

Bacterias solubilizadoras de fosfatos aisladas de *Vanilla* spp. para el biocontrol de *Fusarium* spp.

Andrés Felipe Cruz-Angulo¹

RESUMEN

La Vainilla es una orquídea hemiepífita que crece en el neotrópico, la cual pertenece a la familia *Orchidaceae*. Para el 2023, en Colombia se han encontrado más de 4.300 especies de orquídeas, esta variedad en el género ofrece una amplia gama y diversidad en los sabores de las especies de Vainilla. Esta planta posee gran importancia económica a nivel mundial, debido su compuesto principal, el 4-hidroxí-3-metoxibenzaldehído (vainillina). Gracias a este y otros factores de relevancia económica y social, se ha generado la necesidad de buscar diferentes métodos para controlar la diversidad de microorganismos fitopatógenos que perturban los cultivos comerciales de esta especie. Los hongos del género *Fusarium* afectan una gran variedad de especies de vainilla con extensiones de cultivo comerciales en países como México, Indonesia, Australia, India, China y Puerto Rico, lo que genera pérdidas cercanas al 80% de la producción de esta planta, relacionándose mayoritariamente con las especies *Fusarium oxysporum* f. sp. *vanillae* y *F. oxysporum* f.sp. *radicis-vanillae*. Son diversas las técnicas de manejo integrado que se utilizan en agricultura para disminuir la acción de los patógenos. Entre los principales métodos de biocontrol se encuentran los mediados por bacterias rizosféricas, entre ellas las Bacterias Solubilizadoras de Fosfatos (BSF). Las BSF representan un 10% de la microbiota del suelo encargada de los ciclos del fósforo (P) en el suelo, debido a la producción de metabolitos secundarios, ácidos y protones que ayudan a la disponibilidad de este elemento,

¹ Departamento de Ciencias Naturales y Matemáticas, Pontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia.

el cual es importante para procesos de nutrición de las plantas; igualmente, las BSF pueden cumplir el papel de inhibidoras del crecimiento microbiano, esto evidenciado en estudios de investigación. El objetivo de esta tesis, estilo monografía, es realizar revisión de literatura científica para evidenciar lo que existe sobre bacterias como antagonistas de *Fusarium spp.* enfocándose específicamente en BSF que están asociadas a la rizósfera de especies de vainilla presentes en Colombia y el mundo. El tema que se plantea es de interés dentro de la investigación para la producción de vainilla comercial, pues se deben identificar los mecanismos de biocontrol que emplean las BSF y analizar la relación que se presenta con su principal actividad que es solubilizar fosfatos y su capacidad biocontroladora sobre microorganismos fitopatógenos.

Palabras clave: *Vainilla*, *Fusarium spp.*, Bacterias, Bacterias solubilizadoras de fosfatos, (BSF), Biocontrol, Rizosfera, Interacción planta-microorganismo, Manejo Integrado de Fitoenfermedades

ABSTRACT

Vanilla, a hemiepiphytic orchid native to the Neotropics, holds significant global economic importance, primarily attributed to its principal compound, 4-hydroxy-3-methoxybenzaldehyde (vanillin). With 120 orchid species identified in tropical regions, including 25 reported in Colombia, the economic and social relevance of vanilla has led to a demand for diverse methods to manage the array of phytopathogenic microorganisms affecting commercial crops. Fungi belonging to the *Fusarium* genus, particularly *Fusarium oxysporum* f.sp. *vanillae* and *F. oxysporum* f.sp. *radicis-vanillae*, pose a substantial threat to vanilla crops in countries such as Mexico, Indonesia, Australia, India, China, and Puerto Rico. This results in staggering losses, reaching around 80% of vanilla production. Integrated pest management techniques, including biocontrol methods, have emerged as crucial strategies in agriculture. Notably, rhizospheric bacteria, specifically phosphate-solubilizing bacteria (BSF), have gained prominence. BSF, constituting approximately 10% of soil microbiota, play a pivotal role in phosphorus cycling, essential for plant nutrition. Their production of secondary metabolites and acids not only aids in phosphorus availability but also showcases inhibitory effects on microbial growth, as evidenced by research studies. This monograph-style thesis aims to conduct a comprehensive literature review on bacteria acting as antagonists against *Fusarium* spp., with a specific focus on BSF associated with the rhizosphere of vanilla species in Colombia and globally. The research addresses a critical aspect of commercial vanilla production, aiming to identify the biocontrol mechanisms employed by BSF. Additionally, it delves into analyzing the correlation between their primary activity of phosphate solubilization and their biocontrol efficacy against phytopathogenic microorganisms.

Keywords: Vanilla, *Fusarium* spp., Bacteria, Phosphate-solubilizing bacteria (BSF), Biocontrol, Rhizosphere, Plant-microbe interactions, Agricultural management.

INTRODUCCIÓN

La Vainilla, una orquídea hemiepífita predominante en el neotrópico, pertenece a la familia Orchidaceae, dentro de estas se encuentran especies como la *Vanilla planifolia* la cual es la especie más destacada, siendo la principal para el cultivo comercial. Teniendo una elevada importancia económica a nivel global debido a las propiedades de su compuesto principal, la vainillina, utilizado en la industria alimentaria y cosmética. A nivel mundial, los productos de la planta se presenta en forma química purificada o como extracto natural. Dada su relevancia económica y social, se ha intensificado la búsqueda de métodos para controlar los fitopatógenos que afectan tanto los cultivos comerciales como las plantas silvestres de Vainilla (Azofeifa-Bolaños et al., 2014; Diez, 2015; Flanagan y Mosquera-Espinosa, 2016; Flanagan et al., 2018a; Flanagan et al., 2018b).

Diversas investigaciones han identificado la interacción entre la Vainilla y los hongos del género *Fusarium*, especialmente con especies como *Fusarium oxysporum* y *F. solani*. Autores como Pinaría et al. (2010), Santa-Cardona et al. (2012), y Casillas-Isiordia et al. (2017) han documentado la presencia de *Fusarium* spp. en cultivos de vainilla, con impactos devastadores en la producción. Estos hongos, de alta resistencia y rápida propagación, afectan a diversas especies de vainilla en diferentes regiones del mundo, generando pérdidas económicas sustanciales (He, 2007; Ploetz, 2006; Villa-Martínez et al., 2015).

Para contrarrestar este problema, se ha explorado el uso de distintos microorganismos como biocontroladores, enfatizando en bacterias y hongos. Entre estos, se han estudiado mecanismos de acción como la competencia, la antibiosis, la resistencia

sistémica, la fungistasis y el micoparasitismo, los dos últimos solo aplican para hongos. Rubio y Fereres (2005), Manosalva y Mosquera-Espinosa (2014) y Fernández-Larrea (2001) han contribuido a la comprensión de estos mecanismos.

El presente trabajo tiene como propósito consultar literatura científica sobre las distintas aplicaciones en el uso de control biológico que emplean las bacterias solubilizadoras de fosfato – BSF como alternativa microbiológica sobre aislamientos patógenos dentro del género *Fusarium* en diferentes especies de *Vanilla*. Priorizando las investigaciones sobre la interacción entre la Vainilla y *Fusarium*, así como los avances en el uso de bacterias reportadas como solubilizadoras de fosfato (BSF) como biocontroladores. Teniendo en cuenta que autores como Akhtar et al. (2008), Ulloa (2011) y Valenzuela (2014), han analizado la eficacia de cepas específicas, como *Bacillus* spp. y *Pseudomonas* spp., en la protección contra *Fusarium* spp.

También se aborda la importancia de estos microorganismos en la disponibilidad de fósforo, un elemento esencial para el desarrollo de las plantas (Lara et al., 2011; Cisneros et al., 2017), examinan las características deseables de los biocontroladores microbianos y revisa la literatura sobre la eficiencia de cepas específicas, como *Bacillus subtilis* y *Pseudomonas fluorescens*, en la protección contra *Fusarium* patogénico. La relación de hospedero-patógeno entre la vainilla y *Fusarium* es un tema crucial para abordar, ya que diversos estudios han demostrado la devastadora influencia de estas especies de hongos en los cultivos de vainilla. Gangadara-Naik et al. (2010), Adame-García et al. (2011) y Koyyappurath et al. (2016), han profundizado en los síntomas específicos causados por *F. oxysporum* f. sp. *vanillae* y *F. oxysporum* f.sp. *radicis-vanillae*, detallando desde lesiones en tallos hasta la descomposición completa de la planta.

La búsqueda de estrategias de control biológico para contrarrestar la amenaza del género *Fusarium*, ha generado un conjunto de investigaciones que se han focalizado en microorganismos específicos como: *Bacillus subtilis* y *Pseudomonas fluorescens*, destacados por su capacidad para inhibir el crecimiento de *Fusarium* spp., los cuales han sido objeto de estudios puntuales (Otsuka et al., 2017; Gangadara-Naik et al., 2010; Jiménez-Quesada, et al., 2015). Además, Registeri et al. (2012) y Meliah et al. (2021), han explorado el potencial de *Streptomyces* spp. y *Burkholderia* spp. en el biocontrol, subrayando la diversidad de opciones para abordar esta problemática.

La relación entre BSF y *Fusarium* spp. también se ha destacado en la literatura científica. Varios estudios han demostrado la capacidad de estas bacterias como los géneros *Pseudomonas*, *Bacillus* y *Burkholderia* para solubilizar fosfato, un proceso vital para la nutrición vegetal. La investigación de Khan y Khan (2001), Shobha y Kumudini (2012) y Khalil et al. (2021), señala el impacto positivo de las BSF en cultivos diversos, incluido tomate, maíz, naranja, canola y arroz.

La disponibilidad limitada de fósforo en la naturaleza y su importancia en el desarrollo de las plantas subrayan la relevancia de las BSF no solo en el contexto de fitonutrición sino del control biológico contra fitopatógenos. Las metodologías integrativas para identificar estas bacterias, incluyendo tinciones de Gram y análisis molecular (Álvarez, 2012; Vargas-Barrantes y Castro-Barquero, 2019), ofrecen herramientas valiosas para su estudio y aplicación práctica en la protección de cultivos.

La interacción compleja entre la vainilla, *Fusarium* y diferentes cepas de biocontroladores microbianos como *Bacillus*, *Pseudomonas* y especies reportadas como BSF, han sido objeto de una investigación continua. La comprensión de mecanismos empleados y la identificación de los microorganismos investigados son esenciales para el

planteamiento de estrategias de manejo sostenible y que permitan mantener el equilibrio trófico en la protección de los cultivos de vainilla frente a los desafíos fitopatológicos.

METODOLOGÍA

Se planteó en este trabajo una revisión sistemática de literatura, la cual se define como una forma de estudio secundario que permite identificar, analizar e interpretar las evidencias asociadas con los objetivos o con una pregunta de investigación específica (Kitchenham et al., 2011). Para el desarrollo de este tipo de revisiones, es preciso definir criterios de inclusión y de exclusión, bases de datos, términos de búsqueda, operadores booleanos, flujograma de la revisión de literatura y filtros para la selección de los artículos o documentos analizados

Se desarrolló una búsqueda de artículos científicos publicados entre el 2010 y el 2022, enfocados en investigaciones sobre el estado de la vainilla en Colombia y el mundo, estudios sobre *Fusarium* como patógeno de distintos cultivos enfocados en vainilla como hospedero, aislamiento *In vitro* de bacterias solubilizadoras de fosfatos -BSF en vainilla, control biológico ejercido por especies bacterianas reportadas como solubilizadoras de fosfato sobre especies de *Fusarium* aislado en variedad de cultivos, particularmente en vainilla, ya sea *In vivo* o *In vitro*. También se buscó literatura enfocada en los mecanismos de biocontrol empleados por las BSF, y en la posible relación entre la actividad solubilizadora de fosfato con la actividad biocontroladora de estos microorganismos sobre hongos del género *Fusarium* en general y las especies que en particular tienen como hospedero a la vainilla.

La búsqueda se desarrolló a través de recursos digitales o bases de datos multidisciplinares licenciados por la Pontificia Universidad Javeriana, como EBSCO,

EbscoHost, Science Direct, Web of Science, ResearchGate y Mendeley. Esta búsqueda se desarrolló en base a palabras claves como:

- “Biocontrol” and “Biological Control”
- “Bacteria” and “Phosphate solubility”
- “*Fusarium*” and “Vanilla”
- “Phosphate solubility” and “Vanilla”
- “Vanilla” and “Biological Control”
- “*Fusarium*” and “Phosphate solubility”

Las palabras clave se relacionan mediante los operadores booleanos “and” y “or” para cumplir con las descripciones de las palabras claves (Matthew et al. 2020; Medrano et al. 2020). Para la organización de los archivos se usó la base de datos Mendeley. Por otro lado, la búsqueda estuvo determinada por los siguientes criterios de inclusión y exclusión.

Criterios de inclusión

- Artículos publicados entre el 2010 y el 2022.
- Artículos que contengan dos o más palabras escogidas en la búsqueda.
- Artículos de revistas indexadas.
- Estudios que hagan referencia a vainilla y el control biológico de patógenos.
- Artículos que brinden información sobre cualquier lugar del mundo.

Criterios de exclusión

- Estudios que hayan sido publicados antes del 2010.
- Artículos que hablen de biocontrol y patógenos, pero no relacionados con el cultivo de la vainilla y sus especies.
- Estudios que en su texto solo mencionen una vez alguna palabra clave.

- Artículos que solo tengan citado textos en español.

Para el reporte de los resultados, se siguió la guía PRISMA (preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses), que establece orientaciones y define los componentes que se deben tener en cuenta para el flujograma de la revisión de artículos. A partir de un proceso de selección en las bases de datos identificadas, se filtraron un total de 46 artículos, los cuales 20 fueron leídos en su totalidad con base a los objetivos de la revisión (Ver Anexo A), para posteriormente diseñar la matriz de revisión literaria que sirvió de base para el desarrollo del artículo.

Para filtrar los 20 artículos que se incluyeron en la matriz se utilizaron los siguientes filtros:

- Fecha, idioma y texto completo
- Palabras clave y título: Se identificó si el título y las palabras clave guardaban relación con los términos de búsqueda.
- Relación del artículo con los objetivos de la investigación: Se observó, posteriormente, si el título y palabras clave guardaban estaban relacionados con los objetivos planteados.
- Duplicidad: Este criterio permitió descartar artículos o investigaciones similares que presentaban los mismos resultados.
- Resumen: En este filtro se realizó una lectura detallada del resumen para revisar la pertinencia del trabajo.
- Conclusiones y discusión. Finalmente, se realizó la lectura de las conclusiones y discusión para determinar si los hallazgos permitían responder a los objetivos planteados.

Estos rigurosos criterios de selección garantizan la calidad y relevancia de la información recopilada y proporcionan una base sólida para el análisis y síntesis de los resultados obtenidos en esta revisión de la literatura.

También con base a esta revisión bibliográfica, se presenta el desarrollo de una matriz de revisión de literatura (Anexo A), la cual incluye el año y país del artículo, el método de control biológico *Fusarium* y las especies controladas. De esta forma, es posible analizar la información para comprender los avances de la investigación en esta temática del biocontrol de *Fusarium* en Vainilla con el uso de BSF.

DESARROLLO DEL TEMA

Contexto histórico de la interacción hospedero - patógeno

En el ámbito de las orquídeas, se han identificado en Colombia aproximadamente 4.270 son nativas y 1.572 son endémicas, 819 especies reportadas en los Parques Nacionales Naturales; en la Región Andina se presentan 2542 y 944 endémicas; en la región Pacífica tienen 533 y 98 endémicas; en la región Orinoquía están reportadas 143 y 15 especies endémicas (Delgado, 2020).

El componente extraído de la vainilla conocida principalmente como vainillina (el 4-hidroxibenzoaldehído), el cual tiene gran importancia en la economía global ya que se usa ampliamente en las industrias de alimentos y perfumes. Paralelamente, también se ha estudiado el género *Fusarium*, especialmente la especie *Fusarium oxysporum* f. sp. *vanillae* (Fov) (Koyyappurath, et al., 2016) y *F. oxysporum* f. sp. *radicis-vanillae* (Forv) (Koyyappurath, et al., 2015), que son una seria amenaza para el cultivo comercial de vainilla, y la presencia de estos hongos fitopatógenos resulta en pérdidas significativas de

hasta del 80% de la producción del cultivo en ciertos países (Flanagan y Mosquera-Espinosa, 2016; Flanagan et al., 2018a; Flanagan et al., 2018b).

La relación histórica entre vainilla y *Fusarium* ha sido objeto de investigaciones exhaustivas a lo largo del tiempo (Ramos-Castellá y Iglesias-Andreu, 2022). Estudios anteriores han destacado la constante batalla entre la supervivencia de la orquídea y la capacidad del patógeno para afectar su desarrollo y producción (Gamboa-Gaitán, 2014). Además, la investigación agrícola ha puesto de manifiesto la importancia de comprender estas interacciones no solo desde una perspectiva económica, sino también para la implementación de estrategias de manejo integrado (Gamboa-Gaitán, 2014; Flanagan y Mosquera-Espinosa, 2016; Flanagan et al., 2018a; Flanagan et al., 2018b; Ramos-Castellá y Iglesias-Andreu, 2022), en un contexto internacional y nacional.

Distintos estudios evidencian una relación entre el hongo fitopatógeno del género *Fusarium* con las diferentes especies de vainilla donde las principales interacciones son con *Fusarium oxysporum* (Pinaría et al., 2010; Santa-Cardona et al., 2012), más específicamente *F. oxysporum* f. sp. *vanillae* (Gangadara-Naik et al., 2010; Adame-García et al., 2011; Summerel et al., 2011; Pinaría et al., 2015) y *F. oxysporum* f.sp. *radicis-vanillae* (Koyyappurath et al., 2015; Koyyappurath et al., 2016). Estos hongos en general se caracterizan por colonizar el xilema del hospedero, bloqueando el flujo de nutrientes de los vasos, lo que genera distintos síntomas como pudrición y marchitamiento, tanto en hojas como en raíz (Adame-García et al., 2011). *F. oxysporum* f. sp. *vanillae* empieza su infección con la aparición de lesiones de color café oscuro en la parte basal de los tallos, al mismo tiempo se desarrollan zonas cloróticas en los entrenudos, necrosis y reducción de tejidos apicales (He, 2007; Santa-Cardona et al., 2012; Jiménez-Quesada et al., 2015). Por otro lado, *F. oxysporum* f. sp. *radicis-vanillae* se caracteriza por iniciar con una coloración

marrón en las paredes del cuello de la raíz de donde toma su nombre, seguido ocurre la muerte de raíces terrestres y de los órganos aéreos afectando hojas y tallos que se debilitan y desintegran (Koyyappurath et al., 2015; Koyyappurath et al., 2016; Ramos et al., 2017), finalmente en ambos casos la planta muere. También se ha reportado presencia de especies como *F. solani* (Pinaría et al., 2010; Summerel et al., 2011; Casillas-Isiordia et al., 2017) y *F. semitectum* (Pinaría et al., 2010).

Los hongos del género *Fusarium* pertenecen al Phylum Ascomycota y se consideran fitopatógenos facultativos de alta resistencia, crecimiento y propagación rápida, siendo uno de los patógenos más cosmopolitas. Los diferentes síntomas que se presentan en las plantas afectan una gran variedad de especie de Vainilla en cultivos comerciales en países como México (Villa-Martínez et al., 2015; Borbolla-Pérez et al., 2017; Casillas-Isiordia et al., 2017; Hernández-Hernández, 2019; Bautista-Aguilar et al., 2023); Indonesia (Pinaría et al., 2010), Australia (Summerel et al., 2011); India (Ashoka, 2005; Bhai y Dhanesh, 2008), China (He, 2007) y Puerto Rico (Ploetz, 2006; Havkin y Belanger, 2010). De acuerdo con la información anterior, se evidencia que las pérdidas económicas son cercanas al 80% de la producción de diferentes especies de esta planta (Santa-Cardona et al., 2012; Pinaría et al., 2010).

En cuanto al contexto nacional colombiano, las primeras investigaciones reportadas referentes a la presencia de *Fusarium* se desarrollaron en cultivos bajo cobertizos de techo-sombra (Santa-Cardona et al., 2012). Posteriormente, surgieron estudios de Vainillas silvestres en sistemas agroforestales a pequeña escala con evidencia de *F. oxysporum* f. sp. *vanillae* y *F. solani* (Mosquera-Espinosa et al., 2022). Igualmente, investigaciones sobre el comportamiento meiótico en Vainilla donde se analizaron células madre del polen de la

planta, se concluye que existen genotipos con mayor resistencia a *Fusarium oxysporum* f. sp *vanillae* dentro de algunos cultivos específicos (Iglesias et al., 2022).

MECANISMOS DE BIOCONTROL

El biocontrol ha sido la manera natural que se ha investigado para la protección de cultivos. “El biocontrol contribuye a la protección del entorno ecológico de la zona urbana y responde a la demanda de la agricultura sostenible de métodos técnicamente efectivos, económicamente viables y compatibles con el ambiente.” (Nalimova, 2007).

El control biológico consiste en utilizar el mecanismo de antagonismo entre especies y sus interacciones tróficas para mantener las poblaciones de microorganismos patógenos en niveles bajos. Entre los organismos más utilizados para esta práctica, se encuentran los hongos y las bacterias de diversos géneros de microorganismos como *Bacillus*, *Trichoderma* y *Pseudomonas* (Serrano-Carreón y Galindo, 2007; Manosalva y Mosquera-Espinosa, 2014; Villamil et al., 2015; Naranjo, 2018); estas bacterias reportadas son biocontroladoras para patógenos del género *Fusarium* en distintos estudios (Ulloa, 2011; Valenzuela, 2014; Bubici, 2018; Velasco-Belalcázar et al., 2019).

Los estudios muestran que en el biocontrol de microorganismos se pueden identificar cinco tipos de mecanismos de acción, que se dividen en:

- Competencia: macroscópicamente, se realiza un cubrimiento de la caja Petri por el microorganismo antagonista, lo que genera que el patógeno a controlar muestre un crecimiento reducido o esté cubierto completamente. Microscópicamente, se genera una mayor esporulación por parte del hongo antagonista, el micelio y las estructuras reproductivas de ambos microorganismos carecen de cambios morfológicos o fisiológicos (Manosalva y Mosquera-Espinosa, 2014).

- Fungistasis: macroscópicamente, se presenta un cubrimiento de la caja Petri por el microorganismo antagonista, lo que genera que el patógeno a controlar muestre un crecimiento reducido o esté cubierto completamente. Microscópicamente, se presenta una reducción o detención total en el crecimiento de las hifas y las estructuras reproductivas, principalmente las esporas por parte del patógeno (Mercado-Flores et al., 2014).
- Antibiosis: Macroscópicamente, se presenta un halo de inhibición, el cual es la base del cálculo del porcentaje de inhibición. Microscópicamente: se puede observar invasión de las conidias del patógeno por parte del biocontrolador, las cuales impiden el desarrollo normal del mismo. De esta forma, se presentan cambios morfológicos y fisiológicos en las estructuras reproductivas y el micelio del hongo (Manosalva y Mosquera-Espinosa, 2014).

En este último caso, el porcentaje de inhibición se calcula con base en el porcentaje de Inhibición del crecimiento radial (PICR). Donde R1 es el radio mayor (radio patógeno-testigo) y R2 es el radio menor (radio del patógeno en cultivo dual) (Álvarez et al., 2012; Astorga-Quirós et al., 2014).

Ecuación 1

Fórmula para calcular el porcentaje de inhibición

$$PICR = \frac{R_1 - R_2}{R_1} * 100$$

- Micoparasitismo: es uno de los mecanismos que se presenta únicamente en hongos, consiste en la utilización de organismos patógenos como alimento, para sustentar al hongo antagonista mediante acciones enzimáticas extracelulares como el

rompimiento de la pared celular (Rubio y Fereres, 2005; Bautista-Baños et al., 2006).

- Resistencia sistémica: este mecanismo es indirecto sobre el microorganismo patógeno y es inducido en las plantas por distintos microorganismos; consiste en estimular la activación de los genes de resistencia del hospedero, que a través de cambios bioquímicos estimulan una respuesta de defensa en la planta frente a uno o más patógenos externos, dividiéndose, dependiendo del tipo de estímulo. Se puede diferenciar en, resistencia sistémica adquirida (SAR) o resistencia sistémica inducida (ISR). En ambos casos actúan distintas reacciones enzimáticas con producción de hormonas, donde se diferencia a la SAR por generar memoria genética de infecciones anteriores y la ISR depende del tipo y cantidad del estímulo externo (Rubio y Fereres, 2005; Pal y Gardener, 2006; Cotes et al. 2017).

Experimentación In vitro

También haciendo parte de la comunidad bacteriana presente en la rizósfera, se encuentran bacterias solubilizadoras o mineralizadoras de fosfato cuya sigla es BSF, ya que existe una relación entre las raíces de las plantas con distintos géneros bacterianos como: *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Kurthia*, *Arthrobacter*, *Flavobacterium*, *Rhizobium* y *Streptomyces*. Estos microorganismos ayudan con el proceso de absorción de fósforo y poseen diferentes utilidades biotecnológicas. Destacando su actuación como inhibidoras del desarrollo de patógenos mediante la producción de metabolitos específicos o antibióticos y principalmente pueden promover el crecimiento de plantas (Álvarez, 2012; Sanclemente et al., 2017; Vargas-Barrantes y Castro-Barquero, 2019).

Las condiciones para el desarrollo de experimentos *In vitro* son cumplidas por distintos tipos de bacterias biocontroladoras de patógenos, entre las cuales se encuentran las

bacterias aisladas de la rizósfera de distintas especies vegetales (Ulloa, 2011; Registeri et al., 2012; Valenzuela, 2014; Castañeda y Sánchez, 2016; Buitrago et al., 2017; Méndez-Úbeda et al., 2017). Entre ellas específicamente en la planta de vainilla (Gangadara-Naik, 2010; Adame-García, 2016; Jiménez-Quesada, 2015; Xiong, 2017) y dentro de las mismas rizosféricas se encuentran las BSF (Shobha y Kumudini, 2012; Ajilogba et al., 2013; Pérez-y-Terrón et al., 2014).

Se conocen múltiples estudios sobre el efecto biocontrolador de las bacterias extraídas de la rizosfera de diferentes plantas frente a los hongos del género *Fusarium*; entre estas con gran éxito las cepas de *Bacillus* spp. y *Pseudomonas* spp. (Akhtar et al., 2008; Ulloa, 2011; Valenzuela, 2014; Castañeda y Sánchez, 2016; Buitrago et al., 2017; Leyva et al., 2017; Méndez-Úbeda et al., 2017; Slama et al., 2019), específicamente sobre *Fusarium oxysporum* por antibiosis (Valenzuela, 2014; Castañeda y Sánchez, 2016; Rodríguez et al., 2017; Buitrago et al., 2017). Otras investigaciones registran la acción de cepas de *Streptomyces* spp. (Rocha y Moura, 2013), *Burkholderia* spp. (Registeri et al., 2012, Meliah et al., 2021) que actúan mediante producción de quitinasas, también aislada de la rizosfera tanto de plantas de tomate como de sorgo dulce. Específicamente sobre vainilla, se han evaluado bacterias extraídas del suelo rizosférico (Gangadara-Naik, 2010; Sandheepy y Jisha, 2012; Adame-García, 2016; Xiong, 2017) y tejidos de la planta (Jiménez-Quesada, 2015) como biocontroladores de especies patogénicas de *Fusarium* en países donde se cultiva comercialmente el tomate y el sorgo dulce, en especial las especies bacterianas como *Bacillus subtilis* y *Pseudomonas fluorescens*, frente a *F. oxysporum* f. sp. *vanillae* (Suseela Bhai et al., 2009; Gangadara-Naik et al., 2010; Jiménez-Quesada, 2015).

Experimentación In vivo

En este enfoque, se realizan estudios directamente en condiciones naturales para observar y evaluar el comportamiento de BSF que interactúan con patógenos en el entorno real de la rizosfera vegetal. Además, pueden reproducir con mayor precisión las condiciones de campo, incluidos los factores ambientales, la microbiota del suelo y otros factores que influyen en las interacciones entre plantas y patógenos.

En estudios como el de Singh et al. (2017), se realizaron experimentos *In vivo* para evaluar el potencial del BSF en el control biológico del marchitamiento por *Fusarium* en vainilla, estos estudios proporcionaron información valiosa sobre el mecanismo de acción y eficacia de BSF en condiciones de cultivos *in situ*.

En otras investigaciones como la de Gouda et al. (2018) y Ayaz et al. (2023), se precisa la importancia de los experimentos *in vivo* al estudiar el papel de las bacterias promotoras del crecimiento de las plantas, incluidas las BSF, en la agricultura sostenible. Además, se realizaron experimentos en condiciones de campo para verificar la aplicabilidad de estas bacterias en un entorno agrícola real.

BIOCONTROL DE FITOPATÓGENOS EN DIFERENTES PLANTAS MEDIANTE BACTERIAS RIZOSFÉRICAS Y SOLUBILIZADORAS DE FOSFATOS - BSF

Las BSF representan un 10% de la microbiota del suelo encargada de los ciclos de disponibilidad de fósforo (P), generando también interacciones con algunas especies de hongos. Este elemento tiene gran importancia a nivel biogeoquímico, debido a que se encargan de distintos procesos de desarrollo y crecimiento de la planta. Pero en la naturaleza la captación de los compuestos derivados del fosfato es muy limitada debido a su insolubilidad y baja disponibilidad, lo que genera dificultades en el momento de su asimilación por parte de la planta, la cual es mediada por distintos microorganismos que lo

liberan como resultado de sus procesos metabólicos. la disponibilidad de P para la planta se mitiga haciendo uso de fertilizantes químicos para así facilitar la nutrición vegetal (Lara et al., 2013; Cisneros et al., 2017).

El uso de BSF de la rizosfera para el control biológico de diversos patógenos vegetales, ha sido objeto de numerosos estudios científicos en una variedad de plantas generándose la posibilidad de implementar estrategias de control biológico integrales y sostenibles. Investigaciones como la de Singh et al. (2017) y Gouda et al.(2018) demostraron que las BSF: 1) Tienen un gran potencial para el control biológico de los fitopatógenos en diversas plantas y en una variedad de situaciones agrícolas incluyendo la vainilla y 2) por su capacidad para disponer el fosforo retenido en forma de fosfatos y promover el crecimiento de las plantas, dichas bacterias se han convertido en un valioso aliado en la lucha contra los diferentes patógenos que atacan a las plantas; aspectos que dan relevancia a su rol en la agricultura sostenible y a su aplicabilidad en diferentes cultivos y condiciones, como se puede evidenciar en la figura 1.

Las BSF pueden ser identificadas *In vitro* utilizando medios selectivos, mediante tinción de Gram complementando con análisis molecular (Álvarez, 2012; Vargas-Barrantes y Castro-Barquero, 2019).

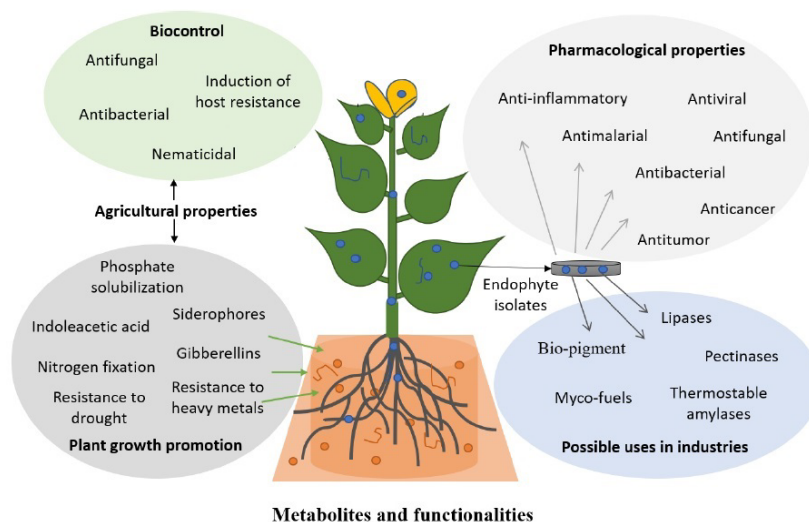


Figura 1

Diferentes aplicaciones y funcionalidades de los metabolitos secundarios de microorganismos rizosféricos y BSF. (Sharma et al. 2021 modificado).

DESAFÍOS IDENTIFICADOS

Mediante el desarrollo de este trabajo se identificaron 1,243 artículos relacionados con bacterias de distintas especies, hongos del género *Fusarium* y/o biocontrol. Se aplicaron filtros basados en el idioma, el año de publicación y la disponibilidad del texto completo, delimitando los resultados al objetivo de la monografía y reduciendo el número a 920 artículos. Posteriormente, se realizó una selección por palabras clave y títulos, obteniendo 304 artículos. De estos, se descartaron 44 por duplicidad y se seleccionaron 35 relacionados con el objetivo de la investigación.

A continuación, se presenta el flujograma de revisión de literatura utilizando base de datos (ver Figura 2).

Flujograma de la revisión de literatura

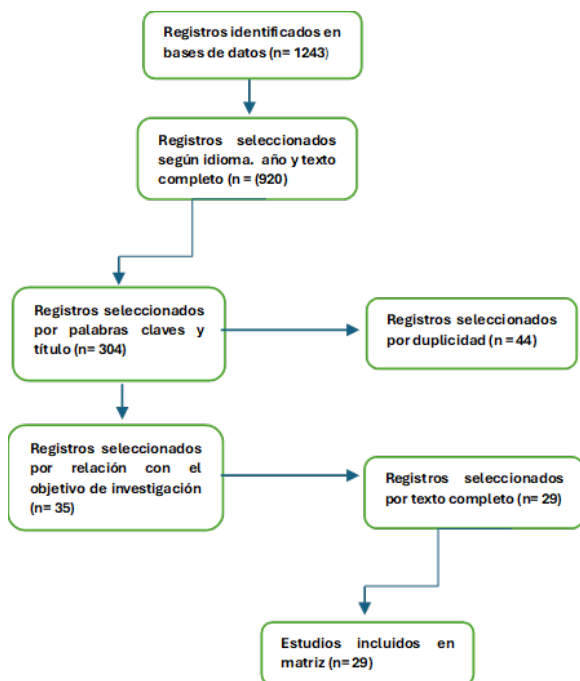


Figura 2. *Flujograma de la revisión de literatura.* La figura describe el paso a paso para la selección de los artículos que hacen parte de la investigación.

De acuerdo con revisión de literatura de estilo monografía, se identificaron desafíos tanto para los académicos como para los agricultores

Investigar sobre la relación entre la diversidad genética y las condiciones ambientales de los hongos del género *Fusarium*, que pueden influir en la eficacia del control biológico, plantea la necesidad de realizar estudios adicionales para optimizar la eficiencia de la BSF, teniendo en cuenta las situaciones específicas de las cepas y sus respectivas adaptaciones; serán puntos importantes para las futuras investigaciones, lo cual ofrece la posibilidad de encontrar perspectivas innovadoras en el uso de técnicas biotecnológicas para mejorar la eficiencia del control biológico.

También se constituye en otro desafío la concientización de la comunidad científica y los agricultores sobre el potencial de las BSF en el control biológico del género *Fusarium* con actividad patogénica en cultivos de vainilla, aspectos que solidifican la posición de BSF como una alternativa valiosa en la protección de cultivos de Vainilla.

En síntesis, los desafíos identificados, artículos analizados y las nuevas oportunidades de investigación abren un camino hacia prácticas agrícolas más sostenibles y resilientes en el cultivo de vainilla en todo el mundo, en particular para Colombia tenemos estudios como Mosquera-Espinosa et al. (2022) que muestran la presencia del género *Fusarium* en plantas de vainilla en pequeños sistemas agroforestales, también abriendo un panorama para continuar con los estudios con BSF extraídas de la misma rizosfera para evaluar su control biológico como Álvarez-López et al. (2014).

CONCLUSIONES

En el proceso de investigación se llegó a las siguientes conclusiones:

Diferentes especies del género Orchidaceae, en especial la vainilla y sus distintas variaciones, tanto ornamentales como de uso agrícola, presentan una alta demanda a nivel mundial para su producción y su propagación. Sin embargo, estas dinámicas se encuentran amenazada por diversos factores, en particular por hongos del género *Fusarium*, ya que, se ha evidenciado que éste patógeno reduce los cultivos en un 70%.

Según la investigación realizada, diversas cepas de bacterias han sido reportadas como biocontroladoras para este patógeno específico. Cabe resaltar que, éstas no han sido reportadas como solubilizadoras de fosfatos y biocontroladoras en los mismos estudios, por ende, la interacción hospedero-patógeno juega un papel fundamental para los estudios de campo, que aportan conceptos básicos en la agricultura y el desarrollo ecológico ambiental.

Por lo tanto, el control biológico surge como una alternativa para disminuir el uso de pesticidas agroquímicos en los cultivos, tanto en diversas especies de vainilla, como plantas de la familia Orchidaceae. Dado que, se ha reportado su efectividad mediante distintos mecanismos, específicamente la antibiosis y la fungistasis que actúan mediante metabolitos secundarios producidos en la misma rizosfera del hospedero. En otras palabras, el control biológico es una alternativa clave en la transición hacia prácticas agrícolas más respetuosas con el medio ambiente.

Cabe acotar que, dentro de la bibliografía científica relacionada al tema, se presentan, como se mencionó anteriormente, en total 8 artículos relacionados a la temática de biocontrol de mediante bacterias reportadas como solubilizadoras, específicamente 5 artículos relacionados a diferentes especies de plantas como son: Jahangir et al. (2016), Islam et al. (2018), Mitra et al. (2020), Khalil et al. (2021) y Asril et al. (2022), de la misma manera, se presentan 3 artículos donde se reporta el control biológico de bacterias rizosfericas que han sido reportadas como BSF en diferentes hongos que tiene a la Vainilla como hospedero: Álvarez-López et al. (2014), Hardiyanti et al. (2022) y Lalanne-Tisné et al. (2023).

De acuerdo con lo anterior, se puede inferir que se requiere más investigación y publicación de literatura científica sobre el uso de BSF en cultivos de vainilla. Se debe señalar, que la mayoría de los reportes corresponden a los cultivos en países que desarrollan producción a nivel comercial, no siendo este el caso de Colombia. Por lo anterior, es posible justificar la importancia de investigar sobre la relación BSF - vainilla- *Fusarium* patogénico en Colombia y el mundo, como alternativas agroecológicas para la Fito nutrición y Fito sanidad a nivel comercial.

BIBLIOGRAFÍA

- Adame-García, J., Luna-Rodríguez, M. e Iglesias-Andreu, G. (2016). Vanilla Rhizobacteria as Antagonists against *Fusarium oxysporum f. sp. vanillae*. *International Journal of Agriculture & Biology*, 18(1), 23-30. Doi: 10.17957/IJAB/15.0053
- Ajilogba, C., Babalola, O., & Ahmad, F. (2013). Antagonistic Effects of Bacillus species in Biocontrol of Tomato *Fusarium Wilt*. *Studies on Ethno-Medicine*, 7(3), 205–216. <https://doi.org/10.1080/09735070.2013.11886462>
- Akhtar, M., Shakeel, U. y Siddiqui, A. (2008). Biocontrol of *Fusarium* wilt by *Bacillus pumilus*, *Pseudomonas alcaligenes*, and *Rhizobium* sp. on lentil. *Turkish Journal of Biology*, 34(1), 1-7. <https://doi.org/10.3906/biy-0809-12>
- Álvarez, C. (2012). *Identificación y caracterización bioquímica, morfológica y molecular de microorganismos cultivables asociados a la rizosfera y al sustrato de plantas de vainilla*. [Tesis de maestría]. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9823>
- Álvarez, P.; Fernández, R. A.; Sanz, A. V.; Miravalles, A. y Diez, J. J. (2012). Antagonismo *in vitro* de hongos endófitos frente a *Fusarium circinatum*, VI Congreso forestal español. Universidad de Valladolid.
- Álvarez-López, C., Osorio-Vega, W., Díez-Gómez, M. C. y Marín-Montoya, M. (2014). Caracterización bioquímica de microorganismos rizosféricos de plantas de vainilla con potencial como biofertilizantes. *Agronomía Mesoamericana*, 225–241. <https://doi.org/10.15517/am.v25i2.15426>

- Ashoka, S. (2005). *Studies on fungal pathogenies of vanilla with special references to Colletotrichum gloeosporioides*. [Tesis de Maestría]. Department of Plant Pathology, University of Agricultural Sciences, Dharwad] An institutional Repository of Indian National Agricultural Research System. <http://krishikosh.egranth.ac.in/handle/1/5810096435>
- Asril, M., Lisafitri, Y., & Siregar, B. A. (2022). Antagonism Activity of Phosphate Solubilizing Bacteria Against *Ganoderma philippii* and *Fusarium oxysporum* of Acacia Plants. *Journal Multidiscip. Appl. Nat. Sci.*, 2(2), pp. 82–89, Apr. DOI: <https://doi.org/10.47352/jmans.2774-3047.118>
- Astorga-Quirós, K., Meneses-Montero, K., Zúñiga Vega, C., Brenes-Madriz, J., & Rivera-Mendez, W. (2014). Evaluación del antagonismo de *Trichoderma sp.* y *Bacillus subtilis* contra tres patógenos del ajo. *Revista Tecnología en Marcha*. 27. 82. 10.18845/tm.v27i2.1929.
- Ayaz, Muhammad, Cai-Hong Li, Qurban Ali, Wei Zhao, Yuan-Kai Chi, Muhammad Shafiq, Farman Ali, Xi-Yue Yu, Qing Yu, Jing-Tian Zhao. et al. (2023). Bacterial and Fungal Biocontrol Agents for Plant Disease Protection: Journey from Lab to Field, Current Status, Challenges, and Global Perspectives. *Molecules* 28, (18) 6735. <https://doi.org/10.3390/molecules28186735>
- Azofeifa-Bolaños, J.B. Paniagua-Vásquez, A. y García-García, J. A. (2014). Importancia y desafíos de la conservación de *Vanilla spp. (orquidaceae)* en Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 25(1), 189-202. Retrieved July 27, 2024, from http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1659-13212014000100019&lng=en&tlng=es.

- Bautista Aguilar, R., Iglesias Andreu, L., Luna-Rodríguez, M., & Sánchez-Coello, N. (2023). Sources of resistance to *Fusarium oxysporum f. sp. vanillae* in *Vanilla spp.* *Research Square. 1* <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3549704/v1>
- Bautista-Baños, S., Hernández-Lauzardo, A. N., Velázquez-Del Valle, M. G., Hernández-López, M., Ait Barka, E., Bosquez-Molina, E., y Wilson, C. L. (2006). Chitosan as a potential natural compound to control pre and postharvest diseases of horticultural commodities. *Crop Protection, 25(2), 108–118*. doi:10.1016/j.cropro.2005.03.010
- Bhai, S., & Dhanesh, J. (2008). Occurrence of fungal diseases in vanilla (*Vanilla planifolia* Andrews). *Kerala Journal of Spices and Aromatic Crops, 17(2), 140-148*. https://www.researchgate.net/publication/309186024_Occurrence_of_fungal_diseases_in_vanilla_Vanilla_planifolia_andrews_in_Kerala.
- Borbolla Pérez, V., Iglesias Andreu, L., Luna-Rodríguez, M., & Octavio-Aguilar, P. (2017). Perceptions regarding the challenges and constraints faced by smallholder farmers of vanilla in Mexico. *Environment, Development and Sustainability, 19*. 10.1007/s10668-016-9863-y.
- Bubici, G. (2018). *Streptomyces* spp. as biocontrol agents against *Fusarium* species. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources, 13(50)*.
- Buitrago, E., Betancurt, A. y Lara, R. (2017). Actividad antagonista de *Bacillus sp.* frente a *Fusarium oxysporum*: un aporte a la agricultura sostenible. *Revista Nova, 3:9-19*.
- Casillas-Isiordia, R., Roberto Flores-de la Rosa, F., Can-Chulim, Á., Luna Esquivel, G., Rodríguez-Guerra, R., Guadalupe Ramírez-Guerrero, L., Luna-Rodríguez, M., & Aguirre Beltrán, G. (2017). *ARN Journal of Agricultural and Biological Science*

- Fusarium sp.* Associated With Vanillasp. Rot In Nayarit, Mexico. 12(2).
www.arpnjournals.com
- Castañeda Álvarez, E. y Sánchez, C. L. (2016). Evaluación del crecimiento de cuatro especies del género *Bacillus sp.*, primer paso para entender su efecto biocontrolador sobre *Fusarium sp.* *NOVA*. 13 (26), 53-65
- Castañeda, E. y Sánchez, L. (2016). Evaluación del crecimiento de cuatro especies del género *Bacillus sp.*, primer paso para entender su efecto biocontrolador sobre *Fusarium sp.* *NOVA*. 14 (26): 53-62.
- Cisneros, C.; Sánchez, M. y Menjivar J. (2017). Identificación de bacterias solubilizadoras de fosfatos en un Andisol de la región cafetera colombiana. *Rev. Colomb. Biotecnol.* 19 (1): 21-28.
- Cotes, A. M., Zapata, Y., Beltrán-acosta, C., Kobayashi, S., Uribe, L., & Elad, Y. (2017). *Control biológico de patógenos foliares Biological control of foliar pathogens.*
- Delgado, D. P. (2020). *Evaluación de germinación y desarrollo de dos especies del género Epidendrum (Orchidaceae), Cundinamarca, Colombia.*
<http://hdl.handle.net/10654/35949>.
- Diez Gómez, M. C. (2015). *Ecofisiología de la vainilla Vanilla planifolia Andrews.* (Tesis doctoral).
- Fernández-Larrea, O. (2001). Microorganismos antagonistas para el control fitosanitario. *Manejo Integrado de Plagas (Costa Rica)*. (62): 96–100.
- Flanagan, N. S., Ospina-calderón, N. H., Teresita, L., Agapito, G., Mendoza, M., & Mateus, H. A. (2018b). A new species of *Vanilla (Orchidaceae)* from the Northwest Amazon in Colombia. *Phytotaxa*. 364(3), 250–258. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.364.3.4>

- Flanagan, N.S., Chavarriaga, P. & Mosquera-Espinosa, A.T. (2018a) Conservation and sustainable use of Vanilla crop wild relatives in Colombia. In: Havkin-Frenkel, D. & Belanger, F.C. (Eds.) *Handbook of vanilla science and technology*. 2nd edition. Wiley-Blackwell, Oxford, UK, pp. 85–110.
<https://doi.org/10.1002/9781119377320.ch6>
- Flanagan, N. S., & Mosquera-Espinosa, A. T. (2016). An integrated strategy for the conservation and sustainable use of native *Vanilla* species in Colombia. *Lankesteriana: International Journal on Orchidology*, 16(2).
<https://doi.org/10.15517/lank.v16i2.26007>.
- Gamboa-Gaitán, M. Á. (2014). Vainillas colombianas y su microbiota. II. Diversidad, cultivo y microorganismos endófitos. *Universitas Scientiarum*, 19(3), 287-300.
<https://doi.org/10.11144/Javeriana.SC19-3.vcmd>
- Gangadara, B.; Saifulla, R., & Basavaraja, M. (2010). Biological control of *Fusarium oxysporum f. sp. vanillae*, the causal agent of stem rot of vanilla in vitro. In: De M.S. Reddy, S. Desai, R.Z. Sayyed, Y.R. Sarma, V.K. Rao, B.C. Reddy, K.R.K. Reddy, A.R. Podile, J.W. *Plant Growth Promotion by Rhizobacteria for Sustainable Agriculture*.
- Gouda, S., Kerry, R.G., Das, G., Paramithiotis S., Shin H.S., & Patra J.K. (2018). Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture. *Microbiol Res*. Jan, 206:131-140. doi: 10.1016/j.micres.2017.08.016. Epub 2017 Oct 17. PMID: 29146250.
- Hardiyanti, S., Sukamto, Noveriza, R., & Mariana, M. (2022). Isolation and screening of rhizobacteria as biocontrol agents against *Fusarium oxysporum f. sp. vanillae*. *IOP*

Conference Series: Earth and Environmental Science, 974(1).

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/974/1/012071>

Havkin-Frenkel, D. & Belanger, F.C. (Eds.) (2010). *Handbook of vanilla science and technology*. 2th edition. Wiley-Blackwell, Oxford, UK, pp. 85–110.

He, X.H. (2007). *Bio-control of root rot disease in vanilla*. (Disertación de PhD).

University of Wolverhampton, Wolverhampton, UK

Hernández-Hernández, J. (2019). Vanilla Diseases. In: Havkin-Frenkel, D. y Belanger, F. (Eds.) *Handbook of Vanilla Science and Technology*, 2nd Edition. Wiley Blackwell. pp. 27-39

Iglesias Andreu, L.G., Almejo-Vázquez, L. I. y Escobedo Gracia-Medrano, R. M. (2022).

Comportamiento meiótico en vainilla (*V. planifolia* Jacks., *orchidaceae*). *Acta*

Biológica Colombiana, 27(3), 464-467. Epub June 16,

<https://doi.org/10.15446/abc.v27n3.90086>

Islam, M.A., Nain, Z., Alam, M.K. et al. (2018). *In vitro* study of biocontrol potential of rhizospheric *Pseudomonas aeruginosa* against *Fusarium oxysporum* f. sp. *cucumerinum*. *Egypt J Biol Pest Control* 28. <https://doi.org/10.1186/s41938-018-0097-1>.

Jahangir, G.Z., Muhamed Aadir Sadiq, Hassan, N., Nasir, I.A., Saleem, M., & Iqbal, M.

(2016). *The effectiveness of phosphate solubilizing bacteria as biocontrol agents*.

26. 1313-1319.

Jiménez-Quesada, K., Schmidt-Durán, A., Quesada-Montero, K. y Moreira-González, I.

(2015). Aislamiento de una bacteria endófito de vainilla (*Vanilla planifolia*) con actividad biocontroladora in vitro contra *Fusarium oxysporum* f. sp. *Vanillae*.

Tecnología en Marcha. 28(2), :116-125.

- Khalil, M.; Fierro-Coronado, R.; Plascencia-Jatomea, R.; Félix-Gastélum, R. y Maldonado-Mendoza, E. (2021) Rhizospheric bacteria as potential biocontrol agents against *Fusarium* wilt and crown and root rot diseases in tomato. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 28(12): 7460-7471.
- Khan, M. R., & Khan, S. (2001). Biomangement of *Fusarium* wilt of tomato by the soil application of certain phosphatesolubilizing microorganisms. *International Journal of Pest Management*. 47(3): 227–231.
- Kitchenham, B.A., Budgen, D., & Pearl Brereton, O. (2011). Using mapping studies as the basis for further research – A participant-observer case study. *Information and Software Technology*, 53(6), pp. 638-651,
<https://doi.org/10.1016/j.infsof.2010.12.011>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950584910002272>.
- Koyyappurath, S., Atuahiva, T., le Guen, R., Batina, H., le Squin, S., Gautheron, N., Edel Hermann, V., Peribe, J., Jahiel, M., Steinberg, C., Liew, E. C. Y., Alabouvette, C., Besse, P., Dron, M., Sache, I., Laval, V., & Grisoni, M. (2016). *Fusarium oxysporum f. sp. radidis-vanillae* is the causal agent of root and stem rot of vanilla. *Plant Pathology*, 65(4), 612–625. <https://doi.org/10.1111/ppa.12445>
- Koyyappurath, S., Conéjéro, G., Dijoux, J. B., Lapeyre-Montès, F., Jade, K., Chiroleu, F., Gatineau, F., Verdeil, J. L., Besse, P., & Grisoni, M. (2015). Differential responses of vanilla accessions to root rot and colonization by *fusarium oxysporum f. sp. radidis-vanillae*. *Frontiers in Plant Science*, 6(DEC). <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01125>
- Lalanne-Tisné, G., Barral, B., Taibi, A., Coulibaly, Z. K., Burguet, P., Rasoarahona, F., Quinton, L., Meile, J. C., Boubakri, H., & Kodja, H. (2023). Exploring the Phytobeneficial and Biocontrol Capacities of Endophytic Bacteria Isolated from

Hybrid Vanilla Pods. *Microorganisms*, 11(7).

<https://doi.org/10.3390/microorganisms11071754>

- Lara, C.; Sanes, S. y Oviedo, L. (2013). Impacto de bacterias nativas solubilizadoras de fosfato en el crecimiento y desarrollo de plantas de rábano (*Raphanus sativus L.*). *Bioteconología Aplicada*. 30:271-275.
- Leyva Rodríguez, L., Cruz-Martín, M., Acosta-Suárez, M., Pichardo, T., Bermúdez-Carballoso, I., & Alvarado-Capó, Y. (2017). Antagonismo *in vitro* de cepas de *Bacillus* spp. frente a *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense. *Bioteconología Vegetal*, 17(4). <https://revista.ibp.co.cu/index.php/BV/article/view/565>
- Manosalva, J.L. y Mosquera-Espinosa, A.T. (2014) Diagnóstico de hongos patógenos en el cultivo de uchuva (*Physalis peruviana L.*) y la evaluación *in vitro* de algunos hongos con actividad biocontroladora. *Fitopatología Colombiana* 38: 1–7.
- Matthew J. Page, Joanne E. McKenzie, Patrick M. Bossuyt, Isabelle Boutron, Tammy C. Hoffmann, Cynthia D. Mulrow, Larissa Shamseer, Jennifer M. Tetzlaff, Elie A. Akl, Sue E. Brennan, Roger Chou, Julie Glanville, Jeremy M. Grimshaw, Asbjørn Hróbjartsson, Manoj M. Lalu, Tianjing Li, Elizabeth W. Loder, Evan Mayo-Wilson, Steve McDonald, Luke A. McGuinness, Lesley A. Stewart, James Thomas, Andrea C. Tricco, Vivian A. Welch, Penny Whiting, David Moher, Juan José Yepes-Nuñez, Gerard Urrútia, Marta Romero-García, Sergio Alonso-Fernández. (2021). Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74(9), pp. 790-799, <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300893221002748>.

- Medrano, L.; Kanter, P. y Trógolo, M. (2020). *Guía para la Búsqueda de Bibliografía Científica*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Córdoba.
- Meliah, S., Sulistiyani, T., Lisdiyant, P., Kanti, S., Sudiana, I., & Kobayashi, M. (2021). Antifungal Activity of Endophytic Bacteria Associated with Sweet Sorghum (*Sorghum bicolor*). *Journal Math. Fund. Sci*, 53: 16–30.
- Méndez-Úbeda, Hernández, M. y Páramo-Aguilera, L. (2017). Aislamiento e identificación de *Bacillus Subtilis* y evaluación del antagonismo in vitro frente hongos fitopatógenos. *Nexo Revista Científica*. 30(02): 96–110.
- Mercado-Flores, Y., Cárdenas-Álvarez, I.O., Rojas-Olvera, A.V., Pérez-Camarillo, J.P., Leyva-Mir, S.G., & Anducho-Reyes, M.A. (2014). Application of *Bacillus subtilis* in the biological control of the phytopathogenic fungus *Sporisorium reilianum*, *Biological Control*, 76, 2014, pp.36-40,
<https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2014.04.011>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1049964414000942>.
- Mitra, D., Anđelković, S., Panneerselvam, P., Senapati, A., Vasić, T., Ganeshamurthy, A. N., ... Radha, T. K. (2020). Phosphate-Solubilizing Microbes and Biocontrol Agent for Plant Nutrition and Protection: Current Perspective. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(5), 645–657. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1729379>
- Mosquera-Espinosa, A. T., Bonilla-Monar, A., Flanagan, N. S., Rivas, Á., Sánchez, F., Chavarriaga, P., Bedoya, A., & Riascos-Ortiz, D. (2022). *In vitro* Evaluation of the Development of *Fusarium* in Vanilla Accessions. *Agronomy*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/agronomy12112831>
- Nalimova, M. (2007). Introducción y eficacia técnica del biocontrol de fitopatógenos con *trichoderma spp.* en Cuba. *Fitosanidad*. 11. 75-79.

- Naranjo, S.E. (2018). Retrospective analysis of a classical biological control programme. *J Appl Ecol.* 55: 2439–2450. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13163>.
- Otsuka Rocha, F. Y., de Oliveira, C. M., Alves da Silva, A. R., Henrique Varial de Melo, L., Goréte Ferreira do Carmo, M., & Baldani, J. I. (2017). Taxonomical and functional characterization of *Bacillus* strains isolated from tomato plants and their biocontrol activity against races 1, 2 and 3 of *Fusarium oxysporum f. sp. Lycopersici*, *Applied Soil Ecology*, 120, pp. 8-19, ISSN 0929-1393, <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.07.025>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0929139317306297>
- Pal, K. K., Scholar, V., & Gardener, B. M. (2006). *Biological Control of Plant Pathogens*. 1–25.
- Pérez-y-Terrón, R., González-Montfort, Th., & Muñoz-Rojas, J. (2014). Antagonismo microbiano asociado a cepas bacterianas provenientes de jitomate (*Lycopersicum esculentum Mill*) y maíz (*Zea Mays*). *Revista Iberoamericana de Ciencias*. 1. 53-60.
- Pinaria, A. G., Laurence, M. H., Burgess, L. W., & Liew, E. C. Y. (2015). Phylogeny and origin of *Fusarium oxysporum f. sp. vanillae* in Indonesia. *Plant Pathology*, 64(6), 1358–1365. <https://doi.org/10.1111/ppa.12365>
- Pinaria, A. G., Liew, E. C. Y., & Burgess, L. W. (2010). *Fusarium* species associated with vanilla stem rot in Indonesia. *Australasian Plant Pathology*, 39(2), 176–183. <https://doi.org/10.1071/AP09079>
- Ploetz, R. C. (2007). *Fusarium* -Induced Diseases of Tropical, Perennial Crops. *Phytopathology*, 96(6): 648–652.

- Ramos, F., Bautista, A. y Sotelo, H. (2017). Relationship between temperature and relative humidity with the outbreak of the fungus *Fusarium oxysporum f. sp. vanillae*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 8(3).
- Ramos-Castellá, A.L. e Iglesias-Andreu, L. G. (2022). Avances y tendencias en mejoramiento genético de vainilla. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 23(2), e2339. Epub April 31, https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num2_art:2339
- Registeri, R., Taghavi, S. M., & Banihashemi, Z. (2012). Effect of Root Colonizing Bacteria on Plant Growth and *Fusarium* Wilt in *Cucumis melo*. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 14: 1121-1131.
- Rubio, S. y Fereres, A. (2005). Capítulo. Control Biológico De Plagas Y Enfermedades De Los Cultivos. (5), 1–16.
- Sanclémente, O. E., Yacumal, V. y Patiño, C. (2017). Solubilización de fosfatos por bacterias nativas aisladas en tres agroecosistemas del Valle del Cauca (Colombia). *Temas Agrarios*, 22(2): 59.
- Sandheep, A., & Jisha, A. (2012) Biocontrol of *fusarium* wilt of vanilla (*vanilla planifolia*) using combined inoculation of *trichoderma sp.* and *pseudomonas sp.* *Int J Pharm Bio Sci*. 3(3):706-716.
- Santa-Cardona, C., Marín, M. y Diez, M. C. (2012). Identificación del agente causal de la pudrición basal del tallo de vainilla en cultivos bajo cobertizos en Colombia. *Revista Mexicana de Micología*. 35: 23-43.
- Serrano-Carreón, L. y Galindo Fentanes, E. (2007). Control biológico de organismos fitopatógenos: un reto multidisciplinario. *Ciencia: Revista de La Academia Mexicana de Ciencias*. <https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/index.php/ediciones-antiores/ediciones-antiores/36-vol-58-num-1-enero-marzo->

2007/comunicaciones-libres34/81-control-biologico-de-organismos-fitopatogenos-un-reto-multidisciplinario

- Shanavas, J. (2013). Colonization study of antagonistic *Pseudomonas sp.* in *Vanilla planifolia* using green fluorescent protein (GFP) as a marker. *African Journal of Microbiology Research*, 7(48), 5417–5423. <https://doi.org/10.5897/ajmr12.916>
- Sharma H, Rai AK, Dahiya D, Chettri R, Nigam PS. (2021). Exploring endophytes for in vitro synthesis of bioactive compounds like metabolites produced in vivo by host plants. *AIMS Microbiol.* May 26;7(2):175-199. doi: 10.3934/microbiol.2021012. PMID: 34250374; PMCID: PMC8255908.
- Shobha, G., & Kumudini, B. S. (2012). Antagonistic effect of the newly PGPR *Bacillus spp.* on *Fusarium oxysporum*. *Int. J. Applied Sci. and Engineering*. 1: 463-474.
- Singh, D., Kour Raina, T., & Singh, J. (2017). Entomopathogenic fungi: An effective biocontrol agent for management of insect populations naturally. *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*. <https://www.researchgate.net/publication/318214256>
- Slama, H., Cherif-Silini, H., Chenari Bouket, A., Qader, M., Silini, A., Yahiaoui, B., Alenezi, F., Luptakova, L., Triki, M., Vallat, A., Oszako, T., Rateb, M., & Belbahri, L (2019). Screening for *Fusarium* Antagonistic Bacteria from Contrasting Niches Designated the Endophyte *Bacillus halotolerans* as Plant Warden Against *Fusarium*. *Microbiol.* 9:3236.
- Summerell, B. A., Leslie, J. F., Liew, E. C. Y., Laurence, M. H., Bullock, S., Petrovic, T., Bentley, A. R., Howard, C. G., Peterson, S. A., Walsh, J. L., & Burgess, L. W. (2011). *Fusarium* species associated with plants in Australia. *Fungal Diversity*. 46, pp. 1–27. <https://doi.org/10.1007/s13225-010-0075-8>.

- Suseela Bhai, R., Remya, B., Jithya, D., & Eapen, S. J. (2009). *In vitro* and *In planta* Assays for Biological Control of *Fusarium* Root Rot Disease of Vanilla. *Journal of Biological Control*, 23(1), 83–86.
<https://doi.org/10.18311/jbc/2009/3621>
- Ulloa, L. (2011). *Efecto biocontrolador de Pseudomonas fluorescens sobre dos especies de hongos fitopatógenos del género Fusarium sp.* (Tesis de pregrado). Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago.
- Valenzuela, K. (2014). Evaluación de la capacidad antagónica de bacterias promotoras de crecimiento vegetal frente a tres aislamientos de *Fusarium oxysporum f. sp. lycopersici (sacc.) w.c. snyder & h.n. Hansen.* (Tesis de especialización). Universidad Católica de Manizales.
- van Lenteren, J.C. (2012). The state of commercial augmentative biological control: plenty of natural enemies, but a frustrating lack of uptake. *BioControl* 57, 1–20.
<https://doi.org/10.1007/s10526-011-9395-1>
- Vargas-Barrantes, P. y Castro-Barquero, L. (2019). Aislamiento y evaluación de microorganismos solubilizadores de fósforo de Andisoles de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 43(1): 47-68.
- Velasco-Belalcázar, M. L.; Hernández-Medina, C. A.; Gómez-López, E. D.; Torres-González, C., y Caro-Hernández, P. A. (2019). Bacterias endófitas de *Capsicum frutescens* antagónicas a *Fusarium spp.* *Agronomía Mesoamericana*, 30(2): 367–380.
- Villa-Martínez, A.; Pérez-Leal, R.; Morales-Morales, H.; Basurto-Sotelo, M.; Soto-Parra, J. y Martínez-Escudero, E. (2015). Situación actual en el control de *Fusarium spp.* y

evaluación de la actividad antifúngica de extractos vegetales. *Acta Agronómica*. 64 (2): 194-205.

Villamil Carvajal, J.E., Viteri Rosero, S.E. y Villegas Orozco, W. L. (2015). Aplicación de antagonistas microbianos para el control biológico de *moniliophthora roreri* Cif & par en *theobroma cacao* L. bajo condiciones de campo. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 68(1), 7441-7450.

<https://doi.org/10.15446/rfnam.v68n1.47830>

Xiong, W., Li, R., Ren, Y., Liu, C., Zhao, Q., Wu, H., & Shen, Q. (2017). Distinct roles for soil fungal and bacterial communities associated with the suppression of *vanilla* *Fusarium* wilt disease. *Soil Biology and Biochemistry*, 107: 198–207.

ANEXOS

Anexo A. Matriz de revisión de literatura

Matriz de revisión de literatura

Año	País	<i>Fusarium</i>	Método de control biológico fusarium	Especie o planta controlada	Resultados	Autores	Link
2023	Madagascar	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>radicis-vanillae</i>	Bacterias endofíticas (<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus siamensis</i> , <i>Bacillus thuringiensis</i>)	Vainilla (<i>Vanilla planifolia</i> , <i>V. tahitensis</i> , <i>V. pompona</i>)	Las cepas de <i>Bacillus</i> mostraron una capacidad significativa para inhibir el crecimiento de <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>radicis-vanillae</i> , con tasas de inhibición de hasta el 40%. Las cepas m62a, m62b, m64, m65 y t24 demostraron ser los antagonistas más efectivos.	Lalanne-Tisné, G.; Barral, B.; Taibi, A.; Coulibaly, Z.K.; Burguet, P.; Rasoarahona, F.; Quinton, L.; Meile, J.-C.; Boubakri, H.; Kodja, H.	https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37512926/
2022	India	<i>Fusarium oxysporum</i>	<i>Pseudomonas stutzeri</i> : una bacteria antagonista aislada de una rizosfera de ginseng	<i>Withania somnifera</i> (<i>Ashwagandha</i>)	El mecanismo de la bacteria puede implicar una enzima lítica en lugar de una sustancia tóxica o antibiótico. Produjo quitinasa y laminarinas extracelular cuando creció en diferentes polímeros como quitina, laminarina o micelio. Estas enzimas extracelulares inhibieron el	Kumar, S., Kumar, D., Dinesh, K., Agarwal, G., Nath, S., Simal-Gandara, J.	Biocontrol potential of <i>Pseudomonas</i> extract against pathogenic <i>Fusarium oxysporum</i> and <i>Rhizoctonia solani</i> (researchgate.net)

Año	País	<i>Fusarium</i>	Método de control biológico fusarium	Especie o planta controlada	Resultados	Autores	Link
					crecimiento del micelio en lugar de la germinación de las esporas y también provocó la lisis del micelio y el germen de <i>Fusarium solani</i> ,		
2022	Indonesia	<i>Fusarium oxysporum f. sp. cucumerinum</i>	Bacterias rizosféricas (<i>Pseudomonas aeruginosa</i>)	Pepino (<i>Cucumis sativus</i>)	La cepa BA5 mostró una actividad antagónica significativa, inhibiendo el crecimiento micelial de <i>Fusarium oxysporum f. sp. cucumerinum</i> en un 58.33%. El filtrado de cultivo libre de células y el extracto crudo de acetato de etilo inhibieron el crecimiento micelial del patógeno en un 56.66% y 25.0%, respectivamente. Además, la cepa BA5 produjo sideróforos, compuestos volátiles y proteasa, lo que contribuyó a su actividad antagonista.	Muhammad Asril, Yuni Lisafitri, Bayo Alhusaeri Siregar	https://doi.org/10.47352/jmans.2774-3047.118

Año	País	<i>Fusarium</i>	Método de control biológico fusarium	Especie o planta controlada	Resultados	Autores	Link
2022	Indonesia	<i>Fusarium oxysporum f. sp. vanillae</i>	Rizobacterias antagonistas (<i>Burkholderia vietnamiensis</i> , <i>B. ambifaria</i> , <i>B. lata</i>)	Vainilla (<i>Vanilla planifolia</i>)	Las rizobacterias L35, PS4, y V112 inhibieron el crecimiento del micelio de Fov en más del 60%, con las mayores inhibiciones observadas en PS4 (72.72%), V112 (68.72%), y L35 (64.92%). Estas rizobacterias mostraron potencial para ser desarrolladas como agentes de control biológico contra Fov.	Hardiyanti, Sukamto, Noveriza & Mariana	https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/974/1/012071
2021	México	<i>Fusarium oxysporum f. sp. lycopersici race 3 (Fol R3)</i>	Bacterias rizosféricas antagonistas (<i>Acinetobacter calcoaceticus AcDB3</i> , <i>Bacillus amyloliquefaciens BaMA26</i> , <i>Bacillus siamensis BsiDA2</i> , <i>Bacillus subtilis BsTA16</i> , <i>Bacillus thuringiensis BtMB9</i>)	Tomate (<i>Solanum lycopersicum L.</i>)	Reducción significativa de la severidad de la enfermedad causada por Fol R3 en condiciones de invernadero. Las cepas BsTA16 y AcDB3 mostraron ser los antagonistas más prometedores. El uso de agentes de biocontrol basados en bacterias rizosféricas nativas puede ser una estrategia efectiva y ambientalmente amigable para manejar enfermedades fúngicas en cultivos de tomate.	Masudur Rahman Khalil, Rosario Alicia Fierro-Coronado, Ofelda Peñuelas-Rubio, Alma Guadalupe Villalderma, Rigoberto Plascencia-Jatomea, Rubén Félix-Gastélum, Ignacio Eduardo Maldonado-Mendoza	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319562X21007312

Año	País	<i>Fusarium</i>	Método de control biológico fusarium	Especie o planta controlada	Resultados	Autores	Link
					La selección y utilización de estas bacterias deben considerarse en función de las condiciones regionales y las características específicas de las plantas y los patógenos involucrados.		
2021	México	<i>Fusarium oxysporum</i> ff. spp. <i>lycopersici</i> race 3	Se utilizaron 1.875 cepas bacterianas rizosféricas. Se utilizaron ensayos de confrontación en placas para seleccionar bacterias que presentaban una inhibición del crecimiento fúngico > 50%.	Tomate	El antagonismo bacteriano y la mejora del crecimiento de las plantas dependen de la cepa bacteriana y de su interacción con híbridos de tomate específicos. Las cepas <i>B. subtilis</i> BsTA16 y <i>Acinetobacter calcoaceticus</i> AcDB3 tienen el mayor potencial como agentes de biocontrol contra Fol R3 y Forl en el tomate.	Rahman et al. (2021)	Redirecting (elsevier.com)

Año	País	<i>Fusarium</i>	Método de control biológico fusarium	Especie o planta controlada	Resultados	Autores	Link
2021	India	<i>Fusarium oxysporu m.f. sp. lycopersici.</i>	Una colección de 46 Bacillus sp., extraídos de la rizosfera del tomate. Se llevó a cabo un ensayo de antagonismo de cultivo dual para evaluar la papel potencial de las cepas contra el patógeno	Tomate	El aislado de <i>Bacillus</i> sp. mostró una reducción del 36% en incidencia de la enfermedad en la planta de tomate. Podría servir como un agente eficiente para el control biológico de la enfermedad.	Jangira, M., Pathaka, R., Sharma, S., y Sharma, S.	Redirecting (elsevier.com)
2021	China	<i>Fusarium oxysporu m.f. sp. cubense tropical race 4 (TR4)</i>	60 actinomicetos del suelo rizosférico de <i>Machilus pingii</i> en la reserva natural ecológica primitiva de la provincia de Hainan, China.	Banana	17 aislamientos y sus extractos exhibieron actividad antifúngica contra <i>F. oxysporum TR4</i> . En particular, se destaca BITDG-11 con la capacidad de inhibición más fuerte, y tiene el potencial para convertirse en una constituyente esencial de la práctica agrícola moderna con biofertilizante y biocontrol	Zhang L., Zhang, H., Huang, Y., Peng J., Xie J., y Wang, W.	Frontiers Isolation and Evaluation of Rhizosphere Actinomycetes with Potential Application for Biocontrolling <i>Fusarium Wilt</i> of Banana Caused by <i>Fusarium oxysporum f. sp. cubense</i> Tropical Race 4 (frontiersin.org)

Año	País	<i>Fusarium</i>	Método de control biológico fusarium	Especie o planta controlada	Resultados	Autores	Link
2021	México	<i>Fusarium oxysporum</i> y <i>Dickeya chrysanthemi</i>	Cepas nativas de <i>Trichoderma asperellum</i> , <i>Trichoderma harzianum</i> y dos aislados de <i>Bacillus spp.</i>	Aloe Vera	<i>T. asperellum</i> obtuvo un porcentaje de inhibición de 70.5 % frente a <i>F. oxysporum</i> ; y un 41.9% Frente a <i>D. chrysanthemi</i> . <i>Trichoderma</i> . Por tanto, <i>T. asperellum</i> representa una alternativa viable para el control de <i>F. oxysporum</i> y <i>D. chrysanthemi</i> .	Rubio, S., Osorio, E., Estrada, J., y Silva, T.	In vitro antagonist biocontrol of <i>Fusarium oxysporum</i> and <i>Dickeya chrysanthemi</i> (scielo.org.mx)
2020	India	<i>Fusarium oxysporum</i> f. <i>lycopersici</i>	Bacterias antagónicas rizosféricas	Tomate	Las bacterias antagónicas rizosféricas ayudan a proteger la planta de varios patógenos, actuando como agentes de biocontrol. Es clave reemplazar los plaguicidas químicos por el uso de biopesticidas, con el fin de promover el desarrollo sostenido de los cultivos.	Karthika, D., Varghese, S. y Jisha, M	(PDF) Exploring the efficacy of antagonistic rhizobacteria as native biocontrol agents against tomato plant diseases (researchgate.net)

Año	País	<i>Fusarium</i>	Método de control biológico fusarium	Especie o planta controlada	Resultados	Autores	Link
2020	Países Bajos	<i>Fusarium oxysporum</i>	Se aplicó el método de control biológico mediado por endófitos, el cual se basa en una actividad directa sobre la cepa patógena a través del parasitismo y la antibiosis.	Tomate	A través del método de control biológico mediado por endófitos es posible mejorar la protección contra los patógenos vasculares que invaden las raíces, mejorando además el control de las enfermedades de marchitez sin afectar las vías de defensa convencionales.	de Lamo, F., y Takken, F.	Frontiers Biocontrol by <i>Fusarium oxysporum</i> Using Endophyte-Mediated Resistance (frontiersin.org)
2020	India	<i>Fusarium oxysporum</i>	Microbios solubilizadores de fosfato (PSM) y bacterias biocontroladoras (<i>Pseudomonas spp.</i> , <i>Bacillus spp.</i> , <i>Streptomyces spp.</i>)	Diversas especies de plantas cultivables	Los PSM han mostrado potencial antagonico contra varios fitopatógenos, mejorando la disponibilidad de fosfato en el suelo y promoviendo el crecimiento y la salud de las plantas.	Debasis Mitra, Snežana Anđelković, P. Panneerselvam, Ansuman Senapati, Tanja Vasić, A. N. Ganeshamurthy, Manisha Chauhan, Navendra Uniyal, Bhaswatimayee Mahakur & T. K. Radha	https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1729379
2019	Egipto	<i>Fusarium oxysporum</i> y <i>Rhizoctonia Solani</i>	Aislados bacterianos de la rizosfera del suelo en muestras recolectadas de diferentes áreas agrícolas en Egipto. S3-C y S1-C fueron	Papa	<i>B.cereus</i> S3C mostró potencial para lisis de la pared celular de muchos hongos fitopatógenos probados como <i>Fusarium oxysporum</i> y <i>Rhizoctonia Solani</i> . La adición de chitinasa S3C de <i>B. cereus</i> fue	Afifi, M., Metry, E., Ismail, E., y Madkour, M.	Agronomy Free Full-Text A Review of Prospective Biocontrol Agents and Sustainable Soil Practices for Bulb Mite (Acari: Acaridae) Management (mdpi.com)

Año	País	<i>Fusarium</i>	Método de control biológico fusarium	Especie o planta controlada	Resultados	Autores	Link
			identificados por pruebas bioquímicas y fisiológicas, además de <i>Bacillus cereus</i> S3C, Gene Banco NCBI accesión MK185696 y <i>Bacillus cereus</i> S1C accesión MK185697.		más eficaz que la de <i>B. cereus</i> S1C en el aumento de la resistencia de las plantas de patata infectadas con varios fitopatógenos transmitidos por los hongos.		
2019	Reino Unido	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>albedinis</i> ,	Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal o endófitos, pues pueden ofrecer una biofertilización interesante en el cultivo, lo que significa que pueden agregar otra capa a la sostenibilidad del enfoque	Date Palm	Los endófitos son activos contra el género <i>Fusarium</i> . Además, exhibieron fuertes actividades contra otros cuatro fitopatógenos principales que se evidenciaban en el ecosistema de oasis objetivo del estudio: <i>B. cinerea</i> , <i>A. alternata</i> , <i>Phytophthora infestans</i> y <i>R. bataticola</i> . Este hallazgo refuerza la utilidad de las cepas de biocontrol aisladas para suprimir patógenos en los sistemas.	Slama et al. (2019)	Frontiers Screening for <i>Fusarium</i> Antagonistic Bacteria From Contrasting Niches Designated the Endophyte <i>Bacillus halotolerans</i> as Plant Warden Against <i>Fusarium</i> (frontiersin.org)

Año	País	<i>Fusarium</i>	Método de control biológico fusarium	Especie o planta controlada	Resultados	Autores	Link
2018	Bangladesh	<i>Fusarium oxysporum f. sp. cucumerinum</i>	Bacterias rizosféricas (<i>Pseudomonas aeruginosa</i>)	Pepino (<i>Cucumis sativus</i>)	La cepa BA5 mostró una actividad antagónica significativa, inhibiendo el crecimiento micelial de <i>Fusarium oxysporum f. sp. cucumerinum</i> en un 58.33%. Además, el filtrado de cultivo libre de células y el extracto crudo de acetato de etilo inhibieron el crecimiento micelial del patógeno en un 56.66% y 25.0%, respectivamente.	Ariful Islam, Zulkar Nain, Khasrul Alam, Nilufa Akhter Banu & Rezuhanul Islam	https://ejbpc.springeropen.com/articles/10.1186/s41938-018-0097-1
2018	Estados Unidos	<i>Fusarium spp</i>	<i>Bacillus simplex</i> 30N-5, <i>B. simplex</i> 11, <i>B. simplex</i> 237 y <i>B. subtilis</i> 30VD-1). Se estudió la producción de celulasa, xilanasa, pectinasa y quitinasa en ensayos funcionales, seguido de análisis de los genes	<i>Zygophyllum dumosum</i> .	Los resultados muestran un modo multivariado de antagonismo de los bacilos contra fitopatógenos <i>Fusarium spp.</i> , mediante la producción de quitinasa y otras moléculas antifúngicas.	Khan et al. (2018)	Frontiers Antifungal Activity of Bacillus Species Against <i>Fusarium</i> and Analysis of the Potential Mechanisms Used in Biocontrol (frontiersin.org)

Año	País	<i>Fusarium</i>	Método de control biológico fusarium	Especie o planta controlada	Resultados	Autores	Link
			relacionados con el biocontrol				
2016	República de Corea	NR	Control biológico mediado por endófitos, los cuales son microorganismos que permanecen dentro de los tejidos vegetales sin causar infecciones o síntomas de enfermedad.	NR	Los endófitos bacterianos son biocontrolados res potenciales porque colonizan un nicho ecológico similar al del patógeno que causa la marchitez vascular. Se pueden emplear varias estrategias para mejorar el biocontrol endófito competente, como investigar los endófitos bacterianos en plantas asintomáticas en áreas infectadas.	Eljounaidi, A., Lee, D., y Bae, A.	Bacterial endophytes as potential biocontrol agents of vascular wilt diseases – Review and future prospects – Science Direct
2016	Pakistán	<i>Fusarium oxysporum</i>	Bacterias solubilizadoras de fosfato (PSB) incluyendo <i>Burkholderia cepacia</i> , <i>Citrobacter freundii</i> , <i>Enterobacter aerogenes</i> , <i>Klebsiella pneumonia</i> , <i>Proteus vulgaris</i> ,	Arveja, caña de azúcar y plantas de mostaza	Las PSB demostraron una actividad antagónica significativa, inhibiendo el crecimiento de <i>Fusarium oxysporum</i> y otros hongos fitopatógenos (<i>Macrophomina phaseolina</i> , <i>Alternaria alternata</i> , <i>Sclerotium rolfsii</i>) mediante la formación de halos de inhibición alrededor de	G. Z. Jahangir, M. Sadiq, N. Hassan, I. A. Nasir, M. Z. Saleem, M. Iqbal	https://www.researchgate.net/publication/310489064_The_effectiveness_of_phosphate_solubilizing_bacteria_as_biocontrol_agents

Año	País	<i>Fusarium</i>	Método de control biológico fusarium	Especie o planta controlada	Resultados	Autores	Link
			<i>Acinetobacter lwoffii</i>		las colonias bacterianas en medios de cultivo.		
2016	Colombia	<i>Fusarium sp.</i>	Aislamientos de cuatro especies de <i>Bacillus s.p.</i> : UCMC-TB1, UCMC-TB2, UCMC-TB3 y UCMC-TB4 s	<i>Ornithogallum umbellatum</i>	Todas las cepas mostraron un importante antagonismo in vitro contra <i>Fusarium sp.</i> El <i>Bacillus subtilis</i> mostró la mayor capacidad antagonica (79,73% PICR), debido principalmente a su velocidad de crecimiento.	Castañeda, A., y Sánchez, L.	https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/nova/article/view/1751
2016	Pakistán	<i>Fusarium oxysporum (F. oxysporum)</i>	Bacterias solubilizadoras de fosfato (OSB) como medio para Defender las raíces de las plantas de hongos patógenos en un modelo amigable con el medio ambiente	Guisante, caña de azúcar y mostaza	Se evidencia un crecimiento completamente restringido del micelio de los hongos fitopatógenos gracias a presencia de las cepas bacterianas seleccionadas. Es preciso, por tanto, avanzar en la exploración de más cepas de PSB con mayor Potencial de solubilización de fosfato, mejorando su eficiencia frente a una gama más amplia de hongos fitopatógenos	Jahangir, M., Sadiq, S., Hassan, L., Nasir, I., y Saleem, M.	thejapds.org.pk/docs/v-26-05/17.pdf

Año	País	<i>Fusarium</i>	Método de control biológico fusarium	Especie o planta controlada	Resultados	Autores	Link
2015	México	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>vanillae</i>	Rizobacterias obtenidas de raíces de vainilla (Sphingobacterium sp., Staphylococcus xylosus, Serratia sp., Psychrobacter sp., Pseudomonas sp., Stenotrophomonas sp.)	Vainilla (<i>Vanilla planifolia</i>)	Las cepas de <i>Staphylococcus xylosus</i> BAC-JAG15, <i>Serratia</i> sp. BAC-JAG4 y <i>Stenotrophomonas</i> sp. BAC-JAG1 mostraron un 90% de antagonismo in vitro contra <i>F. oxysporum</i> en tres medios de cultivo. En condiciones de invernadero, las plantas tratadas con estos aislados mostraron síntomas iniciales de clorosis sin desarrollar los síntomas característicos de la enfermedad causada por <i>F. oxysporum</i> f. sp. <i>vanillae</i> , demostrando la protección proporcionada por las rizobacterias contra la infección de <i>F. oxysporum</i> f. sp. <i>vanillae</i> en plantas de vainilla.	Jacel Adame-García1, Mauricio Luna-Rodríguez and Lourdes Georgina Iglesias-Andreu	https://www.researchgate.net/publication/282414288_Vanilla_Rhizobacterias_Antagonists_against_Fusarium_oxysporum_f_sp_vanillae
2015	Costa Rica	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>Vanillae</i>	Se usaron bacterias endófitas aisladas de muestras de vainilla,	Vainilla, con muestras procedentes de Corcovado, Puriscal, Dota y	La cepa bacteriana BIM11 se establece como un importante elemento para responder al	Jiménez- Quesada, J., Schmidt, A., Quesada, A., y Moreira, A.	(PDF) Aislamiento de una bacteria endófitas de vainilla (<i>Vanilla planifolia</i>) con actividad biocontroladora in vitro contra <i>Fusarium</i>

Año	País	<i>Fusarium</i>	Método de control biológico fusarium	Especie o planta controlada	Resultados	Autores	Link
			mediante pruebas de antagonismo in vitro entre la bacterias aisladas y el hongo <i>F. oxysporum</i> .	Guápiles,	ataque del patógeno, lo cual se evidencio gracias a un importante halo de inhibición del crecimiento del hongo en placa.		<i>oxysporum f. sp. Vanillae</i> (researchgate.net)
2014	Colombia	<i>Fusarium spp.</i>	Bacterias rizosféricas (<i>Serratia sp.</i> , <i>Pseudomonas koreensis</i>) y hongos (<i>Plectosphaerella cucumerina</i> , <i>Penicillium griseofulvum</i> , <i>Aspergillus fumigatus</i>)	Vainilla (<i>Vanilla planifolia</i>)	Los solubilizadores de fosfato inorgánico más efectivos correspondieron bacterias del género <i>Serratia</i> y <i>Pseudomonas koreensis</i> . Entre los microorganismos solubilizadores de fosfato orgánico el más eficiente fue el hongo <i>Plectosphaerella cucumerina</i> . Se concluye que la rizosfera de las plantas de vainilla tiene una comunidad microbial importante para mejorar su productividad y para incidir en el manejo de fitopatógenos.	Claudia Álvarez-López, Walter Osorio-Vega, María Claudia Díez-Gómez, Mauricio Marín-Montoya	hredalyc.org/pdf/437/43731480002.pdf .

Año	País	<i>Fusarium</i>	Método de control biológico fusarium	Especie o planta controlada	Resultados	Autores	Link
2012	India	<i>Fusarium oxysporum</i>	Se aisló una proteobacteria del suelo de la rizosfera, identificada como <i>Pseudomonas fluorescens</i> .	Tomate	Los aislados de <i>Pseudomonas fluorescens</i> . Tienen un efecto antagónico contra los hongos patógenos (<i>Fusarium oxysporum</i>). Las tres especies de <i>Pseudomonas</i> (Pf1a Pf3) mostraron una mejor producción de HCN, dieron positivo en la prueba de cloruro férrico y ayudaron a suprimir el crecimiento del patógeno.	Radha, P., Prema, G., Ramanathan, S., y Shankar, T.	(PDF) K. Radha, P. Prema, G. Ramanathan and T. Shankar, 2012. Biocontrol efficacy of <i>Pseudomonas fluorescens</i> against plant pathogen <i>Fusarium oxysporum</i> . South As. J. Biol.Sci., 2(2): 31 – 38. (researchgate.net)
2012	India	<i>Fusarium oxysporum</i>	Agentes de biocontrol <i>Trichoderma harzianum</i> y <i>Pseudomonas fluorescens</i> aislados del suelo.	Vainilla	La inoculación combinada de <i>Trichoderma harzianum</i> con el tratamiento con <i>Pseudomonas fluorescens</i> mostró la máxima supresión de la infección en la planta. Los resultados indicaron que estos agentes de biocontrol suprimen la enfermedad causada por <i>Fusarium oxysporum</i>	Sandheep, R., y Asok, A.	(PDF) Biocontrol of <i>fusarium</i> wilt of vanilla (<i>vanilla planifolia</i>) Using combined inoculation of <i>trichoderma</i> sp. and <i>Pseudomonas</i> sp (researchgate.net)

Año	País	<i>Fusarium</i>	Método de control biológico fusarium	Especie o planta controlada	Resultados	Autores	Link
2010	India	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>vanillae</i>	<i>Trichoderma harzianum</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> y <i>Bacillus subtilis</i>	Vainilla	La evaluación in vitro <i>Trichoderma harzianum</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> y <i>Bacillus subtilis</i> mostraron una fuerte actividad antagónica contra <i>F. oxysporum</i> f. sp. Es particular, <i>T. harzianum</i> redujo efectivamente el crecimiento radial medio de todos los aislados de <i>F. oxysporum</i> f. sp. <i>vanilla</i> . <i>T. harzianum</i> mostró la inhibición más alta (90,50%)	Gangadara, B., Saifulla, N., y Basavaraja, M.	Biological Control of <i>Fusarium Oxysporum</i> f. sp. <i>Vanillae</i> , The Causal Agent of Stem Rot of Vanilla in Vitro PDF <i>Pseudomonas</i> Biological Pest Control (scribd.com)

Año	País	<i>Fusarium</i>	Método de control biológico fusarium	Especie o planta controlada	Resultados	Autores	Link
2010	Grecia	<i>Fusarium oxysporum f.sp. radicle-lycopersici</i> (FORL), <i>F. Oxysporum f.sp. raphani</i> , <i>Phytophthora cinnamomi</i> , <i>P. nicotianae</i> y <i>Rhizoctonia solani</i>	Endófitos asociados a la rizosfera de plantas de tomate cultivadas en tres medios de crecimiento.	Tomate	35 endófitos de 329 cepas bacterianas mostraron actividad antagónica in vitro contra al menos uno de los hongos patógenos transmitidos por el suelo. Los constituyentes de la pared celular de Levaduras y macrohongos puede haberse convertido en un sustrato que favorece el establecimiento de bacterias antagónicas a las transmitidas por el suelo	Kavroulakis et al.	Antagonistic bacteria of composted agro-industrial residues exhibit antibiosis against soil-borne fungal plant pathogens and protection of tomato plants from <i>Fusarium oxysporum f.sp. radicle-lycopersici</i> SpringerLink

Año	País	<i>Fusarium</i>	Método de control biológico fusarium	Especie o planta controlada	Resultados	Autores	Link
2010	India	<i>Fusarium oxysporum f. sp. vanillae</i>	<i>Trichoderma harzianum</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Bacillus subtilis</i>	Vainilla (<i>Vanilla planifolia</i>)	<i>Trichoderma harzianum</i> mostró la mayor inhibición (90.5%) contra el aislado Fov-3. <i>Pseudomonas fluorescens</i> inhibió hasta un 80% el crecimiento de Fov-5. <i>Bacillus subtilis</i> registró una inhibición del 74.45% contra Fov-6. <i>Trichoderma harzianum</i> fue el más eficiente en la reducción del crecimiento de <i>F. oxysporum f. sp. vanillae</i> .	Gangadara, B.; Saifulla, R., & Basavaraja, M	https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=hC2VDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA408&dq=naik+vanilla+biocontrol&ots=cJoHa2KQsR&sig=84856DMoCWGYtC03hgMzm3YLbls#v=onepage&q=naik%20vanilla%20biocontrol&f=false
2009	India	<i>Fusarium</i>	<i>Trichoderma harzianum</i> , <i>Paecilomyces sp.</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i>	Vainilla	<i>Paecilomyces sp.</i> proporcionó una protección del 100% contra la pudrición de la raíz. <i>T. harzianum</i> y <i>P. fluorescens</i> proporcionaron un 40% de protección. <i>Paecilomyces sp.</i> mostró ser un antagonista potencial contra <i>F. oxysporum f. sp. vanillae</i> .	R. Suseela Bhai, B. Remya, Jithya Danesh and S. J. Eapen	http://www.informaticsjournal.com/index.php/jbc/article/view/3621 https://doi.org/10.18311/jbc/2009/3621