et al.*, 2022). En ambientes gélidos como la montaña de la isla Spitsbergen se han aislado especies de *Streptomyces* sp, capaces de producir trehalosa y glicerol, que se emplean como aditivos para la crioconservación (Ma *et al.*, 2020). La

amplia distribución de las actinobacterias las somete a distintos niveles de estrés ambiental, lo que deriva en la producción de compuestos bioactivos como respuesta al ambiente (Tiwari *et al.*, 2015).

Metabolitos secundarios producido por actinobacterias

En consecuencia, debido a su amplia distribución, estos microorganismos necesitan adaptarse rápidamente a los cambios y competencia ambientales. Dicha adaptación se debe a su plasticidad metabólica. Tanto en ambientes pobres como en ricos en nutrientes, logran descomponer distintas fuentes y transformarlas en alimento. El metabolismo de las actinobacterias se divide en dos vertientes: el metabolismo primario y el metabolismo secundario (Gunnarsson *et al.*, 2004; Hamedi *et al.*, 2017). El metabolismo primario de los actinomicetos se centra en el aprovechamiento de nutrientes mediante sistemas catabólicos de carbohidratos y nitrógeno, que permiten un uso eficiente de los recursos del suelo para que el microorganismo crezca y se reproduzca (Vanev *et al.*, 2017). En contraste, el metabolismo secundario, si bien no es estrictamente necesario para el crecimiento, si está involucrado en distintas facetas; por ejemplo, permite que la bacteria desarrolle ventajas adaptativas para sobrevivir mediante la producción de compuestos bioactivos; también desempeña un rol clave en la simbiosis con otros microorganismos (Demain & Fang, 1995; Ichinose, 2003).

De particular interés resultan los metabolitos secundarios, conocidos por ser la fuente de sustancias bioactivas que pueden ser aprovechadas para distintos propósitos: producción de antibióticos, producción de enzimas para las industrias, aplicaciones ambientales y aplicaciones en la agricultura (Khan *et al.*, 2023; Saito & Arai, 2024).

Producción de antibióticos

Cerca de 4,500 metabolitos secundarios activos con capacidad antibiótica han sido producido por actinobacterias con implementación para tratar enfermedades en humanos, animales y en el sector agrícola. Entre los antibióticos reportados se encuentran cethromicina, amphotericina, eritromicina, nistanina, clorafenicol, gentamicina, entre otros producidos por *Streptomyces malaysiensis* (Bano *et al.*, 2019; Meenakshi *et al.*, 2024).

Aprovechamiento de las enzimas en la industria

Las enzimas que producen las actinobacterias son de alta especificidad y gran estabilidad por eso son aprovechadas para distintos fines, por ejemplo, la proteasa producida por *Nocardia* sp es usada para la elaboración de detergentes removedores de manchas, en la elaboración de quesos, para procesar residuos industriales y para clarificar cervezas; la celulasa es empleada para la

generación de biocombustibles gracias a que transforma la celulosa en azúcar fermentable; la amilasa producida por *Thermomonospora curvata* es empleada para darle al pan la textura suave y esponja que conocemos, también es usada para elaboración de jarabes sirope (Mukhtar *et al.*, 2017; Abdel-Aziz *et al.*, 2019; Mebrat, 2024).

Aprovechamiento ambiental

Los biosurfactantes (glicolípidos, ramanolípidos, soforolípidos) producidos por *Rhodococcus erythropolis* han sido ampliamente estudiados y aplicados para la remoción de hidrocarburos, pesticidas e insecticidas gracias a la producción de enzimas líticas como la quitinasa y celulasas capaces de descomponer polímeros complejos (Valan-Arasu *et al.*, 2016).

Aplicación en la agricultura

Los actinomicetos mantienen relaciones estrechas con la agricultura, ya que se involucran en la promoción del crecimiento vegetal mediante la fijación de nitrógeno, la solubilización de fosfatos y potasio, y en el biocontrol mediante la producción de antimicrobianos, sideróforos y enzimas líticas que eviten la proliferación de fitopatógenos (Negi *et al.*, 2024).

Principales mecanismos de antagonismo

Los actinomicetos son catalogados como excelentes agentes de antagonismo debido a su amplio repertorio de acción, derivado de su gran diversidad metabólica, el cual incluye: producción de compuestos antimicrobianos que inhiben el crecimiento de hongos y bacterias fitopatógenas, producción de enzimas líticas como la quitinasa, glucanasa y peroxidasa, producción de sideróforos e inducción de resistencia en la planta (Pérez-Corral *et al.*, 2022).

Producción de antimicrobianos

Dentro de las actinobacterias, *Streptomyces* sp es el género con mayor relevancia en cuanto a la producción de compuestos antimicrobianos ya que es responsable de producir la streptomina, gentamicina y entromicina, entre otras sustancias (Al-shaibani, Radin, Sidik, Enshasy, Al-Gheethi, Noman, Al-Mekhalafi, Zin, 2021). Los antimicrobianos afectan principalmente la bioquímica y fisiología de las células microbianas dañando la pared o membrana celular mientras que otros atacan la maquinaria sintética logrando reducir la proliferación del microorganismo (Muteeb *et al.*, 2024).

La producción de compuestos antimicrobianos por actinobacterias ha sido descrita en los últimos años. La cepa *Streptomyces praecox* KUBS-B6 fue reportada por primera vez como endófito del estropajo (*Luffa cylindrica*), exhibiendo una gran capacidad antagonista al producir

distintos compuestos microbianos que inhibieron a bacterias grampositivas y gramnegativas (Mahdi *et al.*, 2022). En el mismo sentido, a partir de las plantas *Thymes kotschyanus*, *Allium hooshidaryae* y *Cerasus microcarpa* se aisló la especie *Streptomyces cyaneofuscatus* KBG19 que logró inhibir de forma satisfactoria a *Escherichia coli*, *Pseudomona aureginosa* y *Staphylococcus aureus* lo que resalta su capacidad para producir compuestos antibacterianos (Delbari *et al.*, 2023).

La producción de sustancias antifúngicas que logran inhibir la síntesis de quitina en la pared celular de los hongos también ha sido reportada para los actinomicetos, por ejemplo; polyoxinas, nikkomicina, lipopentina, neopeptina, globopeptina, coronamicina, valinomicina y ciclothiazomicina se han aislado a partir de las actinobacterias (Zhang *et al.*, 2020). De muestras de rizosfera de la hierba sarcandra (*Sarcandra glabra*) se obtuvo la cepa *Streptomyces tsukubaensis* la cual expuso porcentajes de inhibición favorables frente a diversos hongos fitopatógenos: *Colletotrichum dermatium* 86.75 %, *Botrytis cinerea* 83 %, *Fusarium oxysporum* 81 %, *Alternaria panax* 87 %, *Colletotrichum gloesporoides* 81%, *Fusarium solani* 76 % y *Stagonosporopsis cucurbitacearum* 81 % (Song, Jiang, Wei, Lan, Pan, 2020). Por último, *Streptomyces felleus* BHPL-KSKU15 logró remarcar su versatilidad metabólica al producir compuestos antibacterianos que inhibieron a *Salmonella typhi* en 18 mm y compuestos antifúngicos al causar una reducción en la proliferación del hongo *Candida albicans* de 16 mm (Sarika *et al.*, 2021).

Producción de sideróforos

Los sideróforos son compuestos orgánicos de bajo peso molecular quelantes de hierro producido por las bacterias. Actúan en condiciones de deficiencia de hierro, captándolo del suelo y transportándolo a las bacterias, lo que lo hace menos disponible para los patógenos y, como resultado, estos no crecen (Aguado-Santacruz *et al.*, 2012; Santoyo *et al.*, 2020).

A partir de las actinobacterias se han logrado aislar compuestos como: trihidroxamida, desferrioxamina (aislado de *Streptomyces* sp), nocardiochelina A y B (aislado de *Nocardia* sp) aerobactina, heterobactina y griscobactina (Salwan & Sharma, 2020; Silva *et al.*, 2022) los cuales actúan directa e indirectamente a favor de la planta disminuyendo la cantidad del hierro en el medio, para así, reducir las condiciones que permiten la proliferación de fitopatógenos y benefician la salud de la planta (Cesa-Luna *et al.*, 2020; Islas-Lugo *et al.*, 2024).

Producción de enzimas líticas

Las enzimas líticas facilitan el rompimiento, descomposición o degradación de los enlaces que conforman la pared celular de los microorganismos, lo cual les causa lisis celular (Salazar &

Asenjo, 2007; Briers, 2019; Teles *et al.*, 2019; Osorio-Echeverri *et al.*, 2023). La quitinasa es un ejemplo de enzima lítica producida por actinomicetos; es una herramienta eficaz para la degradación de la quitina presente en la pared celular de muchos hongos fitopatógenos (Markovich & Kononova, 2003). Otros ejemplos de enzimas líticas producidas por actinomicetos son la peptinasa, la celulasa, la glucanasa, la proteasa, la lipasa y la amilasa cuya principal función es la desintegración de la pared celular. Los géneros de los comúnmente se obtienen estas enzimas son: *Streptomyces* sp, *Actinoplaes* sp, *Microbiospora* sp, y *Micromonospora* sp (Chowdhury *et al.*, 2021; Fasim *et al.*, 2021; Shanthi, 2021). Tal es el caso de la cepas *Streptomyces* MUA26, *Streptomyces* AM1, *Streptomyces flavorabiis* XM21, *Streptomyces halstedii*, *Streptomyces griseus*, *Actinoplanes campanulatus*, *Micromonospora chalcea* y *Luteimicrobium album* YSS-33 quienes fueron capaces de secretar enzimas líticas: quitinasas, celulasas, amilasas, proteasas y lipasas las cuales les permitieron antagonizar a varios hongos fitopatógenos: *F. oxysporum*, *Fusarium flavus*, *Gibberolla xylanoides* causante de la roya del cafeto, *Fusarium verticillioides*, *Frotium amstelodon* y *Aspergillus niger* (Do *et al.*, 2021; Ebrahimi-Zarandi *et al.*, 2022; Dinh *et al.*, 2023; Kotb *et al.*, 2023; Nuguse & Kejela, 2024).

Inducción de resistencia en la planta

La inducción de resistencia es un estado fisiológico en el que, gracias a hormonas secretadas por microorganismos, la capacidad de respuesta de la planta frente a factores bióticos, como los fitopatógenos, aumenta. Las plantas inducidas o cebadas desarrollan una respuesta más rápida y duradera frente a los patógenos (Terrero-Yépez *et al.*, 2018; Delgado-Oramas, 2020; Valerio-Landa *et al.*, 2021). Dentro de las actinobacterias, géneros como *Streptomyces* sp y *Micromonospora* sp son reconocidos por producir sustancias responsables del refuerzo de la defensa de la planta, como la celulosa citólica Ca² y la oxidación bifásica (Ansari, Krishna, Zeyad, Singh, Yadav, 2020; Ebrahimi-Zarandi, Saberi-Riseh, Tarkka, 2022). Las cepas *Streptomyces enisocaesillis* y *Streptomyces rochei*, al ser inoculadas en la planta de tomate (*Solanum lycopersicum*), disminuyeron los síntomas de clorosis atrófica y el marchitamiento. La reacción de la planta se debió a la producción de catalasas y peroxidasas, así como al aumento de la expresión de genes (COX y TFX) involucrados en la respuesta de defensa de la planta (Abbasi *et al.*, 2019).

Actinomicetos como antagonistas de hongos fitopatógenos

Por su probada capacidad para producir sustancias antimicrobianas los actinomicetos han sido aislados con el objetivo de encontrar nuevos compuestos bioactivos que puedan inhibir a

hongos fitopatógenos que afectan a distintos cultivos alrededor del mundo y así mitigar el uso de sustancias tóxicas (Adra *et al.*, 2023; Díaz-Díaz *et al.*, 2024).

La cepa *Streptomyces* PR69, aislada de suelo de desierto de Cuatro Ciénegas, Chihuahua logró inhibir en 71 % a *Phytophthora capsici*, fitopatógeno del pimiento morrón, gracias a la producción de la enzima lipasa causante de lisis en la pared celular del hongo y de sideróforos compuesto encargado de secuestrar el hierro disponible en el medio (López-Reyes *et al.*, 2024). La cepa *Streptomyces murinus* JKTJ-3 produjo enzimas líticas como glucanasas y quitinasas las cuales le sirvieron para inhibir en porcentajes prometedores a un gran número de fitopatógenos como fueron: *Stagonosporopsis cucurbitacearum* 69 %, *F. oxysporum* fsp *niveum* 71 %, *C. capsici* 72 %, *F. solani* 76 %, *Phomopsis vexans* 78 %, *Phomopsis asparagi* 81 %, *Sclerotinia sclerotiorum* 84 %, *Colletotrichum gloeosporioides* 85 %, *Rhizoctonia solani* 91 %, *Leptosphaeria biglobosa* 91 %, *Verticillium dahliae* 95 % y *Pythium aphanidermatum* 95 % (Ge *et al.*, 2023). CM253, obtenida de rizosfera de azafrán, logró inhibir al hongo *F. oxysporum* causante de la podredumbre del azafrán, se registró que la actinobacteria alteró por completo la estructura de la hifa gracias a la liberación de sideróforos, proteasas, glucanasas y celulasas (Tian *et al.*, 2022).

Incorporación de actinomicetos para el antagonismo de fitopatógenos del cacao y como productores de promotores del crecimiento vegetal

El uso de actinomicetos como antagonistas a la moniliasis o determinados fitopatógenos del cacao es un tema poco explorado en la actualidad, así como la capacidad de estos microorganismos para producir sustancias promotoras de crecimiento vegetal.

La primera aproximación para el aislamiento de actinobacterias se logró a partir de semillas y mazorcas de cacao, en las cuales se encontraron siete cepas que lograron inhibir a *Phytophthora megakarya*, *Phytophthora erythroseptica*, *F. oxysporum* y *B. cinerea*. Además, de su actividad promotora del crecimiento vegetal *in vitro*, principalmente, la cepa denominada Ref8, la cual produjo el antibiótico Geldamicina (Mouafo-Tchinda *et al.*, 2016). Estos mismos autores, recolectaron muestras de rizosfera, de la cual obtuvieron una nueva cepa denominada *Streptomyces cameroonensis*. Dicha cepa inhibió a *A. niger*, *B. cinerea*, *F. oxysporum*, *P. erythroseptica*, *Phytophthora infestans*, *P. megakarya*, *Pythium aphanidermatum* y *Pythium myriotylum* y mostró características BPCV *in vitro* (Boudjeko *et al.*, 2017).

A partir de los extractos biológicos generados por *Streptomyces cameroonensis* se elaboraron formulaciones en polvo para evaluar los efectos de crecimiento y resistencia frente a *P.*

megakarya en plantas de cacao. Dicha formulación en polvo logró inhibir la incidencia de *P. megakarya* en las plantas de cacao, además, aquellas plántulas tratadas mostraron un crecimiento notable en altura, número de hojas, peso fresco y peso seco de brotes y raíces en comparación con aquellos no tratados con la formulación (Aristide *et al.*, 2022).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México

1.3 JUSTIFICACIÓN

En Tabasco, la enfermedad de la “moniliasis” afecta la producción de cacao cultivado, reduciéndola del 30 al 100 por ciento en las plantaciones. Esto ha generado desaliento entre los productores por el desconocimiento del manejo de la enfermedad y recientemente, cerca de mil hectáreas han sido derribadas en Tabasco debido a la afectación de la “moniliasis” (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, 2022). Otros autores sostienen que el cacao se ve afectado por la presencia de la moniliasis; además, de la edad avanzada de las plantaciones y un manejo agronómica deficiente (Vázquez-Vidal & López-Rodríguez, 2021).

De acuerdo con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), la producción de cacao en el estado de Tabasco presentó una disminución significativa en los últimos años, al registrarse 34,260.50 toneladas en 2022, cifra inferior a las 40,865.26 toneladas obtenidas en 2021 y a las 40,923.26 toneladas reportadas en 2020 (Arias 2024). Esta reducción en la producción se asocia, entre otros factores, a la incidencia de *M. roreri*, considerada una de las principales enfermedades del cultivo del cacao en la región desde el 2005, la cual ha ocasionado pérdidas de hasta el 80 % de la producción, lo que equivale a aproximadamente 28 mil toneladas de grano que dejan de cosecharse (Torres de la Cruz, 2010). La persistencia de esta problemática fitosanitaria representa una amenaza constante para la sostenibilidad productiva y económica de los sistemas cacaoteros en Tabasco.

Ante semejante problema resulta indispensable encontrar alternativas eficientes para el control de las enfermedades y aumentar el rendimiento del cultivo empleando microorganismos que nos permitan inhibir la proliferación de fitopatógenos y promover el crecimiento vegetal de la planta.

Los actinomicetos constituyen un grupo de especial interés debido a su reconocida capacidad para producir metabolitos con actividad antimicrobiana y compuestos promotores del crecimiento vegetal. No obstante, su potencial como agentes de biocontrol frente a *M. roreri*, así como su efecto en la promoción del crecimiento del cacao, ha sido escasamente documentado en condiciones locales. Por ello, la generación de información científica sobre su efecto antagonista y su capacidad para producir promotores del crecimiento vegetal resulta relevante para el desarrollo de estrategias biológicas orientadas al manejo de la moniliasis del cacao.

1.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1. ¿Existe diversidad actinomicetos en la rizosfera de árboles de cacao?
2. ¿Pueden las actinobacterias producir in vitro compuestos promotores del crecimiento vegetal?
3. ¿Tienen las actinobacterias rizosféricas capacidad para producir in vitro compuestos inhibitorios contra *M. royeri*?
4. ¿Son capaces los extractos biológicos de los actinomicetos de evitar la germinación in vitro de las esporas de *M. royeri*?

México

Autónoma de Tabasco.

1.5 HIPÓTESIS

1. En la rizosfera de cacao existe diversidad de actinobacterias por las interacciones que allí se llevan a cabo entre plantas y actinomicetos, donde ambos microorganismos se benefician.
2. Los actinomicetos rizosféricos poseen la capacidad de producir compuestos promotores del crecimiento vegetal porque les permite sobrevivir y establecer relaciones simbióticas con las plantas.
3. Las actinobacterias rizosféricas pueden producir compuestos microbianos que causen la inhibición de microorganismos fitopatógenos como *M. royeri*.
4. Los extractos biológicos de las actinobacterias poseen la capacidad de evitar la proliferación de las esporas de *M. royeri*.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México

1.6 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto antagónico de actinomicetos contra *M. royeri* y su capacidad para producir promotores de crecimiento vegetal.

Objetivos específicos

1. Identificar cepas de actinomicetos aislados de la rizosfera de *T. cacao*.
2. Evaluar la capacidad de los actinomicetos aislados de rizosfera de *T. cacao* para producir promotores de crecimiento vegetal.
3. Determinar la capacidad antagónica *in vitro* de los actinomicetos sobre el crecimiento de *M. royeri* mediante confrontación dual.
4. Obtener extractos biológicos de actinomicetos para evaluar su efecto inhibitorio *in vitro* en la germinación de las esporas de *M. royeri*.

1.7 METODOLOGÍA

Área de estudio

Zona de Cultivo

El área de estudio se localizó en a la División Académica Multidisciplinaria de Comalcalco de la (DAMC) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) ubicada ($18^{\circ}13'35.9''N$ $93^{\circ}13'51.8''W$) en Sur 4ta. sección, 86654 Comalcalco, Tabasco (Figura 1). La zona de estudio fue seleccionada por contar con una plantación de cacao dentro de las instalaciones. Dichas plantaciones tienen un área aproximada de 3.58 hectáreas. Se realizó una visita prospectiva para conocer el área y el estado de la plantación, y determinar los sitios de muestreo y el número de muestras.



Figura 1. División Académica Multidisciplinaria de Comalcalco (DAMC).

Nota. a) Extensión territorial de las plantaciones de cacao de la DAMC., b) Instalaciones de la DAMC., c) árbol de cacao dentro de las plantaciones

Trabajo de campo

Selección de Árboles

La selección de los árboles de cacao se realizó con base en criterios de sanidad vegetal, considerando individuos aparentemente sanos y con presencia de uno o más frutos sin síntomas visibles de enfermedad. Adicionalmente, se tomó en cuenta la información proporcionada por los responsables de la plantación. En total, se seleccionaron cinco árboles, de los cuales se colectaron muestras de rizosfera. La información de cada árbol seleccionado se registró en una hoja de campo. En la Tabla 1 se muestran los datos registrados por cada ejemplar seleccionado.

Tabla 1. Datos obtenidos durante el muestreo.

Tabla de registro (Hoja de campo)							
Arboles	Municipio	Sitio	Coordenadas	Observación	Fecha de colecta	Hora de colecta	Variedad
1	Comalcalco	DAMC	N 18°13'43.6116" W 93°13'55.2"	Dos mazorcas sanas	3 de mayo 2024	08:52 am	Trinitario
2	Comalcalco	DAMC	N 18°13'42.9096" W 93°13'52.1472"	Una mazorca sana	3 de mayo 2024	09:32 am	Trinitario
3	Comalcalco	DAMC	N 18°15'1.62" W 93°13'50.628"	Una mazorca sana	3 de mayo 2024	09:49 am	Trinitario
4	Comalcalco	DAMC	N 18°13'42.3336" W 93°13'53.6556"	Una mazorca sana	3 de mayo 2024	10:12 am	Trinitario
5	Comalcalco	DAMC	N 18°13'42.402" W 93°13'51.3336"	Una mazorca sana	3 de mayo 2024	10:31 am	Trinitario

Colecta de muestras

La colecta de muestras se realizó siguiendo la metodología propuesta por Trinidad-Cruz et al. (2017). En cada árbol se tomaron cuatro submuestras de rizosfera, correspondientes a los puntos cardinales, guiándose por las raíces principales (Figura 2). Para cada submuestra se introdujo una pala a una profundidad aproximada de 20 cm, removiendo el suelo hasta localizar raíces secundarias con diámetros de entre 1 y 5 mm. En cada submuestra se cortaron 7.5 cm de raíces

secundarias, obteniendo un total de 30 cm de raíces por árbol. Las submuestras de cada individuo se integraron para conformar una muestra compuesta.

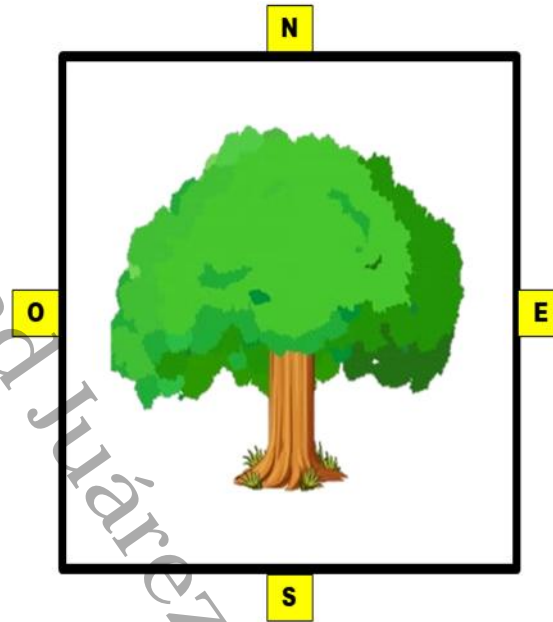


Figura 2. Ejemplos de los puntos de muestreo.

Almacenamiento y transporte de las raíces

Las muestras compuestas de raíces se colocaron en bolsas estériles y se transportaron en una nevera en condiciones de refrigeración, al laboratorio de microbiología de la DACBiol, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (17°59'23"N 92°58'23"W). El procesamiento de las muestras se realizó en un periodo no mayor a 72 h posteriores a su colecta.

Trabajo de laboratorio

Procesamiento de la rizosfera

Las raíces colectadas se sacudieron para eliminar el suelo superficial. Posteriormente, se cepillaron cuidadosamente para desprender la rizosfera adherida, obteniendo un total de 10 g de rizosfera de cacao por muestra compuesta.

Aislamiento de actinomicetos

El aislamiento de actinomicetos se realizó mediante el método de cuenta viable por extensión en superficie, de acuerdo con Nabila & Kannabiran (2018). Diez gramos de rizosfera se suspendieron en 90 mL de peptona alcalina, obteniendo una dilución inicial 10^{-1} (Figura 3). La suspensión se homogenizó en un agitador orbital a 150 rpm de 10 a 15 minutos a temperatura ambiente.

En la Tabla 2 se muestra la composición química de los medios de cultivo, que se utilizaron para el aislamiento de los actinomicetos.

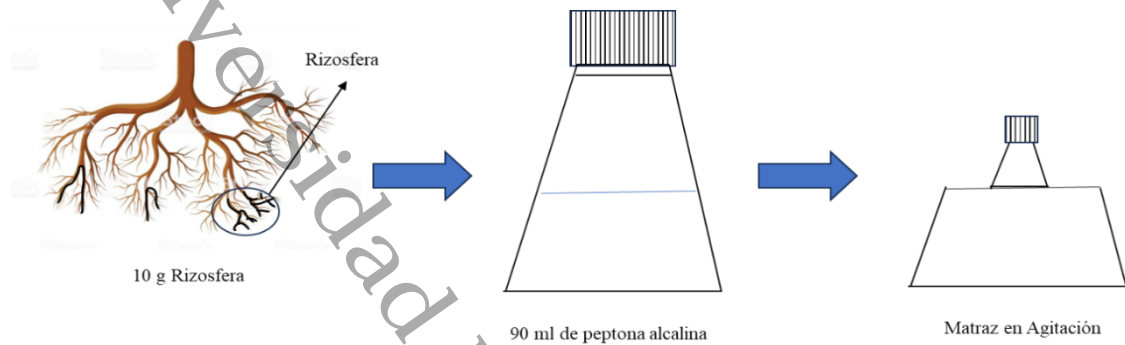


Figura 3. Preparación de las muestras para el aislamiento de actinomicetos a partir de la rizosfera de cacao.

A partir de la dilución 10^{-1} se realizaron diluciones seriadas hasta 10^{-6} . Se sembraron con asa de Drigalsky $100 \mu\text{L}$ de las diluciones 10^{-4} , 10^{-5} y 10^{-6} en las cajas Petri que con los medios Agar Czapek-Dox [CZP], Agar Extracto de Levadura-Extracto de Malta [ISP2], Agar Avena [ISP3], y Agar Papa Dextrosa [PDA] (Tabla 2). Cada dilución se sembró por triplicado (Figura 4) y las cajas se incubaron a 28°C durante un periodo de 5 a 15 días.

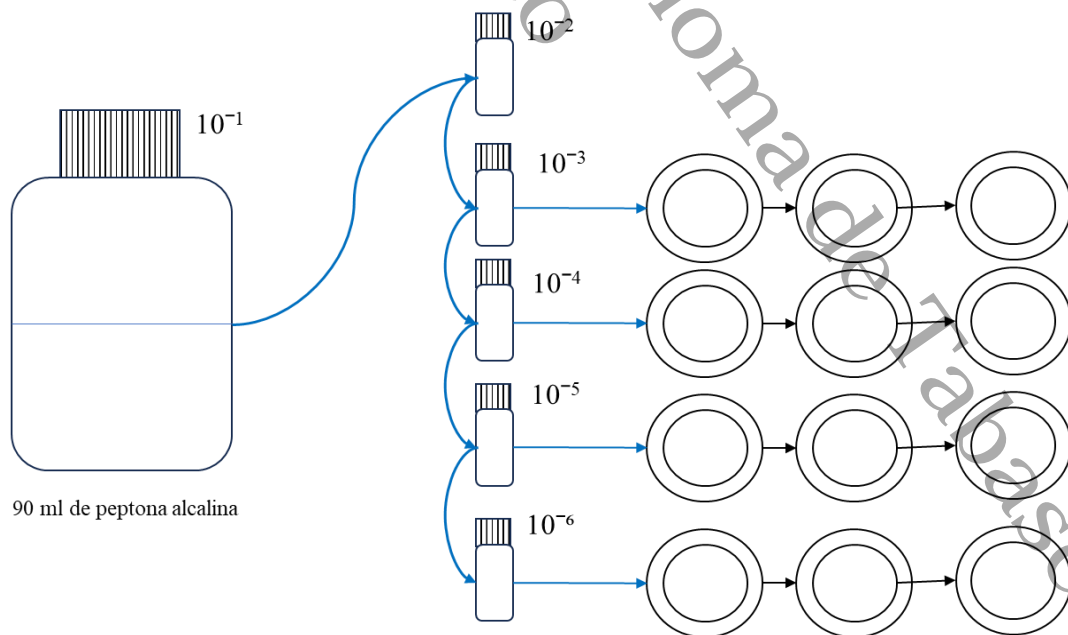


Figura 4. Diluciones seriadas e inoculación en cajas de Petri.

Tabla 2. Composición de los medios de cultivo empleados para el aislamiento y purificación de los actinomicetos.

Formula en gramos por litro de agua destilada			
PDA	ISP 2	CZP	ISP 3 (Agar Avena)
Agar 15 g	Extracto de Levadura 4 g	(NaNO ₃) Nitrato Sódico 2 g	Avena 20 g
Dextrosa 20 g	Extracto de Malta 10 g	(KCL) Cloruro Potásico 0.5 g	Agar 18 g
Infusión de Papa 4 g	Dextrosa 4g	(MgSO ₄) Sulfato magnésico 0.5 g	(Solución Traza)
	Agar 20 g	(FeSO ₄) Sulfato Ferroso 0.01 g	(FeSO ₄ x 7H ₂ O) Sulfato Ferroso Heptahidratado 0.1 g
		(K ₂ HPO ₄) Fosfato dipotásico 1 g	(MnCl ₂ x 4H ₂ O) Tetrahidrato de Cloruro de Magnesio 0.1 g
		Sacarosa 30 g	(ZnSO ₄ x 7H ₂ O) Sulfato de Zinc heptahidratado 0.1 g
		Agar 12 g	

Purificación de las cepas y Caracterización morfológica

Transcurrido el tiempo de incubación, se seleccionaron las cepas morfológicamente típicas a los actinomicetos (colonias secas, con aspecto algodonoso, rugosas y polvorientas) y se transfirieron mediante la técnica de estría cruzada (Figura 5), al Agar ISP2, hasta obtener las cepas puras. Estas cepas fueron incubadas a 28 °C de 7 a 14 días.

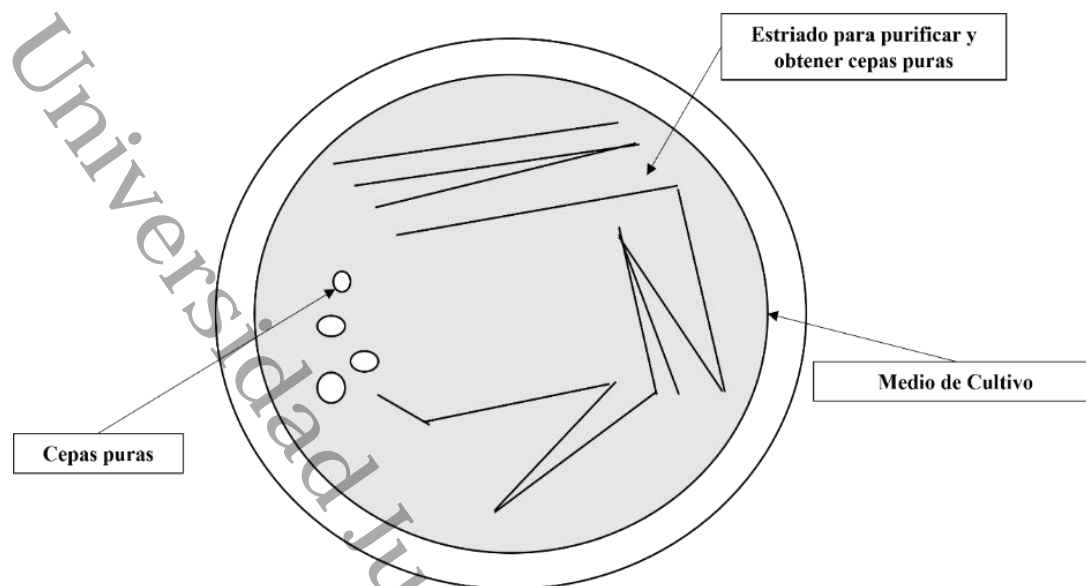


Figura 5. Purificación de las cepas después del proceso de aislamiento.

La identificación a nivel de género se llevó a cabo según las metodologías mencionadas por Pérez-Corral *et al.* (2017) y Bergey & Holt (1993). Para la caracterización macroscópica de los actinomicetos se utilizó el medio ISP-2. El tiempo de incubación y temperatura son los señalados en párrafos anteriores. Los criterios morfológicos en este medio fueron; textura, forma, elevación, tamaño, margen, color, color del micelio aéreo y del sustrato y pigmento difusible. Además, durante 7 y 14 días se evaluó mediante observación el crecimiento del micelio y las hifas con el estereoscopio ZEISS Stemi DV4 fabricado en Alemania.

Consecutivamente, se realizaron microcultivos, para observar estructuras que respaldaron la identificación. Los cuales consistieron en colocar en una caja Petri agua destilada y una base de soporte (triángulo de vidrio). En esta base se colocó un portaobjetos y un cubo de 1.5 a 2.0 cm de ISP-2. Sobre este se transfirió por picadura un fragmento de la colonia. Finalmente, se colocó un cubreobjeto sobre el bloque de agar inoculado y se incubó durante 7 a 14 días a 28 °C. La observación de las características morfológicas de su estructura micelial se realizó mediante la observación directa del bloque de agar con crecimiento del actinomiceto y el montaje del cubreobjeto en un portaobjeto.

Conservación de cepas

Con el objeto de mantener viables y durante largos periodos las cepas de actinomicetos, se utilizó la técnica planteada por Evangelista-Martínez *et al.* (2017). Las esporas y el micelio de las

cepas aisladas se conservaron en glicerol al 20 % (v/v) a -20 °C. Además, se prepararon inóculos generales (I.G.) de esporas y micelio con glicerol al 20 % para obtener una suspensión de esporas.

Detección de enzimas hidrolíticas.

Los actinomicetos seleccionados se caracterizaron por la producción de enzimas hidrolíticas. Para ello, fueron resembrados en agar mínimo mineral (M.M.; Tabla 3), con distintas fuentes de carbono (avena, caseína, celulosa y quitina). A partir de la solución de esporas de los actinomicetos, se tomaron de 2 a 5 µL, los cuales fueron sembrados en tres puntos de la caja de manera equidistante. Se inocularon tres cepas diferentes en cada uno de los puntos. Se dejó actuar durante 10 minutos para que el líquido sembrado se absorbiera por el medio de cultivo. Posteriormente, se incubaron las cepas a 28 °C durante 5-7 días. Se tomó como positiva aquella cepa capaz de desarrollarse en el medio suplementado y como negativa aquella que no lo haga.

Tabla 3. Composición de los medios de cultivo y las distintas fuentes de carbono.

Agar Mínimo Mineral (M.M.)	Fuentes de Carbono para el M.M.
L-asparagina 0.5 g	Caseína
K ₂ HPO ₄ 0.5 g	
MgSO ₄ *7H ₂ O 0.5 g	Carboximetilcelulosa
FeSO ₄ *7H ₂ O 0.01 g	Avena
Glucosa 10 g (Fuente de Carbono)	Almidón
Agar 10 g	
(NH ₄) ₂ SO ₄ 5 g en lugar de L-asparagina cuando se cambien la fuente de carbono	
Fuente de carbono sustituta a glucosa se añada en 5 g/L	

Cepa de *M. royeri*

Se siguió lo sugerido por Castro (2016); se utilizó una cepa referencial del hongo fitopatógeno *M. royeri* proveniente del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). El hongo fue resembrado en Agar V8 clarificado para su reactivación, mantenimiento y posterior aplicación en el ensayo de antagonismo. El hongo fue incubado a 28 °C durante 10 a 15 días.

Prueba *in vitro* de antagonismo de cepas de actinomicetos contra *M. royeri*

Las pruebas de antagonismo se efectuaron de acuerdo con Lino-Navarro *et al.* (2020) con modificaciones. En cajas Petri, con agar suplementado con V8 clarificado, se realizaron las pruebas de antagonismo, la cual consistió en sembrar un disco de agar del hongo fitopatógeno a 1 mm del extremo de la caja Petri (Figura 6), después de 72 h de incubación, se colocó un disco de agar del actinomiceto en el extremo opuesto de la caja. Este procedimiento se repitió por triplicado para cada tratamiento. Además, se incluyó una placa testigo que sólo contenía a *M. royeri*. Cada tratamiento se realizó por triplicado y se incubaron a 29 °C por 7 días (Figura 7).

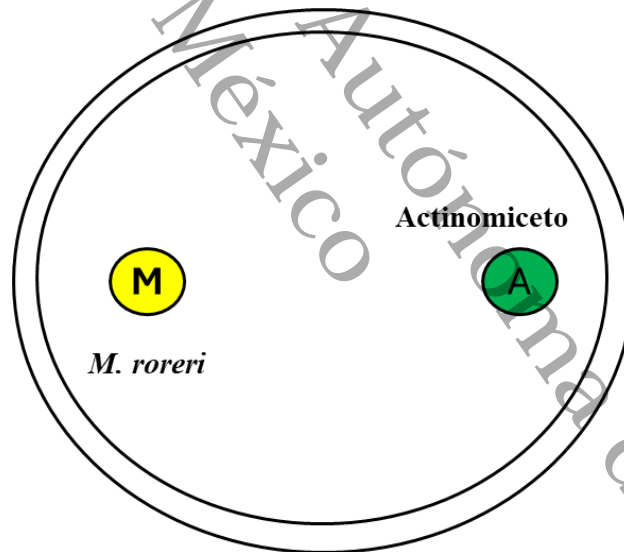


Figura 6. Prueba de antagonismo. El punto amarillo representa a *M. royeri*. El punto verde representa a los actinomicetos.

El porcentaje de inhibición de *M. royeri* se calculó de la siguiente manera:

$$PI = \frac{CC - CT}{CC} \times 100$$

Donde CC es el crecimiento del control y CT es el crecimiento de cada tratamiento.



Figura 7. Diseño Experimental para la prueba de antagonismo contra *M. royeri*.

Antagonismo frente a otros hongos fitopatógenos

Para esta siguiente fase se seleccionaron a las cepas que lograron porcentajes de inhibición favorables frente a la monilia. Se repitieron los procedimientos planteados en la etapa anterior. Los hongos utilizados para esta fase fueron: *F. oxysporum f sp gladioli*, *F. oxysporum f sp lycopersici*, *F. oxysporum*, *Colletotrichum siamense*, *Colletotrichum. musae*, *Lasiodiplodia theobromae*, *B. cinerea* y *Aspergillus sp*, quienes también afectan a cultivos agrícolas de interés comercial a nivel nacional. Las cepas de los hongos fitopatógenos utilizados fueron cultivos monospóricos (Rios-Muñiz & Evangelista-Martínez, 2022), proporcionadas por el Banco de Germoplasma de Actinomicetos en la Subsele Sureste del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ).

Obtención de metabolitos secundarios

Para la producción de metabolitos secundarios se preparó caldo ISP-2. Se colocó 30 mL de caldo en un matraz Erlenmeyer. Posteriormente, se cosecharon las esporas de las cepas

seleccionadas y fueron sembradas en el matraz con caldo ISP-2. El matraz se incubó durante a 120 rpm durante 14 días a 28 °C. Posteriormente, el caldo fue transferido a tubos falcón de 15 mL. Los cuales, se centrifugaron a 10, 000 rpm durante 10 minutos. El sobrenadante se filtró a otro tubo falcón empleando una membrana estéril de 0.22 μm . Finalmente, almaceno en tubos Eppendorf previamente esterilizados (Figura 8).

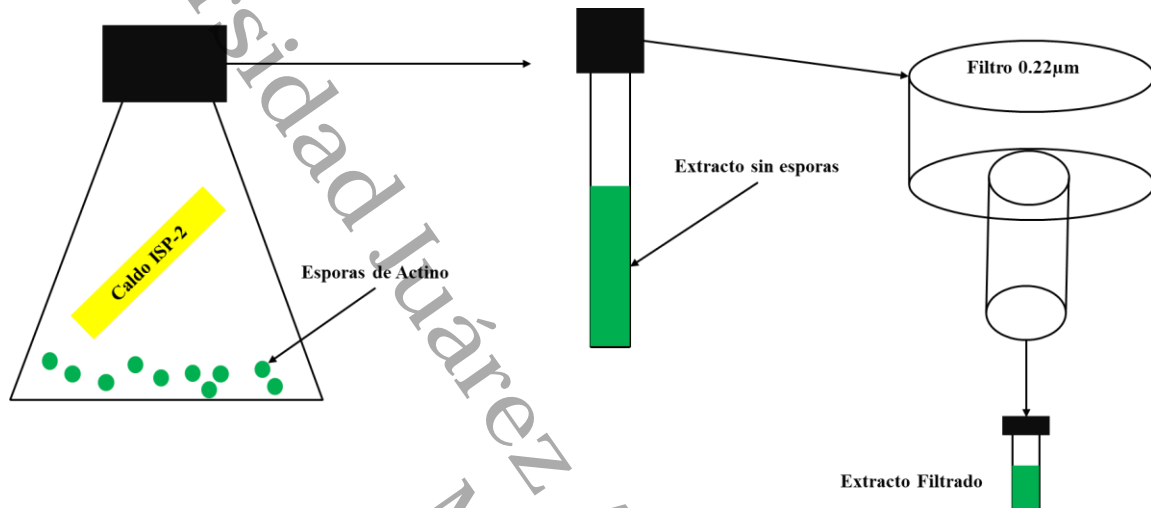


Figura 8. Representación del proceso mediante el cual se obtienen los metabolitos de los actinomicetos.

Efecto del extracto biológico de los metabolitos secundarios en la germinación de las esporas de *M. roreri*.

Para comprobar el posible efecto de los extractos obtenidos a partir de actinomicetos sobre las esporas de monilia, se cosecharon y se filtraron las esporas del hongo. Para esto, se cultivó en placas con V8 el hongo fitopatógeno durante 15-20 días a 28 °C. Cuando concluyó el tiempo de incubación se procedió a transferir de 2-3 mL de agua destilada estéril a la placa. Con un asa de Drigalsky estéril se desprendieron las esporas de la placa, con el objetivo de obtener una suspensión de esporas. Posteriormente, esta suspensión se depositó en un filtro estéril. Primero, se añadieron 2 mL de agua destilada estéril en el filtro, después, se añadieron los 3 mL de la suspensión de esporas, finalmente, se volvió a transferir 2 mL de agua destilada estéril en el filtro. Con esto obtuvimos una suspensión de esporas libre de micelio. La suspensión se almacenó en un tubo de falcón estéril con capacidad nominal de 15 mL (Figura 9).

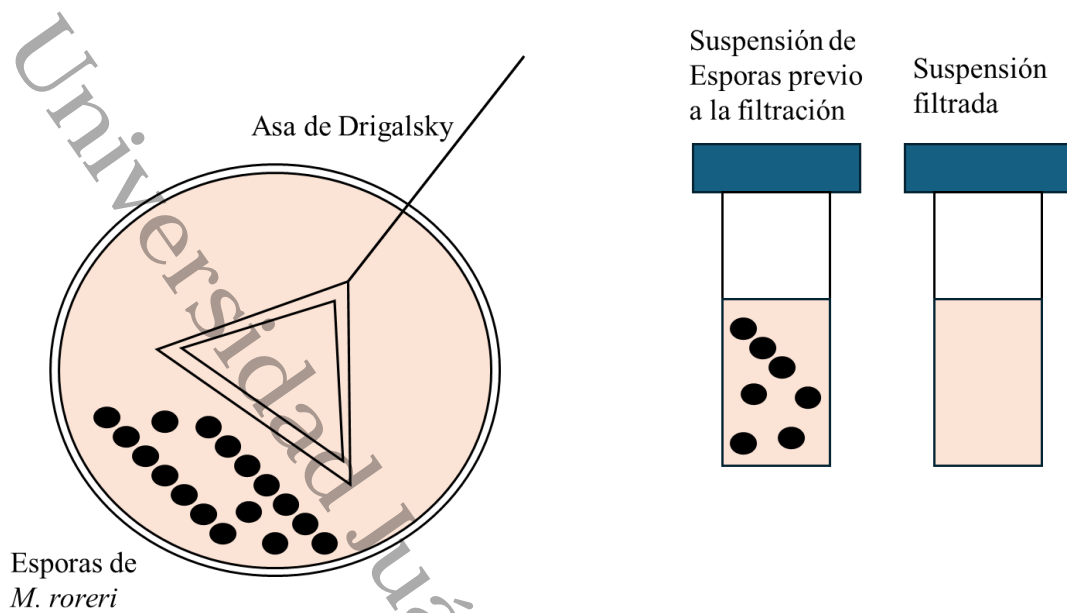


Figura 9. Cosecha de esporas de *M. royeri* para obtener una solución de esporas libre de micelio.

En una microplaca estéril de 24 pocillos se procedió a testear distintas concentraciones de los extractos contra las esporas de monilia. Las concentraciones de los extractos fueron: 0 %, 3 %, 6 %, 12 %, 20 % y 25 %. Cada concentración tuvo 3 réplicas más un control de contaminación. En cada uno de los pozos se inocularon 30 μ L de esporas, más caldo ISP-2 y agua destilada estéril (Figura 10).

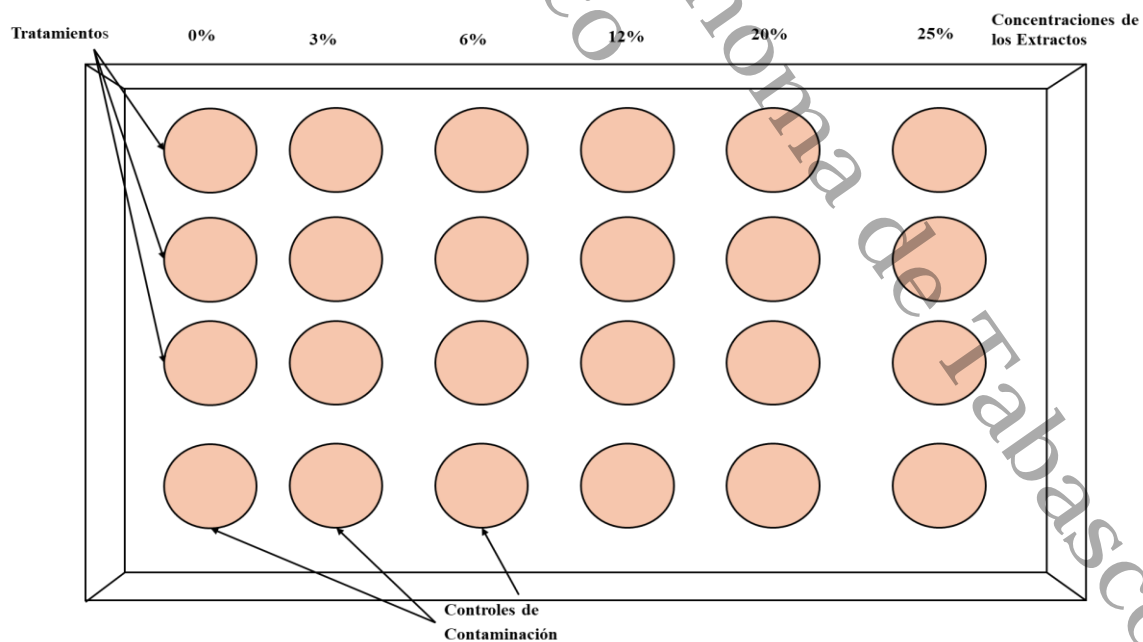


Figura 10. Montaje de la microplaca para la evaluación de la capacidad inhibitoria de los extractos.

Cada pozo fue fotografiado usando el microscopio invertido eclipse Ti de Nikon empleando el objetivo 10X para obtener evidencia de un posible efecto del extracto sobre las esporas de monilia y la fórmula para calcular el porcentaje de inhibición fue:

$$\% \text{ germinación} = (a/a + b) \times 100.$$

Donde: a= número de conidios germinadas; y b= número de conidios sin germinar.

Evaluación de promotores del crecimiento vegetal

La evaluación de las cepas de actinomicetos aisladas como promotoras del crecimiento vegetal se realizó con cuatro pruebas químicas sugeridas por Lino-Navarro *et al.* (2020) con modificaciones: producción de ácido indol acético, producción de sideróforos, fijación de nitrógeno y solubilización de fosfato. En la Tabla 4 se encuentren los componentes de los medios de cultivos que se emplearon en cada prueba química. Para esto las cepas de actinomicetos se sembraron en medio PDA, las cuales, se incubaron durante 28 °C durante 7 días. Posteriormente se procedió a realizar las siguientes pruebas:

Fijación de nitrógeno:

Los actinomicetos aislados se sembraron por medio de la técnica de agotamiento en agar de Ashby. Se incubaron a 22 °C evaluando su crecimiento durante 15 días. Aquellas cepas capaces de crecer de manera pura y definida en el medio fueron consideradas como capaces de crecer en medios libres de nitrógeno.

Producción sideróforos:

En el medio CAS se adicionarán entre 2 y 5 µL de la solución de esporas de actinomicetos, que serán sembradas en tres puntos de la caja de manera equidistante, dejando tiempo suficiente para que el medio absorbiera la solución inoculada. Se inocularon tres cepas diferentes en cada uno de los puntos. La producción de sideróforos se evaluó por la formación de halos en el medio.

Solubilización de fosfatos:

En el medio SRSM-1 se agregó de 2 a 5µL de la solución de esporas de actinomicetos, los cuales serán sembrados en tres puntos de la caja de manera equidistante dando el tiempo suficiente para que el medio absorbiera la solución inoculada. Se inocularon tres cepas diferentes, de los actinomicetos previamente purificados, en cada uno de los puntos. La solubilización de fosfatos se evaluó por un cambio a color amarillo en el medio.

Producción de ácido indol acético:

Las cepas fueron cultivadas en tubos Falcon de 15 mL que contenían PDB suplementado con triptófano al 0.2 %. Fueron incubadas a 37 °C a 125 rpm durante 14 días en una incubadora rotatoria. Después, las cepas de actinomicetos se centrifugaron a 5000 rpm durante 10 minutos. Posteriormente, se mezclaron 1 ml del sobrenadante y 1 ml del reactivo de Salkowski. Los tubos se incubaron a temperatura ambiente durante 20-30 minutos. Se consideró como resultado positivo el viraje a color rosa del medio.

Tabla 4. Componentes para cada uno de los medios de cultivo empleados en las pruebas químicas.

Fórmula en gramos por litro de agua destilada			
Medio Ashby	MEDIO CAS	MEDIO SRSM-1	CALDO PDA
Manitol 20 g	CAS 0.605 g	(NH ₄) ₂ SO ₄ 0.5 g	Dextrosa 20 g
CaCl ₂ 0.20 g	Bromuro de Hexadeciltrimetilamonio (C ₁₉ H ₄₂ BrN) 0.0729 g	KCL 0.2 g	Infusión de papa 4 g
KH ₂ PO ₄ 0.20 g	FeCl ₃ 6H ₂ O 0.0027 g	MgSO ₄ 0.3 g	REACTIVO SALKOWSKY
MgSO ₄ 0.20 g	NaH ₂ PO ₄ *2H ₂ O 0.2953 g	FeSO ₄ 0.004 g	FeCL ₃ 12 g
K ₂ SO ₄ 0.10 g	NaHPO ₄ *12H ₂ O 1.2135 g	NaCl 0.2 g	H ₂ SO ₄ 7.9 M
CaCO ₃ 5 g	NH ₄ Cl 0.1250 g	Glucosa 10 g	
Agar 15 g	KH ₂ PO ₄ 0.0375 g	Extracto de Levadura 0.5 g	
	NaCl 0.0625 g	Purpura bromocresol 0.1 g	
	Agar 15 g	Ca ₃ (PO ₄) ₂ 5 g	
		Agar 15 g	

Análisis estadístico

Para realizar el contraste de la inhibición producida por distintas cepas de actinomicetos sobre *M. roreri* se verificaron los postulados de la estadística paramétrica. La normalidad, se

verificó empleando los coeficientes estandarizados de sesgo y curtosis (Demir, 2022) y la homocedasticidad con la prueba de Levene. Se empleó un ANOVA de un factor, seguido de una prueba de Fisher (LSD). Los resultados de las pruebas estadísticas fueron expresados como de medias (\pm DE).

Identificación molecular de cepas de actinomicetos

La identificación molecular de las cepas seleccionadas de actinomicetos, a partir de su elevada capacidad antagónica *in vitro* frente *M. roreri*, se realizó con base en el análisis de la secuencia parcial del gen rRNA 16S.

Extracción de ADN

El DNA genómico empleado como molde para reacción en cadena de la polimerasa (PCR) se obtuvo a partir de cultivos puros de las cepas seleccionadas, de acuerdo con Evangelista-Martínez (2014). La extracción de ADN se realizó utilizando el reactivo DNAzol,

Amplificación por PCR

La amplificación del gen 16S rRNA se realizó con el par de primer de oligonucleótidos fD1 (5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3') y rD1 (5'-AAGGAGGTGATCCAGCC-3') (Osborn *et al.*, 2002). La reacción de PCR se realizó en un volumen final de 50 μ l que contenían 0.4 μ M de cada primer, 0.2 mM de cada dNTP, 2 U de *Taq* DNA polymerase, 2 mM MgCl₂ y buffer de PCR 1X, 2 ng de DNA.

Las condiciones del PCR fueron: un ciclo inicial de desnaturalización a 95 °C durante 1 min, seguido de 40 ciclos desnaturalización 95 °C por 15 segundos, alineamiento entre 55 °C y 65 °C durante 45 segundos, y una extensión a 75 °C durante 120 segundos. Las reacciones se finalizaron con una extensión. Los productos de PCR se analizaron mediante electroforesis con un gel de agarosa al 1%, empleando el tampón TBE 1X como solución de corrida. La electroforesis se realizó a 60 V durante una hora. Posteriormente, el gel fue teñido con bromuro de etidio durante 20 minutos, y la visualización de las bandas se realizó mediante el sistema de documentación GelDoc EZ (Bio-Rad). Los amplicones de los primers fD1/rD1 se purificaron con el Kit Purification PureLink PCR (Invitrogen®).

Secuenciación del ADN

La secuenciación se realizó en ambas cadenas en el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C. (IPICYT).

Las secuencias fueron editadas y ensambladas con el software Bioedit 7.7.1 (Hall, 1999). El fragmento de 1443 pb fue analizado buscando homólogos con el programa Basic Local Alignment Search Tool (BLAST) y las secuencias de DNA del gen rRNA 16S se recuperaron y emplearon como referencias para realizar un análisis filogenético en el servidor Phylogeny.fr (<http://www.phylogeny.fr/phylogeny.cgi>). Las secuencias se alinearon utilizando el software MUSCLE (v 3.5). Las secuencias se alinearon con MUSCLE (v 3.5) configurado para la más alta precisión. El árbol filogenético se reconstruyó usando el método de NJ y el modelo de sustitución utilizado fue el de Kimura de 2 parámetros con un Bootstrap de 1000 réplicas. El árbol filogenético se visualizó con TreeDyn (v 198.3). La secuencia parcial del gen rRNA 16S de *Streptomyces* sp UJAT54 se depositó en el GenBank con número de accesión **PX497579**.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
México

1.8 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Actividades	Meses																							
	2023					2024										2025								
	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	No v	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Ma y	Jun	
Búsqueda de literatura	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
Tutoriales					X						X						X							
Pruebas Piloto							X																	
Recolección de Rizosfera							X	X	X															
Aislamiento y Montaje de Experimento								X	X	X	X	X	X											
Análisis e Interpretación de los Datos												X	X	X	X	X	X							
Redacción de Tesis												X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Envío de Artículo																					X	X		
Estancia																		X	X					
TOEFL																						X		
Presentación / Defensa de Investigación																							X	

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

1.9 REFERENCIAS CITADAS

- Abad, K. L. B., Cevallos, H. V., Montealegre, V. J. G., & Romero, H. C. (2021). Análisis de las exportaciones del cacao ecuatoriano en grano en el periodo 2008 al 2018. *Revista metropolitana de ciencias aplicadas*, 4(Suplemento 1), 147-155. <https://doi.org/10.62452/kqjprc07>
- Abbasi, S., Safaie, N., Sadeghi, A., & Shamsbakhsh, M. (2019). Streptomyces strains induce resistance to Fusarium oxysporum f. Sp. Lycopersici Race 3 in tomato through different molecular mechanisms. *Frontiers in Microbiology*, 10, 1505. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01505>
- Abdel-Aziz, M. S., Hathout, A. S., El-Neleety, A. A., Hamed, A. A., Sabry, B. A., Aly, S. E., & Abdel-Wahhab, M. A. (2019). Molecular identification of actinomycetes with antimicrobial, antioxidant and anticancer properties. *Comunicata Scientiae*, 10(2), 218–231. <https://doi.org/10.14295/CS.V10I2.2269>
- Acebo-Guerrero, Y., Hernández-Rodríguez, A., Vandeputte, O., Miguélez-Sierra, Y., Heydrich-Pérez, M., Ye, L., Cornelis, P., Bertin, P., & El Jaziri, M. (2015). Characterization of Pseudomonas chlororaphis from Theobroma cacao L. rhizosphere with antagonistic activity against Phytophthora palmivora (Butler). *Journal of Applied Microbiology*, 119(4), 1112–1126. <https://doi.org/10.1111/jam.12910>
- Adra, C., Tran, T. D., Foster, K., Tomlin, R., & Kurtböke, D. İ. (2023). Untargeted MS-Based Metabolomic Analysis of Termite Gut-Associated Streptomyces with Antifungal Activity against Pyrrhoderma noxium. *Antibiotics*, 12(9), 1373. <https://doi.org/10.3390/antibiotics12091373>
- Aguado-Santacruz, G. A., Moreno-Gómez, B., Jiménez-Francisco, B., García-Moya, E., & Preciado-Ortiz, R. E. (2012). Impacto de los sideróforos microbianos y fitosideróforos en la asimilación de hierro por las plantas: Una síntesis. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(1), 9. <https://doi.org/10.35196/rfm.2012.1.9>
- Aguirre, G. (2019). Caracterización molecular de Moniliophthora roreri causante de la vaina helada (moniliasis) en el cacao en tres provincias del Ecuador: Los Ríos, Manabí y Santo Domingo de los Tsáchilas. In *Scientia Agropecuaria* (Vol. 1).
- Albores-Flores, V. J. (2017). Descripción morfológica y bioquímica del mecanismo de la enfermedad de la moniliasis en la interacción Moniliophthora roreri—Theobroma cacao. <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000766825>
- Álvarez, J. C., Martínez, S. C., & Coy, J. (2014). Estado de la moniliasis del cacao causada por Moniliophthora roreri en Colombia. *Acta Agronómica*, 63(4), 388–399. <https://doi.org/10.15446/ACAG.V63N4.42747>

Al-shaibani, M. M., Radin Mohamed, R. M. S., Sidik, N. M., Enshasy, H. A. E., Al-Gheethi, A., Noman, E., Al-Mekhlafi, N. A., & Zin, N. M. (2021). Biodiversity of secondary metabolites compounds isolated from phylum actinobacteria and its therapeutic applications. *molecules*, 26(15), 4504. <https://doi.org/10.3390/molecules26154504>

Ansari, W. A., Krishna, R., Zeyad, M. T., Singh, S., & Yadav, A. (2020). Endophytic actinomycetes-mediated modulation of defense and systemic resistance confers host plant fitness under biotic stress conditions. En R. P. Singh, G. Manchanda, I. K. Maurya, & Y. Wei (Eds.), *Microbial Versatility in Varied Environments* (pp. 167-180). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3028-9_10

Anzules, V., Borjas, R., Alvarado, L., Castro-Cepero, V., & Julca-Otiniano, A. (2019). Control cultural, biológico y químico de *Moniliophthora roreri* y *Phytophthora* spp en *Theobroma cacao* 'CCN-51'. *Scientia Agropecuaria*, 10(4), 511-520. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.04.08>

Arias, N. (2024) Pierde Tabasco más de 6 mil hectáreas de cacao en 6 años - El Heraldo de Tabasco. Recuperado 5 de noviembre de 2025, de <https://oem.com.mx/elheraldodetabasco/local/cuantas-hectareas-de-cacao-se-perdieron-en-tabasco-18483023>

Aristide, D., Martial, T. T. P., Ruth, N. N. E., Grace, L. B., Ebenezer, F. T., Flore, M. P. T., & Thaddee, B. (2022). Effects of a powder formulation of *Streptomyces cameroonensis* on growth and resistance of two cocoa hybrids from cameroon against *Phytophthora megakarya* (Causal Agent of Black Pod Disease). *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 32(2), 160-169. <https://doi.org/10.4014/jmb.2110.10006>

Avendaño-Arrazate, C. H. (2018). BIOLOGÍA FLORAL DE CACAO (*Theobroma cacao* L.); Criollo, trinitario y forastero en México. *Agro Productividad*, 11(9). <https://doi.org/10.32854/AGROP.V11I9.1225>

Ayala-Benítez, M. F. (2008). Manejo integrado de moniliasis (*moniliophthora roreri*) en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) mediante el uso de fungicidas, combinado con labores culturales. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/31859>

Ayala-Torres, A. M., Aranda-Ocampo, S., De León-García de Alba, C., Nava-Díaz, C., & Sánchez-Pale, J. R. (2023). Antagonistic bacteria against *Fusarium* spp. isolated from sclerotia of

Claviceps gigantea in maize (*Zea mays*). *Revista Mexicana de Fitopatología, Mexican Journal of Phytopathology*, 41(2). <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2208-2>

Badii, M. H., & Abreu, J. L. (2006). Control biológico una forma sustentable de control de plagas. *International Journal of Good Consciene*, 1(1).

Bailey, B. A., Evans, H. C., Phillips-Mora, W., Ali, S. S., & Meinhardt, L. W. (2018). *Moniliophthora roreri*, causal agent of cacao frosty pod rot. *Molecular Plant Pathology*, 19(7), 1580-1594. <https://doi.org/10.1111/mpp.12648>

Bano, N., Siddiqui, S., & Amir, M. (2019). House of industrially important bioactive metabolites: A review on actinobacteria.

Barrón, Y., Morales, A., López, P., & Mirafuente, F. (2014). Metodología adaptada para la formación de híbridos F1 de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Tabasco. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(5).

Barros, C. (2018). Laura Caso Barrera coord., Cacao. Producción, consumo y comercio. Del período prehispánico a la actualidad en América Latina. Madrid, Iberoamericana-Vervuert. 408 pp. 2016. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 15(1), 139-143.

Benavides M. P., Bustillo P. A. E., Montoya R. E. C., Cárdenas M. R., & Mejía M. C. G. (2002). Participación del control cultural, químico y biológico en el manejo de la broca del café. *Revista Colombiana de Entomología*, 28(2), 161-165. <https://doi.org/10.25100/socolen.v28i2.9642>

Bergey, D. H., & Holt, J. G. (1993). Bergey's manual of determinative bacteriology . In *Bergey's manual of determinative bacteriology* (9th ed). Williams & Wilkins.

Boudjeko, T., Tchinda, R. A. M., Zitouni, M., Tchatchou Nana, J. A. V., Lerat, S., & Beaulieu, C. (2017). *Streptomyces cameroonensis* sp. nov., a geldanamycin producer that promotes *Theobroma cacao* growth. *Microbes and Environments*, 32(1), 24–31. <https://doi.org/10.1264/jsme2.ME16095>

Briers, Y. (2019). Phage Lytic Enzymes. *Viruses*, 11(2), 113. <https://doi.org/10.3390/v11020113>

CACAO Mexicano planeación agrícola nacional. (2017).

Cao, M., Narayanan, M., Shi, X., Chen, X., Li, Z., & Ma, Y. (2023). Optimistic contributions of plant growth-promoting bacteria for sustainable agriculture and climate stress alleviation. *Environmental Research*, 217. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114924>

Castro, C. (2016). Capacidad antagonista de actinomicetos aislados de la rizósfera de la papa (*Solanum tuberosum* sp. andigena) para el control de hongos fitopatógenos de importancia agrícola. In *Universidad Nacional Mayor De San Marcos Facultad De Ciencias Biológicas*.

Cesa-Luna, C., Baez, A., Quintero-Hernández, V., De La Cruz-Enríquez, J., Castañeda-Antonio, M. D., & Muñoz-Rojas, J. (2020). The importance of antimicrobial compounds produced by beneficial bacteria on the biocontrol of phytopathogens. *Acta Biológica Colombiana*, 25(1), 140-154. <https://doi.org/10.15446/abc.v25n1.76867>

Chowdhury, F. T., Zaman, N. R., Islam, M. R., & Khan, H. (2021). Anti-fungal secondary metabolites and hydrolytic enzymes from rhizospheric bacteria in crop protection: a review. *Journal of Bangladesh Academy of Sciences*, 44(2), 69–84. <https://doi.org/10.3329/jbas.v44i2.51452>

Contreras, L. Y. S., & Riaño, A. L. R. (2013). Aislamiento de microorganismos para control biológico de *Moniliophthora roreri*. *Acta Agronómica*, 62(4), 370-378.

Corrales-Ramírez MSC, L. C., Sánchez-Leal MSC, L. C., Cuervo-Andrade PhD, J. L., Joya, J. A., & Márquez, K. (2012). Efecto biocontrolador de “*Bacillus*” spp., frente a “*Fusarium*” sp., bajo condiciones de invernadero en plantas de tomillo (“*Thymus Vulgaris* l”). *Nova*, 10(17). <https://doi.org/10.22490/24629448.518>

Crits-Christoph, A., Diamond, S., Butterfield, C. N., Thomas, B. C., & Banfield, J. F. (2018). Novel soil bacteria possess diverse genes for secondary metabolite biosynthesis. *Nature* 2018 558:7710, 558(7710), 440–444. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0207-y>

Cruz-Landero, E. D. L., Córdova-Avalos, V., García-López, E., Bucio-Galindo, A., & Jaramillo-Villanueva, J. L. (2015). Manejo agronómico y caracterización socioeconómica del cacao en comalcalco, tabasco. *Foresta Veracruzana*, 17(1), 33-40.

Delbari, Y., Mohassel, Y., Kakaei, E., & Bahrami, Y. (2023). Identification and antibacterial property of endophytic actinobacteria from *Thymes kotschyanus*, *Allium hooshidaryae*, and *Cerasus microcarpa*. *Scientific Reports*, 13(1), 13145. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40478-x>

Delgado-Oramas, B. P. (2020). La resistencia inducida como alternativa para el manejo de plagas en las plantas de cultivo. *Revista de Protección Vegetal*, 35(1). <https://censa.edicionescervantes.com/index.php/RPV/article/view/1084>

Demain, A. L., & Fang, A. (1995). Emerging concepts of secondary metabolism in actinomycetes. *Actinomycetologica*, 9(2), 98–117. https://doi.org/10.3209/SAJ.9_98

Demir, S. (2022). Comparison of normality tests in terms of sample sizes under different skewness and kurtosis coefficients. *International Journal of Assessment Tools in Education*, 9(2). <https://doi.org/10.21449/ijate.1101295>

Díaz-Díaz, M., Antón-Domínguez, B. I., Raya, M. C., Bernal-Cabrera, A., Medina-Marrero, R., Trapero, A., & Agustí-Brisach, C. (2024). Streptomyces spp. strains as potential biological control agents against Verticillium Wilt of Olive. *Journal of Fungi*, 10(2), 138. <https://doi.org/10.3390/jof10020138>

Dinh, M. T., To, U. H., & Anh, D. N. (2023). Isolation, identification, and biological characterization of chitinase-producing actinomycetes from yok don national park. *Tạp Chí Khoa Học Nông Nghiệp Việt Nam*, 21(12), 1517–1526. <https://vie.vjas.vn/index.php/vjasvn/article/view/1223>

Do, T. T., Le, V. T., Ngo, C. C., Do, T. T. H., & Dang, T. H. P. (2021). Biological characteristics and classification of thermophilic actinomycetes showed extracellular hydrolytic enzymes producing ability isolated from compost. *E3S Web of Conferences*, 265, 04008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126504008>

Dorchenkova, Y. A., Gracheva, T. A., Babich, T. L., Sokolova, D. S., Alexandrova, A. V., Pham, G. T. H., Lysak, L. V., Golovchenko, A. V., & Manucharova, N. A. (2022). Soil actinomycetes of vietnam tropical forests. *Forests 2022, Vol. 13, Page 1863*, 13(11), 1863. <https://doi.org/10.3390/F13111863>

Dostert, N., Roque, J., Cano, A., La Torre, M. I., Weigend, M., & Luebert, F. (2012). Hoja botánica: Cacao. *Theobroma cacao* L. <http://repositoriodigital.minam.gob.pe/xmlui/handle/123456789/185>

Ebrahimi-Zarandi, M., Saberi Riseh, R., & Tarkka, M. T. (2022). Actinobacteria as effective biocontrol agents against plant pathogens, an overview on their role in eliciting plant defense. *Microorganisms*, 10(9), 1739. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10091739>

Evangelista-Martínez, Z., Rincon, G., & Quiñones, E. (2017). Potencial biotecnológico de las actinobacterias aisladas de suelos de México como fuente natural de moléculas bioactivas: compuestos antimicrobianos y enzimas hidrolíticas. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 21(63).

Farda, B., Djebaili, R., Vaccarelli, I., Del Gallo, M., & Pellegrini, M. (2022). Actinomycetes from caves: an overview of their diversity, biotechnological properties, and insights for their use in soil environments. *Microorganisms 2022, Vol. 10, Page 453*, 10(2), 453. <https://doi.org/10.3390/MICROORGANISMS10020453>

Fasim, A., More, V. S., & More, S. S. (2021). Large-scale production of enzymes for biotechnology uses. *Current opinion in biotechnology*, 69, 68-76. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2020.12.002>

Fernández-Larrea, O. (2001). Microorganismos antagonistas para el control fitosanitario. *Manejo Integrado De Plagas (Costa Rica)*, 62.

Franco-Correa, M. (2009). Utilización de los actinomicetos en procesos de biofertilización. *Revista Peruana de Biología*, 16(2). <https://doi.org/10.15381/rpb.v16i2.213>

Ge, M., Cai, X., Wang, D., Liang, H., Zhu, J., Li, G., & Shi, X. (2023). Efficacy of *Streptomyces murinus* JKTJ-3 in suppression of pythium damping-off of watermelon. *Microorganisms*, 11(6), 1360. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11061360>

Ghorbani-Nasrabadi, R., Greiner, R., Alikhani, A., Hamed, J., & Yakhchali, B. (2013). Distribution of actinomycetes in different soil ecosystems and effect of media composition on extracellular phosphatase activity. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13(1), 223-236.

Gómez, R., Villanueva, S., & Henríquez, M. (2019). World trend in the elaboration of cocoa derived products. 26(2).

Guaman Villa, M. A., Jaramillo Aguilar, E. E., & Bernal Morales, J. F. (2022). Control biológico de la mazorca negra (*Phytophthora Palmivora* l.) en el cultivo del cacao (*Theobroma cacao* L.). *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 5.

Guillermo, J., & Gil, R. (2016). Pérdidas económicas asociadas a la pudrición de la mazorca del cacao causada por *Phytophthora* spp. y *Moniliophthora roreri* (Cif y Par) Evans et al., en la hacienda Theobroma, Colombia. *Rev. Protección Veg*, 31(1).

Gunnarsson, N., Bruheim, P., & Nielsen, J. (2004). Glucose metabolism in the antibiotic producing actinomycete *Nonomuraea* sp. ATCC 39727. *Biotechnology and Bioengineering*, 88(5), 652–663. <https://doi.org/10.1002/BIT.20279>

Hall, T. A. (1999). *BIOEDIT*: A user-friendly biological sequence alignment editor and analysis program for windows 95/98/ NT. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:82421255>

Hamed, J., Poorinmohammad, N., & Papiran, R. (2017). Growth and life cycle of actinobacteria. En J. Wink, F. Mohammadipannah, & J. Hamed (Eds.), *Biology and Biotechnology of Actinobacteria* (pp. 29-50). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60339-1_3

Hatha, A. a. M., Rinoy, V., Nishamol, S., & Suchitra, R. (2012). Biochemical and physiological characteristics of actinomycetes isolated from high altitude shola soils of tropical Montane forest. <http://dyuthi.cusat.ac.in/xmlui/handle/purl/3948>

Hernández-Gómez, E., López-Navarrete, M. C., Garrido-Ramírez, E. R., Solís-Bonilla, J. L., Zamarripa-Colmenero, A., Avendaño-Arrazate, C. H., & Mendoza-López, A. (2012). Las moniliasis (*Moniliophthora roreri* Cif & Par) del Cacao: búsqueda de estrategias del manejo. *Agro Productividad*, 5(6).

Hipólito-Romero, E., Carcaño-Montiel, M. G., Ramos-Prado, J. M., Vázquez-Cabañas, E. A., López-Reyes, L., & Ricaño-Rodríguez, J. (2017). Effect of mixed edaphic bacterial inoculants in the early development of improved cocoa cultivars (*Theobroma cacao* L.) in a traditional agroforestry system of Oaxaca, Mexico. *Revista Argentina de Microbiología*, 49(4), 356–365. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2017.04.003>

Huamanchumo De La Cuba, O. (2017). Cacao. Producción, consumo y comercio. Del período prehispánico a la actualidad en América Latina. *Fronteras de la Historia*, 22(1), 237-242.

Ichinose, K. (2003). Biosynthetic studies on model antibiotics towards elucidation and utilization of actinomycete secondary metabolism. *Actinomycetologica*, 17(2), 71–75. https://doi.org/10.3209/SAJ.17_71

Islas-Lugo, F., Gutiérrez-García, V., Cruz-Arredondo, A., Ríos-Muñiz, D. E., & Evangelista-Martínez, Z. (2024). Evaluación de la capacidad promotora del crecimiento vegetal y actividad antagonista contra hongos fitopatógenos de las bacterias *Streptomyces*. *Enfoques Transdisciplinarios: Ciencia y Sociedad*, 2(2), 137–148. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12766054>

Jiménez-Martínez, E. (with Sandino Díaz, V., & Valle Gómez, N.). (2009). Métodos de control de plagas. Universidad Nacional Agraria. <https://repositorio.una.edu.ni/2457/>

Jiménez-Zapata, D. L., Quiroga-Pérez, M., Quiroz-Yepes, M., Marulanda-Tobón, A., Álvarez, J. C., & Mosquera-López, S. (2023). Development of a method for detecting and estimating *Moniliophthora roreri* spore loads based on spore traps and qPCR. *Journal of Fungi*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/jof9010047>

Jose, P. A., & Jha, B. (2016). New Dimensions of research on actinomycetes: Quest for next generation antibiotics. *Frontiers in Microbiology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01295>

Khan, S., S., Gul, A., Jehan, S., Khan, Z., saeed, J., Shirazi, R., Raziq, A., Waseem Khan, M., & Ullah, H. (2023). Biodiversity of Actinomycetes and Their Secondary Metabolites: A Comprehensive Review. *Journal of Advanced Biomedical and Pharmaceutical Sciences*, 6(1). <https://doi.org/10.21608/jabps.2022.161607.1165>

Kotb, E., Alabdall, A. H., Alghamdi, A. I., Ababutain, I. M., Aldakeel, S. A., Al-Zuwaid, S. K., Algarudi, B. M., Algarudi, S. M., Ahmed, A. A., & Albarrag, A. M. (2023). Screening for chitin degrading bacteria in the environment of Saudi Arabia and characterization of the most potent chitinase from *Streptomyces variabilis* Am1. *Scientific Reports*, 13(1), 11723. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38876-2>

Larios, C. Z., Solís, G. B., Baizabal, V. A., Gómora, M. J. G., Torres, R. A., Ruz, M. H., Cámara-Córdova, J., Zayas, E. E. M., Valenzuela-Córdova, B., Cadenas-Madrigal, C., Moreno-Jiménez, V., Díaz-López, H., Luna-Ruiz, R., Moguel-Ordoñez, E., Villanueva-García, C., Gómez-Rivera, A., Lobato-García, C. E., García-Alamilla, P., Carrera-Lanestosa, A., Rodríguez, R. L. (2024). El Cacao tabasqueño: De los olmecas a nuestro tiempo. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. <https://doi.org/10.19136/ect120424a0>

Lino-Navarro, M., Morales-Tello, E., Castellanos-Sanchez, P., Acosta-Román, M., & Soberon-Lozano, M. (2020). Respuesta antifúngica y propiedades PGPB de actinomicetos aislados de cultivos de “vid” *Vitis vinifera* (Vitaceae). *Arnaldoa*, 27(2), 571-586. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.272.27209>

López, I. G. C. G., Guerrero, Ms. J. N. Q., & Batista, D. C. R. M. G. (2018). Alternativas orgánicas para el control de *Monilia* (*Moniliophthora roreri*, Cif. Y Par) en el cultivo de cacao. *Revista Científica Agroecosistemas*, 6(2), 56-62.

López-Reyes, P. K., De la Torre-Zavala, S., Cortés-González, M. M., Galán-Wong, L. J., & Avilés-Arnaut, H. (2024). biological control of *streptomyces* sp. PR69 against *phytophthora capsici* and its growth-promoting effects on plants. *Horticulturae*, 10(12), 1365. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10121365>

Ma, A., Zhang, X., Jiang, K., Zhao, C., Liu, J., Wu, M., Wang, Y., Wang, M., Li, J., & Xu, S. (2020). Phylogenetic and physiological diversity of cultivable actinomycetes isolated from alpine habitats on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Frontiers in Microbiology*, 11, 555351. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2020.555351/BIBTEX>

Mahdi, R. A., Bahrami, Y., & Kakaei, E. (2022). Identification and antibacterial evaluation of endophytic actinobacteria from *Luffa cylindrica*. *Scientific Reports*, 12(1), 18236. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23073-4>

Markovieh, N. A., & Kononova, G. L. (2003). Lytic enzymes of trichoderma and their role in plant defense from fungal diseases: A review. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 39(4), 341-351. <https://doi.org/10.1023/A:1024502431592>

Martin, M. Á., & Ramos, S. (2021). Impact of cocoa flavanols on human health. *Food and Chemical Toxicology: An International Journal Published for the British Industrial Biological Research Association*, 151, 112121. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2021.112121>

Mebrat, Y. (2024). Production of secondary metabolites by actinomycetes and their biological applications: A review. *International Journal of Science, Technology, Engineering and Mathematics*, 4(3), 154–172. <https://doi.org/10.53378/IJSTEM.353099>

Meenakshi, S., Hiremath, J., Meenakshi, M. H., & Shivaveerakumar, S. (2024). Actinomycetes: Isolation, cultivation and its active biomolecules. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 18(1), 118-143. <https://doi.org/10.22207/JPAM.18.1.48>

Menezes, A., Douglas Melo Coutinho, H., Gonçalves Wanderley, A., Ribeiro-Filho, J., Ngamcharunghit, C., Chaimusik, N., Panbangred, W., Euanorasetr, J., & Intra, B. (2023). Bioactive metabolites from terrestrial and marine actinomycetes. *Molecules* 2023, Vol. 28, Page 5915, 28(15), 5915. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES28155915>

Moniliophthora roreri (MONPRO)[World distribution] EPPO Global Database. (2025). Recuperado 9 de enero de 2026, de <https://gd.eppo.int/taxon/MONPRO/distribution>

Mouafo-Tchinda, R. A., Boudjeko, T., Simao-Beauvoir, A. M., Lerat, S., Tsala, É., Monga, E., & Beaulieu, C. (2016). Morphological, physiological, and taxonomic characterization of actinobacterial isolates living as endophytes of cacao pods and cacao seeds. *Microbes and Environments*, 31(1), 56–62. <https://doi.org/10.1264/jsme2.ME15146>

Mukhtar, S., Zaheer, A., Aiysha, D., Malik, K. A., & Mehnaz, S. (2017). Actinomycetes: A source of industrially important enzymes. *Journal of Proteomics & Bioinformatics*, 10(12), 316–319. <https://doi.org/10.4172/JPB.1000456>

Muteeb, G., Rehman, M. T., Pani, B., & Khan, R. H. (2024). Editorial: Novel drug-designing approaches to combat antimicrobial resistance. *Frontiers in Molecular Biosciences*, 10, 1342702. <https://doi.org/10.3389/fmolb.2023.1342702>

Nabila, M. I., & Kannabiran, K. (2018). Antagonistic activity of terrestrial *Streptomyces* sp. VITNK9 against Gram negative bacterial pathogens affecting the fish and shellfish in aquaculture. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 53(2), 171-183. <https://doi.org/10.22370/rbmo.2018.53.2.1291>

Negi, V., Sharma, P., Amreen, & Rawat, G. (2024). A comprehensive review on actinomycetes distribution, novel bioactive compounds and their implementation in the field of agronomy and medical. *19(2)*, 85–95. <https://doi.org/10.51220/jmr.v19-i2.10>

Nuguse, M., & Kejela, T. (2024). Actinomycetes isolated from rhizosphere of wild *Coffea arabica* L. showed strong biocontrol activities against coffee wilt disease. *PLOS ONE*, 19(8), e0306837. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306837>

Ofori, A., Padi, F. K., Amoako-Attah, I., Asare, E. K., Dadzie, A., & Bukari, Y. (2023). Genetic variation among cocoa (*Theobroma cacao* L.) families for resistance to black pod disease under field and laboratory conditions. *Ecological Genetics and Genomics*, 28, 100182. <https://doi.org/10.1016/j.egg.2023.100182>

Osborn, A. M., Moore, E. R. B., & Timmis, K. N. (2000). An evaluation of terminal-restriction fragment length polymorphism (T-RFLP) analysis for the study of microbial community structure and dynamics. *Environmental Microbiology*, 2(1), 39-50. <https://doi.org/10.1046/j.1462-2920.2000.00081.x>

Osorio-Echeverri, V. M., Obando-García, J. J., Castrillón-Duque, E. X., & Martínez, J. G. (2023). Bacterias filamentosas productoras de enzimas hidrolíticas aisladas de rizosferas y un sistema de compostaje. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 15(1), 231–249. <https://doi.org/10.22490/21456453.6594>

Parija, S. C. (2023). Actinomycetes. In *Textbook of Microbiology and Immunology* (pp. 457–464). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-3315-8_32

Pérez-Corral, D. A., García-González, N. Y., Gallegos-Morales, G., Ruiz-Cisneros, M. F., Berlanga-Reyes, D. I., & Ríos-Velasco, C. (2017). Aislamiento de actinomicetos asociados a rizosfera de árboles de manzano antagonicos a *Fusarium equiseti*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(7), 1629-1638. <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i7.555>

Pérez-Corral, D. A., Ornelas-Paz, J. de J., Olivas-Orozco, G. I., Acosta-Muñiz, C. H., Salas-Marina, M. Á., Berlanga-Reyes, D. I., Ruiz-Cisneros, M. F., & Rios-Velasco, C. (2022). Molecular, morphological and biochemical characterization of actinomycetes and their

antagonistic activity against phytopathogenic fungi. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 45(1), 103-103. <https://doi.org/10.35196/rfm.2022.1.103>

Pests & Diseases - International Cocoa Organization. (2023). Retrieved September 3, 2025, from <https://www.icco.org/pests-diseases/>

Petit, A.-N., Fontaine, F., Vatsa, P., Clément, C., & Vaillant-Gaveau, N. (2012). Fungicide impacts on photosynthesis in crop plants. *Photosynthesis Research*, 111(3), 315-326. <https://doi.org/10.1007/s11120-012-9719-8>

Phillips-Mora, W., Castillo, J., Krauss, U., Rodríguez, E., & Wilkinson, M. J. (2005). Evaluation of cacao (*Theobroma cacao*) clones against seven colombian isolates of *Moniliophthora roreri* from four pathogen genetic groups. *Plant Pathology*, 54(4). <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2005.01210.x>

Phillips-Mora, W., Coutiño, A., Ortiz, C. F., López, A. P., Hernández, J., & Aime, M. C. (2006). First report of *Moniliophthora roreri* causing frosty pod rot (moniliasis disease) of cocoa in Mexico. *Plant Pathology*, 55(4). <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2006.01418.x>

Planeación Agrícola Nacional: Cacao Mexicano, I Planeación agrícola nacional 2017-2030 1 (2017).

Ploetz, R. C. (2007). Cacao diseases: Important threats to chocolate production worldwide. *Phytopathology*, 97(12). <https://doi.org/10.1094/PHYTO-97-12-1634>

Pozo, Y. R., Romero, L. C., Suárez, A. G., Pérez, J. G., & Álvarez-Rivera, V. P. (2006). Aislamiento, selección e identificación de bacterias del género *Bacillus* antagonistas de *Pectobacterium Carotovorum*. *Fitosanidad*, 10(3), 187-191.

Quiñones-Aguilar, E. E. (2018). actinomicetos aislados de rizosfera de nardo (*Polianthes tuberosa*) del estado de Morelos, México. *Agro Productividad*, 11(8). <https://doi.org/10.32854/agrop.v11i8.1098>

Quintana-Fuentes, L. F., Gómez-Castelblanco, S., García-Jerez, A., & Martínez-Guerrero, N. (2015). Caracterización de tres índices de cosecha de cacao de los clones CCN51, ICS60 e ICS 95, en la montaña santandereana, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(1). <https://doi.org/10.22490/21456453.1284>

Reyes-Figueroa, O., Ortiz-García, C. F., Torres-de la Cruz, M., Lagunes-Espinoza, L. del C., & Valdovinos-Ponce, G. (2016). *Trichoderma* species from the cacao agroecosystem with

biocontrol potential of *Moniliophthora roreri*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 22(2), 149–163. <https://doi.org/10.5154/R.RCHSCFA.2015.08.036>

Rios-Muñiz, D. E., & Evangelista-Martínez, Z. (2022). Antifungal activity of *Streptomyces* sp. CACIS-2.15CA, as a potential biocontrol agent, against some soil-borne fungi. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 32(1), 130. <https://doi.org/10.1186/s41938-022-00630-7>

Rodríguez, W. (2021). Memorias del II Congreso de Control Biológico Aplicado. *Archivos Académicos USFQ*, 36. <https://doi.org/10.18272/archivosacademicos.vi36.2313>

Saito, S., & Arai, M. A. (2024). Methodology for awakening the potential secondary metabolic capacity in actinomycetes. *Beilstein Journal of Organic Chemistry* 20:69, 20(1), 753–766. <https://doi.org/10.3762/BJOC.20.69>

Salaria, N., Sharma, S., & Sharma, S. (2017). Exploration of antimicrobial potential of soil actinomycetes from dal lake of north-western himalayas, India. *International Journal of Science and Research Methodology*, 7(3).

Salazar, O., & Asenjo, J. A. (2007). Enzymatic lysis of microbial cells. *Biotechnology Letters*, 29(7), 985-994. <https://doi.org/10.1007/s10529-007-9345-2>

Salwan, R., & Sharma, V. (2020). Molecular and biotechnological aspects of secondary metabolites in actinobacteria. In *Microbiological Research* (Vol. 231). <https://doi.org/10.1016/j.micres.2019.126374>

Sang, J., Wang, H., Yu, Y., Ji, Z., Xia, M., Hao, T., Li, L., & Ge, R. (2023). Azole fungicides inhibit human and rat gonadal 3 β -hydroxysteroid dehydrogenases: Structure-activity relationship and in silico docking analysis. *Food and Chemical Toxicology*, 114028. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2023.114028>

Santoyo, G., Hernández-Flores, B., Hernández Salmerón, J., Rojas Solís, D., Contreras-Pérez, M., Loaeza-Lara, P. D., & Orozco-Mosqueda, Ma. D. C. (2020). Detección de los genes *phlD* y *hcnC* en bacterias antagonistas productoras de sideróforos asociadas a *Rubus fruticosus* L. *Nova Scientia*, 12(24). <https://doi.org/10.21640/ns.v12i24.2160>

Sarika, K., Sampath, G., Kaveriyappan Govindarajan, R., Ameen, F., Alwakeel, S., Al Gwaiz, H. I., Raja Komuraiah, T., & Ravi, G. (2021). Antimicrobial and antifungal activity of soil actinomycetes isolated from coal mine sites. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(6), 3553-3558. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.03.029>

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021). Cacao, cultivo con historia tangible en nuestro presente. gob.mx. Recuperado 4 de noviembre de 2025, de <http://www.gob.mx/agricultura/articulos/cacao-cultivo-con-historia-tangible-en-nuestro-presente>

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021). Cacao, riqueza del campo mexicano. gob.mx. Recuperado 4 de noviembre de 2025, de <http://www.gob.mx/agricultura/articulos/cacao-riqueza-del-campo-mexicano>

Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Pesca. (2024) Discrepan Bienestar y SIAP por hectáreas de cacao sembradas en Tabasco. El Heraldo de Tabasco. Recuperado 5 de noviembre de 2025, de <https://oem.com.mx/elheraldodetabasco/local/discrepan-bienestar-y-siap-por-hectareas-de-cacao-sembradas-en-tabasco-19508993>

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2025). *Panorama Agroalimentario e Infografías Estatales*. gob.mx. Recuperado 9 de enero de 2026, de <http://www.gob.mx/agricultura/dgsiap/acciones-y-programas/panorama-agroalimentario-258035>

Shanthi, V. (2021). Actinomycetes: Implications and prospects in sustainable agriculture. En Inamuddin, M. I. Ahamed, R. Boddula, & M. Rezakazemi (Eds.), *Biofertilizers* (1.a ed., pp. 335-370). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119724995.ch11>

Silva, G. D. C., Kitano, I. T., Ribeiro, I. A. D. F., & Lacava, P. T. (2022). The potential use of actinomycetes as microbial inoculants and biopesticides in agriculture. *Frontiers in Soil Science*, 2, 833181. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2022.833181>

Song, L., Jiang, N., Wei, S., Lan, Z., & Pan, L. (2020). Isolation, screening, and identification of actinomycetes with antifungal and enzyme activity assays against *Colletotrichum dematium* of *Sarcandra glabra*. *Mycobiology*, 48(1), 37-43. <https://doi.org/10.1080/12298093.2020.1716604>

Subathra Devi, C., Merlyn Keziah, S., Jemimah Naine, S., & Mohanasrinivasan, V. (2022). Actinomycetes: microbiology to systems biology. *Actinobacteria: Microbiology to Synthetic Biology*, 1–35. https://doi.org/10.1007/978-981-16-5835-8_1/FIGURES/2

Teles, A. S. C., Chávez, D. W. H., Oliveira, R. A., Bon, E. P. S., Terzi, S. C., Souza, E. F., Gottschalk, L. M. F., & Tonon, R. V. (2019). Use of grape pomace for the production of hydrolytic enzymes by solid-state fermentation and recovery of its bioactive compounds. *Food Research International*, 120, 441-448. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.083>

- Terrero-Yépez, P. I., Peñaherrera-Villafuerte, S. L., Solís-Hidalgo, Z. K., Vera-Coello, D. I., Navarrete-Cedeño, J. B., & Herrera-Defaz, M. A. (2018). In vitro compatibility of *Trichoderma* spp. with fungicides commonly used in cocoa (*Theobroma cacao* L.). *Investigación Agraria*, 20(2), 146–151. <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2018.diciembre.146-151>
- Tian, L., Hu, S., Wang, X., Guo, Y., Huang, L., Wang, L., & Li, W. (2022). Antagonism of rhizosphere *Streptomyces yangpuensis* CM253 against the pathogenic fungi causing corm rot in saffron (*Crocus sativus* L.). *Pathogens*, 11(10), 1195. <https://doi.org/10.3390/pathogens11101195>
- Tistechok, S., Skvortsova, M., Luzhetskyy, A., Fedorenko, V., Parnikoza, I., & Gromyko, O. (2019). Antagonistic and plant growth promoting properties of actinomycetes from rhizosphere *Deschampsia antarctica* E. Desv. (Galindez Island, Antarctica). *Ukrainian Antarctic Journal*, 1(18), 169–177. [https://doi.org/10.33275/1727-7485.1\(18\).2019.140](https://doi.org/10.33275/1727-7485.1(18).2019.140)
- Tiwari, K., Upadhyay, D. J., Mösker, E., Süßmuth, R., & Gupta, R. K. (2015). Culturable bioactive actinomycetes from the Great Indian Thar Desert. *Annals of Microbiology*, 65(4), 1901–1914. <https://doi.org/10.1007/S13213-014-1028-3/FIGURES/4>
- Torres de la Cruz. (2010). *Progreso temporal y manejo integrado de la moniliasis [Moniliophthora roreri (Cif y Par) Evans et al] del cacao (Theobroma cacao) en Tabasco, México*. <http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/handle/10521/146>
- Torres-de la Cruz, M., Mora-Aguilera, G., Ortiz-García, C. F., De la Cruz-Pérez, A., & Gaspar-Génico, J. Á. (2020). Flujos productivos determinan la estructura epidémica de la moniliasis del cacao en el sureste de México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 43(4), 431. <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.4.431>
- Torres-de-la-Cruz, M., Quevedo-Damián, I., Ortiz-García, C. F., Lagúnez-Espinoza, L. del C., Nieto-Angel, D., & Cruz, M. P. la. (2019). Control químico de *Moniliophthora roreri* en México. *Biotecnia*, 21(2), 55-61. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v21i2.906>
- Tosto, A., Morales, A., Rahn, E., Evers, J. B., Zuidema, P. A., & Anten, N. P. R. (2023). Simulating cocoa production: A review of modelling approaches and gaps. *Agricultural Systems*, 206, 103614. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103614>
- Trinidad-Cruz, J. R., Quiñones-Aguilar, E. E., Hernández-Cuevas, L. V., López-Pérez, L., & Rincón-Enríquez, G. (2017). Hongos micorrízicos arbusculares asociados a la rizosfera de *Agave cupreata* en regiones mezcaleras del estado de Michoacán, México. *Scientia Fungorum*, 45, 13–25. <https://doi.org/10.33885/sf.2017.0.1164>

Trinidad-Cruz, J. R., Rincón-Enríquez, G., Evangelista-Martínez, Z., & Quiñones-Aguilar, E. E. (2025). Antimicrobial activity of *Streptomyces* spp. isolated from bean rhizospheric soil against *Xanthomonas* sp. *Revista Argentina de Microbiología / Argentinean Journal of Microbiology*. <https://doi.org/10.1016/J.RAM.2025.07.002>

Valan-Arasu, M., Esmail, G. A., & Al-Dhabi, N. A. (2016). Hypersaline actinomycetes and their biological applications. En D. Dhanasekaran & Y. Jiang (Eds.), *Actinobacteria—Basics and Biotechnological Applications*. InTech. <https://doi.org/10.5772/61065>

Valerio-Landa, S. D., Quiñones-Aguilar, E. E., Enríquez-Vara, J., Hernandez-Montiel, L. G., Hernández-Gutiérrez, R., & Rincon-Enriquez, G. (2021). Method of induction, isolation, and selection of HRP proteins from phytopathogenic bacteria, a potential source of inducers of plant resistance. *45*, 70–78. <https://doi.org/10.22201/fm.0188137xe.2021.45.07>

Vanee, N., Paul Brooks, J., & Fong, S. S. (2017). Metabolic profile of the cellulolytic industrial actinomycete *Thermobifida fusca*. *Metabolites 2017, Vol. 7, Page 57, 7(4)*, 57. <https://doi.org/10.3390/METABO7040057>

Vázquez Vidal, V., & López Rodríguez, W. B. (2021). Comportamiento de la producción de cacao en Comalcalco, Tabasco durante el periodo 2014-2018. *Publicaciones e Investigación*, *15(2)*. <https://doi.org/10.22490/25394088.5549>

Verna, R. (2013). The history and science of chocolate. *Malaysian J Pathol*, *35(2)*, 111–121.

Villamil C., J. E., Sierra A., L. J., Olarte L., Y., Mosquera E., A. T., Fajardo C., J. D., Pinzón, E. H., & Martínez O., J. W. (2016). Integración de prácticas culturales y control biológico para el manejo de *Moniliophthora roreri* Cif & Par. *Revista de Ciencias Agrícolas*, *32(2)*, 13–25. <https://doi.org/10.22267/rcia.153202.9>

Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C., & Guzmán-Reyna, R. R. (2005). Control genético de características de crecimiento en vivero de plántulas de *Pinus oocarpa*. *Revista Fitotecnia Mexicana*, *28(4)*. <https://doi.org/10.35196/rfm.2005.4.333>

Zhang, D., Lu, Y., Chen, H., Wu, C., Zhang, H., Chen, L., & Chen, X. (2020). Antifungal peptides produced by actinomycetes and their biological activities against plant diseases. *The Journal of Antibiotics*, *73(5)*, 265-282. <https://doi.org/10.1038/s41429-020-0287-4>

CAPITULO 2: ARTÍCULO CIENTÍFICO

Nombre del artículo: Actividad antagonista de bacterias *Streptomyces* contra *Moniliophthora roreri* causante de la moniliasis en frutos de cacao (*T. cacao* L.)

Autores: Eduardo Arturo Calles-Moreno¹, Rosa Martha Padrón-López¹, Evangelista-Martínez², Lucero Vázquez-Cruz¹ y Eder Ramos-Hernández³

Resumen: A nivel mundial el cacao (*Theobroma cacao* L.) es un cultivo de gran relevancia económica y social cuya producción se ve amenazada por la moniliasis, que es una enfermedad provocada por el hongo *M. roreri*, que causa la pudrición del fruto de cacao. En el presente trabajo se evaluó la actividad antagónica contra *M. roreri* de diversas cepas de bacterias *Streptomyces* aisladas del suelo rizosférico de una plantación de cacao. La actividad antagonista de las bacterias aisladas se evaluó in vitro mediante ensayos de confrontación dual; el porcentaje de inhibición (PI) del crecimiento del hongo se empleó como criterio para la selección de la mejor cepa. Posteriormente, con la cepa seleccionada se obtuvo un extracto bioactivo (EB) que se empleó para evaluar su efecto sobre la germinación de las esporas del hongo. Se aislaron 12 cepas con características morfológicas similares al género *Streptomyces*, de las cuales se seleccionó la cepa UJAT54 que obtuvo el mayor porcentaje de inhibición (PI) del crecimiento de *M. roreri* (50 %). Además, la cepa UJAT54 mostró antagonismo contra otros hongos fitopatógenos como *Aspergillus* sp., *F. oxysporum*, *L. theobromae*, *B. cinerea*, y especies de *Colletotrichum*. En relación con el EB54, se obtuvo una concentración mínima inhibitoria (CMI) de 50 µg/mL. El análisis molecular del gen ribosomal 16S confirmó que la cepa UJAT-54 pertenece al género *Streptomyces*. Los resultados obtenidos muestran el potencial de *Streptomyces* sp. y sus metabolitos para ser empleados para el control de la moniliasis en cultivos de cacao.

Palabras clave: Actividad Antifúngica, actinobacterias, control biológico, confrontación dual

Institución de adscripción de cada autor:

¹Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas. Carretera Villahermosa-Cárdenas Km. 0.5 S/N, Ranchería Emiliano Zapata, 86150 Villahermosa, Tabasco, México; (E.A.C.M.), (R.M.P.L.), (L.V.C.).

²Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C., Subsección Sureste. Tablaje 31264, Km. 5.5 Carretera Sierra Papacal - Chuburná Puerto. C.P. 97302 Mérida, Yucatán, México (Z.E.M.).

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Carretera Federal Huimanguillo-Cárdenas Km 1, Centro 86400 Huimanguillo, Tabasco, México; (E.R.H.).

Enviado a y/o publicado en: Terra Latinoamericana

Nombre de la Editorial: Terra Latinoamericana

Fecha de envío o Fecha de publicación: 11 de diciembre del 2025

Actividad antagonista de bacterias *Streptomyces* contra *Moniliophthora roreri* causante de la moniliasis en frutos de cacao (*Theobroma cacao* L.)
Antagonistic activity of *Streptomyces* against *Moniliophthora roreri*, the causative agent of moniliasis on cocoa fruits (*Theobroma cacao* L.)

Eduardo Arturo Calles-Moreno^{1‡} (<https://orcid.org/0009-0004-9416-8345>), Rosa Martha Padrón López^{1‡} (<https://orcid.org/0000-0001-7242-7247>), Zahaed Evangelista-Martínez^{2‡} (<https://orcid.org/0000-0003-3145-0824>), Lucero Vázquez Cruz¹ (<https://orcid.org/0000-0002-2512-9842>) y Eder Ramos Hernández³ (<https://orcid.org/0000-0001-6860-4212>)

¹ Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de ciencias Biológicas. Carretera Villahermosa-Cárdenas Km. 0.5 S/N, Ranchería Emiliano Zapata, 86150 Villahermosa, Tabasco, México; (E.A.C.M.), (R.M.P.L.), (L.V.C.).

² Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C., Subsede Sureste. Tablaje 31264, Km. 5.5 Carretera Sierra Papacal - Chuburná Puerto. C.P. 97302 Mérida, Yucatán, México (Z.E.M.).

³ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Carretera Federal Huimanguillo-Cárdenas Km 1, Centro 86400 Huimanguillo, Tabasco, México; (E.R.H.).

‡ Autor para correspondencia: eduardocalles24@gmail.com

Editor Asociado:

Editor Técnico:

2.1 RESUMEN

A nivel mundial el cacao (*T. cacao* L.) es un cultivo de gran relevancia económica y social cuya producción se ve amenazada por la moniliasis, que es una enfermedad provocada por el hongo *M. roreri*, que causa la pudrición del fruto de cacao. En el presente trabajo se evaluó la actividad antagónica contra *M. roreri* de diversas cepas de bacterias *Streptomyces* aisladas del suelo rizosférico de una plantación de cacao. La actividad antagonista de las bacterias aisladas se evaluó in vitro mediante ensayos de confrontación dual, el porcentaje de inhibición (PI) del crecimiento del hongo se empleó como criterio para la selección de la mejor cepa. Posteriormente, con la cepa seleccionada se obtuvo un extracto bioactivo (EB) que se empleó para evaluar su efecto sobre la germinación de las esporas del hongo. Se aislaron 12 cepas con características morfológicas similares al género *Streptomyces*, de las cuales se seleccionó la cepa UJAT54 que obtuvo el mayor porcentaje de inhibición (PI) del crecimiento de *M. roreri* (50 %). Además, la cepa UJAT54 mostró antagonismo contra otros hongos fitopatógenos como *Aspergillus* sp, *F. oxysporum*, *L. theobromae*, *B. cinerea*, y especies de *Colletotrichum*. En relación con el EB54, se obtuvo una concentración mínima inhibitoria (CMI) de 50µg/ml. El análisis molecular del gen ribosomal 16S confirmó que la cepa UJAT-54 pertenece al género *Streptomyces*. Los resultados obtenidos muestran el potencial de *Streptomyces* sp y sus metabolitos para ser empleados para el control de la moniliasis en cultivos de cacao.

Palabras clave: actividad antifúngica, actinobacterias, control biológico, confrontación dual

2.2 SUMMARY

Worldwide, cocoa (*Theobroma cacao L.*) is a crop of great economic and social relevance whose production is threatened by moniliasis, a disease caused by the fungus *Moniliophthora roreri*, which induces cocoa fruit rot. In the present work, the antagonistic activity against *M. roreri* of various *Streptomyces* strains isolated from the rhizosphere soil of a cocoa plantation was evaluated using dual-confrontation assays; the percentage inhibition (PI) of fungal growth was used as a criterion for selecting the best strain. Subsequently, a bioactive extract (BE) was obtained from the selected strain and used to evaluate its effect on fungal spore germination. Twelve strains with morphological characteristics similar to those of the genus *Streptomyces* were isolated; the selected strain, UJAT54, showed the highest percentage inhibition (PI) of fungal growth (50%). In addition, the *Streptomyces* isolate UJAT54 exhibited additional antagonism against phytopathogenic fungi, including *Aspergillus* sp., *F. oxysporum*, *Lasiodiplodia theobromae*, *Botrytis cinerea*, and *Colletotrichum* sp. For BE54, the minimum inhibitory concentration (MIC) was 50 µg/ml. Molecular analysis of the 16S ribosomal gene confirmed that the UJAT-54 strain belongs to the genus *Streptomyces*. These results demonstrated the potential of strain UJAT54 for controlling moniliasis in cocoa crops.

Index words: antifungal activity, actinobacteria, biological control, dual confrontation

2.3 INTRODUCCIÓN

El fruto de la planta de cacao (*Theobroma cacao L.*) es un producto muy importante para la economía de los productores agrícolas en diferentes países de Asia, África y Latinoamérica (Hipólito-Romero, Cocolitozi-Vázquez, Ramos-Prado, Torres-de la Cruz, Ricaño-Rodríguez, 2020; Martín & Ramos, 2021). En México, el cacao es un recurso muy importante desde el punto de vista económico y cultural, ya que constituye una fuente de ingresos para los productores y sus familias. Sin embargo, las enfermedades causadas por hongos constituyen un serio problema para la producción; la moniliasis (*Moniliophthora roreri*) es una de las principales enfermedades que afecta la mazorca del cacao en cualquier etapa de desarrollo, que causa necrosis en el tejido y pudrición de las semillas, provocando pérdidas de hasta el 75 % de la producción (Crisostomo-Panuera et al., 2024).

Para reducir los efectos nocivos del hongo fitopatógeno en las plantaciones de cacao, se han empleado el control cultural y el químico, siendo este último el más utilizado (Anzules, Borjas, Alvarado, Castro-Cepero, Julca-Otiniano, 2019). El control químico basa su éxito en el uso de diversos fungicidas como azoxystrobin, trifloxystrobin, tebuconazol o propiconazol, en ocasiones complementados con hidróxido de cobre (Torres-de-la-Cruz, Quevedo-Damián, Ortiz-García, Lagúnez-Espinoza, Nieto-Angle, Cruz, 2019). También, se han usado Difenconazole y Boscalid (Figueroa-Saavedra, Barbaru-Grajales, Paguay-Soxo, Intriago-Reyna, Acosta-Pérez, 2023). Sin embargo, el uso constante e indiscriminado de estos productos provoca, por una parte, problemas ambientales, de salud para los humanos y animales, y económicos por los costos de inversión que hacen los productores para adquirirlos (Rani, Kaur, Chhabra, Jain, 2024); por otra parte, provoca la aparición de cepa patógenas resistentes a los fungicidas lo cual agrava aún más el problema sobre la productividad del cultivo (Islam *et al.*, 2024).

Ante este contexto, es necesario implementar estrategias de control del hongo basadas en productos menos tóxicos e inoocuos para el ambiente y el ser humano. Los microorganismos antagonistas a los fitopatógenos son una excelente opción para controlar las enfermedades y mitigar sus efectos nocivos sobre la producción de alimentos de origen agrícola (Yao, Guo, Zhang, Ruan, Chen, 2023). Estos agentes de control biológico pueden encontrarse en los suelos, en las raíces, en el interior de las plantas (endófitos), o en la zona rizoférica de las plantas, que es un lugar donde existe una estrecha asociación con microorganismos benéficos con los cuales las plantas establecen complejas interacciones físicas, químicas y biológicas (Lagos et al., 2015; Chandrasekaran et al., 2022).

Entre los microorganismos benéficos que se pueden aislar de la rizosfera se encuentran las actinobacterias, que se caracterizan por ser bacterias grampositivas, en su mayoría mesófilas, aerobias, quimiótrofas y saprofitas, y muchas de ellas producen metabolitos secundarios bioactivos (Muazi-Alenazi, Anwar, Abo-Aba, Bataweel, 2023). El género *Streptomyces* es uno de los grupos con mayor presencia, caracterizados por un crecimiento filamentoso con desarrollo de micelio vegetativo, a partir del cual se diferencian el micelio aéreo y las esporas (Li, Chen, Jiang, Jiang, 2016). La asimilación de los nutrientes disponibles en el ambiente es de utilidad para el proceso posterior de diferenciación de parte del micelio vegetativo en micelio aéreo, el cual, a su vez, se especializa en la formación de esporas (Pérez-Corral, Ornelas-Paz, Olivas-Orozco, Acosta-Muñiz, Salas-Marina, Berlanga-Reyes, Ruiz-Cisneros, Rios-Velasco, 2022; Ngamcharungchit,

Chaimusik, Panbangred, Euanorasetr, Intra, 2023). Los miembros del género *Streptomyces* también son conocidos por su capacidad para producir y liberar una gran variedad de metabolitos secundarios al medio ambiente, muchos de los cuales poseen propiedades antimicrobianas, antiparasitarias, antivirales y antitumorales (Qi, Zou, Zhou, Chen, Gao, Feng, Zhang, Li, Xie, Wang, 2019). Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue evaluar la actividad antagonista de bacterias de la especie *Streptomyces* aisladas de suelos rizosféricos de una plantación de cacao contra *M. royeri*. Además, se determinó el efecto inhibitorio en la germinación de los conidios del hongo fitopatógeno por un extracto bioactivo de *Streptomyces* sp UJAT54

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

Colecta del suelo rizosférico

El suelo rizosférico se colectó en la plantación de cacao de la División Académica Multidisciplinaria de Comalcalco (DAMC) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) ubicada en (18°13'35.9"N 93°13'51.8"W) Comalcalco, Tabasco. La toma de muestras se realizó de acuerdo con Trinidad Cruz *et al.* (2017), almacenándola en bolsas estériles con cierre hermético transportadas dentro de una nevera en condiciones de refrigeración y procesadas en las primeras 48 horas posteriores al muestreo.

Microorganismos empleados en el estudio

Las cepas de *Streptomyces* empleadas en el estudio se encuentran conservadas en el cepario del Laboratorio de Microbiología de la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBiol) de la UJAT (17°59'23"N 92°58'23"W). La cepa comercial *S. lydicus* WYEC108 se utilizó en los experimentos de antagonismo como control positivo. La cepa fitopatógena de *M. royeri* fue proporcionada por del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias campus Huimanguillo (INIFAP) y se mantuvo en crecimiento en el Agar V8 clarificado a 25°C durante 20 días. Los hongos fitopatógenos utilizados para los experimentos de antagonismo adicionales fueron cultivos monospóricos de *F. oxysporum*, *F. oxysporum* f. sp *lycopersici*, *F. oxysporum* f. sp *gladioli*, *B. cinerea*, *Aspergillus* sp, *L. theobromae*, *C. musae* y *C. siamense*

Aislamiento y selección de los estreptomicetos

El aislamiento de las bacterias con morfología del tipo estreptomiceto se realizó empleando los medios de cultivo Agar Czapek-Dox (CZP), Agar Papa Dextrosa (PDA), International *Streptomyces* Project No.2 (ISP 2) y No. 3 (ISP 3) (Shirling & Gottlieb, 1966). Inicialmente, 10 g de suelo se agregaron a un matraz Erlenmeyer con 90 mL de agua destilada estéril, el cual se mantuvo en agitación a 150 rpm por 60 min. Posteriormente, se realizaron diluciones seriales de 10^{-1} a 10^{-6} ; de cada una se tomaron 0.1 mL y se distribuyeron de manera homogénea en placas Petri con los medios de cultivo por duplicado (Nabila & Kannabiran, 2018). Las placas de Petri se mantuvieron a 28 °C durante 14 días, seleccionando las colonias con morfología similar a la de las bacterias estreptomicetos (Li *et al.*, 2016). Los aislados obtenidos se purificaron mediante resiembras en medio agar ISP 2.

Actividad antagonista de los estreptomicetos

La búsqueda inicial de estreptomicetos antagonistas sobre el crecimiento de *M. roreri* se realizó mediante experimentos de confrontación dual en placas Petri con medio agar V8 clarificado (Lino-Navarro, Morales-Tello, Castellanos-Sanchez, Acosta-Román, Soberon-Lozano, 2020). Para ello, se depositó a 1 mm de distancia del borde de la placa Petri un disco de agar de 5 mm de diámetro con micelio activo con el estreptomiceto con 10 días de crecimiento en medio ISP-2 a 29 °C, Después de 5 min, se depositó al extremo contrario de cada placa Petri un disco de agar de 5 mm de diámetro cubierto con micelio activo de *M. roreri*. Un disco de agar cubierto con micelio activo del hongo fitopatógeno depositado hacia el borde de la placa Petri sin los estreptomicetos se usó como control del crecimiento. Se consideraron como antagonistas a aquellas cepas que redujeron y detuvieron el crecimiento del hongo en la placa. El porcentaje de inhibición (PI) se determinó con la fórmula:

$$PI = (CC - CT) / CC \times 100$$

Donde CC es el crecimiento radial del hongo en la placa Petri del control y CT es el crecimiento radial del hongo en dirección a la colonia del estreptomiceto. El experimento se realizó por triplicado y la cepa con el mayor PI fue seleccionada para estudios posteriores. Un estudio subsecuente para evaluar el Porcentaje de inhibición (PI) de la cepa seleccionada sobre otros

hongos fitopatógenos se realizó tal como se describió previamente. Los hongos fitopatógenos empleados fueron: *F. oxysporum f sp gladioli.*, *F. oxysporum f sp lycopersici*, *F. oxysporum*, *C. siamense*, *C. musae*, *L. theobromae*, *B. cinerea* y *Aspergillus sp.* Todos los experimentos de antagonismo se realizaron por triplicado.

Producción de metabolitos bioactivos por fermentación sumergida

La producción de metabolitos con actividad antifúngica se obtuvo a partir de un cultivo de 50 mL de caldo ISP 2 dentro de un matraz Erlen-Meyer de 250 mL con un resorte de acero inoxidable al interior (Kieser, Bibb, Buttner, Chater, Hopwood, 2000). El cultivo se inoculó con una suspensión de esporas para obtener una DO₄₅₀ inicial de 0.05 y se mantuvo a una agitación de 150 rpm a 29 °C durante 14 días. Posteriormente, el cultivo se centrifugó a 6000 rpm durante 10 min para separar el sobrenadante de la biomasa celular. El sobrenadante del cultivo, ahora denominado extracto bioactivo (EB54), se filtró con membranas estériles de 0.22 micras y fue conservado en alícuotas a -20 °C hasta su uso.

Efecto de los metabolitos sobre la germinación de las esporas de *M. roleri*

La suspensión de conidios de *M. roleri* se preparó a partir de un cultivo de 19 días de crecimiento en medio PDA, y se ajustó a una concentración de aproximadamente 1×10^6 células/mL (Oliveira, Pauli, Mascarín, Delalibera, 2015). El efecto inhibitorio del EB54 sobre la germinación de los conidios se evaluó en microplacas de 24 pozos estériles. El experimento consistió en mezclar el EB54 en caldo de papa dextrosa (1X PDB) a las concentraciones de 3 %, 6 %, 12 %, 20 % y 25 %, y enseguida se agregó la suspensión de esporas para tener en cada pozo aproximadamente 5000 conidios, ajustando el volumen final a 500 µL con agua destilada. Como control de inhibición, se empleó anfotericina B (Sigma-Aldrich, 250 µg/mL). Las placas se mantuvieron a 29 °C por 24 horas y posterior a la incubación, cada concentración se observó con el microscopio invertido Eclipse Ti (Nikon®) y de cada una se tomaron fotografías en tres diferentes campos para poder hacer el conteo de los conidios germinados y de los no germinados. Los conidios se consideraron germinados cuando el tubo de germinación alcanzó el doble del diámetro del conidio. Se contaron 100 conidios elegidos al azar por triplicado, separando los germinados de los no germinados para calcular el porcentaje de germinación empleando la siguiente fórmula:

$$\text{Porcentaje Germinación (PG \%)} = (a/a + b) \times 100.$$

Donde: a = número de conidios germinados y b = número de conidios sin germinar.

Identificación molecular

La identidad de la cepa seleccionada se determinó a partir del análisis de la secuencia parcial del gen rRNA 16S. El DNA genómico empleado como templado para el PCR punto final se preparó de acuerdo con el procedimiento descrito por Evangelista-Martínez (2014). Para la amplificación del gen se utilizó la enzima Platinum Taq DNA polymerasa (Invitrogen®) y los oligonucleótidos cebadores fD1 (5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3') y rD1 (5'-AAGGAGGTGATCCAGCC-3') (Osborn, Moore, Timmis, 2002). La reacción de PCR se efectuó en un volumen final de 50 µL que contenía buffer de PCR 1X, 2 mM de MgCl₂, 0.2 mM de cada dNTP, 2 ng de DNA, 0.4 µM de cada oligonucleótido y 2 unidades de Taq DNA polymerase.

Las condiciones del PCR fueron: paso inicial de desnaturalización a 94 °C/5 min seguido de 35 ciclos de amplificación a 94 °C/1 minuto, 55 °C/45 segundos, y 72 °C/ 1.5 minutos. EL fragmento amplificado se purificó con el kit de purificación PureLink PCR (Invitrogen®). La secuenciación se realizó en ambas cadenas en el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C. (IPICYT).

Las secuencias fueron editadas y ensambladas manualmente usando el software Bioedit 7.7.1 (Hall, 1999). El fragmento de 1443 pb fue analizado buscando homólogos con el programa BLASTN y las secuencias de DNA del gen rRNA 16S se recuperaron y emplearon como referencias para realizar un análisis filogenético en el servidor Phylogeny.fr (<http://www.phylogeny.fr/phylogeny.cgi>). Las secuencias se alinearon con MUSCLE (v 3.5) configurado para la más alta precisión. El árbol filogenético se reconstruyó usando el método de NJ y el modelo de sustitución fue el de Kimura de 2 parámetros, con un Bootstrap de 1000 réplicas. El árbol filogenético se visualizó con TreeDyn (v 198.3). La secuencia parcial del gen rRNA 16S de *Streptomyces* sp. UJAT-54 se depositó en GenBank con el número de acceso **PX497579**.

Análisis Estadístico

Todos los experimentos se realizaron por triplicado y se analizaron por medio de un análisis de varianza (ANDEVA) de una vía con una P=0.05. Para identificar los grupos con diferencias significativas, se aplicó una prueba de LSD de Fisher.

2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Actividad antagónica preliminar contra *M. roreri*.

Se aislaron un total de 12 cepas de las muestras de suelo, las cuales mostraron características morfológicas asociadas a las bacterias estreptomicetos, como son desarrollar colonias con micelio vegetativo y aéreo, con apariencia áspera, rugosa, algunas de ellas algodonosas, y otras que se fragmentan a manera de polvo, presencia de una masa de esporas (Uzcátegui-Negrón, Serrano, Boiron, Rodríguez-Nava, Couble, Moniée, Sánchez, Sandoval, Reviakina, Mercedes, Mendoza, 2009; Alejandro-Rosas, Vallejo-Rosas, Ochoa-Álvarez, Alvarado-Mávil, Ledea-Rodríguez, 2025). Las 12 cepas fueron evaluadas para identificar alguna con actividad antagónica frente al hongo mediante confrontación dual. Los resultados mostraron valores de PI entre el 20 % y el 40 % en las cepas, excepto la cepa UJAT-54, con un PI del 50 % (Figura 12). El análisis de varianza (ANDEVA) mostró diferencias significativas entre las cepas ($P < 0.05$). Es importante señalar que la cepa UJAT54 fue la que provocó que el crecimiento del micelio de *M. roreri* en dirección a la cepa fuera más ralo y escaso (Figura 13), con apariencia menos esponjosa que con el resto de las cepas de *Streptomyces*, lo cual sugiere la presencia de diversas moléculas y posiblemente enzimas extracelulares del tipo quitinasas que pueden actuar en sinergia para inhibir el crecimiento de los hongos (Prapagdee *et al.*, 2008).

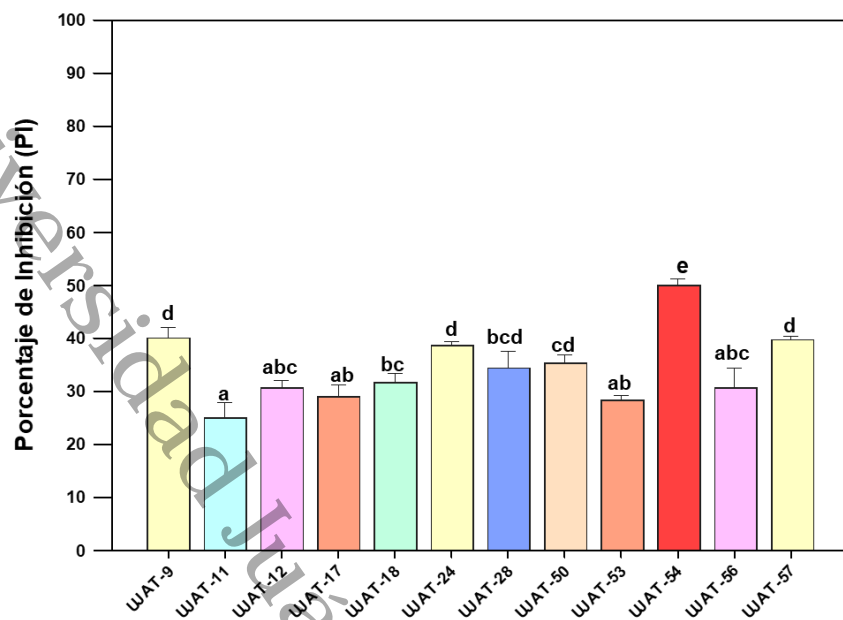


Figura 11. Actividad antagonista de diferentes cepas de estreptomicetos contra *M. royeri*. Las medias con letras diferentes difieren estadísticamente ($P < 0.05$). Las líneas de error representan el valor \pm la desviación estándar.

Figure 11. Antagonistic activity produced by streptomycetes against *M. royeri*. Means with different letter are significantly different ($P < 0.05$). Error lines represent \pm standard deviation.

El control biológico de las enfermedades en los cultivos vegetales provocadas por hongos es una alternativa que va cobrando mayor impulso frente al uso de fungicidas químicos. En el caso de las enfermedades provocadas por microorganismos que afectan el cultivo del cacao, se han evaluado microorganismos antagonistas del crecimiento de los fitopatógenos, entre ellos bacterias y hongos. Del grupo de las bacterias destacan diversas actinobacterias endófitas aisladas de semillas y mazorcas de cacao como agentes de bioncontrol de fitopatógenos, en particular antagonizando el crecimiento de *P. megakarya* causante de la “mazorca negra del cacao” (Mouafo-Tchinda, Boudjeko, Simao-Beauvoir, Lerat, Tsala, Monga, Beaulieu, 2016). Destaca en otro estudio el aislamiento de una nueva especie de bacteria, llamada *S. cameroonensis* capaz de controlar a *P. megakarya* mediante la síntesis y producción de gendalmicina (Boudjeko, Tchinda, Zitouni, Tchatchou, Lerat, Beaulieu, 2017). En cuanto a la inhibición de *M. royeri*, se observó que algunas especies del hongo benéfico *Trichoderma* alcanzaron, in vitro, un PI del 42 % y hasta del 55 % (Reyes-Figueroa, Ortiz-García, Torres-de la Cruz, Langunes-Espinoza, Valdovinos-Ponce, 2016; Garcés-Moncayo, Romero, Pérez-Martínez, Noceda, Galarza, del Castillo, 2025). En

comparación con los estudios mencionados, la cepa de *Streptomyces* sp UJAT54, resultó ser la mejor de los aislados para inhibir el crecimiento de *M. royeri*.

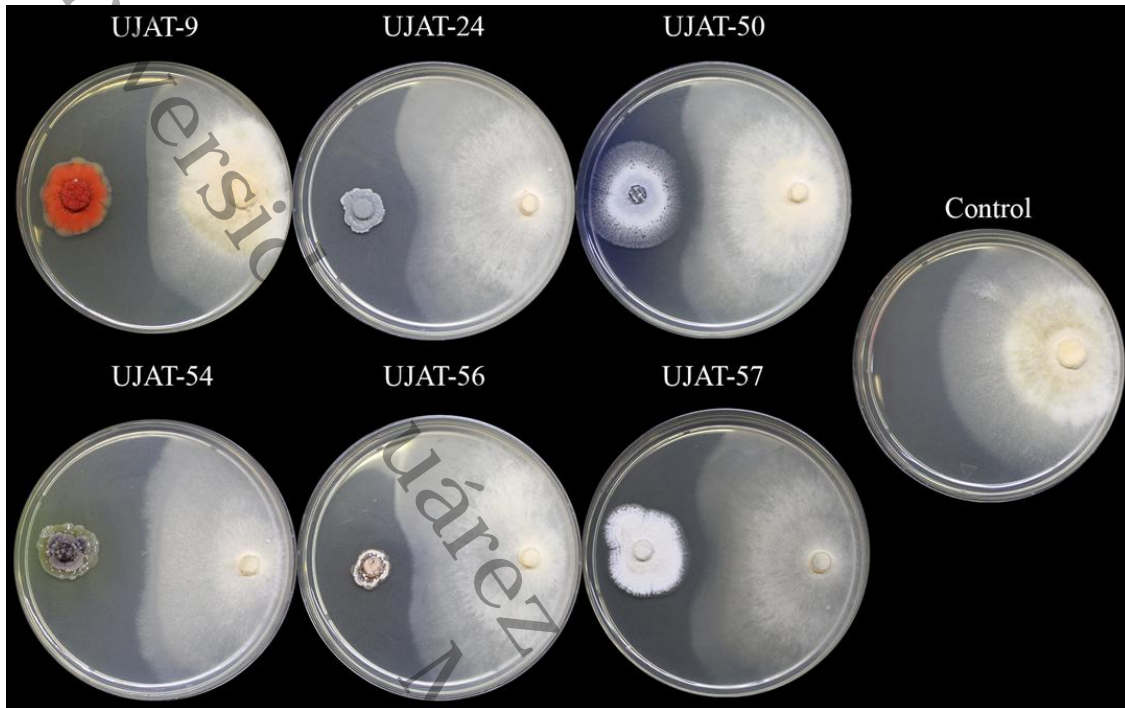


Figura 12. Selección de estreptomicetos con actividad antagonista contra *M. royeri* por confrontación dual.

Figure 12. Screening for streptomyces with antagonistic activity against *M. royeri* by dual confrontation.

Una segunda serie de experimentos de antagonismo se realizó con la cepa UAJT54, ahora evaluando su capacidad de inhibir el crecimiento de otros hongos y, con ello, valorar su potencial de amplio espectro para controlar fitopatógenos. La confrontación dual entre los microorganismos mostró que la cepa UJAT54 antagonizó el crecimiento de los hongos evaluados, con un mayor porcentaje de inhibición contra *Aspergillus* sp (39 %), seguida de *F. oxysporum* f sp *lycopersici* con 37% y *L. theobromae* con un 34 % (Tabla 5). Con estos resultados se confirma que la cepa UJAT54 tiene la capacidad de inhibir el crecimiento de diversos hongos y el potencial para usarse como agente de control biológico.

Tabla 5. Actividad antagonista de *Streptomyces* sp UJAT54 contra diversos hongos fitopatógenos.

Table 5. Antagonistic activity of *Streptomyces* sp UJAT54 against diverse fungal phytopathogens

Hongo	Porcentaje de Inhibición % (\pm DE)
<i>L. theobromae</i>	34 \pm 5.13 ^{bcd}

<i>B. cinerea</i>	25 ± 7.50 ^{abc}
<i>F. oxysporum</i> f sp <i>lycopersici</i>	37 ± 2.51 ^{cd}
<i>C. musae</i>	23 ± 7.28 ^{ab}
<i>F. oxysporum</i>	15 ± 3.46 ^a
<i>Aspergillus</i> sp	39 ± 1.52 ^d
<i>C. siamense</i>	21 ± 1.52 ^{ab}
<i>F. oxysporum</i> f sp <i>gladioli</i>	12 ± 3.51 ^a

Las medias (± DE) con letras distintas difieren estadísticamente (P < 0.05).

Means (± SD) with different letter are significantly different (P < 0.05).

La capacidad que tienen las bacterias *Streptomyces* de antagonizar diversos hongos fitopatógenos ha sido muy documentada; *Streptomyces* sp CACIS-1,16CA antagonizó el crecimiento de hongos fitopatógenos de los géneros *Colletotrichum*, *Fusarium*, *Lasiodiplodia*, *Curvularia*, *Corynespora*, *Helmintosporium*, *Aspergillus*, *Phytophthora*, *Rhizoctonia*, entre otros hongos, en rangos de entre el 43 % - 96 % (Evangelista-Martínez, 2014; Vargas-Gómez, Evangelista-Martínez, Gastélum-Martínez, Uc-Varguez, Quiñones-Aguilar, Rincón-Enríquez, 2025). *Streptomyces* sp YYS-7, un aislado que mejora la resistencia de la planta de plátano contra *F. oxysporum* f. sp *cubense* Tropical Race 4, también antagonizó otros hongos como *Colletotrichum fallax*, *C. musae*, *Colletotrichum fragariae*, *C. gloeosporioides*, *Colletotrichum acutatum*, *F. oxysporum cucumerinum* y *F. graminearum*, en rangos de entre el 50 % y 74 % (Wei, Zhao, Zhou, Qi, Tang, Chen, Jing, Zang, Xie, Wang, 2020). *Streptomyces graminearus* STR-1, antagonizó el crecimiento de *Magnaporthe oryzae*, *R. solani*, *Fusarium graminearum*, *Ustilaginoidea virens*, y *Bipolaris maydis* (Shen et al., 2024).

Actividad antifúngica de los metabolitos bioactivos producidos por *Streptomyces* sp UJAT54 sobre la germinación de las esporas de *M. roleri*

El efecto de los metabolitos producidos por la cepa UJAT54 sobre la germinación de los conidios de *M. roleri* se determinó mediante la exposición a diferentes concentraciones de EB54, 24 horas después de la exposición (Figura 14). Los resultados muestran que la concentración más baja de EB54 (12 µg/ml) redujo el PG al 35 % en comparación con el 84 % del tratamiento control; concentraciones mayores a 50 µg/ml disminuyeron el PG por debajo del 16 %. Las diferencias significativas se observaron en todos los tratamientos respecto al control (P < 0.05).

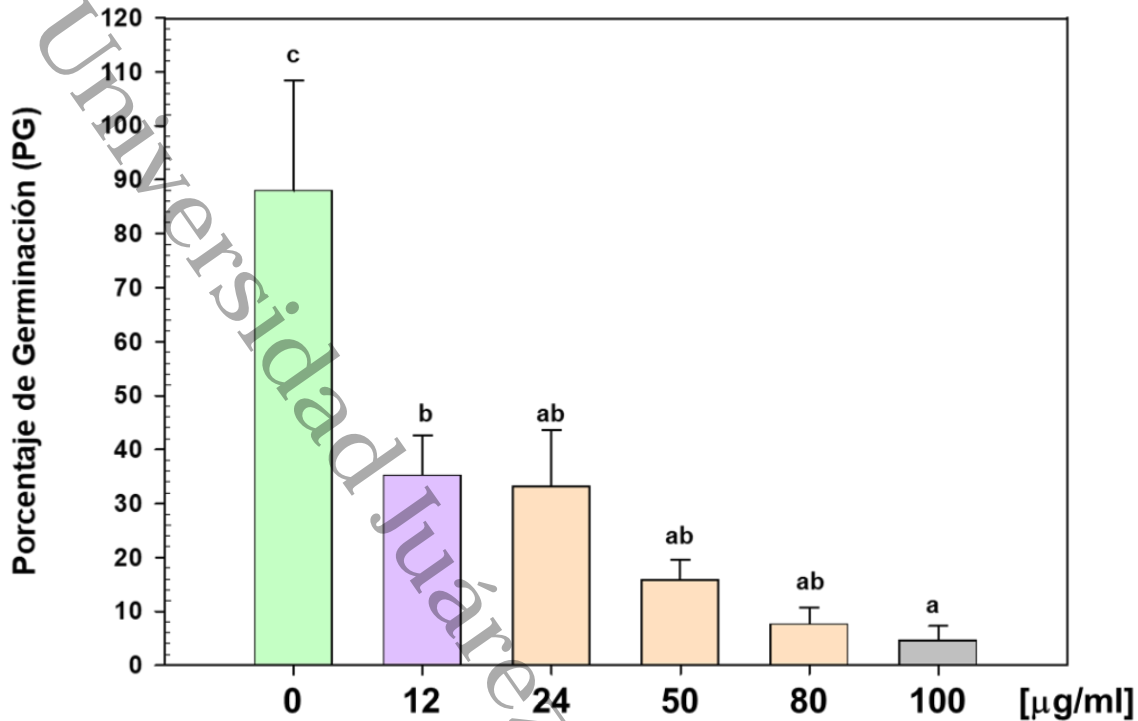


Figura 13. Efecto del EB54 sobre la germinación de los conidios de *M. roseri*. Las medias con letras diferentes difieren estadísticamente ($P < 0.05$). Las líneas de error representan el valor \pm la desviación estándar.

Figure 13. Effect of BE54 on conidial germination of *M. roseri*. Means with different letter are significantly different ($P < 0.05$). Error lines represent \pm standard deviation.

La geometría de los conidios de *M. roseri* varía de una forma esférica o globosa (\rightarrow), ovalada o subglobosa (\rightarrow), de paredes celulares gruesas (hasta 2 μm), que ocasionalmente pueden tener forma elipsoide (\rightarrow) (Figura 14; Bailey, Evans, Phillips-Mora, Ali, Meinhardt, 2018). A las 24 horas de incubación en ausencia del EB54, se observa un micelio en desarrollo y con casi la totalidad de los conidios germinados (Figura 14a). Se observa el efecto de inhibición en la germinación al añadir el EB54 (50 $\mu\text{g/mL}$), aunque en algunos conidios se observan inicios tardíos en la emergencia del tubo germinativo localizado en el extremo distal del conidio (\rightarrow), que corresponde al 16 % de los conidios germinados (Figura 14b). El potencial de las bacterias para inhibir la germinación de las esporas de *M. roseri* ha sido evaluado en otras investigaciones; por ejemplo, una especie endófito del género *Bacillus* produjo metabolitos secundarios que disminuyeron la germinación de los conidios hasta en un 60 % (Loor, Cabrera, Coello, Mora, Aragón, Villegas, 2021). En otro estudio, los compuestos volátiles producidos por la bacteria

endófito *Bacillus pumilus*, disminuyeron la germinación de los conidios hasta un 82 % respecto al tratamiento control (De la Cruz-López, Cruz-López, Holguín-Meléndez, Guillén-Navarro, Huerta-Palacios, 2022). Por otro lado, a partir del ácido nonanoico (pelargonico) que secreta en un cultivo líquido el hongo *Trichoderma harzianum* se obtuvo un efecto inhibitorio en la germinación de los conidios de *M. royeri* de hasta un 75 % empleando concentraciones muy bajas del compuesto, del orden de 0.09 μM (Aneja *et al.*, 2022).

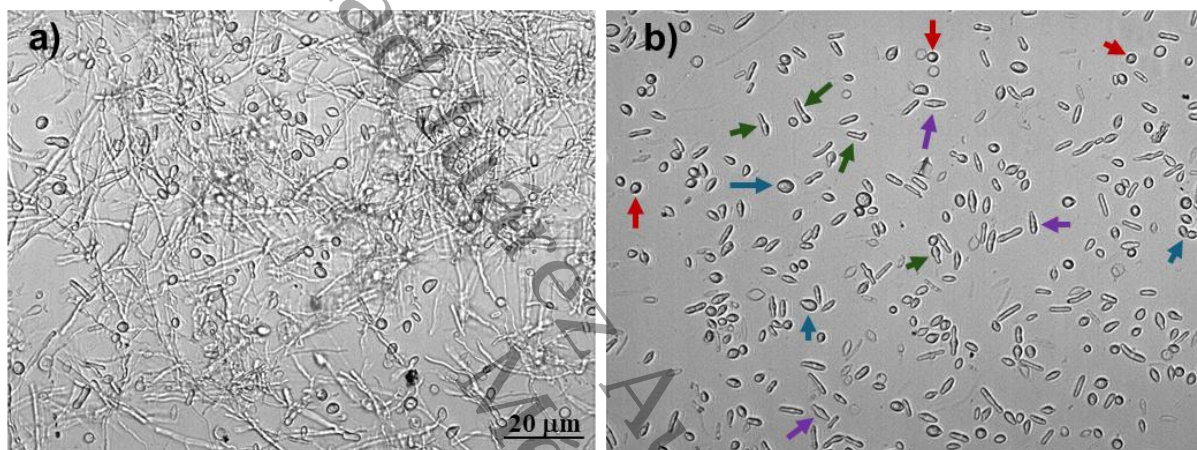


Figura 14. Efecto inhibitorio del EB54 de *Streptomyces* sp UJAT54 sobre la germinación de los conidios de *M. royeri* después de 24 horas. a) Control de la germinación. b) Efecto inhibitorio sobre germinación al aplicar 50 $\mu\text{g/ml}$ del EB. Conidios esféricos (\rightarrow), ovalados (\rightarrow), elipsoide (\rightarrow), en germinación (\rightarrow).

Figure 14. Inhibitory effect of *Streptomyces* sp UJAT54 BE on germination of *M. royeri* conidia. a) Control germination. b) Inhibitory effect of BE at 50 $\mu\text{g/ml}$. Spheric conidia (\rightarrow), oval conidia (\rightarrow), ellipse conidia (\rightarrow), germination conidia (\rightarrow).

Identificación molecular

El análisis de la secuencia parcial del gen rRNA 16S (1443 pb) de la cepa UJAT54 reveló porcentaje de identidad hasta el 97.53 % con algunas especies de estreptomicetos después del análisis de la secuencia en Blast, por tanto, se confirma en conjunto con las características morfológicas que la cepa es una especie perteneciente al género *Streptomyces*. El árbol filogenético (Figura 15) basado en el método de Neighbor-Joining muestra que la cepa UJAT54 se ubica en un clado junto con las especies *S. luteolifulvus* y *S. cyaneus*. Estas especies han mostrado tener

actividad antimicrobiana contra microorganismos patógenos de plantas; por ejemplo, *S. lutosioli* GB8 presentó actividad antibacteriana con los patógenos *Bacillus licheniformis*, *B. subtilis*, *E. coli*, *P. aeruginosa*, y extractos bioactivos obtenidos a partir del crecimiento de la bacteria tuvieron actividad antibacteriana significativa contra las mismas bacterias ($P \leq 0.05$), además de presentar actividad larvicida contra mosquitos del género *Anopheles* (Liaqat, Muhammad, Nubin, Arshad, Iftikhar, Sajjad, Rashid, 2023). Por otra parte, *S. cyaneus* ZEA17I, inhibió in vitro el crecimiento del micelio del hongo fitopatógeno *Sclerotinia sclerotiorum* por más del 75% (Chen *et al.*, 2016).

Streptomyces es un género que agrupa bacterias que establecen relaciones estrechas con las plantas favoreciendo su desarrollo a través de diversos mecanismos como la producción de fitohormonas tipo auxinas, mejorando la biodisponibilidad de los nutrientes en el suelo a través de la solubilización de fosfatos, produciendo diversos metabolitos bioactivos contra fitopatógenos (bacterias, hongos, nemátodos, insectos), así como a través de la inducción de respuestas inmunológicas en las plantas a la presencia de los microorganismos fitopatógenos (Balakrishnan *et al.*, 2021; Sousa & Olivares, 2016).

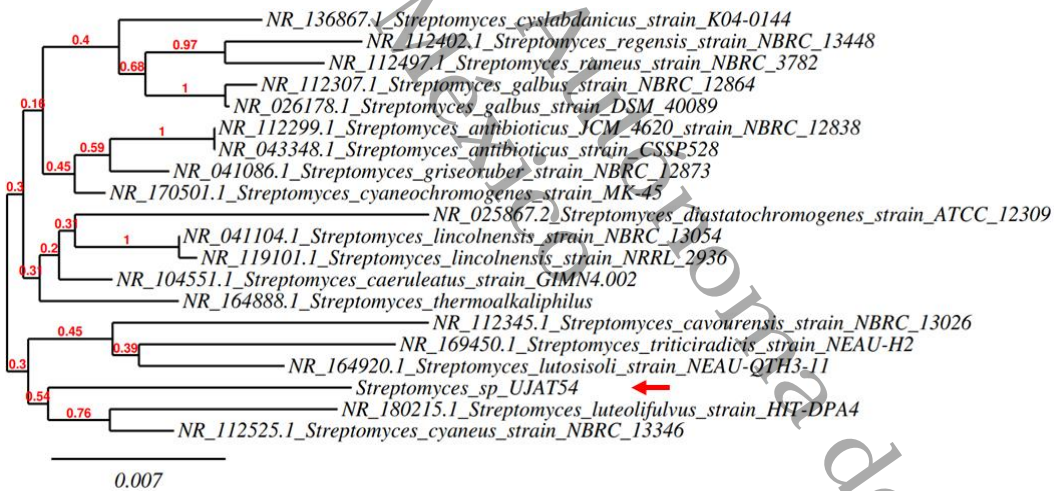


Figura 15. Relaciones filogenéticas entre *Streptomyces* sp UJAT54 y otras especies de *Streptomyces*. Los números en los nodos representan porcentajes que indican los niveles de soporte del bootstrap ($n = 1000$ remuestreos). La barra de escala representa 0,007 sustitución de nucleótido por sitio.

Figure 15. Phylogenetic relationships among *Streptomyces* sp UJAT54 and other *Streptomyces* species. The numbers at the nodes represent percentage values that indicate bootstrap support levels ($n = 1000$ re-samplings). The scale bar represents 0.007 nucleotide substitutions per site.

2.6 CONCLUSIONES

En el presente estudio, *Streptomyces sp* UJAT-54 fue la cepa que mostró la mayor actividad antagonista frente a *M. royeri*. El efecto antagonista se corroboró mediante la inhibición de la germinación de los conidios por medio de los metabolitos secundarios contenidos en el extracto bioactivo (EB54), los cuales podrían emplearse para controlar la proliferación y dispersión de *M. royeri* en cultivos de cacao. Futuros estudios deberán enfocarse en la caracterización química de dichos metabolitos y en la evaluación de su eficacia en condiciones de campo.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos están disponibles cuando seas solicitados.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de interés

FINANCIACIÓN

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: E.A.C-M., R.M.P-L., L.V-C y Z.E-M. **Metodología:** E.A.C.M., R.M.P-L., L.V-C., E.R-H y Z.E-M. **Validación:** E.A.C.M., R.M.P.L. y L.V.C. **Análisis formal:** E.A.C-M y Z.E-M. **Investigación:** E.A.C-M., y Z.E-M. **Escritura:** preparación del borrador original, E.A.C-M., R.M.P-L., L.V-C., E.R-H y Z.E-M. **Escritura:** revisión y edición, E.A.C-M., y Z.E-M. **Supervisión:** R.M.P-L., L.V-C., E.R-H y Z.E-M

AGRADECIMIENTOS

E.A.C-M. (CVU: 1260703) agradece al SECIHTI (Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación) por la beca recibida para realizar los estudios de Maestría en Ciencias Ambientales (MCA) en la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBiol) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT)

2.7 LITERATURA CITADA

Alejandro-Rosas, J., Vallejo-Rosas, J. M., Ochoa-Álvarez, N. A., Alvarado-Mávil, A., & Ledea-Rodríguez, J. L. (2025). Actinomicetos de suelos de manglares. Antagonismo frente a fitopatógenos de *Sechium edule* (Jacq.) Sw.). *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 12(1). <https://doi.org/10.19136/ERA.A12N1.4172>

Aneja, M., Gianfagna, T. J., & Hebbar, P. K. (2005). *Trichoderma harzianum* produces nonanoic acid, an inhibitor of spore germination and mycelial growth of two cacao pathogens. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 67(6), 304–307. <https://doi.org/10.1016/J.PMPP.2006.05.002>

Anzules, V., Borjas, R., Alvarado, L., Castro-Cepero, V., & Julca-Otiniano, A. (2019). Control cultural, biológico y químico de *Moniliophthora roreri* y *Phytophthora* spp en *Theobroma cacao* ‘CCN-51’. *Scientia Agropecuaria*, 10(4), 511-520.

<https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.04.08>

Balakrishnan, K., Thirumalairaj, J., Radhakrishnan, M., Gopikrishnan, V., & Balagurunathan, R. (2021). Phosphate solubilization and plant growth promoting actinobacteria from rhizosphere soil. *Indian Journal of Agricultural Research*, 55(1), 87–92.

<https://doi.org/10.18805/IJARE.A-5328>

Bailey, B. A., Evans, H. C., Phillips-Mora, W., Ali, S. S., & Meinhardt, L. W. (2018). *Moniliophthora roreri*, causal agent of cacao frosty pod rot. *Molecular Plant Pathology*, 19(7), 1580-1594. <https://doi.org/10.1111/mpp.12648>

Boudjeko, T., Tchinda, R. A. M., Zitouni, M., Tchatchou Nana, J. A. V., Lerat, S., & Beaulieu, C. (2017). *Streptomyces cameroonensis* sp. nov., a geldanamycin producer that promotes *Theobroma cacao* growth. *Microbes and Environments*, 32(1), 24–31.

<https://doi.org/10.1264/jsme2.ME16095>

Chandrasekaran, M., Paramasivan, M., & Sahayarayan, J. J. (2022). Microbial volatile organic compounds: an alternative for chemical fertilizers in sustainable agriculture development. *Microorganisms*, 11(1), 42. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11010042>

Chen, X., Pizzatti, C., Bonaldi, M., Saracchi, M., Erlacher, A., Kunova, A., Berg, G., & Cortesi, P. (2016). Biological control of lettuce drop and host plant colonization by rhizospheric and endophytic streptomycetes. *Frontiers in Microbiology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00714>

Crisostomo-Panuera, J. S., Nieva, A. S. del V., Ix-Balam, M. A., Díaz-Valderrama, J. R., Alviarez-Gutierrez, E., Oliva-Cruz, S. M., & Cumpa-Velásquez, L. M. (2024). Diversity and functional assessment of indigenous culturable bacteria inhabiting fine-flavor cacao rhizosphere:

Uncovering antagonistic potential against *Moniliophthora roreri*. *Heliyon*, 10(7), e28453.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28453>

De la Cruz-López, N., Cruz-López, L., Holguín-Meléndez, F., Guillén-Navarro, G. K., & Huerta-Palacios, G. (2022). Volatile organic compounds produced by cacao endophytic bacteria and their inhibitory activity on *Moniliophthora roreri*. *Current Microbiology*, 79(2), 35.
<https://doi.org/10.1007/s00284-021-02696-2>

Evangelista-Martínez, Z. (2014). Isolation and characterization of soil *Streptomyces* species as potential biological control agents against fungal plant pathogens. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 30(5), 1639–1647. <https://doi.org/10.1007/S11274-013-1568-X/FIGURES/2>

Figueroa-Saavedra, H. F., Barbaru-Grajales, A., Paguay-Soxo, P. X., Intriago-Reyna, H. O., & Acosta-Perez, K. I. (2023). Sensitivity in vitro of isolates of *Moniliophthora roreri* against fungicides with different modes of action. *Journal of Pharmaceutical Negative Results*, 3527-3533. <https://doi.org/10.47750/pnr.2023.14.02.415>

Garcés-Moncayo, M. F., Romero, C. A., Pérez-Martínez, S., Noceda, C., Galarza, L. L., & del Castillo, D. S. (2025). Differential strain-specific responses of *Trichoderma* spp. in mycoparasitism, chitinase activity, and volatiles production against *Moniliophthora* spp. *Microorganisms*, 13(7), 1499. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13071499>

Hall, T. A. (1999). *Bioedit: a user-friendly biological sequence alignment editor and analysis program for windows 95/98/ Nt*. <https://api.semanticscholar.org/Corpusid:82421255>

Hipólito-Romero, E., Cocoltzi-Vásquez, E., Ramos-Prado, J. M., Espinoza, C., Torres-de la Cruz, M., & Ricaño-Rodríguez, J. (2020). Breve aproximación a la naturaleza genómica de *Moniliophthora roreri* CPMRT01 aislado de cacao en Tabasco, México/Brief approach to the genomic nature of *Moniliophthora roreri* CPMRT01 isolated from cocoa in Tabasco, Mexico. *Biotecnia*, 22(2). <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v22i2.1244>

Islam, T., Danishuddin, Tamanna, N. T., Matin, M. N., Barai, H. R., & Haque, M. A. (2024). Resistance mechanisms of plant pathogenic fungi to fungicide, environmental impacts of fungicides, and sustainable solutions. *Plants*, 13(19), 2737.
<https://doi.org/10.3390/plants13192737>

Kieser, T., Bibb, M. J., Buttner, M. J., Chater, K. F. & Hopwood, D. A. (2000). *Practical Streptomyces genetics: A laboratory manual*. Norwich, United Kingdom: The John Innes Foundation.

Lagos, L., Maruyama, F., Nannipieri, P., Mora, M. L., Ogram, A., & Jorquera, M. A. (2015). Current overview on the study of bacteria in the rhizosphere by modern molecular techniques: A mini-review. *Journal of soil science and plant nutrition*, 15(2), 504-523. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162015005000042>

Li, Q., Chen, X., Jiang, Y. and Jiang, C. (2016). Morphological identification of actinobacteria. In: Dhanasekaran D. and Jiang Y. (eds). *Actinobacteria -basics and biotechnological applications: InTech, India*. pp. 59–86. <https://doi.org/10.5772/61461>

Liaqat, I., Muhammad, N., Mubin, M., Arshad, N., Iftikhar, T., Sajjad, S., & Rashid, F. (2023). Antibacterial and larvicidal activity of ethyl acetate extract of actinomycetes from soil samples. *Pakistan Journal of Zoology*, 55(5). <https://doi.org/10.17582/journal.pjz/20200526130518>

Lino-Navarro, M., Morales-Tello, E., Castellanos-Sanchez, P., Acosta-Román, M., & Soberon-Lozano, M. (2020). Respuesta antifúngica y propiedades PGPB de actinomicetos aislados de cultivos de “vid” *Vitis vinifera* (Vitaceae). *Arnaldoa*, 27(2), 571-586. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.272.27209>

Loor, M. A. V., Cabrera, A. B., Coello, D. V., Mora, M. L., Aragón, A. R., & Villegas, L. M. D. de. (2021). Actividad antifúngica de compuestos volátiles producidos por especies endófitas de *Bacillus* sobre *Moniliophthora roreri* H.C Evans et al. *Revista de Protección Vegetal*, 36(1). <https://censa.edicionescervantes.com/index.php/RPV/article/view/1130>

Martin, M. Á., & Ramos, S. (2021). Impact of cocoa flavanols on human health. *Food and Chemical Toxicology: An International Journal Published for the British Industrial Biological Research Association*, 151, 112121. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2021.112121>

Mouafo-Tchinda, R. A., Boudjeko, T., Simao-Beaunoir, A. M., Lerat, S., Tsala, É., Monga, E., & Beaulieu, C. (2016). Morphological, physiological, and taxonomic characterization of actinobacterial isolates living as endophytes of cacao pods and cacao seeds. *Microbes and Environments*, 31(1), 56–62. <https://doi.org/10.1264/jsmc2.ME15146>

Muazi-Alenazi, A., Anwar, Y., E.M. Abo-Aba, S., & M. Bataweel, N. (2023). A review on actinomycetes distribution, isolation, and their medical applications. *Novel Research in Microbiology Journal*, 7(2), 1918-1931. <https://doi.org/10.21608/nrmj.2023.294180>

Nabila, M. I., & Kannabiran, K. (2018). Antagonistic activity of terrestrial *Streptomyces* sp. vitnk9 against gram negative bacterial pathogens affecting the fish and shellfish in aquaculture. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 53(2), 171-183. <https://doi.org/10.22370/rbmö.2018.53.2.1291>

Ngamcharungchit, C., Chaimusik, N., Panbangred, W., Euanorasetr, J., & Intra, B. (2023). bioactive metabolites from terrestrial and marine actinomycetes. *Molecules*, 28(15), 5915. <https://doi.org/10.3390/molecules28155915>

Oliveira, D. G. P., Pauli, G., Mascarin, G. M., & Delalibera, I. (2015). A protocol for determination of conidial viability of the fungal entomopathogens *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* from commercial products. *Journal of Microbiological Methods*, 119, 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2015.09.021>

Osborn, A. M., Moore, E. R. B., & Timmis, K. N. (2000). An evaluation of terminal-restriction fragment length polymorphism (T-RFLP) analysis for the study of microbial community structure and dynamics. *Environmental Microbiology*, 2(1), 39-50. <https://doi.org/10.1046/j.1462-2920.2000.00081.x>

Pérez-Corral, D. A., Ornelas-Paz, J. de J., Olivas-Orozco, G. I., Acosta-Muñiz, C. H., Salas-Marina, M. Á., Berlanga-Reyes, D. I., Ruiz-Cisneros, M. F., & Rios-Velasco, C. (2022). Molecular, morphological and biochemical characterization of actinomycetes and their antagonistic activity against phytopathogenic fungi. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 45(1), 103-103. <https://doi.org/10.35196/rfm.2022.1.103>

Prapagdee, B., Kuekulvong, C., & Mongkolsuk, S. (2008). Antifungal potential of extracellular metabolites produced by *Streptomyces hygroscopicus* against phytopathogenic fungi. *International Journal of Biological Sciences*, 4, 330-337. <https://doi.org/10.7150/ijbs.4.330>

Qi, D., Zou, L., Zhou, D., Chen, Y., Gao, Z., Feng, R., Zhang, M., Li, K., Xie, J., & Wang, W. (2019). Taxonomy and Broad-Spectrum Antifungal Activity of *Streptomyces* sp. SCA3-4 Isolated From Rhizosphere Soil of *Opuntia stricta*. *Frontiers in Microbiology*, 10, 1390. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01390>

Rani, R., Kaur, A., Chhabra, R., & Jain, S. (2024). Role of fungicides in agriculture and their impact on environment: A review. *Plant Archives*, 24(1).

<https://doi.org/10.51470/PLANTARCHIVES.2024.V24.NO.1.139>

Reyes-Figueroa, O., Ortiz-García, C. F., Torres-de la Cruz, M., Lagunes-Espinoza, L. del C., & Valdovinos-Ponce, G. (2016). Trichoderma species from the cacao agroecosystem with biocontrol potential of *Moniliophthora roreri*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 22(2), 149–163. <https://doi.org/10.5154/R.RCHSCFA.2015.08.036>

Shen W, Liu R, Wang J, Yang M, Qi T, Shu G, He M and Chen X (2024) Characterization of a broad-spectrum antifungal strain, *Streptomyces graminearus* STR-1, against *Magnaporthe oryzae*. *Front. Microbiol.* 15:1298781. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1298781>

Shirling, E. B., & Gottlieb, D. (1966). Methods for characterization of *Streptomyces* species. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 16(3), 313-340. <https://doi.org/10.1099/00207713-16-3-313>

Sousa, J. A. de J., & Olivares, F. L. (2016). Plant growth promotion by streptomycetes: ecophysiology, mechanisms and applications. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture 2016 3:1*, 3(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/S40538-016-0073-5>

Torres-de-la-Cruz, M., Quevedo-Damián, I., Ortiz-García, C. F., Lagúnez-Espinoza, L. del C., Nieto-Angel, D., & Cruz, M. P. la. (2019). Control químico de *Moniliophthora roreri* en México. *Biotecnia*, 21(2), 55-61. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v21i2.906>

Trinidad Cruz, J. R., Quiñones Aguilar, E. E., Hernández Cuevas, L. V., López Pérez, L., & Rincón Enríquez, G. (2017). Hongos micorrízicos arbusculares asociados a la rizosfera de *Agave cupreata* en regiones mezcaleras del estado de Michoacán, México. *Scientia Fungorum*, 45, 13–25. <https://doi.org/10.33885/sf.2017.0.1164>

Uzcátegui-Negrón, M., Serrano, J. A., Boiron, P., Rodríguez-Nava, V., Couble, A., Monié, D., Sánchez Herrera, K., Sandoval, H., Reviakina, V., Mercedes Panizo, M., & Mendoza, M. (2009). Clasificación e identificación de especies de actinomicetos: Un estudio fenotípico comparativo. *Revista de La Sociedad Venezolana de Microbiología*, 29(2), 91–97. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-25562009000200005&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Vargas-Gómez, K. A., Evangelista-Martínez, Z., Gastélum-Martínez, É., Uc-Varguez, A., Quiñones-Aguilar, E. E., & Rincón-Enríquez, G. (2025). Broad spectrum antagonistic activity of

Streptomyces sp. CACIS-1.16CA against phytopathogenic fungi. *Microbiology Research*, 16(9), 193. <https://doi.org/10.3390/microbiolres16090193>

Wei, Y., Zhao, Y., Zhou, D., Qi, D., Li, K., Tang, W., Chen, Y., Jing, T., Zang, X., Xie, J., & Wang, W. (2020). A newly isolated Streptomyces sp. yys-7 with a broad-spectrum antifungal activity improves the banana plant resistance to Fusarium oxysporum f. sp. cubense tropical race 4. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1712. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01712>

Yao, X., Guo, H., Zhang, K., Zhao, M., Ruan, J., & Chen, J. (2023). Trichoderma and its role in biological control of plant fungal and nematode disease. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1160551. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2023.1160551/XML>

México

Juárez Autónoma de Tabasco.

CAPITULO 3: RESULTADOS

3.1 RESULTADOS NO INCLUIDOS EN EL ARTÍCULO CIENTÍFICO

Detección de enzimas hidrolíticas

Las 12 cepas de actinomicetos aisladas presentaron actividad hidrolítica sobre al menos una de las fuentes carbono suplementadas al medio de cultivo (Figura 16), evidenciando su capacidad metabólica para la degradación de compuestos complejos.



Figura 16. Hidrólisis de distintas fuentes de carbono por parte de las actinobacterias.

La hidrólisis de celulosa fue menos frecuente en comparación con otras fuentes de carbono; únicamente cinco cepas (UJAT-12, UJAT-17, UJAT-53, UJAT-54 y UJAT-57) lograron crecer en este medio, lo que indica una capacidad diferencial para la producción de celulasas. Los resultados de la hidrólisis de almidón, avena, celulosa y caseína se encuentran resumidos en la Tabla 3.1

Tabla 6. Resultados de la hidrólisis generada por las actinobacterias en distintas fuentes de carbono.

Cepas	Almidón	Avena	Celulosa	Caseína
-------	---------	-------	----------	---------

UAJT-9	+	+	-	+
UJAT-11	+	+	-	+
UJAT-12	+	+	+	+
UJAT-17	+	+	+	+
UJAT-18	+	+	-	+
UJAT-24	+	+	-	+
UJAT-28	+	+	-	+
UJAT-50	+	+	-	+
UJAT-53	+	+	+	+
UJAT-54	+	+	+	+
UJAT-56	+	+	+	+
UJAT-57	+	+	+	+

Producción de promotores del crecimiento vegetal

En relación con la producción de promotores del crecimiento vegetal, seis cepas (UJAT-9, UJAT-11, UJAT-18, UJAT-24, UJAT-50 y UJAT-53) fueron consideradas como fijadoras de nitrógeno ya que lograron crecer en el medio Ashby. (Figura 17), lo cual, indica su capacidad para fijar nitrógeno atmosférico



Figura 17. Cepas fijadoras de nitrógeno en el medio Ashby.

Con respecto a la solubilización de fosfatos en el medio SRSM-1, solo las cepas UJAT-9 y UJAT-24 lograron solubilizar fosfatos ya que existe un viraje a color amarillo producido en la colonia y alrededor de ella (Figura 18), característico de la solubilización de fosfatos insolubles.

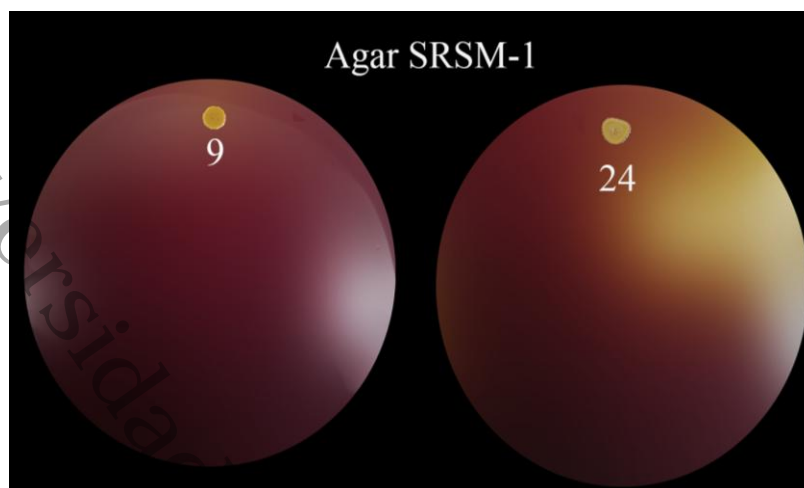


Figura 18. Solubilización de fosfatos por parte de los actinomicetos en el medio SRSM-1.

Ninguna de las cepas de actinomicetos evaluadas mostró producción detectable de sideróforos ni ácido indol-3- acético bajo las condiciones experimentales de este estudio. El resumen con los resultados de todas las pruebas se encuentra en la Tabla 7.

Tabla 7. Evaluación de la producción de promotores del crecimiento vegetal.

Cepas	Producción promotores del crecimiento vegetal			
	Fosfatos	Nitrógeno	Sideróforos	AIA
UJAT-9	+	+	-	-
UJAT-11	-	+	-	-
UJAT-12	-	-	-	-
UJAT-17	-	-	-	-
UJAT-18	-	+	-	-
UJAT-24	+	+	-	-
UJAT-28	-	-	-	-
UJAT-50	-	+	-	-
UJAT-53	-	+	-	-
UJAT-54	-	-	-	-
UJAT-56	-	-	-	-
UJAT-57	-	-	-	-

3.2 DISCUSIÓN

Caracterización e identificación de actinomicetos aislados de rizosfera de cacao

Se aislaron un total de 12 cepas provenientes de rizosfera de *T. cacao*, las cuales muestran características morfológicas típicas de actinomicetos, como son colonias secas,

aspecto algodonoso, rugosas y polvoriento. Estas cepas fueron sometidas a tres procesos de caracterización: presuntivo, molecular y fenotípico.

La caracterización presuntiva permitió clasificar en trece géneros principales: seis pertenecían al género *Streptomyces* sp identificadas por la presencia de cadenas largas de conidiósporas dispuestas en espiral; cinco cepas al género *Nocardia* sp, caracterizada por sus hifas agrupadas en cadenas cortas y largas de conidiósporas, y una correspondiente al género *Micromonospora* sp, la cual presentó quistes con conidiósporas en su interior. El resumen de las características macroscópicas se encuentra en la Tabla 8, mientras que las micrografías de las hifas se incluyen en la sección “Anexos”.

Tabla 8. Resumen de las características macroscópicas de las 12 actinobacterias.

Características morfológicas de las actinobacterias			
Cepa	Género	Pigmento Soluble	Pigmento Inverso
UJAT-9	<i>Streptomyces</i> sp	Rojo-Naranja	Rojo-Naranja
UJAT-11	<i>Streptomyces</i> sp	Blanco-Gris	Amarillo ámbar
UJAT-12	<i>Nocardia</i> sp	Amarillo ámbar	Café
UJAT-17	<i>Micromonospora</i> sp	Blanco	Rojo-Café
UJAT-18	<i>Nocardia</i> sp	Gris	Rojo-Café
UJAT-24	<i>Streptomyces</i> sp	Azul-verde	Amarillo ámbar
UJAT-28	<i>Nocardia</i> sp	Purpura	Purpura
UJAT-50	<i>Nocardia</i> sp	Purpura	Purpura
UJAT-53	<i>Streptomyces</i> sp	Blanco-Gris	Amarillo ámbar
UJAT-56	<i>Streptomyces</i> sp	Rosa-Salmón	Amarillo ámbar
UJAT-54	<i>Sreptomyces</i> sp	Marrón	Marrón
UJAT-57	<i>Nocardia</i> sp	Blanco	Café-Amarillo

En la fase molecular, se seleccionaron a seis cepas con actividad antagonista frente a *M. roreri in vitro*. Las cepas fueron identificadas dentro del género *Streptomyces* sp, con porcentajes de identidad superiores al 99 %, de acuerdo con las comparaciones realizadas en la base de datos GenBank (Tabla 9). Estos resultados respaldan la predominancia de *Streptomyces* como un grupo clave de actinobacterias rizosféricas con potencial biocontrolador.

Tabla 9 Identificación de las cepas secuenciadas mediante de datos del NCBI.

Cepa	Identificación de GenBank	Tamaño pb	Valor de cobertura	Porcentaje de identidad
UJAT-9	<i>Streptomyces</i> sp	1513	99%	99.81%
UJAT-24	<i>Streptomyces</i> sp	525	97%	99.81%
UJAT-50	<i>Streptomyces</i> sp	97	42%	100%
UJAT-54	<i>Streptomyces</i> sp	435	43%	100%
UJAT-56	<i>Streptomyces</i> sp	528	99%	100%
UJAT-57	<i>Streptomyces</i> sp	529	100%	99.43%

La presencia de los géneros *Streptomyces*, *Nocardia* y *Micromonospora* en la rizosfera de cacao, puede explicarse a los roles que desempeñan en el suelo y en las raíces de las plantas. Estas actinobacterias promueven el crecimiento vegetal a través de la facilitación de nutrientes esenciales como nitrógeno y fósforo, brindan defensa contra fitopatógenos y segregan enzimas líticas que promueven el reciclamiento de nutrientes en el suelo, dichas funciones le permiten colonizar y predominar en la rizosfera (Pérez-Corral *et al.*, 2015; Martins *et al.*, 2020; Trinidad-Cruz *et al.*, 2021).

El género *Streptomyces* sp. destaca por su actividad antifúngica asociada a la producción de enzimas como quitinasas (Mendoza-Herrera *et al.*, 2020; Díaz-Díaz *et al.*, 2022; Rodríguez-Melquiades *et al.*, 2025), las cuales, degradan la pared celular. Por su parte, reportes de las especies de *Nocardia* sp indican que participan en la degradación de lignina para reciclar nutrientes en el suelo y suministra ácido indol acético, fósforo solubilizado y amonio que promueven el crecimiento de la planta (Nouioui *et al.*, 2022; Shan *et al.*, 2022; El-Sayed *et al.*, 2023; Nonthakaew *et al.*, 2025). Mientras que *Micromonospora* sp se caracteriza por su actividad antagonista, producción de sideróforos para la captación de hierro en favor de la planta (Malisorn *et al.*, 2020; Carro *et al.*, 2024; Nouioui *et al.*, 2025).

En el presente estudio, las 12 cepas de actinomicetos aisladas produjeron enzimas líticas como amilasas, celulasas y caseínasas. Estas enzimas, en conjunto, juegan un papel notable en la interacción entre la rizosfera y los actinomicetos al permitirles la degradación de la pared celular de fitopatógenos o plagas y, también, aumentan la biodisponibilidad en el suelo de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y azufre (Sreevidya *et al.*, 2016; Zerín, 2020, Elshafie & Camele, 2022; Silva *et al.*, 2022;). Así, las amilasas pueden ser empleadas para la producción de biocombustibles (Souza & Oliveira Magalhães, 2010; Farooq *et al.*,

2021), la celulosa, puede aplicarse para sustituir los plásticos derivados del petróleo ya que son polímeros biodegradables y no tóxicos (Aziz *et al.*, 2022; Choi *et al.*, 2022) y las caseínas son utilizadas en la industria alimentaria, específicamente, se aplican en productos lácteos, ya que hidrolizan la proteína de la leche para facilitar su asimilación y la obtención de nutrientes como: calcio, fósforo y aminoácidos (Hussein *et al.*, 2020; Padilla-Doval & Zambrano-Arteaga, 2021).

En estudios similares, donde se aislaron actinobacterias endófitas de semillas y mazorcas de cacao, se reportan la producción de enzimas líticas como: quitinasas, proteasas, pectinasas y celulasas las cuales jugaron un papel trascendental en el desarrollo de la actividad antagonista contra *P. megakarya* (Mouafo-Tchinda *et al.*, 2016; Boudjeko *et al.*, 2017). Las enzimas celulasas, proteasas, caseínas, quitinasas y amilasas juegan un rol importante en las actividades que desempeñan los actinomicetos endófitos en las plantaciones de cacao para evitar la proliferación de microorganismos que signifiquen una competencia en el medio o una amenaza para la planta, estos procesos son: degradación de la pared celular de fitopatógenos, producción de compuestos volátiles, exclusión de fitopatógenos mediante competencia de nutrientes (Sallam *et al.*, 2021; Oyedoh *et al.*, 2023; Kariyanna & Panda, 2025).

Producción de promotores del crecimiento vegetal

Seis de las 12 cepas de actinomicetos aisladas en este estudio lograron producir promotores del crecimiento vegetal *in vitro*, principalmente, por la fijación de N, de las cuales, dos cepas (UJAT-9 y UJAT-24) presentaron solubilización de fosfatos. Estos mecanismos son fundamentales para el desarrollo vegetal, ya que N es un elemento clave que conforma proteínas, ácidos nucleicos, fosfolípidos, clorofila, hormonas, vitaminas y participa en todos los estadios del desarrollo de las plantas (Wang *et al.*, 2024). Para obtener N en formas y cantidades asimilables, las plantas establecen relaciones simbióticas con actinobacterias rizosféricas que convierten el N₂ en amonio (NH₃) (Kakoi *et al.*, 2014). Los hallazgos encontrados son similares a los reportados por (Abdelgawad *et al.*, 2020; Kaewkla *et al.*, 2021), quienes resaltan la presencia de actinobacterias rizosféricas fijadoras de N *in vitro* que lograron producir cambios en los niveles de N tanto en el suelo, como en los tallos y raíces de la soja (*Glycine max*) y alubia (*Pisum sativum* L) lo cual demuestra la viabilidad y el rol vital de las actinobacterias para la biodisponibilidad de N.

Por otro lado, el fosfato es otro elemento esencial para el desarrollo de las plantas, influye en: formación de moléculas tanto de ADN y ARN, mejora la formación de flores, producción de semillas y estimula el desarrollo radicular. Sin embargo, el P se encuentra en cantidades limitadas o en formas no asimilables como AlPO_4 (Fosfato de aluminio) y FePO_4 (Fosfato de hierro) (Chouyia *et al.*, 2022). Para que el P puede ser absorbido por las plantas, este debe estar en forma de iones de Dihidrogenofosfato (H_2PO_4^-). Durante ese proceso, las actinobacterias rizosféricas se encargan de producir ácidos orgánicos capaces de solubilizar el fosfato para que este pueda fungir como macronutriente en las plantas (Boubekri *et al.*, 2021). Los resultados concuerdan con lo reportado por Vargas Hoyos *et al.* (2021) y Babu *et al.* (2025) quienes destacan la solubilización de fosfatos por parte de actinobacterias rizosféricas.

La presencia de mecanismos promotores del crecimiento vegetal detectados in vitro sugiere que las actinobacterias rizosféricas asociadas a las raíces de *Theobroma cacao* podrían constituir una alternativa sostenible y ambientalmente amigable. Estos mecanismos, como la fijación presuntiva de nitrógeno y la solubilización de fosfatos, podrían contribuir indirectamente a mejorar la eficiencia en la nutrición vegetal y a reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos y agroquímicos, tal como ha sido reportado en estudios previos (Soumare *et al.*, 2021; Shahrajabian & Sun, 2025).

3.3 LITERATURA CITADA

Abdelgawad, H., Abuelsoud, W., Madany, M. M. Y., Selim, S., Zinta, G., Mousa, A. S. M., & Hozzein, W. N. (2020). Actinomycetes Enrich Soil Rhizosphere and Improve Seed Quality as well as Productivity of Legumes by Boosting Nitrogen Availability and Metabolism. *Biomolecules*, 10(12), 1675. <https://doi.org/10.3390/biom10121675>

Aziz, T., Farid, A., Haq, F., Kiran, M., Ullah, A., Zhang, K., Li, C., Ghazanfar, S., Sun, H., Ullah, R., Ali, A., Muzammal, M., Shah, M., Akhtar, N., Selim, S., Hagagy, N., Samy, M., & Al Jaouni, S. K. (2022). A Review on the Modification of Cellulose and Its Applications. *Polymers*, 14(15), 3206. <https://doi.org/10.3390/polym14153206>

Babu, P. M., Panda, N., Nayak, R. K., Sethi, D., Biswal, S., Mishra, M. K., Datta, S., Karubakee, S., Suchitha, N. S., Prusty, M., Nayak, A., Dash, R., & Pattanayak, S. K. (2025). Isolation, characterization and screening of phosphate (P) solubilizing actinomycetes and exploring its potency in finger millet (*Eleusine coracana* L.). *BMC Plant Biology*, 25(1), 362. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06385-1>

Boubekri, K., Soumare, A., Mardad, I., Lyamlouli, K., Hafidi, M., Ouhdouch, Y., & Kouisni, L. (2021). The Screening of Potassium- and Phosphate-Solubilizing Actinobacteria and the Assessment of Their Ability to Promote Wheat Growth Parameters. *Microorganisms*, 9(3), 470. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9030470>

Boudjeko, T., Tchinda, R. A. M., Zitouni, M., Tchatchou Nana, J. A. V., Lerat, S., & Beaulieu, C. (2017). *Streptomyces cameroonensis* sp. nov., a geldanamycin producer that promotes *Theobroma cacao* growth. *Microbes and Environments*, 32(1), 24–31. <https://doi.org/10.1264/jsme2.ME16095>

Carro, L., Golińska, P., Saati-Santamaría, Z., Igual, J. M., Klenk, H.-P., & Goodfellow, M. (2024). Atacama desert is a source of new *Micromonospora* strains: Description of *Micromonospora sicca* sp. nov. *Systematic and Applied Microbiology*, 47(5), 126542. <https://doi.org/10.1016/j.syapm.2024.126542>

Choi, S. M., Rao, K. M., Zo, S. M., Shin, E. J., & Han, S. S. (2022). Bacterial Cellulose and Its Applications. *Polymers*, 14(6), 1080. <https://doi.org/10.3390/polym14061080>

Díaz-Díaz, M., Bernal-Cabrera, A., Trapero, A., Medina-Marrero, R., Sifontes-Rodríguez, S., Cupull-Santana, R. D., 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(5), 645. <https://doi.org/10.3390/plants11050645>

Dukare, A., & Paul, S. (2021). Biological control of *Fusarium* wilt and growth promotion in pigeon pea (*Cajanus cajan*) by antagonistic rhizobacteria, displaying multiple modes of pathogen inhibition. *Rhizosphere*, 17, 100278. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100278>

El-Sayed, M. H., Kobisi, A. E.-N. A., Elsehemy, I. A., & El-Sakhawy, M. A. (2023). Rhizospheric-Derived *Nocardopsis alba* BH35 as an Effective Biocontrol Agent Actinobacterium with Antifungal and Plant Growth-Promoting Effects: In Vitro Studies. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 33(5), 607-620. <https://doi.org/10.4014/jmb.2301.01001>

Elshafie, H. S., & Camele, I. (2022). Rhizospheric Actinomycetes Revealed Antifungal and Plant-Growth-Promoting Activities under Controlled Environment. *Plants*, 11(14), 1872. <https://doi.org/10.3390/plants11141872>

Farooq, M. A., Ali, S., Hassan, A., Tahir, H. M., Mumtaz, S., & Mumtaz, S. (2021). Biosynthesis and industrial applications of α -amylase: A review. *Archives of Microbiology*, 203(4), 1281-1292. <https://doi.org/10.1007/s00203-020-02128-y>

Hussein, N. N. A., Ibrahim, A. I., Kamar, F. H., & Nechifor, A. C. (2020). Caseinase Production and Media Optimization from *Bacillus subtilis*. *Revista de Chimie*, 71(11), 1-9. <https://doi.org/10.37358/RC.20.11.8368>

Kaewkla, O., Suriyachadkun, C., & Franco, C. M. M. (2021). *Micromonospora veneta* sp. Nov., an endophytic actinobacterium with potential for nitrogen fixation and for bioremediation. *Archives of Microbiology*, 203(6), 2853-2861. <https://doi.org/10.1007/s00203-021-02260-3>

Kakoi, K., Yamaura, M., Kamiharai, T., Tamari, D., Abe, M., Uchiumi, T., & Kucho, K.-I. (2014). Isolation of Mutants of the Nitrogen-Fixing Actinomycete *Frankia*. *Microbes and Environments*, 29(1), 31-37. <https://doi.org/10.1264/jsme2.ME13126>

Kariyanna, B., & Panda, S. (2025). Unveiling the advanced application of actinomycetes in biotic stress management for sustainable agriculture. *Discover Life*, 55(1), 30. <https://doi.org/10.1007/s11084-025-09704-6>

Kowalska, J., Krzywińska, J., & Tyburski, J. (2022). Yeasts as a Potential Biological Agent in Plant Disease Protection and Yield Improvement—A Short Review. *Agriculture*, 12(9), 1404. <https://doi.org/10.3390/agriculture12091404>

Malisorn, K., Embaen, S., Sribun, A., Saeng-in, P., Phongsopitanun, W., & Tanasupawat, S. (2020). Identification and antimicrobial activities of *Streptomyces*, *Micromonospora*, and *Kitasatospora* strains from rhizosphere soils. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 10,(2), 123-128. <https://doi.org/10.7324/JAPS.2020.102018>

Martins, S. D. S. D. O., Mendonça, J. L. V. D., Nascimento, A. P. D., Costa Neto, P. D. Q., & Barbosa, A. M. (2020). Ação antimicrobiana de actinomicetos rizosféricos de guaranazeiro. *Nature and Conservation*, 14(1), 83-89. <https://doi.org/10.6008/CBPC2318-2881.2021.001.0009>

Mendoza-Herrera, Y. M., Rios-Velasco, C., Cambero-Campos, J., dios-Ávila, N. D., Pérez-Corral, D. A., Rodríguez-Guerra, R., & Estrada-Virgen, M. O. (2020). Actinomicetos antagonistas a *Colletotrichum* sp. Penz. En el cultivo de mango en Nayarit, México. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 7(2). <https://doi.org/10.19136/era.a7n2.2420>

Mouafo-Tchinda, R. A., Boudjeko, T., Simao-Beauvoir, A. M., Lerat, S., Tsala, É., Monga, E., & Beaulieu, C. (2016). Morphological, physiological, and taxonomic characterization of actinobacterial isolates living as endophytes of cacao pods and cacao seeds. *Microbes and Environments*, 31(1), 56–62. <https://doi.org/10.1264/jsme2.ME15146>

Nonthakaew, N., Sharkey, L. K. R., & Pidot, S. J. (2025). The genus *Nocardia* as a source of new antimicrobials. *Npj Antimicrobials and Resistance*, 3(1), 5. <https://doi.org/10.1038/s44259-025-00075-6>

Nouioui, I., Ha, S., Baek, I., Chun, J., & Goodfellow, M. (2022). Genome insights into the pharmaceutical and plant growth promoting features of the novel species *Nocardia alni* sp. Nov. *BMC Genomics*, 23(1), 70. <https://doi.org/10.1186/s12864-021-08257-y>

Nouioui, I., Zimmermann, A., Gomez Escribano, J. P., Jando, M., Pötter, G., Neumann-Schaal, M., & Mast, Y. (2025). Taxonomic description of *Micromonospora reichwaldensis* sp. Nov. And its biosynthetic and plant growth-promoting potential. *Microbiology Spectrum*, 13(4), e02129-24. <https://doi.org/10.1128/spectrum.02129-24>

Oyedoh, O. P., Yang, W., Dhanasekaran, D., Santoyo, G., Glick, B. R., & Babalola, O. O. (2023). Sustainable Agriculture: Rare-Actinomycetes to the Rescue. *Agronomy*, 13(3), 666. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030666>

Padilla-Doval, J., & Zambrano-Arteaga, J. C. (2021). Estructura, propiedades y genética de las caseínas de la leche: Una revisión. *CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 16(3), 62-95. <https://doi.org/10.21615/cesmvz.5231>

Pérez-Corrál, D. A., García-González, N. Y., Gallegos-Morales, G., Ruiz-Cisneros, M. F., Berlanga-Reyes, D. I., & Ríos-Velasco, C. (2015). Aislamiento de actinomicetos asociados a rizosfera de árboles de manzano antagonísticos a *Fusarium equiseti*. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 6(7), 1629-1638.

pigeon pea (*Cajanus cajan*) by antagonistic rhizobacteria, displaying multiple modes of pathogen inhibition. *Rhizosphere*, 17, 100278. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100278>

Rodríguez-Melquiades, A., Téllez-Jurado, A., Mercado-Flores, Y., Ramírez-Vargas, R., & Anducho-Reyes, M. A. (2025). Aislamiento e identificación de actinomicetos asociados al suelo rizosférico de *Machaeranthera gypsumifila* (Planta del yeso) con potencial actividad antagonista a microorganismos fitopatógenos. *Mexican Journal of Biotechnology*, 10(2), 1-24. <https://doi.org/10.29267/mxjb.2025.10.2.1-24>

Sallam, N., Ali, E. F., Seleim, M. A. A., & Khalil Bagy, H. M. M. (2021). Endophytic fungi associated with soybean plants and their antagonistic activity against *Rhizoctonia solani*. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 31(1), 54. <https://doi.org/10.1186/s41938-021-00402-9>

Sallam, N., Ali, E. F., Seleim, M. A. A., & Khalil Bagy, H. M. M. (2021). Endophytic fungi associated with soybean plants and their antagonistic activity against *Rhizoctonia solani*. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 31(1), 54. <https://doi.org/10.1186/s41938-021-00402-9>

Shahrajabian, M. H., & Sun, W. (2025). Microbial interaction of Actinobacteria strains with various plants, promote growth and development in natural farming, and alleviating biotic and abiotic stresses. *Discover Sustainability*, 6(1), 564. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01413-4>

Shan, Q., Han, C., Zhao, J., Yu, B., Jiang, M., Liu, T., Wang, X., & Xiang, W. (2022). *Nocardia albiluteola* sp. Nov., a novel lignin-degrading actinobacterium isolated from rhizosphere soil of pumpkin. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 72(4). <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.005305>

Silva, G. D. C., Kitano, I. T., Ribeiro, I. A. D. F., & Lacava, P. T. (2022). The Potential Use of Actinomycetes as Microbial Inoculants and Biopesticides in Agriculture. *Frontiers in Soil Science*, 2, 833181. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2022.833181>

Soumare, A., Boubekri, K., Lyamlouli, K., Hafidi, M., Ouhdouch, Y., & Kouisni, L. (2021). Efficacy of phosphate solubilizing Actinobacteria to improve rock phosphate agronomic effectiveness and plant growth promotion. *Rhizosphere*, 17, 100284. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100284>

Souza, P. M., & Oliveira Magalhães, P. (2010). Application of microbial α -amylase in industry – A review. *Brazilian Journal of Microbiology*, 41(4), 850-861. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822010000400004>

Sreevidya, M., Gopalakrishnan, S., Kudapa, H., & Varshney, R. K. (2016). Exploring plant growth-promotion actinomycetes from vermicompost and rhizosphere soil for yield enhancement in chickpea. *Brazilian Journal of Microbiology*, 47(1), 85-95. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2015.11.030>

Trinidad-Cruz, J. R., Rincón-Enríquez, G., Evangelista-Martínez, Z., Guízar-González, C., Enríquez-Vara, J. N., López-Pérez, L., & Quiñones-Aguilar, E. E. (2021). Actinobacterias de la rizosfera del aguacate: Actividad antagónica contra *Colletotrichum gloeosporioides* y *Xanthomonas* sp. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 39. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.802>

Vargas-Hoyos, H. A., Chiaramonte, J. B., Barbosa-Casteliani, A. G., Fernandez Morais, J., Perez-Jaramillo, J. E., Nobre Santos, S., Nascimento Queiroz, S. C., & Soares Melo, I. (2021). An Actinobacterium Strain From Soil of Cerrado Promotes Phosphorus Solubilization and Plant Growth in Soybean Plants. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 579906. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.579906>

Wang, Q., Li, S., Li, J., & Huang, D. (2024). The Utilization and Roles of Nitrogen in Plants. *Forests*, 15(7), 1191. <https://doi.org/10.3390/f15071191>

Zerin, T. (2020). Isolation of Bacillus spp. from rhizosphere of garden soil: Their potential role in amylase production and nitrogen cycle. Stamford Journal of Microbiology, 10(1), 12-15. <https://doi.org/10.3329/sjm.v10i1.50726>

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIÓN GENERAL

Estos resultados demuestran la diversidad microbológica y metabólica de las actinobacterias presentes en la rizósfera de las plantaciones de cacao. La diversidad de

actinobacterias presente en la rizosfera de los árboles de cacao estuvo representada por 12 cepas agrupadas en tres géneros: *Streptomyces*, *Nocardia* y *Micromonospora*, géneros reportados por su abundancia en suelos agrícolas y su capacidad metabólica.

Asimismo, se identificaron rasgos asociados a la promoción del crecimiento vegetal, tales como la capacidad presuntiva de fijación de nitrógeno y la solubilización de fosfatos,

En cuanto a la actividad antagonista, se identificó que *Streptomyces* sp. UJAT-54 inhibió en un 50 % el crecimiento *in vitro* de *M. royeri*. Además, los extractos biológicos obtenidos a partir de esta cepa mostraron un efecto inhibitorio sobre la germinación total y la germinación tardía de las esporas del patógeno, lo que sugiere una marcada actividad antifúngica asociada a los metabolitos producidos.

4.2 RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos en la presente investigación, se recomienda que en estudios futuros considerar los siguientes elementos:

1. Evaluar la obtención de extractos biológicos a partir de las cepas de actinomicetos que mostraron capacidad presuntiva de fijación de N y solubilizaron los fosfatos, con el fin de evaluarlos en campo su potencial como promotores del crecimiento vegetal en cacao.
2. Realizar ensayos preliminares en condiciones controladas y de campo para evaluar la aplicación del extracto biológico obtenido de la cepa *Streptomyces* sp UJAT-54 en frutos con infecciones incipientes de moniliasis, a fin de determinar si su efecto biológico corresponde a una actividad fungistática o fungicida.
3. Profundizar en el estudio de los mecanismos asociados a los promotores de crecimiento vegetal y a la actividad antagonista de las cepas aisladas, incluyendo la posible síntesis de enzimas líticas, las cuales podrían estar involucradas en la inhibición del crecimiento de *M. royeri*.
4. Impulsar el desarrollo y validación de biofungicidas y biofertilizantes a partir de las cepas de actinomicetos con mayor actividad biológica, con el propósito de disminuir la dependencia de agroquímicos y fortalecer la sostenibilidad de los sistemas de producción de cacao.

5 ANEXOS

Anexo. Área de Estudio

En el área de estudio se observó un daño considerable en los cacaotales los cuales contaban con las siguientes características: mordedura de ardilla, necrosis en las mazorcas y presencia de hongos blanco en la superficie de la mazorca (Figura 19). El estado en el que encontramos la plantación se debió a la ausencia de estrategias que permitan controlar plagas y enfermedades. La característica de los frutos infectados fue: crecimiento micelial de color blanco en la superficie de la mazorca de cacao, lo que pudiera estar sugiriendo la presencia de *M. rozeri*.



Figura 19. Frutos de cacao con daño causado por plagas e infecciones por hongos.

Nota: a) Mazorcas dañadas por mordedura de ardillas. b) Fruto de cacao con recubierto de esporas blancas y con síntomas de necrosis. c) Conjunto de frutos dañados e infectados, se observan frutos recubierto en su totalidad por esporas blancas y con evidente maduración prematura. d) Mazorcas totalmente necrosadas y recubiertas de esporas blancas

Anexo. Características macroscópicas y microscópicas de las actinobacterias

Con la finalidad de complementar la información presentada en los apartados correspondientes a la descripción macroscópica y microscópica de las cepas, en esta sección se incluyen las microfotografías obtenidas durante las diferentes etapas del proceso de caracterización.

Como primer paso, se confirmó que las cepas aisladas presentaran características morfológicas asociadas a los actinomicetos, de acuerdo a las claves descritas en la literatura. La tabla con las características evaluadas se presenta en la sección de resultados. A continuación, se muestran las características macroscópicas observadas durante la caracterización de las cepas aisladas (Figura 20).

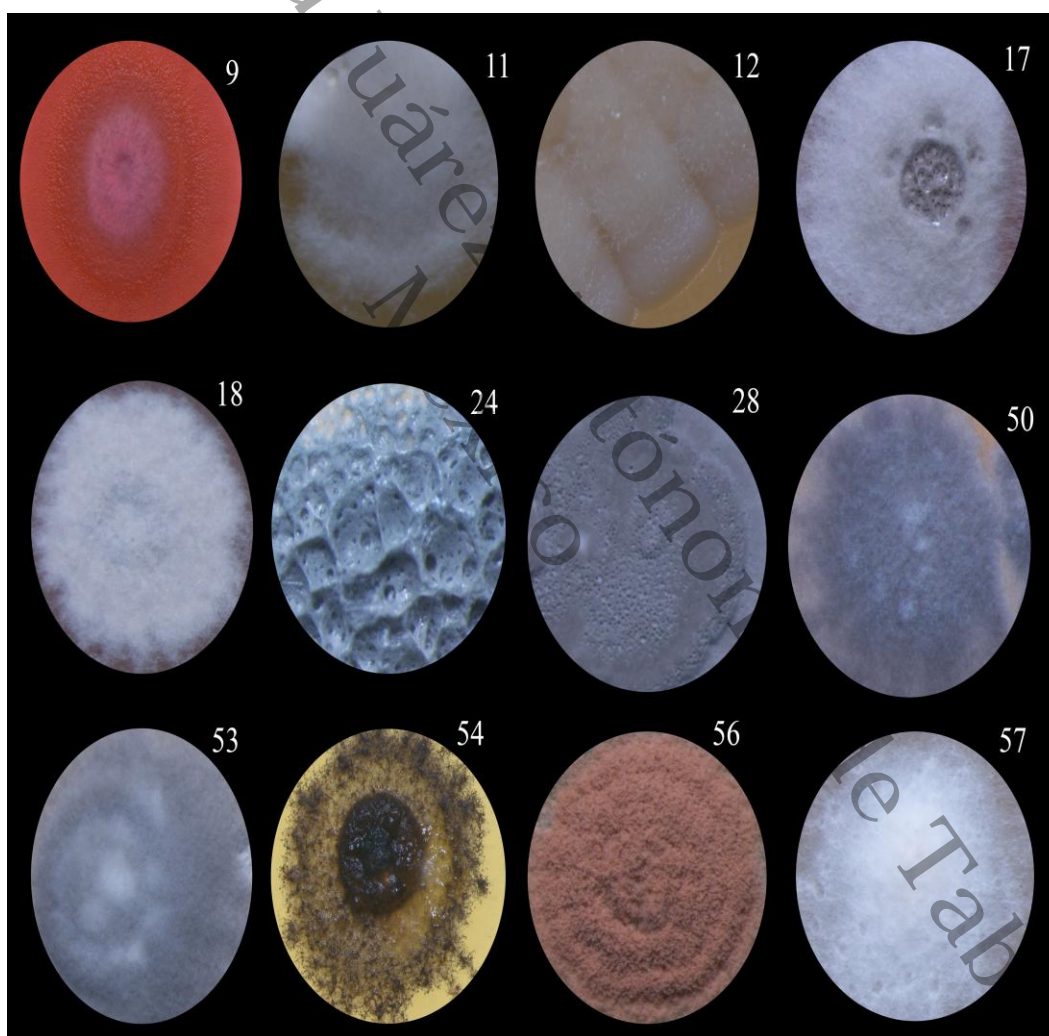


Figura 20. Características macroscópicas de las 12 cepas de actinomicetos aislados durante la investigación.

A continuación, se presentan las microfotografías obtenidas durante la caracterización microscópica, en la que se documentan las hifas y las estructuras morfológicas observadas en cada una de las cepas.

Las cepas UJAT-9, UJAT-11, UJAT-24, UJAT-53, UJAT-54 y UJAT-56 fueron identificadas dentro del género *Streptomyces* por presentar cadenas largas de conidios dispuestas en forma de espiral (Figura 21).

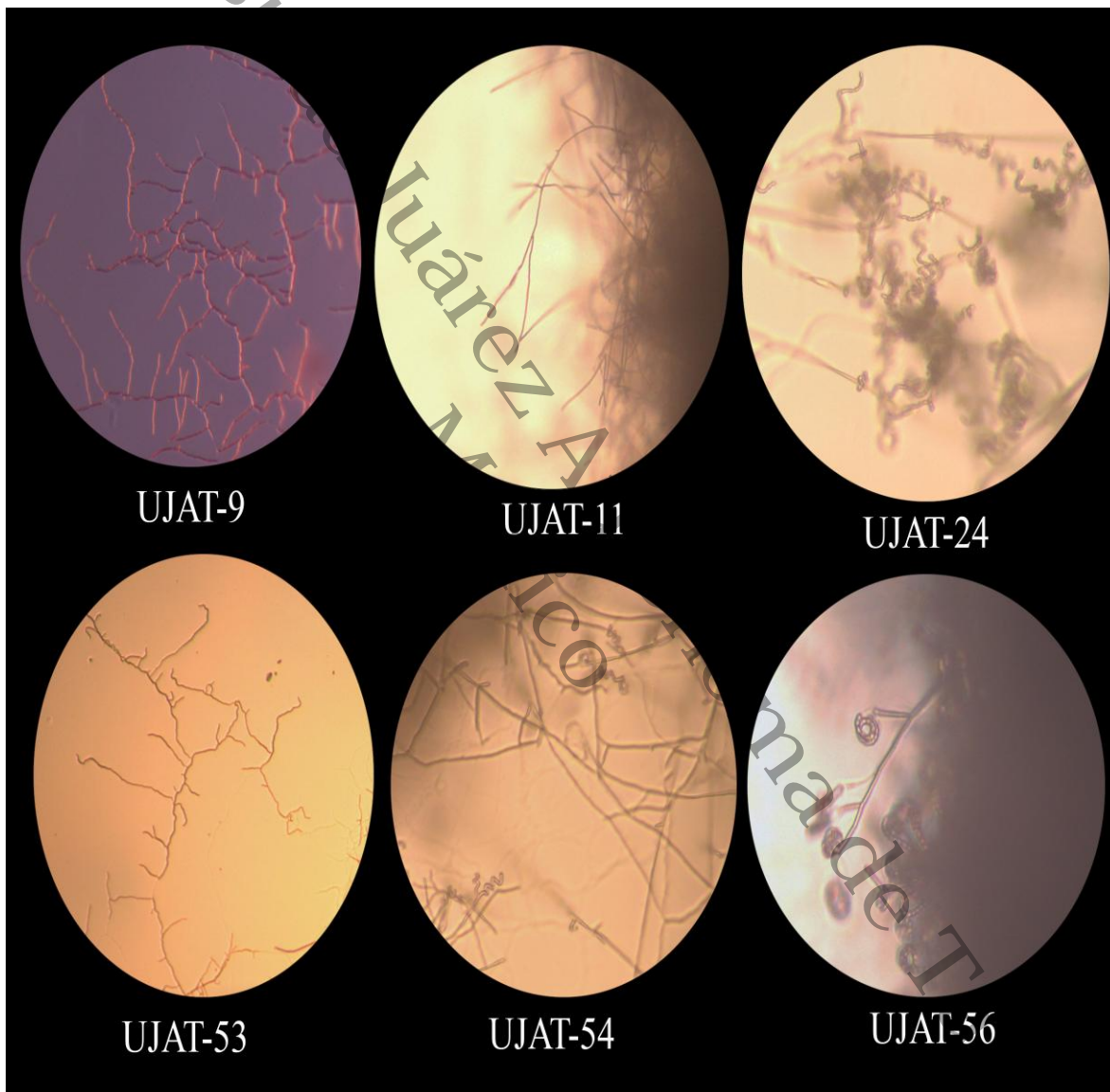


Figura 21. Hifas en espiral en cepas de *Streptomyces* sp.

Las cepas UJAT-12, UJAT-18, UJAT-28, UJAT-50 y UJAT-57 fueron identificadas dentro del género *Nocardia* por presentar cadenas cortas y largas de conidios, características morfológicas típicas de este género (Figura 22).

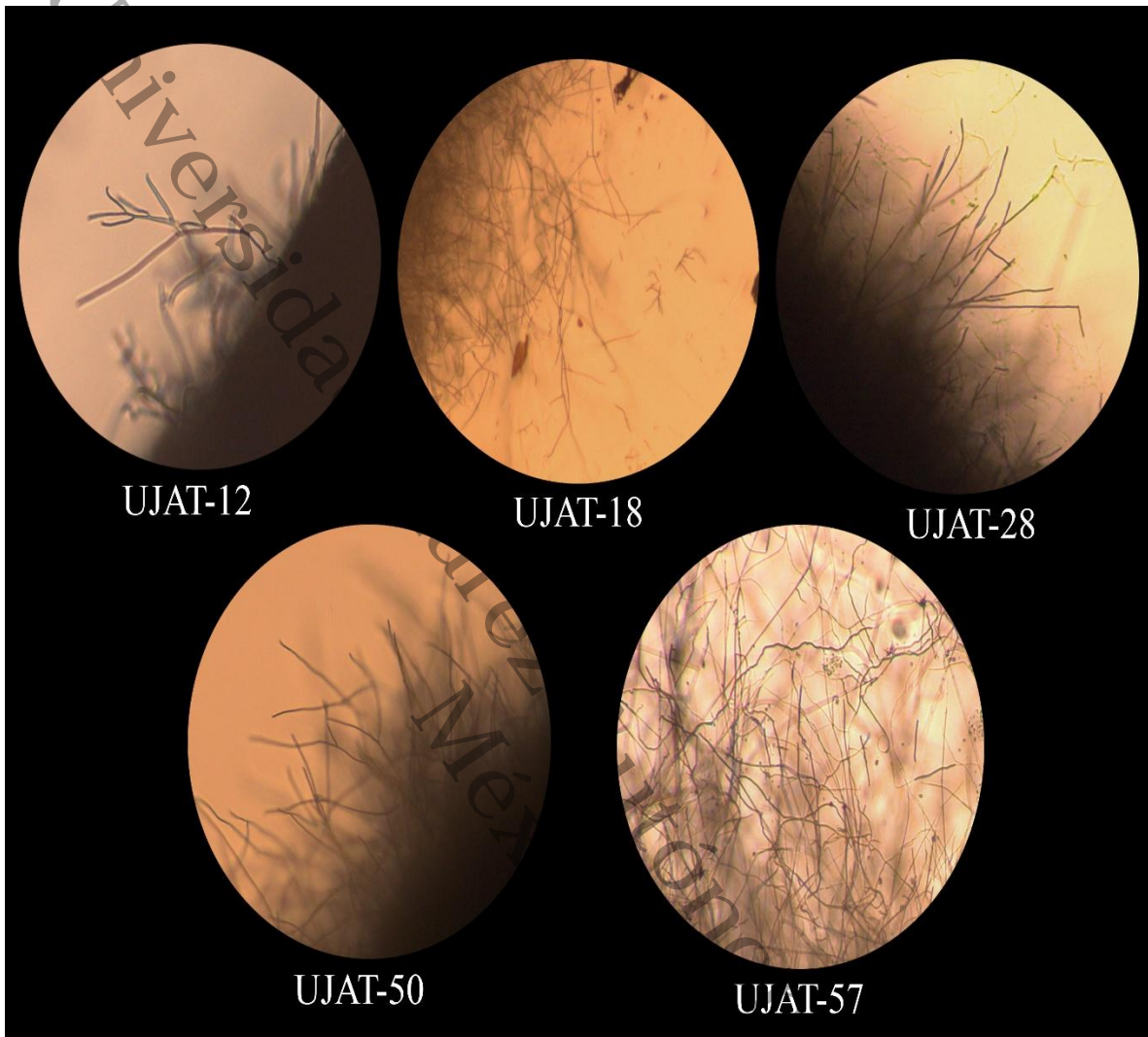


Figura 22. Hifas en con cadenas cortas y largas de conidios en cepas de *Nocardia sp.*

La cepa UJAT-17 fue la única cepa asociada al género *Micromonospora*. Presentó conidiosporas individuales, así como estructuras quísticas que contenían conidios en su interior, rasgos característicos de este género (Figura 23).

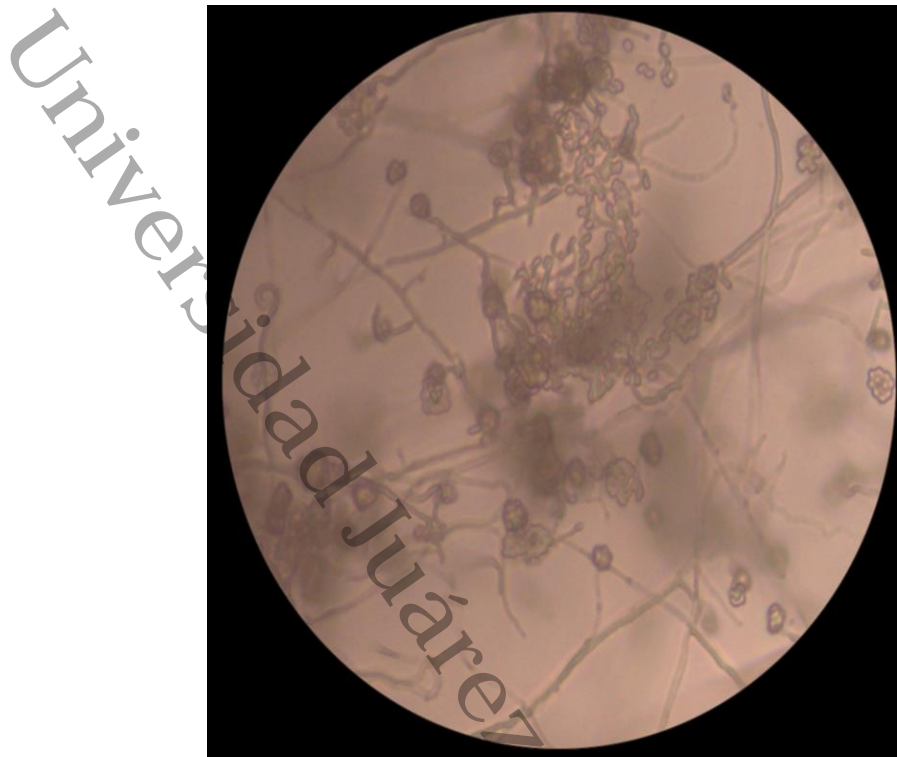


Figura 23. Estructuras quísticas con conidios en su interior observadas en el microcultivo de la cepa UJAT-17.

Anexo 6. Principios bioéticos

Capítulo 2: Buenas prácticas

Sección 1. Protección a las personas

1.1 La investigación científica que se realiza en la UJAT se fundamenta en el respeto a la dignidad, libertad y diversidad humana, así como en la garantía de bienestar y confidencialidad de los datos personales y aquellos denominados “datos sensibles” de los sujetos de estudio. Para ejercerlos correctamente, todas las autoridades universitarias, personal académico, los alumnos y demás participantes deberán observar la normatividad ética correspondiente a su ámbito de estudio, así como todas aquellas normas jurídicas vinculadas, lo que aplica también para profesionales y estudiantes externos que se encuentren realizando alguna actividad en la institución.

Sección 2. Protección al ambiente

2.1 Durante el desarrollo de la investigación deberá darse prioridad a la conservación del equilibrio ecológico, a la biodiversidad y al cumplimiento de las disposiciones oficiales internacionales y nacionales aplicables, minimizando los riesgos colaterales derivados del uso de compuestos químicos, biológicos y/o innovaciones biotecnológicas, a fin de reducir en la medida de lo posible la ya marcada huella ecológica del ser humano.

2.2 La investigación científica deberá priorizar la búsqueda de soluciones a los problemas ambientales donde se realizan los estudios, tales como deforestación, contaminación, sequía, inundaciones, epidemias, extinción de especies, entre otros.

Anexo 7. Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional	
Título de Tesis:	Evaluación del efecto antagonista de actinomicetos sobre <i>Moniliophthora roreri</i> y la producción de promotores del crecimiento vegetal
Autores de la Tesis:	Eduardo Arturo Calles Moreno, Rosa Martha Padrón López y Lucero Vázquez Cruz
ORCID:	https://orcid.org/0009-0004-9416-8345 http://orcid.org/0000-0001-7242-7247 https://orcid.org/0000-0002-2512-9842
Resumen de la Tesis:	El cacao es uno de los cultivos con mayor significado social, cultural y económico para Tabasco y México. La producción de este cultivo se ve amenazada por la enfermedad moniliasis del cacao causada por <i>M. roreri</i> . Para controlar dicha enfermedad es frecuente practicar tanto el control cultural como el control químico, el uso constante de fungicidas sintéticos causa contaminación tanto para la tierra como para el hombre. Para evitar el uso constante de estas sustancias químicas se buscó aislar actinomicetos provenientes de la rizosfera de arboles cacao con capacidad para inhibir la proliferación del fitopatógeno <i>M. roreri</i> y que, además, pudiesen producir promotores del crecimiento vegetal in vitro. Los resultados demostraron el gran potencial antagónico de nuestras actinobacterias al inhibir en porcentajes de 40 a 50% el desarrollo del micelio de la monilia in vitro y como extra lograron fijar nitrógeno y solubilizar fosfato los cuales son macronutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo de la planta.
Palabras claves de la Tesis:	Actinomicetos, Antagonismo, Biocontrol, Cacao, Monilia, <i>Streptomyces</i>
Referencias citadas:	Mouafo-Tchinda, R. A., Boudjeko, T., Simao-Beaunoir, A. M., Lerat, S., Tsala, É., Monga, E., & Beaulieu, C.

	<p>(2016). Morphological, physiological, and taxonomic characterization of actinobacterial isolates living as endophytes of cacao pods and cacao seeds. <i>Microbes and Environments</i>, 31(1), 56–62. https://doi.org/10.1264/jsme2.ME15146</p> <p>Boudjeko, T., Tchinda, R. A. M., Zitouni, M., Tchatchou Nana, J. A. V., Lerat, S., & Beaulieu, C. (2017). <i>Streptomyces cameroonensis</i> sp. nov., a geldanamycin producer that promotes <i>Theobroma cacao</i> growth. <i>Microbes and Environments</i>, 32(1), 24–31. https://doi.org/10.1264/jsme2.ME16095</p> <p>Aristide, D., Martial, T. T. P., Ruth, N. N. E., Grace, L. B., Ebenezer, F. T., Flore, M. P. T., & Thaddee, B. (2022). Effects of a powder formulation of <i>Streptomyces cameroonensis</i> on growth and resistance of two cocoa hybrids from cameroon against <i>Phytophthora megakarya</i> (Causal Agent of Black Pod Disease). <i>Journal of Microbiology and Biotechnology</i>, 32(2), 160-169. https://doi.org/10.4014/jmb.2110.10006</p>
--	---