

Agentes de control biológico de la roya del café ¿Cómo funcionan y qué tan efectivos son?

Christian Hernández¹, Luis López^{3*}, Leonardo Sánchez²

¹Centro de Investigación en Sustentabilidad y Biotecnología Ambiental Montecristo (CISBAM), Mesa del barro sn. Jalcomulco, Veracruz, México.

²Centro de Investigación en Micología Aplicada, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México.

³Universidad Politécnica de Huatusco, Huatusco de Chicuellar, Veracruz, México.

mtro.luis.lopez244@uphuatusco.edu.mx

Resumen

La roya del café (*Hemileia vastatrix*) es el patógeno con mayor importancia económica en la producción de café arábigo. Diversos fungicidas químicos contribuyen a su control, sin embargo, plantaciones orgánicas y con prácticas agroecológicas requieren alternativas diferentes a las soluciones convencionales. Una de estas soluciones son los agentes de control biológico. Esta revisión, sintetiza el conocimiento disponible sobre la efectividad y modo de acción de biofungicidas a partir de bacterias, hongos y metabolitos naturales contra la roya del café. Se encontró que los agentes de control biológico poseen los siguientes modos de acción para proteger a los cafetos de *H. vastatrix*: i) inducción de resistencia local o sistémica, ii) competencia por nutrientes y/o espacio en tejidos foliares, iii) hiperparasitismo, iv) actividad antifúngica. Las efectividades de las cuatro categorías de biofungicidas pueden llegar a ser superiores al 80% en cuanto a la inhibición de germinación de esporas de *H. vastatrix* o la reducción de daño foliar. Sin embargo, a pesar de los resultados promisorios, la mayoría de los estudios se han realizado a escala laboratorio o piloto, por lo que se requiere incrementar esfuerzos para la realización de pruebas en campo.

Palabras clave: *Hemileia vastatrix*, biocontrol, biofungicidas, *Coffea arabica*, café orgánico, prácticas agroecológicas.

Abstract

Coffee rust (*Hemileia vastatrix*) is the most economically important pathogen in Arabica coffee production. Several chemical fungicides contribute to its control, however, organic plantations and agroecological practices require different alternatives to conventional solutions. One of these solutions is the use of biological control agents. This review synthesizes the available knowledge on the effectiveness and action mode of biofungicides from bacteria, fungi and natural metabolites against coffee rust. It was found that biological control agents have the following action modes to protect coffee trees from *H. vastatrix*: i) induction of local or systemic resistance, ii) competition for nutrients and/or space in leaf tissues, iii) hyperparasitism, iv) antifungal activity. The effectiveness of the four categories of biofungicides can be higher than 80% in terms of inhibiting *H. vastatrix* spore germination or reducing foliar damage. However, despite the promising results, most of the studies have been carried out at lab or pilot scale, which requires increased efforts to carry out field tests.

Key words: *Hemileia vastatrix*, biocontrol, biofungicides, *Coffea arabica*, organic coffee, agroecological practices.

Introducción

La roya del café es una enfermedad causada por el hongo *Hemileia vastatrix*, considerada la más destructiva y la que ocasiona mayores pérdidas productivas y económicas para los cafeticultores (Carrión & Rico-Gray, 2002; Gómez-De La Cruz et al., 2018). Este hongo es endófito, infecta las hojas por los estomas y posteriormente se desarrolla dentro del tejido de la hoja; su efecto provoca la defoliación de los cafetos y la aparición de círculos anaranjados en las hojas (esporangios del hongo, Figura 1), lo que conlleva a bajas producciones de café e incluso la muerte de las plantas (Hernández-Martínez y Velázquez-Premio, 2016). Se estima que entre 2012 y 2016, la roya del café provocó la disminución de la producción nacional de café en México en hasta 50% (Escamilla, 2016).



Figura 1. Daño foliar ocasionado por la roya de café.

La crisis socioeconómica que ocasionó la roya del café en la última década entre los cafeticultores ha provocado la implementación de distintas estrategias para controlarla, donde destacan el desarrollo de nuevas variedades (e.g. Catimores y Sarchimores), el control con fungicidas químicos, manejo de variables agroecológicas y recientemente el control biológico (Hernández-Martínez & Velázquez-Premio, 2016). Si bien el desarrollo de variedades tolerantes a la roya es un paso importante para el establecimiento de parcelas con alta producción, algunos cafeticultores aun prefieren las variedades susceptibles a la roya por su alta calidad de taza, como la variedad Typica y la Bourbon (Escamilla, 2016), lo que causa la necesidad del control de esta

enfermedad en dichas variedades. Además, el crecimiento de mercados emergentes, como el orgánico, requiere de soluciones de control de plagas diferentes al control químico (Harman, 2000).

El control químico por medio de fungicidas preventivos como el sulfato de cobre, oxiclورو de cobre o el hidróxido de sodio, o sistémicos como los derivados de azoles han mostrado ser efectivos para el control de la roya. Sin embargo, su uso excesivo puede ocasionar efectos adversos, como toxicidad al suelo o a la vegetación por acumulación de cobre (Leep et al., 1984; Loland & Singh, 2004), afección a especies no objetivo o desarrollo de resistencia por parte del patógeno (Daivasikamani & Rajanaika, 2009).

Esta situación ha llevado a la investigación y desarrollo de productos con base biotecnológica, los cuales son inocuos para el ser humano y no presentan efectos ambientales severos (Retinassababady & Jeyalakshmi, 2014). Su modo de acción involucra el uso de microorganismos, como los son bacterias y hongos, o metabolitos como enzimas y extractos vegetales que inhiben, suprimen o depredan al hongo causante de la roya del café (Herrera-Estrella & Chet, 2004).

Sin embargo, el uso de biofungicidas para el control de la roya del café en campo no se encuentra muy popularizado, dado el desconocimiento de sus diferentes modos de uso y efectividades. Además, el éxito del uso de biofungicidas está condicionado a *buenas prácticas* de aplicación y diseño del agente biofungicida, ya que además del efecto supresor, el biofungicida debe diseñarse de forma que pueda ser almacenado y transportado de manera viable, además de poseer la capacidad de sobrevivir en el ambiente donde se aplica (Herrera-Estrella & Chet, 2004).

Por lo tanto, el objetivo de la presente revisión es sintetizar el conocimiento adquirido a la fecha, sobre el modo de acción y efectividad de los biofungicidas probados contra la roya del café.

Biofungicidas basados en bacterias

Existen diversos grupos bacterianos que forman asociaciones benéficas con plantas, estas asociaciones pueden

coadyuvar a la fijación de nitrógeno, solubilización de nutrientes como el fósforo y a la protección contra patógenos (Babalola, 2010). Existen tres mecanismos generales por medio de los cuales las bacterias benéficas pueden brindar protección a las plantas contra patógenos, el primero es por medio de competencia por espacio o nutrientes, ya que muchas bacterias viven tanto dentro (endofíticas) como sobre (epifíticas) los tejidos de las plantas, y su presencia evita que los patógenos puedan germinar y/o desarrollarse. El segundo es por medio de la producción de metabolitos antimicrobianos, como enzimas hidrolíticas que pueden atacar las paredes celulares de hongos competidores. Y el tercero es induciendo resistencia sistémica a la planta (Figura 2; Herrera-Estrella & Chet, 2004; Ongena & Jacques, 2008).

Las bacterias que han sido seleccionadas para la formulación de biofungicidas con acción contra *H. vastatrix* pueden poseer alguno o todos los mencionados mecanismos de acción (Tabla 1); en general, las bacterias de los géneros *Bacillus* son las que presentan los mejores resultados para disminuir el daño por roya del café. Estas bacterias, producen enzimas

hidrolíticas que degradan los polisacáridos (e.g. quitina) que componen las paredes celulares de los hongos (Shiomi et al., 2006) y sintetizan lipopeptidos (e.g. iturina A, surfactinas) que son antagonistas contra virus, micoplasmas, otras bacterias, levaduras, hongos y nemátodos (Zerrouh et al., 2011). Además, potencializan el sistema inmune de la planta, aumentando con esto su resistencia a la colonización de sus tejidos por *H. vastatrix* (Daivasikamani & Rajanaika, 2009). Un ejemplo de este mecanismo es la inducción de la Resistencia Sistémica Inducida (ISR por sus siglas en inglés) ocasionada por las fengicinas y surfactinas producidas por diversas cepas de *Bacillus* (Nagórska et al., 2007; Ongena and Jacques, 2008; Kim et al., 2017).

Aunado a lo anterior, se ha determinado que diversos géneros bacterianos que son endófitos de las plantas de café son capaces de penetrar en diferentes tejidos de la planta y diseminarse sistemáticamente, colonizando de forma activa el apoplasto, conductos vasales y ocasionalmente los espacios intracelulares (Hallmann et al., 1997). La supresión de la enfermedad se da por antibiosis y

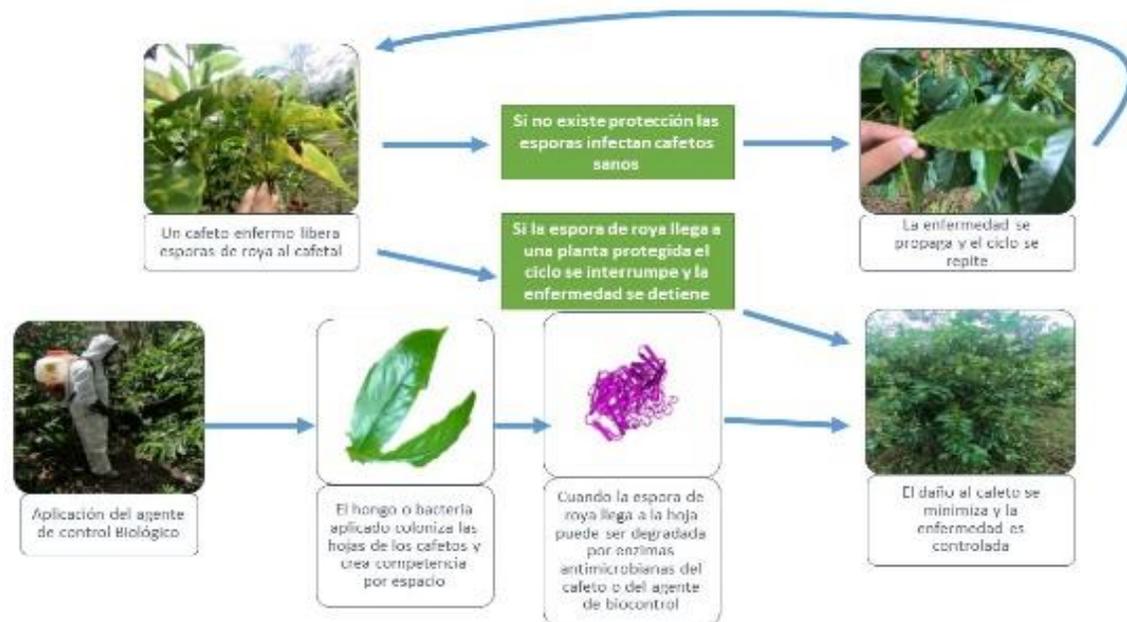


Figura 2. Proceso de protección de un agente de control biológico contra la roya del café. En el ciclo de arriba no existe aplicación de un agente de control biológico, la enfermedad ocasionada por *H. vastatrix* se propaga entre cafétos sanos. En el ciclo de abajo los cafétos están protegidos por un agente de control biológico, cuando esporas de *H. vastatrix* entran en contacto con hojas protegidas no las logran infectar y la enfermedad se interrumpe.

Artículos

Tabla 1. Principales bacterias usadas con efecto fungicida como control biológico en roya del café

Especie	Concentración de inóculo utilizado en pruebas (UFC)	Efectividad		Mecanismo de Biocontrol	Referencia
		Reducción de lesiones en hojas de Cafeto (%)	Reducción en germinación de esporas de <i>H. vastatrix</i> (%)		
<i>Bacillus thuringiensis</i>	SD	76-90	SD	Induce resistencia sistémica en los cafetos y la producción de enzimas hidrolíticas (β -1,3- glucanasa y quitinasa) en los tejidos de las hojas.	Roveratti <i>et al.</i> , 1989; Guzzo y Martins, 1996
<i>Bacillus lentimorbus</i>	1 x 10 ⁸	SD	50	Producción de enzimas hidrolíticas (β -1,3- glucanasa y quitinasa) y metabolitos fungicidas.	Shiomi <i>et al.</i> , 2006
<i>Bacillus cereus</i>	1 x 10 ⁸	SD	50		Shiomi <i>et al.</i> , 2006
<i>Bacillus subtilis</i>	1 - 4.3 x 10 ⁸	87	100	Actividad antagonista, Induce resistencia sistémica en los cafetos, producción de metabolitos fungicidas	Bettiol y Varzea, 1992; Daivasikamani y Rajanaika, 2009
<i>Pseudomonas fluorescens</i>		36	64		Tran <i>et al.</i> , 2007; Daivasikamani y Rajanaika, 2009
<i>Bacillus megaterium</i>	1 x 10 ⁸	SD	28 a 13	Inducción de resistencia sistémica, colonización de sitios de infección.	Silva <i>et al.</i> , 2012
<i>Salmonella enterica</i>		74 *	SD		
<i>Pectobacterium carotovorum</i>		55 *	SD		
<i>Brevibacillus choshinensis</i>		SD	28 a 9		
<i>Microbacterium testaceum</i>		SD	28 a 10		
<i>Cedecea davisae</i>		43 *	SD		

SD Sin datos; * En Número de pústulas; UFC=Unidades Formadoras de Colonias

competencia por los nutrientes, además de que se induce una respuesta de resistencia por parte de la planta (M'Piga et al., 1997). Algunas de estas bacterias son *Bacillus lentimorbus*, *Bacillus cereus*, *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis*, *Klebsiella pneumoniae*, *Pandorae pnomenusa*, *Kocuria kristinae*, *Cedecea sp* y *Acinetobacter calcoaceticus* (Shiomi et al., 2006).

La efectividad de los biofungicidas basados en bacterias, va del 50% al 90% (en control de la germinación de esporas patógenas y lesiones en tejido foliar) mientras sean aplicados previamente a la exposición a esporas de *H. vastatrix* (12-72 horas antes), si su aplicación es posterior, su efecto disminuye considerablemente (Tabla 1).

Para que se presenten los efectos benéficos, las bacterias necesitan colonizar el tejido de las hojas de los cafetos, lo que provoca un aumento en el sistema inmune de la planta, genera un ambiente competitivo por espacio y restricción de nutrientes (Silva et al., 2012). Todo esto inhibe posteriormente la germinación y desarrollo de esporas de *H. vastatrix*. Además, si la bacteria tiene la capacidad de producción de enzimas hidrolíticas o metabolitos fungicidas, erradicará las esporas de *H. vastatrix* que intenten colonizar los tejidos del cafeto (Silva et al., 2012).

La concentración del inóculo del biofungicida también es un factor importante para promover el buen desarrollo de las bacterias benéficas y proteger a los cafetos de

la infección por *H. vastatrix* (Haddad et al., 2009). En el caso de biofungicidas basados en bacterias, se han reportado como efectivos inóculos con una concentración de bacterias en el rango de $1-4 \times 10^8$ UFC (Tabla 1).

Las aplicaciones en campo son realizadas por medio de aspersiones foliares. De esta manera, el inóculo bacteriano entra en contacto con toda la superficie de la hoja. Es recomendable considerar las condiciones climatológicas antes de aplicar el inóculo bacteriano, evitando las horas de elevada radiación solar (debido a que puede ser nocivo para las bacterias; Muela et al., 2000) y eventos de lluvia intensa que pudiesen lavar el inóculo de las hojas antes de que las bacterias puedan colonizar los tejidos vegetales (Fajardo-Franco et al., 2020).

Kim y colaboradores (2002) reportaron que la bacteria *Bacillus lentimorbus* produce compuestos antifúngicos α y β glucósidas, los cuales tienen actividad inhibitoria contra *Botrytis cinérea*, además de que produce compuestos volátiles que inhiben el desarrollo de *Fusarium sambucinum* (Sadfi et al., 2001). Otros autores han demostrado que *Bacillus cerius* promueve el desarrollo de diferentes especies vegetales además de brindar protección contra *Fusarium sambucinum*, ya que produce diversas quitinasas que impiden el desarrollo de los hongos (Shiomi et al., 2006).

Biofungicidas basados en hongos

Los hongos tienen modos de acción similares a las bacterias, induciendo resistencia sistémica a las plantas y coadyuvando al vigor general de la planta (Herrera-Estrella & Chet, 2004). Pero también pueden actuar como micoparásitos o hiperparásitos, proceso mediante el cual, el micelio del agente de control biológico penetra diferentes estructuras del hongo patógeno y degrada parcialmente sus células, mediante la acción de enzimas líticas como quitinasas, glucanasas y proteasas (Herrera-Estrella & Chet, 2004; Viterbo et al., 2002).

El género de hongos más estudiado como agente de biocontrol es *Trichoderma*, el cual puede utilizarse tanto de manera foliar (e.g. para el control de la roya del café), así como para suprimir patógenos de la rizósfera. Esto se debe a que este género fúngico produce gran cantidad de metabolitos que pueden ser utilizados como agentes de biocontrol, como lo son trichodermamidas, viridinas, antraquinonas, pironas, estatinas, derivados de ergosterol, harziolactonas, por mencionar algunos (Reino et al., 2007). Sin embargo, al menos ocho géneros más han mostrado antagonismo contra *H. vastatrix*. Las efectividades de los hongos mostradas en la Tabla 2 son superiores al 80%, disminuyendo la afección por *H. vastatrix* en tejidos foliares de cafetos, así como en la producción de urediniosporas. No obstante, a pesar de los promisorios resultados reportados en estudios en laboratorio, pocos estudios han probado la efectividad de hongos como agentes de control de la roya de café en campo, y los que lo han hecho han encontrado resultados contradictorios (Jackson et al., 2012).

Lo anterior debido a que estos hongos son más sensibles que las bacterias para sobrevivir en ambientes adversos (Haddad et al., 2014) y presentan altas inhibiciones o muerte cuando son expuestos a radiaciones de luz UV-B (Galvão y Bettiol, 2014). Esto dificulta su aplicación en plantaciones con baja sombra, o sin ella.

Sin embargo, los hongos poseen características interesantes que les confieren importancia como agentes de biocontrol por medio de interacciones ecológicas. Por ejemplo, existe evidencia de que esporas de *Lecanicillium lecanii*, un hiperparásito de *H. vastatrix*, pueden permanecer latentes por periodos de un año en suelo, y ser transportadas hasta las hojas de los cafetos por hospederos como *Coccus viridis* (escama verde de café) y la hormiga *Azteca instabilis* (Jackson et al., 2012). Este tipo de interacciones se han reportado en agroecosistemas cafetaleros complejos, lo que asegura la sobrevivencia y el establecimiento de relaciones ecosistémicas entre diversas especies, que permiten el control natural de *H. vastatrix* (Vandermeer et al., 2009).

Artículos

Tabla 2. Principales Hongos usados con efecto fungicida como control biológico en roya del café.

Especie	Concentración de inóculo utilizado en pruebas (#esporas)	Efectividad		Mecanismo de Biocontrol	Referencia
		Reducción de lesiones en hojas de Cafeto (%)	Reducción en hojas de urediosporas de <i>H. vastatrix</i>		
<i>Lecanicillium</i> spp.	5 x 10 ⁶	SD	68% después de 120 h de inoculación	Hiperparasitismo	Galvão y Bettiol, 2014; Gómez-De la Cruz <i>et al.</i> , 2018.
<i>Simplicillium</i> spp.	5 x 10 ⁶	SD	89% hiperparasitadas después de 24 h de inoculación		
<i>Calcarisporium</i> sp.	5 x 10 ⁶	SD	51% hiperparasitadas después de 120 h de inoculación		
<i>Trichoderma</i> spp.	SD	SD	SD	Hiperparasitismo, producción de enzimas líticas (quitinasas y glucanasas), inducción de resistencia sistémica, aumenta el vigor de la planta.	Viterbo <i>et al.</i> , 2002; Harman, 2000.
<i>Fusarium</i> spp.		83-89	95-99% después de 40 días.	No especificado	Haddad <i>et al.</i> , 2014.
<i>Penicillium</i> spp.		80-92	90-98% después de 40 días.		
<i>Acremonium</i> sp.	1 x 10 ⁶	84	91% después de 40 días.		
<i>Cladosporium</i> sp.		89	96% después de 40 días.		
<i>Aspergillus</i> sp.		97	E liminación después de 40 días		

SD Sin dato

Biofungicidas basados en metabolitos naturales

A diferencia de los biofungicidas que utilizan como agente de control células bacterianas o fúngicas vivas, los biofungicidas basados en metabolitos naturales únicamente utilizan productos o componentes de dichas células, los cuales también pueden ser sintetizados artificialmente para su producción y aplicación. Además, la obtención de estos biofungicidas no se restringe a fuentes bacterianas o fúngicas, ellos pueden obtenerse de plantas, algas y animales (Moon *et al.*, 1992; Guzzo *et al.*, 1993; Silva *et al.*, 2014), ya que el agente de control es un componente que no pierde su actividad biológica al ser extraído de su organismo productor. Esto facilita su almacenaje, transporte y aplicación, pero no genera el establecimiento de interacciones benéficas entre agente de control biológico y planta de café, que pudiesen ofrecer protección contra *H. vastatrix* durante mayor tiempo (Vandermeer *et al.*, 2009).

Actualmente, se han realizados estudios en los cuales se ha evaluado la efectividad de biofungicidas elaborados con *Azadirachta indica* (neem), *Melaleuca alternifolia* (árbol de té) y la combinación de *Bacillus subtilis* con *Azadirachta indica* y *Syzygium aromaticum* (clavo) en el control de la roya causada por *H. vastatrix* en dos variedades de cafeto, observando que, aunque no se logró erradicar la roya del cafeto, si hubo una disminución en el progreso de la enfermedad y la tasa de infección aparente (Fajardo-Franco *et al.*, 2020).

Los biofungicidas basado en metabolitos naturales probados contra *H. vastatrix* poseen dos modos generales de acción: la inducción de resistencia local o sistémica y la actividad antifúngica (Guzzo *et al.*, 1993; Silva-Castro *et al.*, 2018). El primero se refiere a la exposición de las plantas de café a ciertas moléculas que generan la activación de su sistema inmune, este efecto puede lograrse mediante la exposición a

polisacáridos de membrana y/o proteínas del agente patógeno, o de otras bacterias y hongos. Cuando el patógeno real ataca a la planta de café, ésta ya se ha protegido y la infección será menor, de manera similar a como actúa una vacuna en los seres humanos. Por ejemplo, se ha identificado que la enzima polifenoloxidasas está relacionada con mecanismos de defensa por parte de la planta, permitiéndole a las plantas de café desarrollar resistencia ante los ataques de *Hemileia vastatrix*, ya que se presenta un incremento en el potencial oxidativo en los tejidos vegetales que impide el desarrollo del hongo (Melo et al., 2006).

Por otro lado, los metabolitos con acción fungicida (e.g. terpenos, guaiacol) atacan físicamente al organismo patógeno, destruyendo alguno de sus componentes y con esto, disminuyen su capacidad de colonización o lo eliminan (Pereira et al., 2012). Los metabolitos fungicidas probados contra *H. vastatrix* se han obtenido de diversas fuentes, la mayoría vegetales (Tabla 3).

Sin embargo, existen muchos metabolitos naturales con actividad antifúngica que aún no han sido probados contra este hongo.

Además, los estudios que evalúan la efectividad fungicida de este tipo de productos se restringen en su mayoría a escala de laboratorio, aunque con efectividades muy promisorias en el control de la germinación de urediniosporas de *H. vastatrix* (Tabla 3).

Uno de los compuestos que se han probado en campo es el hidróxido de cobre, el cual tiene actividad antifúngica y funciona como un método novedoso en el control biológico de la roya del café (Arroyo-Esquivel et al., 2019).

Además, se ha identificado que la enzima polifenoloxidasas está relacionada con mecanismos de defensa por parte de la planta, permitiéndole a las plantas de café desarrollar resistencia ante los ataques de *Hemileia vastatrix*, ya que se presenta un incremento en el potencial oxidativo en los tejidos vegetales que impide el desarrollo del hongo (Melo et al., 2006).

Tabla 3. Metabolitos naturales con actividad fungicida contra la roya del café

Metabolito	Efectividad		Mecanismo de Biocontrol	Referencia
	Disminución en lesiones foliares (%)	Inhibición de la germinación de esporas de <i>H. vastatrix</i>		
• Expolisacáridos de <i>Xanthomonas campestris</i> , e.g. β -mananos	80	SD	Inducción de resistencia sistémica, provocando una disminución de lesiones foliares cuando se aplica 72 h antes de la inoculación con <i>H. vastatrix</i> .	Guzzo et al., 1993
• Goma xantana	90	SD		
• Oligómeros de quitosano	75-100	99%	Actividad antifúngica, mediante de inhibición de la germinación de esporas de <i>H. vastatrix</i> , así como reducción de daño foliar en cafetos si es aplicado 24 h antes de la exposición.	Silva-Castro et al., 2018
• Extractos etanólicos de propóleo	SD	54%	Actividad antifúngica, mediante de inhibición de la germinación de esporas de <i>H. vastatrix</i>	Silva-Castro et al., 2018
• Extracto de <i>Allium sativum</i> .	SD	100%	Inhibición de la germinación de urediniosporas	Silva et al., 2014
• Extracto de <i>Vernonia polysphaera</i> .	SD	92%		
• Extracto o aceite esencial de <i>Cymbopogon nardus</i>	SD	98-100%	Inhibición de la germinación de urediniosporas, agentes antimicrobianos monoterpénicos, con dosis = 1000 $\mu\text{L L}^{-1}$	Pereira et al., 2012; Silva et al., 2014
• Extracto o aceite esencial de <i>Cymbopogon citratus</i>	SD	97-100%		
• Aceite esencial de <i>Cinnamomum verum</i>	SD	100 %		
• Aceite esencial de <i>Thymus</i> sp.	SD	100 %		
• Aceite esencial de <i>Melaleuca alternifolia</i>	SD	100 %	Inhibición de la germinación de urediniosporas, agentes antimicrobianos del grupo de los terpenos y guaiacol, con dosis = 1000 $\mu\text{L L}^{-1}$	Pereira et al., 2012
• Ácidos carboxílicos (étil-formato, propiónico, octadecenoico, metil-acetato) de <i>Pichia membranifaciens</i>	SD	~10-50% menos severidad vs control	Desaceleración del proceso de infección en plantaciones de café.	Andrade et al., 2018

Conclusiones

Existe una amplia gama de microorganismos y metabolitos que presentan actividad antifúngica contra *H. vastatrix*, o que promueven resistencia sistémica a las plantas de café. La efectividad probada en laboratorio para el control o eliminación de este patógeno va del 50 al 100%; sin embargo, pocos son los estudios que han llevado a estos agentes de control biológico a pruebas en campo, aunque con buenos resultados.

Se requiere incrementar esfuerzos para generar evidencia científica del desempeño de estos agentes biológicos en plantaciones comerciales, para el control de *H. vastatrix*, mediante el diseño e implementación de prácticas agroecológicas de manejo, que fomenten la generación de interacciones ecológicas benéficas y que contribuyan a la protección de los cafetos en el mediano y largo plazo, por ejemplo, estudios de correlación y modelado de factores como lluvia, humedad, sombra, temperatura y viento con la presencia de la roya del café.

Finalmente, en términos económicos, estas estrategias de control de patógenos, además de poder resolver el bajo rendimiento en una producción en cafetal, también permitiría a los productores acceder a mercados orgánicos, altamente demandados en Europa y Estados Unidos, repercutiendo en las utilidades del productor.

Referencias

- Andrade RL, Rosales VG, García MG, Fernández SP, Álvarez GO, Narváez JM (2018) Effectiveness of carboxylic acids from *Pichia membranifaciens* against coffee rust. *Ciência e Agrotecnologia* 42(1):42-50.
- Arroyo-Esquivel J, Sanchez F, & Barboza LA (2019). Infection model for analyzing biological control of coffee rust using bacterial anti-fungal compounds. *Mathematical Biosciences*. doi:10.1016/j.mbs.2018.10.009
- Babaloba OO (2010) Beneficial bacteria of agricultural importance. *Biotechnology Letters* 32: 1559-1570.
- Bettiol W, Varzea VMP (1992) Controle biológico da ferrugem (*Hemileia vastatrix*) do cafeiro com *Bacillus subtilis* em condições controladas. *Fitopatol. Bras.* 17(1): 91-95.
- Daivasikamani S and Rajanaika (2009) Biological control of coffee leaf rust pathogen, *Hemileia vastatrix* Berkeley and Broome using *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas fluorescens*. *Journal of Biopesticides*. 2(1): 94-98.
- Escamilla E (2016) Las variedades de café en México ante el desafío de la roya del café. *Breves de Políticas Públicas* 4. Disponible en línea: http://pmcarbono.org/pmc/descargas/proyectos/redd/Breves_de_Políticas_Públicas_No.4-Variedades_de_cafe_en_Mexico.pdf
- Fajardo-Franco ML, Aguilar-Tlatelpa M (2020) Biofungicides evaluation in two coffee cultivars for *Hemileia vastatrix* control. *Evaluación de biofungicidas en dos variedades de café para el control de Hemileia vastatrix*. *Revista Mexicana de Fitopatología* 38(2): DOI: <http://dx.doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2001-1>
- Galvão JAH, Bettiol W (2014) Effects of UV-B radiation on *Lecanicillium* spp., biological control agents of the coffee leaf rust pathogen. *Tropical Plant Pathology* 39(5): 392-400.
- Gómez-De La Cruz I, Pérez-Portilla E, Escamilla-Prado E (2018) Selection *in vitro* of mycoparasites with potential for biological control on Coffee Leaf Rust (*Hemileia vastatrix*). *Revista Mexicana de Fitopatología* 36(1): 172-183.
- Guzzo SD, Bach EE, Martins EMF, Moraes WBC (1993) Crude exopolysaccharides (EPS) from *Xanthomonas campestris* pv. *manihotis*, *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* and commercial xanthan gum as inducers of protection in coffee plants against *Hemileia vastatrix*. *J. Phytopathology* 139: 119-128.
- Guzzo SD, Martins EMF (1996) Local and systemic induction of β -1,3-glucanase and chitinase in coffee leaves protected against *Hemileia vastatrix* by *Bacillus thuringiensis*. *J. Phytopathology* 144: 449-454.

- Haddad F, Maffia LA, Mizubuti ESG, Teixeira H (2009) Biological control of coffee rust by antagonistic bacteria under field conditions in Brazil. *Biological Control* 49:114-119. <http://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2009.02.004>
- Haddad F, Saraiva RM, Mizubuti ESG, Romeiro RS, Maffia LA (2014) Isolation and selection of *Hemileia vastatrix* antagonist. *Eur J Plant Pathol* 139: 763-772.
- Harman GE (2000) Myths and dogmas of biocontrol, changes in perceptions derived from research on *Trichoderma harzianum* T-22. *Plant Disease* 84(4): 373-393.
- Hernández-Martínez G, Velázquez-Premio T (2016) Análisis integral sobre la roya del café y su control. *RINDERESU* 1(1): 92-99.
- Herrera-Estrella A, Chet I (2004) The biological control agent *Trichoderma*—from fundamentals to applications. En: Arora DK, editor. *Fungal biotechnology in agricultural, food and environmental applications*. New York: Marcel Dekker pp. 147–156.
- Jackson D, Skillman J, Vandermeer J (2012) Indirect biological control of the coffee leaf rust, *Hemileia vastatrix*, by the entomogenous fungus *Lecanicillium lecanii* in a complex coffee agroecosystem. *Biological Control* 61: 89-97.
- Kim KJA, Yang YJ, Kim J (2002) Production of alpha-glucosidase inhibitor by beta-glucosidase inhibitor producing *Bacillus lentimorbus* B-6. *Journal of Microbiology and Biotechnology*. v.12, p.895-900.
- Lepp NW, Dickinson NM, Ormand KL (1984) Distribution of fungicide-derived copper in soils, litter and vegetation of different aged stands of coffee (*Coffea arabica* L.) in Kenya. *Plant and Soil* 77(2-3): 263-270.
- Melo G, Massao M, Mazzafera P (2006) and its role in resistance against the coffee leaf miner and coffee leaf rust. *Phytochemistry*. 67 (3) 277-285,
- Moon SS, Chen JL, Moore RE, Patterson GML (1992) Calphycin, a fungicidal cyclic decapeptide from the terrestrial blue-green alga *Calothrix fusca*. *J. Org. Chem.* 57(4): 1097-1103.
- Muela A, García-Bringas JM, Arana I, Barcina I (2000) The effect of simulated solar radiation on *Escherichia coli*: The relative roles of UV-B, UV-A, and photosynthetically active radiation. *Microbial Ecology* 39, 65-71.
- Nagórska K, Bikowski M, Obuchowski M (2007). Multicellular behaviour and production of a wide variety of toxic substances support usage of *Bacillus subtilis* as a powerful biocontrol agent. *Acta Biochem. Pol.*54, 495–508.
- Loland JO, Singh BR (2004) Cooper contamination of soil and vegetation in coffee orchards after long-term use of Cu fungicides. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 69(3): 203-211.
- Ongena M, Jacques P (2008). *Bacillus* lipopeptides: versatile weapons for plant disease biocontrol. *Trends Microbiol.*16, 115–125. doi: 10.1016/j.tim.2007.12.009.
- Pereira RB, Lucas GC, Perina FJ, Alves E (2012) Essential oils for rust control on coffee plants. *Ciênc. agrotec. Lavras* 36(1): 16-24.
- Reino JL, Guerrero RF, Hernández-Galán R. et al. (2018) Secondary metabolites from species of the biocontrol agent *Trichoderma*. *Phytochem Rev* 7, 89–123 <https://doi.org/10.1007/s11101-006-9032-2>.
- Rettinassababady C, Jeyalakshmi C (2014) Bio-fungicides: the best alternative for sustainable food security and ecosystem. En: Kharwar R., Upadhyay R., Dubey N., Raghuvanshi R. (eds) *Microbial Diversity and Biotechnology in Food Security*. Springer, New Delhi.
- Sadfi N, Cherif M, Fliss I, Boudabbous A, Antoun H (2001) Evaluation of bacterial isolates from salty soils and *Bacillus thuringiensis* strains for the biocontrol of *Fusarium* dry rot of potato tubers. *Journal of Plant Pathology*. 83, p.101-118.
- Shiomi HF, Alves Silva HS, Soares de Melo I, Nunes FV, Bettiol W (2006) Bioprospecting endophytic bacteria for biological control of coffee leaf rust. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)* 63(1): 32-39.

Artículos

- Silva JL, Souza PE, Monteiro FP, Freitas MLO, Silva Júnior MB, Belan LL (2014) Antifungal activity using medicinal plant extracts against pathogens of coffee tree. *Rev. Bras. Plantas med.* 16(3): 539-544.
- Silva-Castro I, Barreto RW, Rodríguez MCH, Matei PM, Martín-Gil J (2018) Control of coffee leaf rust by chitosan oligomers and propolis. *Agriculture for life, life for agriculture, Conference Proceedings* 1(1): 311-315.
- Silva HSA, Tozzi JPL, Terrasan CRF, Bettiol W (2012) Endophytic microorganisms from coffee tissues as plant growth promoters and biocontrol agents of coffee leaf rust. *Biological Control* 63: 62-67.
- Tran H, Ficke A, Asiimwe T, Hofte M, Raijmakers J (2007) Role of the Cyclic Lipopeptide Massetolidea in Biological Control of *Phytophthora infestans* and in Colonization of Tomato Plants by *Pseudomonas fluorescens*. *New Phytologist*. 175(4):731-42
- Vandermeer , Perfecto I, Liere H (2009) Evidence of hyperparasitism of coffee rust (*Hemileia vastatrix*) by the entomogenous fungus, *Lecanicillium lecanii*, through a complex ecological web. *Plant Pathology* 58: 636-641.
- Viterbo A, Rmou O, Chernin L, Chet I (2002) Significance of lytic enzymes from *Trichoderma* pp. in the biocontrol of fungal plant pathogens. *Antonie Van Leeuwenhoek* 81: 549-556.