

Evaluación en campo de *Serratia marcescens* IBC-CR18 como agente de biocontrol de la roya del café

Benjamín Moreno-Castillo, Abdías Espada-Sánchez, Miguel Salvador-Figueroa, María de Lourdes Adriano-Anaya*

Instituto de Biociencias, Universidad Autónoma de Chiapas. Tapachula, Chiapas, México.

Resumen

El objetivo de este trabajo fue evaluar en campo el efecto de la aspersión de la cepa *Serratia marcescens* IBC-CR18 como potencial agente de biocontrol de la roya del café (*Hemileia vastratrix*) en plantas de café árabe variedad “Marago” de siete meses de edad. Se evaluó el cultivo crudo (10^9 UFC mL⁻¹ más metabolitos) obtenido en caldo nutritivo por 72 h bajo fermentación estática a 26 °C (± 2 °C) y el cultivo crudo sometido a congelación por 48 h previamente a la aspersión en campo, con la finalidad de inactivar las células bacterianas. Se incluyó un tratamiento químico convencional (oxicloruro de cobre al 85% como ingrediente activo, a dosis de 5 g L⁻¹ de agua), un biofungicida comercial a base de *Bacillus subtilis* (Serenade® Opti, 5 g L⁻¹) y un Control (agua). El análisis de medidas repetidas del índice de infección mostró diferencias altamente significativas entre tratamientos ($F_{4,437}=4.47$; $P=0.0015$), las cuales se presentaron al final del ensayo. Después de la aspersión de los tratamientos sobre las plantas de café, el biofungicida comercial fue el que presentó el menor valor de área bajo la curva del progreso de la enfermedad (abcpe) con respecto a los demás tratamientos y al Control ($F_{4,115}=3.00$; $P=0.02$) y causó retraso en la epidemia por 20.3 días en comparación con el testigo. Los tratamientos a base del cultivo crudo de la bacteria y cultivo crudo congelado retrasaron el progreso de la enfermedad por 12.2 y 15.3 días, respectivamente, con respecto al Testigo.

Palabras clave:

Cultivo crudo
Epidemia
Escala
Marago
Severidad

Keywords:

Crude culture
Epidemic
Scale
Marago
Severity

Field evaluation of *Serratia marcescens* IBC-CR18 as biocontrol agent of the Coffee leaf rust

Abstract

The aim of this work was to assess in the field the effect of *Serratia marcescens* strain IBC-CR18 as potential biocontrol agent of the coffee leaf rust (*Hemileia vastratrix*), sprayed onto seven months-old Arabica coffee plants cv. “Marago”. We evaluated the crude culture of the strain (10^9 UFC mL⁻¹ and metabolites) grown on nutrient broth during 72 h under static fermentation at 26 °C (± 2 °C) and the crude culture subjected to freeze-thaw 48 h before field spraying, with the objective to inactivate the bacterial cells. A conventional chemical treatment (85% copper oxychloride as active ingredient, at a dose of 5 g L⁻¹ of water), a commercial biofungicide based on *Bacillus subtilis* (Serenade® Opti, 5 g L⁻¹) and a Control (water) were included. The repeated measures analysis of the infection indices revealed statistical differences between treatments ($F_{4,437}=4.47$; $P=0.0015$), which were noticeable at the end of the field trial. After spraying of the treatments on coffee plants, the commercial biofungicide accumulated the lowest amount of disease (area under disease progress curve) in comparison to the rest of the treatments and control ($F_{4,115}=3.00$; $P=0.02$), and caused a delay of the epidemics for 20.3 days as compared to Control. On the other hand, bacterial crude culture and freeze-thaw crude culture, delayed the disease progression for 12.2 y 15.3 days, respectively, in comparison to Control.

* Autor para correspondencia:

Instituto de Biociencias,
Universidad Autónoma de
Chiapas.
Boulevard Príncipe Akishino
sin número, Colonia
Solidaridad 2000, CP.
30798.
Tapachula, Chiapas, México.
Teléfono: + 52 9626427972.
Correo-electrónico:
maria.adriano@unach.mx

1. Introducción

A nivel mundial, México se ubica dentro de los primeros diez países productores de café (Canet Brenes et al., 2016). Durante el año 2021, se produjeron 947 000 ton de café cereza en una superficie de alrededor de 710 000 ha, donde Chiapas contribuyó con el 36% de la producción total (SIAP, 2021). En México, la mayoría de la producción de café se obtiene de las variedades arábicas (*Coffea arabica* L.), las cuales ofrecen alta calidad de taza pero que en campo son altamente susceptibles al hongo *Hemileia vastatrix*, agente causal de la roya del café (Hernández et al., 2021). Este hongo es considerado el patógeno más destructivo y de mayor importancia económica para el sector cafetalero a nivel mundial, el cual puede provocar pérdidas en rendimiento superiores al 35% y tener impacto epidemiológico poliético en los años posteriores a su aparición en las plantaciones (Talhinhas et al., 2017).

La roya del café fue detectada por primera vez en México en 1981, específicamente en el Soconusco, Chiapas (Barrera-Gaytán y Gómez-Ruiz, 2019), pero durante los subsecuentes 30 años no se observaron niveles de infección económicamente importantes en los cafetales sembrados con las variedades susceptibles de café arábigo que se cultivaban tradicionalmente por esos años (árabe, bourbon, marago, catuaí). Sin embargo, durante el 2012 se presentaron niveles atípicos de la enfermedad en los cafetales de las regiones Soconusco y Sierra de Chiapas que oscilaron alrededor del 74% de incidencia y 30% de severidad, lo que causó una defoliación promedio de 36% en los cafetos (Barrera et al., 2013; Libert-Amico y Paz-Pellat, 2018) y pérdidas del 20% en rendimiento que fueron incrementándose en los años posteriores. Los especialistas han coincidido que los cambiantes patrones climáticos generados por el calentamiento global han impactado la dinámica de las epidemias de roya del café (Barrera et al., 2013; Canet Brenes et al., 2016; Henderson, 2019; Libert-Amico y Paz-Pellat, 2018). Aunque las variedades arábicas de café “Typica” y “Bourbon” son las preferidas por los productores, éstas se han sustituido por la especie tolerante “Robusta” (*C. canephora* Pierre ex Froehner) o por variedades e híbridos de *C. arabica* resistentes a la roya (Libert-Amico y Paz-Pellat, 2018, Hernández et al., 2021). Sin embargo, se han encontrado muchas variantes de *H. vastatrix* que han llegado a superar esta resistencia (Talhinhas et al., 2017).

El desarrollo de la enfermedad inicia cuando las urediniosporas germinan, lo cual ocurre entre las 12 y 24 h posteriores a su llegada a las hojas y requiere de una película de agua sobre la superficie foliar. Al cabo de 48 h se generan los apresorios sobre los estomas e ingresa el micelio al interior de la hoja. Los síntomas aparecen 14 días después de la germinación y la esporulación ocurre entre los 2 o 4 días posteriores a la aparición de los síntomas. Las temperaturas de 22 a 26 °C favorecen los procesos del hongo (Barrera-Gaytán et al., 2014; Toniutti et al., 2017). La roya causa daños en las las hojas, las ramas y en casos de alta severidad también en los frutos del café, además de provocar la

defoliación total o parcial de los cafetos. Inicialmente la enfermedad se manifiesta como puntos cloróticos que con el tiempo se vuelven manchas necróticas, sobre las cuales se forman esporulaciones polvosas de tonalidad amarillo-naranja y que finalmente conducen a la muerte del tejido infectado (Barrera-Gaytán et al., 2014; Toniutti et al., 2017). El manejo de la enfermedad se realiza principalmente mediante la aplicación de fungicidas sintéticos como el oxiclورو de cobre (de contacto) y triazoles (curativos, sistémicos) que previenen y eliminan el establecimiento del inóculo del patógeno sobre la superficie de las hojas y tallos (Talhinhas et al., 2017). Sin embargo, el oxiclورو de cobre es el preferido por tratarse de un fungicida relativamente barato, aunque su efectividad es limitada y se requieren aplicaciones continuas para lograr resultados favorables de control. Desafortunadamente, el uso continuo de este fungicida puede llegar a causar problemas de contaminación ambiental (Hernández et al., 2021). Esta situación ha propiciado la búsqueda de estrategias alternativas de biocontrol mediante el uso de microorganismos, los cuales son de bajo riesgo para el ser humano y de bajo impacto ambiental (Pandit et al., 2022; Rettinassababady y Jeyalakshmi, 2014).

Los microorganismos ejercen varios modos de acción contra los hongos fitopatógenos: inducción de resistencia vegetal, competencia por espacio y nutrientes, hiperparasitismo y antibiosis (mediante la producción de enzimas micolíticas y metabolitos secundarios) (Köhl et al., 2019). Uno de los microorganismos ampliamente estudiados como agentes de biocontrol de fitopatógenos ha sido la bacteria *Serratia marcescens* (Enterobacteriaceae), la cual se caracteriza por tener un variado metabolismo secundario que la hace ser un potencial candidato agente de biocontrol de *H. vastatrix* (Soenens e Imperial, 2020). Por esta razón, el objetivo del presente estudio fue evaluar en campo los metabolitos extracelulares y las células bacterianas de *S. marcescens* cepa IBC-CR18, como agente de biocontrol de la roya del café en una plantación comercial del Soconusco, Chiapas, México.

2. Materiales y métodos

2.1. Microorganismo

La bacteria *Serratia marcescens* IBC-CR18 (antes FCA-CR18, en lo sucesivo referida como IBC-CR18) fue proporcionada por el cepario del Instituto de Biociencias de la Universidad Autónoma de Chiapas. La bacteria fue aislada de rizósfera de plantas de café variedad Bourbon en la localidad Plan Esperanza de la zona media-alta del municipio de Tapachula, Chiapas, México (Camposeco, 2017).

2.2. Preparación del inóculo de *S. marcescens* IBC-CR18

Después de la reactivación de la cepa en agar nutritivo, la bacteria fue cultivada en caldo nutritivo (pH 7) por 72 h bajo fermentación estática a temperatura ambiente (26±2 °C).

2.3. Tratamientos

Se evaluaron dos tratamientos de *S. marcescens*: 1) cultivo crudo (metabolitos y 10^9 UFC mL⁻¹) y 2) cultivo crudo sometido a congelación (-8 °C por 48 h), para inactivar las células bacterianas y evaluar en campo únicamente el efecto de los metabolitos extracelulares. Los tratamientos se realizaron durante el año 2021 en una plantación comercial de café árabe variedad Marago, ubicada en el Cantón el Triunfo municipio de Tapachula, Chiapas, México, en el rancho los Olivos (14°58'34.6", N 92°13'24.8", 440 msnm). El promedio de precipitación oscila alrededor de los 2000 mm y presenta un clima cálido-húmedo con abundantes lluvias en verano (INEGI, 2017). Las plantas experimentales fueron de siete meses de edad. Durante el experimento no se registraron aplicaciones de herbicidas, insecticidas o fungicidas, con excepción de los tratamientos evaluados en el presente ensayo, el cual se llevó a cabo del 20 de junio al 22 de octubre del 2021. Aparte de los dos tratamientos a base del inóculo bacteriano IBC-CR18, se incluyeron como tratamientos el oxiclورو de cobre con un contenido de 85% de ingrediente activo (dosis 5 g L⁻¹ de agua), un biofungicida comercial a base de *Bacillus subtilis* cepa QST713 con 1.3×10^{10} UFC g⁻¹ de producto formulado (Serenade® Opti, Bayer CropScience, dosis 5 g L⁻¹ de agua) y agua como control (testigo). Para la aplicación se utilizaron aspersores manuales de 1 L de capacidad (Klintek modelo ATO-100), calibrados a un gasto de 200 L ha⁻¹. Se aplicaron soluciones correspondientes a cada tratamiento de manera uniforme sobre el haz y envés de las hojas. Los tratamientos se establecieron bajo un diseño completamente al azar de cinco tratamientos y tres repeticiones, cada repetición consistió de ocho plantas experimentales. Las aspersiones de los tratamientos se realizaron cada 14 días y los muestreos de la enfermedad cada 30 días.

2.4. Índice de infección de las plantas

El índice de infección fue determinado mediante una escala de daño, establecida de acuerdo al porcentaje de la hoja con síntomas visibles de la roya: grado 0= sin síntomas de roya, grado 1= con puntos cloróticos, grado 2: 2-6% con síntomas, grado 3= 7-19% con síntomas, grado 4= 20-44% con síntomas, grado 5= 45-70% de la hoja con síntomas de roya, y grado 6= > 70% de la hoja con roya (Camposeco, 2017). Se analizaron todas las hojas de las plantas y en base a esta escala se calculó el índice de infección (II) para cada planta de acuerdo a la fórmula, $II (\%) = (\sum an/6N) \times 100$ (Carlier et al., 2002); donde: a es cada uno de los grados de la escala (0-6), n corresponde al número de hojas presentes en cada grado y N es el número total de hojas muestreadas. Con esta información, se calculó por cada planta el parámetro área bajo la curva del progreso de la enfermedad (abcpe), utilizando la fórmula $abcpe = \sum [(II_1 + II_2)/2] [t_2 - t_1]$ (Achicanoy, 2000; Mohapatra et al., 2008); donde: II₁ y II₂ son los índices de infección acumulados en los tiempos t₁ y t₂, respectivamente, siendo t₁ y t₂ los días transcurridos entre dos muestreos consecutivos.

La tasa de infección aparente (r) de cada tratamiento se calculó mediante la fórmula de Van der Plank (1964); $r = [1/(t_2-t_1)] [\ln(X_2/1-X_2) - \ln(X_1/1-X_1)]$; donde: t₁ y t₂ representan los días transcurridos (fecha inicial y fecha final del ensayo), X₁ y X₂ son la proporción acumulada de la enfermedad en t₁ y t₂. Con esta información, se calculó el factor Δt entre cada tratamiento y control (Whitney, 1976) usando la fórmula $\Delta t = (1/r) \ln(x_0/x_{os})$; donde: Δt es el retraso en el progreso de la enfermedad (en días) causado por el tratamiento (x_{os}) en comparación con el control (x₀), r es la tasa aparente de infección de x_{os} calculado con la fórmula de Van der Plank (1964).

2.5. Análisis de datos

El análisis de los índices de Infección (II) sobre el tiempo se realizó mediante un análisis de varianza de medidas repetidas ($\alpha=0.05$) y la separación de medias de los tratamientos en cada fecha de muestreo mediante los intervalos de confianza al 95%. Para el abcpe se realizó un análisis de varianza de un factor y la separación de medias mediante la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$). Previamente los valores de abcpe se transformaron mediante la raíz cuadrada para cumplir los supuestos de normalidad y homocedasticidad. Los análisis estadísticos se realizaron en el paquete estadístico R (R Core Team, 2021; ver 4.1.1., <https://www.R-project.org>) con apoyo de R Commander (versión 2.7-1). El valor del factor Δt se presenta como una medida descriptiva general del retraso en el progreso de la enfermedad causado por cada tratamiento.

3. Resultados y Discusión

El análisis de medidas repetidas reveló diferencias altamente significativas entre tratamientos al término de la evaluación en campo ($F_{4,437}=4.47$; $P=0.0015$). Inicialmente los tratamientos mostraron índices de infección desiguales, los cuales se homogenizaron hacia el segundo y tercer muestreo, para finalmente mostrar diferencias significativas en el cuarto muestreo entre las plantas tratadas y las del Control (Figura 1).

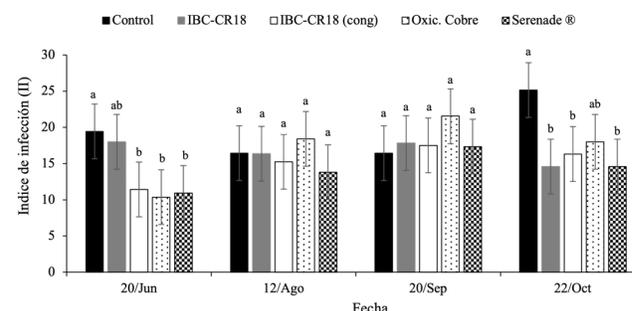


Figura 1. Evolución de los índices de infección (II) durante la evaluación en campo de IBC-CR-18 como agente de biocontrol de la roya del café. Las barras de error son los intervalos de confianza superior e inferior al 95%. Dentro de cada fecha de muestreo, barras con la misma letra son estadísticamente iguales ($P>0.05$).

Por otro lado, el análisis de varianza mostró diferencias estadísticas significativas entre tratamientos en cuanto al área bajo la curva del progreso de la enfermedad (abcpe) ($F_{4,115}=3.01$; $p=0.02$) siendo el biofungicida a base de

Bacillus subtilis (Serenade® Opti) el que presentó el menor valor de abcpe, aunque fue similar a los tratamientos a base de la cepa IBC-CR18 y oxiclورو de cobre (Figura 2).

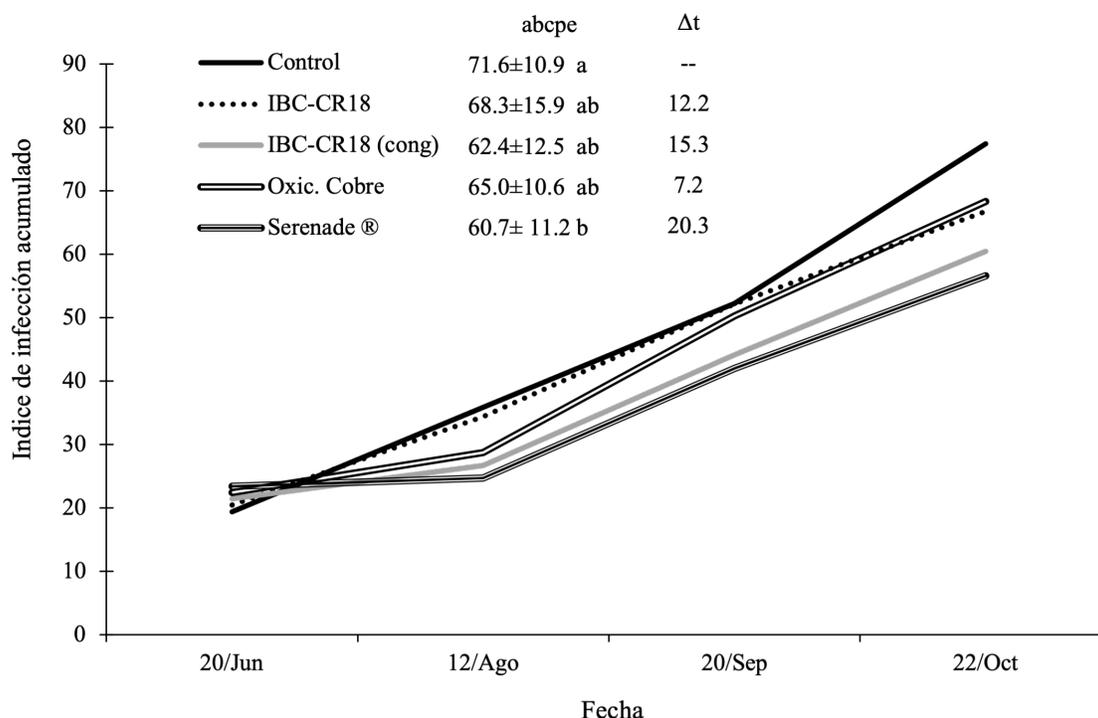


Figura 2. Índices de infección acumulados durante la evaluación en campo de IBC-CR18. Se muestran los valores promedio de área bajo la curva (abcpe) ± desviación estándar por tratamiento y el valor de Δt (días) por tratamiento en comparación con el control. Valores con la misma letra son significativamente iguales ($P>0.05$).

En cuanto al retraso en el progreso de la enfermedad, los tratamientos a base del cultivo crudo y cultivo crudo congelado de la cepa IBC-CR18 mostraron un factor Δt de 12.2 y 15.3 días, mientras que el oxiclورو de cobre y el biofungicida comercial retrasaron la enfermedad por 7.2 y 20.3 días en comparación con el control, respectivamente (Figura 2).

S. marcescens es ampliamente reconocida por tener una destacada actividad antifúngica ante una variedad de fitopatógenos, lo cual es atribuible a su variado metabolismo secundario extracelular que incluye antibióticos (prodigiosina, carbapenémicos, altiomicina), una maquinaria quitinolítica altamente eficiente para degradar la quitina estructural de las paredes celulares fúngicas (enzimas micolíticas), compuestos antifúngicos (oocidina A), compuestos volátiles antifúngicos (sodorifeno) y biosurfactantes (serrawettins), principalmente (Soenens e Imperial, 2020).

De manera general, los trabajos de investigación en campo sobre la evaluación de agentes de biocontrol de *H. vastatrix* son relativamente pocos (Hernández et al., 2021). A pesar de que es un hongo parásito obligado que no puede cultivarse en el laboratorio, se han reportado algunos trabajos que

muestran porcentajes de inhibición *in vitro* en la germinación de las urediniosporas de *H. vastatrix* entre el 50-100%, ocasionados por *Bacillus* spp. y *Pseudomonas fluorescens* (Bettiol y Varzea, 1992; Daivasikamani y Rajanaika, 2009; Shiomi et al., 2006). Algunas cepas de hongos también han sido reportadas como micoparásitos potenciales agentes de biocontrol de *H. vastatrix*, principalmente *Lecanicillium* spp., *Simplicillium* spp., *Calcarisporium* sp., *Trichoderma* spp., *Fusarium* spp., *Penicillium* spp., *Acremonium* sp., *Cladosporium* sp. y *Aspergillus* sp. (Hernández et al., 2021). En el presente trabajo se encontró que las plantas que fueron asperjadas con los cultivos crudos (metabolitos y células) de la bacteria IBC-CR18 mostraron valores de severidad similares a las plantas tratadas con el oxiclورو de cobre, además de causar mayor retraso en el desarrollo de la enfermedad que el fungicida químico. Similarmente, Haddad et al. (2009) encontraron que la aspersión en campo de plantas de café variedad Mundo novo con una suspensión bacteriana de la cepa B157 de *B. subtilis* mostró valores de severidad de roya similares a las plantas tratadas con hidróxido de cobre. Estos resultados ponen de manifiesto la posibilidad de que estos biofungicidas sustituyan a futuro, reduzcan o complementen a los fungicidas químicos, debido

a su actividad quitinolítica sobre las paredes celulares fúngicas (Swiontek et al., 2014) o a la alteración de procesos metabólicos fúngicos que causan los metabolitos extracelulares de la bacteria (Soenens e Imperial, 2020).

Por otro lado, la efectividad de los tratamientos don se usó IBC-CR18 pudo haber sido afectada durante la temporada de lluvias, ocasionando que el tratamiento se haya dispersado en eventos de lluvia intensa que pudiesen lavar el inóculo de las hojas antes de que las bacterias puedan colonizar los tejidos vegetales, considerando que las aplicaciones en campo se realizaron en los meses de junio-octubre. La formulación de estos bioproductos juega un papel clave para poder garantizar resultados favorables de control en el campo, tal como ocurre con los biofungicidas disponibles comercialmente. Por ejemplo, el biofungicida comercial recomendado para roya del café y formulado a base de extractos botánicos de *Melaleuca alternifolia* (Timorex Gold®) redujo significativamente en casi 50% la tasa de infección aparente (r) de la roya y el abcpe en 14% en relación al Testigo (Fajardo-Franco et al., 2020). En el presente estudio, el biofungicida comercial a base de *B. subtilis* (Serenade® Opti) presentó los valores más bajos de abcpe y causó el mayor retraso de la enfermedad con respecto al control (20 días). Con los resultados obtenidos en esta investigación se muestra el potencial de la cepa IBC-CR18 como agente de biocontrol de la roya. Sin embargo, investigación complementaria es requerida para validar los resultados obtenidos, así como también definir las metodologías que permitan escalar su producción y diseñar una formulación adecuada que permita dar más estabilidad y sobrevivencia a la cepa y sus metabolitos en el campo.

4. Conclusión

Los cultivos crudos de la cepa IBC-CR18 de *Serratia marcescens* tienen potencial como agentes de biocontrol de la roya del café y podrían a futuro reducir, sustituir o complementar las aplicaciones de oxiclورو de cobre en el campo.

Los tratamientos a base de la cepa IBC-CR18 (metabolitos más células) y cultivo crudo congelado (metabolitos), retrasaron la enfermedad por 12 y 15 días, respectivamente.

Agradecimientos

Se agradece al propietario de la finca Los Olivos por las facilidades otorgadas para el establecimiento del experimento de campo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses

Referencias

Achicanoy H. (2000). Descripción cuantitativa de las epidemias de las plantas. Revista Facultad Nacional Agronomía Medellín 53(1): 941–968.

- Barrera-Gaytán JF, Gómez-Ruiz J. 2019. Plagas y enfermedades del café: características, manejo y retos. En: Bello-Baltazar E, Soto-Pinto L, Huerta-Palacios G, Gómez-Ruiz J. (Eds.), Caminar el cafetal: perspectivas socioambientales del café y su gente. San Cristobal de las Casas, Chiapas, México. ECOSUR. Juan Pablos Editores. Pp. 115–139.
- Barrera-Gaytán JF, Pérez-Quintanilla J, Pinson-Rincón E, Díaz-Vicente VM, y Rivas-Platero GG. 2014. Plagas y enfermedades del café: Identificación, bioecología y manejo agroecológico. México. ECOSUR-UNACH-IICA.
- Barrera JF, Avelino J, Huerta G, Herrera J, Gómez J. 2013. La roya del café, crónica de una devaluación anunciada. ECOFRONTERAS 49: 22–25.
- Bettiol W, Varzea V. 1992. Controle biológico da ferrugem (*Hemileia vastatrix*) do cafeiro com *Bacillus subtilis* em condições controladas. Fitopatologia Brasileira 17(1): 91–95.
- Camposeco JD. 2017. Evaluación de las cepas bacterianas FCA-CR10 y FCA-CR18 como agentes de biocontrol de la roya del café (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.). Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Chiapas. México.
- Canet Brenes G, Soto Viquez C, Ocampo Thomason P, Rivera Ramírez J, Navarro Hurtado A, Guatemala Morales GM, Villanueva Rodríguez S. 2016. La situación y tendencias de la producción de café en América Latina y el Caribe. IICA-CIATEJ. San José, Costa Rica. 126 p.
- Carlier J, De Waele D, Escalant JV. 2002. Evaluación global de la resistencia de los bananos al marchitamiento por *Fusarium*, enfermedades de las manchas foliares causadas por *Mycosphaerella* y nemátodos: evaluación extensiva. Vézina A, Picq C. (Eds.). Guías técnicas INIBAP 6. Red Internacional para el Mejoramiento del Banano y el Plátano, Montpellier, Francia.
- Daivasikamani S, 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.
- Fajardo-Franco ML, Aguilar-Tlatelpa M, Guzmán-Plazola RA. 2020. Biofungicidas evaluation in two coffee cultivars for *Hemileia vastatrix* control. Revista Mexicana de Fitopatología 38(2): 293–306.
- 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(2): 114–119.
- Henderson TP. 2019. La roya y el futuro del café en Chiapas. Revista Mexicana de Sociología 81(2): 389–416.
- Hernández C, López L, Sánchez L. 2021. Agentes de control biológico de la roya del café ¿Cómo funcionan y qué tan efectivos son? BioTecnología 25(1): 21–30.
- INEGI. 2017. Anuario estadístico y geográfico de Chiapas 2017. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx>
- Köhl J, Kolnaar R, Ravensberg WJ. 2019. Mode of action of microbial biological control agents against plant diseases: relevance beyond efficacy. Frontiers in Plant Science 10: 845.
- Libert-Amico A, Paz-Pellat F. 2018. Del papel a la acción en la mitigación y adaptación al cambio climático: la roya del cafeto en Chiapas. Madera y Bosques 24: e2401914.
- Mohapatra NK, Mukherjee AK, Rao AVS, Nayak P. 2008. Disease progress curves in the rice blast pathosystem compared

- with the logistic and gompertz models. *ARPN Journal of Agricultural and Biological Science* 3(1): 28–37.
- Pandit MA, Kumar J, Gulati S, Bhandari N, Mehta P, Katyal R, Rawat CD, Mishra V, Kaur J. 2022. Major biological control strategies for plant pathogens. *Pathogens* 11(2): 273.
- Rettinassababady C, Jeyalakshmi C. 2014. Bio-Fungicides: the best alternative for sustainable food security and ecosystem. In: Kharwar RN, Upadhyay RS, Dubey NK, Raghuvanshi R. (Eds.), *Microbial diversity and biotechnology in food security*. Pp. 401–411.
- Shiomi HF, Sandro H, Silva A, Melo ISD, Vieira F, Bettiol W. 2006. Bioprospecting endophytic bacteria for biological control of coffee leaf rust. *Scientia Agricola* 63(1): 32–39.
- SIAP. 2021. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Producción de café cereza. Disponibl en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Soenens A, Imperial J. 2020. Biocontrol capabilities of the genus *Serratia*. *Phytochemistry Reviews* 19(3): 577–587.
- Swiontek M, Jankiewicz U, Burkowska A, Walczak M. 2014. Chitinolytic microorganisms and their possible application in environmental protection. *Current Microbiology* 68(1): 71–81.
- Talhinhas P, Batista D, Diniz I, Vieira A, Silva DN, Loureiro A, Tavares S, Pereira AP, Azinheira HG, Guerra-Guimarães L, Várzea V, Silva MDC. 2017. The coffee leaf rust pathogen *Hemileia vastatrix*: one and a half centuries around the tropics. *Molecular Plant Pathology* 18(8): 1039–1051.
- Toniutti L, Breitler JC, Etienne H, Campa C, Doubeau S, Urban L, Lambort C, Pinilla JCH, Bertrand, B. 2017. Influence of environmental conditions and genetic background of arabica coffee (*C. arabica* L.) on leaf rust (*Hemileia vastatrix*) pathogenesis. *Frontiers in Plant Science* 8: 2025.
- Van der Plank JE. 1964. *Plant diseases: epidemics and control*. Academic Press. 366 p.
- Whitney PJ. 1976. *Microbial Plant Pathology*. Hutchinson & Co Ltd. London.