

Evaluación en campo de bioactivadores de resistencia vegetal para el control de la roya del café

Diego Rosales-Hernández¹, Lourdes Adriano-Anaya², Miguel Salvador-Figueroa², Gamaliel Velázquez-Ovalle², Benjamín Moreno-Castillo^{2*}

¹Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Chiapas. Huehuetán, Chiapas, México.

²Instituto de Biociencias, Universidad Autónoma de Chiapas, Tapachula, Chiapas, México.

Resumen

El objetivo del presente trabajo fue evaluar en campo el efecto de las aspersiones de tres bioactivadores de la defensa vegetal o IRVs [inductores de resistencia vegetal] (PF14-50, PF5 y PSD; no disponibles comercialmente y sujetos a registros de patente), oxiclورو de cobre al 85% y agua (testigo) sobre la severidad de roya de café (*Hemileia vastratix*) en plantas de café (*Coffea arabica* L. var Bourbon), expresada como índices de infección (II), área bajo la curva del progreso de la enfermedad (abcpe) y retraso en el desarrollo de la enfermedad (factor Δt). Las aspersiones de las plantas se realizaron cada 15 días del 27/jul al 9/dic de 2018. Los resultados mostraron que las plantas asperjadas con el bioactivador PF5 acumularon en promedio menor cantidad de enfermedad (8559.0) en comparación con el testigo (11937.5) aunque fue similar a las plantas asperjadas con oxiclورو de cobre (9298.1), PF14-50 (9924.0) y PSD (11247.5). No obstante, al final del experimento el oxiclورو de cobre retrasó el progreso de la roya por 42 días, mientras que el PF5, PF14-50 y PSD causaron un retraso de 27, 22 y 15 días, respectivamente y en comparación con el testigo. Se concluye que el PF5 y el oxiclورو de cobre fueron los tratamientos más efectivos, además de hacer evidente el potencial de estos IRVs para reducir los niveles de severidad de la roya del café.

Palabras clave:

Bourbon
Escala
Epidemia
IRVs
Severidad

Keywords:

Bourbon
Scale
Epidemics
PRIs
Severity

Field evaluation of plant resistance bioactivators on the control of the coffee leaf rust

Abstract

This work aimed to evaluate in the field the spraying effects of three plant defense bioactivators or PRIs [plant resistance inducers] (labeled as PF14-50, PF5, and PSD; non-commercially available and subjected to patent registration), 85% copper oxychloride (chemical fungicide) and water (control) on severity of coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*) in coffee plants (*Coffea arabica* L. var Bourbon), expressed as Infection Index (II), area under disease progress curve (audpc) and delay on the disease progress (factor Δt). The coffee plants were sprayed every 15 days from July 25th to December 9th, 2018. Our results showed that PF5-treated plants registered the lowest value of audpc (8559.0) in comparison to control plants (11937.5) but was similar to audpc of copper oxychloride (9298.1), PF14-50 (9924.0) and PSD (11247.5). Nevertheless, at the end of the experiment the chemical fungicide delayed the disease progress by 42 days, while PF5, PF14-50, and PSD caused a delay of 27, 22 and 15 days, respectively, and in comparison to the control. It is concluded that PF5 and copper oxychloride were the most effective treatments, in addition to making evident the potential of the three PRIs tested, to reduce the severity levels of the coffee leaf rust.

* Autor para correspondencia:

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

1. Introducción

Una de las principales limitantes que tiene el cultivo de variedades árabes del café (*Coffea arabica* L.) (Rubiaceae), es la susceptibilidad al patógeno *Hemileia vastatrix* (Basidiomycota) agente causal de la roya del café (Hernández et al., 2021), el cual puede causar pérdidas de hasta un 35% del grano si no se implementa el manejo adecuado de la enfermedad (Talhinhas et al., 2017). México se ubica dentro de los diez principales países productores de café, cultivo que representa una de las mayores fuentes de divisas para el país por su exportación (Canet-Brenes et al., 2016). El aromático grano es uno de los sistemas socioecológicos más importantes en Chiapas, pues contribuye con el 37% de la producción total nacional (SIAP, 2023).

Durante los 30 años posteriores a su llegada a México en 1981, teniendo como punto de entrada la región del Soconusco en Chiapas, los niveles de incidencia y severidad de la roya del café fueron relativamente bajos y no representaron una amenaza para el sector cafetalero de la región (Barrera-Gaytán y Gómez-Ruiz, 2019). Sin embargo, a partir del 2012 y a la fecha se han atestiguado incrementos atípicos en la severidad de la enfermedad (Barrera et al. 2013; Libert-Amico y Paz-Pellat, 2018) y pérdidas en los rendimientos de 20% o más, situación que se ha atribuido a los efectos del cambio climático (Barrera et al. 2013; Canet-Brenes et al., 2016; Henderson, 2019; Libert-Amico y Paz-Pellat, 2018). Esto ha provocado una conversión hacia la producción de café “Robusta” y/o ciertas variedades arabigas resistentes, las cuales han mostrado cierta tolerancia a la infección por el hongo (Libert-Amico y Paz-Pellat, 2018, Hernández et al., 2021, Talhinhas et al., 2017).

El ciclo del patógeno se cumple favorablemente con temperaturas entre los 22 °C y 26 °C y, como resultado de su invasión, el tejido se necrosa o causa defoliación y por tanto, pérdidas en la cosecha (Barrera-Gaytán et al., 2014; Toniutti et al., 2017). El manejo de la enfermedad es principalmente químico (Talhinhas et al., 2017) con las consecuencias conocidas de generación de cepas resistentes y/o contaminación ambiental (Hernández et al., 2021).

Con el interés de causar el mínimo impacto ambiental y a la salud humana y eliminar los riesgos de generación de resistencia, se han explorado algunas estrategias de biocontrol de patógenos utilizando células microbianas directamente o sus metabolitos extracelulares (Köhl et al., 2019; Pandit et al., 2022; Rettinassababady y Jeyalakshmi, 2014; Soenens e Imperial, 2020). Otra alternativa explorada ha sido el estudio y la búsqueda de sustancias inductoras o activadoras de la resistencia vegetal (endógenas o exógenas), tal como el ácido jasmónico, etileno, ácido salicílico entre otras moléculas orgánicas de origen natural (Delgado-Oramas, 2020). El objetivo del presente estudio fue evaluar en campo tres productos formulados a base de bioactivadores de la resistencia vegetal reforzados con microelementos para el control de la roya del café en una plantación comercial en el Soconusco, Chiapas, México.

2. Materiales y Métodos

2.1. Sitio experimental

El experimento se llevó a cabo en una plantación mezclada de café robusta (*Coffea canephora*) y árabe (*C. arabica*, variedad Bourbon) de aproximadamente 1.5 ha. El cafetal tenía intercaladas algunas especies frutales como papaya, papaya, limón, naranja, plátano morado, etc., así como algunas especies forestales como primavera, cedro mundani, cedro rojo, roble, palo de zope, árbol de pan, caoba, etc. asociadas con algunas plantas trepadoras (Araceae) y bromelias. El sitio experimental se ubica en el km 5 de la carretera Tapachula-Felipe Carrillo Puerto-Cacahoatán perteneciente al Cantón “El Chaparrón” del municipio de Tapachula, Chiapas, México (14°59'14" N, 92°14'07" O) a una altitud de 527 msnm. El clima predominante del sitio es cálido húmedo con abundantes lluvias en verano y predominantemente con suelos pesados arcillosos de tipo Luvisol (INEGI, 2017).

2.2. Experimento

Para el experimento se utilizaron plantas de café de la variedad Bourbon (recepas de 1 año). Las aspersiones se realizaron con aspersores de 5 L de capacidad, con un gasto estimado de 200 L ha⁻¹. El periodo experimental comprendió del 27 de julio al 9 de diciembre de 2018 y el sitio experimental estuvo sujeto al manejo normal que da el productor a su cafetal, con la excepción de la aplicación de fungicidas sobre las plantas experimentales. Las aspersiones se realizaron cada 15 días y los tratamientos evaluados fueron los siguientes: 1) testigo (agua), 2) oxiclورو de cobre 85% (2 kg ha⁻¹), 3) Bioactivador PF14-50 (2 L ha⁻¹), 4) Bioactivador PF5 (2 L ha⁻¹) y 5) Bioactivador PSD (2 L ha⁻¹). A todos los tratamientos se les agregó adherente-surfactante para reducir el lavado y mejorar su adherencia (INEX-A, Cosmocel, 2 mL L⁻¹). De acuerdo con la información proporcionada por la empresa formuladora, los bioactivadores evaluados están compuestos por una mezcla específica de oligosacáridos y otros compuestos, así como algunos nutrientes que son requeridos por las plantas para activar las defensas vegetales y estimular el crecimiento. Estos bioactivadores no están comercialmente disponibles y son propiedad de la empresa SAS (Sustainable Agro Solutions, S.A.U., Lleida, España) quien los proporcionó para el estudio. Cada uno de los tratamientos se asperjó sobre 11 plantas de café, cada una de las cuales se consideró como repetición o unidad experimental. En cada planta se marcaron cinco ramas (dos inferiores, una media y dos de la parte alta), a las cuales se les dio seguimiento en cuanto a la severidad de roya durante todo el periodo experimental utilizando una escala de severidad basada en la intensidad de daño y/o síntomas visibles de roya.

2.3. 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 (Ramírez-Rodríguez et al., 2020). Se muestrearon todas las hojas de las seis ramas y en base a esta escala se calculó el índice de infección (II) para cada planta de acuerdo a la fórmula (Carlier et al., 2002): $II (\%) = (\sum an/6N) \times 100$; 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 (Achicanoy, 2000; Mohapatra et al., 2008): $abcpe = \sum [(II_1 + II_2)/2] [t_2 - t_1]$; donde, II_1 y II_2 son los índices de infección acumulados en los tiempos t_1 y t_2 , respectivamente, siendo t_1 y t_2 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 (1963): $r = [1/(t_2-t_1)] [\ln(X_2/1-X_2)-\ln(X_1/1-X_1)]$; donde, t_1 y t_2 representan los días transcurridos (fecha inicial y fecha final del ensayo), X_1 y X_2 son la proporción acumulada de la enfermedad en t_1 y t_2 , y \ln es el logaritmo natural. Con esta información, se calculó el factor Δt entre tratamientos y control (Whitney, 1976): $\Delta t = (1/r) \ln (x_0/x_{0S})$; donde, Δt es el retraso en el progreso de la enfermedad (en días) causado por

el tratamiento (x_{0S}) en comparación con el control (x_0), r es la tasa aparente de infección de x_{0S} calculado con la fórmula de Van der Plank (1963) y \ln es el logaritmo natural.

2.4. Análisis de datos

La evolución en el tiempo de los índices de infección (II) para cada tratamiento se muestra gráficamente tanto de manera acumulada como no acumulada. 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.) 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, calculado con los valores finales de los índices de infección acumulados (IIa) de cada tratamiento.

3. Resultados y Discusión

En la Figura 1 se muestra la evolución normal de los índices de infección (II) de la roya del café en cada tratamiento durante el experimento, mientras que en la Figura 2 se muestran los índices de manera acumulada en cada fecha (IIa).

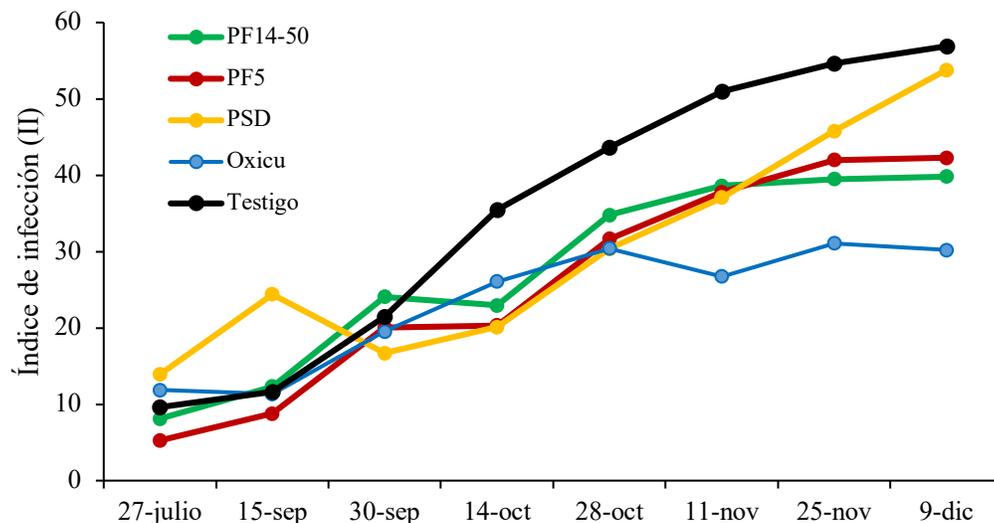


Figura 1. Dinámica de los índices de infección (II) de la roya del café registrados durante la evaluación en campo de bioactivadores de resistencia vegetal durante el año 2018 en el Cantón el Chaparrón, municipio de Tapachula, Chiapas, México.

Como se puede apreciar en la Figura 1, de manera general los índices de infección (II) por roya incrementaron conforme al tiempo, con excepción de un ligero pico observado el 15-sep en el tratamiento PSD. A partir del 14 de octubre la curva de la epidemia se estabilizó para el caso del oxiclورو de cobre,

mientras que en el caso de los bioactivadores PF14-50 y el PF5 las curvas de la enfermedad fueron incrementando, aunque este incremento fue menos pronunciado en comparación con el PSD y el testigo. Al final del ensayo, el oxiclورو de cobre registró un valor promedio menor de II

con respecto al PF5 y PF14-50 (10 y 12 unidades menos, respectivamente).

Con respecto a los índices de infección acumulados (IIa) para cada uno de los tratamientos (Figura 2), el análisis indicó diferencias entre tratamientos en cuanto al área bajo la curva del progreso de la enfermedad (abcpe; $F_{4,50} = 2.59$; $P < 0.05$). El tratamiento PF5 fue el que presentó un valor promedio de abcpe (8559.0 ± 759.8) significativamente menor que el testigo (11937.5 ± 816.9), aunque fue estadísticamente similar

a los demás tratamientos. No obstante, al final del experimento el fungicida a base de oxiclورو de cobre retrasó la enfermedad por 42 días con respecto al testigo, mientras que el bioactivador PF5 causó un retraso de 27 días. Aunque los bioactivadores PF14-50 y PSD acumularon estadísticamente la misma cantidad de enfermedad (abcpe) con respecto al testigo, causaron retrasos importantes en el progreso de la roya, los cuales fueron de 22 y 15 días, respectivamente.

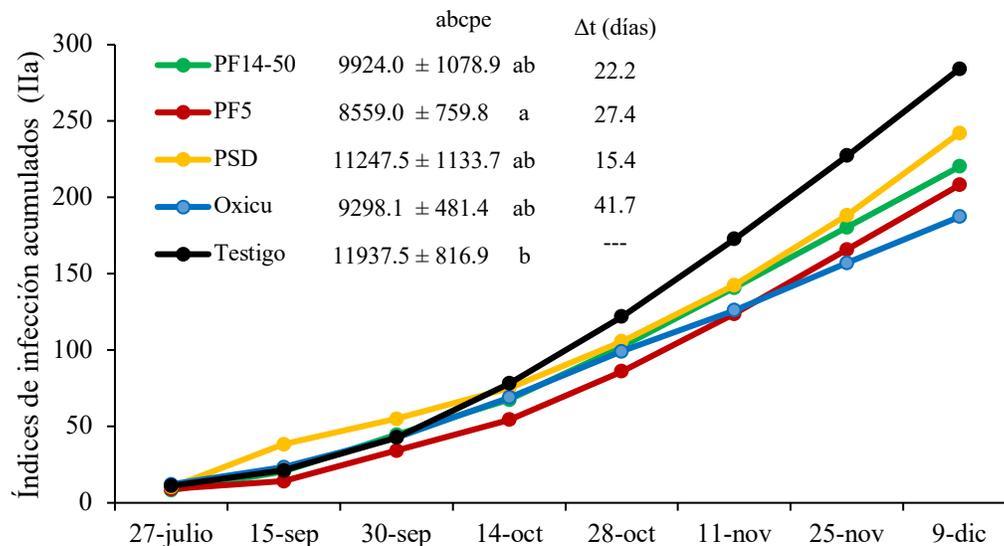


Figura 2. Índices de infección acumulados (IIa) de la roya del café durante la evaluación en campo de los bioactivadores de resistencia vegetal. Se muestran los valores promedio de área bajo la curva (abcpe \pm error estándar) por tratamiento (valores con la misma letra son significativamente iguales, $P > 0.05$). Asimismo, se proporciona el valor de Δt (días) por tratamiento en comparación con el control. Los valores finales de IIa (al 9-dic) fueron considerados como x_{05} para tratamiento y x_0 para testigo en el cálculo de Δt (Whitney, 1976).

Los tres complejos bioactivadores usados en el presente trabajo mostraron potencial para el control de la roya del café (*Hemileia vastatrix*), pero solamente el bioactivador PF5 fue diferente al testigo (agua) en cuanto al abcpe (Figura 2). Por tratarse de compuestos que ejercen reacción de respuesta de defensa vegetal, los bioactivadores evaluados se consideran dentro del grupo de los inductores de la resistencia vegetal (IRVs), los cuales suelen estar formulados a base de una mezcla especial de oligosacáridos y otras moléculas, así como algunos micronutrientes y azufre que son requeridos por las plantas para activar las defensas vegetales y estimular un adecuado crecimiento.

De manera general, los IRVs son compuestos o sustancias que pueden ser de origen natural o sintético, endógenos (producido por la planta) o exógenos (producidos por patógenos), microbiano, animal o vegetal y son también conocidos como bioactivadores de la defensa o inmunidad vegetal o simplemente *elicitors* (Meena et al., 2022). Es importante mencionar que todas las plantas poseen un mecanismo natural de defensa que puede permanecer inactivo o latente, hasta que es activado naturalmente con la

llegada de un patógeno de manera inducida previo a la llegada del patógeno, tal como en este trabajo (Cai et al., 2023).

Por su naturaleza química los IRVs pueden ser proteínas, péptidos, hormonas, carbohidratos (oligosacáridos, polisacáridos, monosacáridos, incluyendo nanoformas de ~ 100 nm), glucopéptidos, lípidos, lipopéptidos, lipopolisacáridos, metabolitos de bajo peso molecular, vitaminas, ácidos y compuestos químicos (Alexandersson et al., 2016; Guarnizo et al., 2020; Kongala y Kondreddy 2023; Ochoa-Meza et al., 2021; Yang et al., 2022; Zhu et al., 2024). En las plantas, los IRVs desencadenan mecanismos de resistencia vegetal básicamente en tres etapas: 1) reconocimiento de los inductores, 2) transducción de señales y activación de genes, y 3) expresión de la respuesta de defensa (Zhu et al., 2024). Estas respuestas de defensa pueden manifestarse mediante la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS), producción de compuestos antioxidantes de origen enzimático o no enzimático, metabolitos secundarios, activación de la maquinaria enzimática de defensa (quitinasas, glucanasas, proteasas,

celulasas, lipasas, etc.), producción de fitoalexinas, modificación de la composición de la pared celular, acumulación de melatonina, carotenoides y poliaminas, principalmente (Kaur et al., 2022).

Se sabe que la inducción de resistencia se dispara de manera natural mediante el reconocimiento y detección de elicitores o patrones moleculares asociados al patógeno (PAMPs: *pathogen-associated molecular patterns*) a través de receptores específicos (PRRs) ubicados en la superficie celular, mecanismo conocido como Inmunidad Disparada por PAMPs (PTI). Los PRRs a su vez disparan la señalización mediada por el Ca^{2+} , producción de ROS, activación de proteínas-quinasas (p.ej. proteína-quinasa dependientes de calcio, CPKs; o activadas por mitógeno MAPKs) y reprogramación transcripcional para dar paso a la PTI. Algunos patógenos han evolucionado para contrarrestar la PTI mediante la producción de efectores proteicos que introducen a la célula vegetal y que anulan la PTI (mecanismo conocido como susceptibilidad disparada por efectores proteicos, ETS). Aparte de la PTI, un mecanismo de defensa vegetal utiliza receptores proteicos intracelulares que bloquean estos efectores del patógeno, causando la Inmunidad disparada por efectores (ETI) que induce la muerte celular (conocida como reacción de hipersensibilidad, HR) y confina al patógeno en el sitio foliar necrosado. Otro mecanismo de inmunidad conocido ocurre en el caso de las infecciones virales, en donde los PAMPs virales corresponden a RNA de doble cadena (dsRNA) y los PRRs inducen la producción de RNAi (RNA de interferencia) que se adhieren a los dsRNA y no permiten su replicación dentro de la célula causando su degradación. Para contrarrestar este tipo de PTI, los virus han evolucionado para producir proteínas de cubierta (efectores) que suprimen a los RNAi. Como respuesta, las plantas activan a los genes R y producen proteínas-R (proteínas de respuesta) que inactivan a los efectores virales desencadenando con ello la ETI. Otros dos tipos de resistencia que han desarrollado las plantas son la Resistencia Sistémica Inducida (RSI) y la Resistencia Sistémica Adquirida (RSA), dependientes del jasmonato (JA) y/o etileno (Et) y del ácido salicílico (AS), respectivamente, las cuales pueden proteger tejidos no infectados y distantes al punto de infección. Además de la RSA, la PTI y la ETI también son dependientes de AS, aunque la RSA produce una respuesta más duradera y ofrece mayor protección ante una variedad de patógenos. Aunque fenotípicamente la RSA y RSI son análogas, su principal diferencia radica en la molécula señal activadora, además de que la RSI es inducida por microorganismos asociados a la rizósfera vegetal, mediante la producción de ciertos compuestos o moléculas (Meena et al., 2022; Zhou y Wang, 2018; Zhu et al., 2024).

La respuesta o resistencia vegetal también puede inducirse mediante la aplicación de IRVs vía foliar, tal como se aplicaron los bioactivadores en el presente estudio. Algunos IRVs se han evaluado en diferentes solanáceas como chile, tomate, papa y tabaco contra patógenos como el tizón tardío

(*Phytophthora infestans*, *P. capsici*), pudrición vascular (*Ralstonia solanacearum*), antracnosis (*Colletotrichum coccodes*), pudrición gris (*Botrytis cinerea*), entre otros y con resultados favorables (Alexandersson et al., 2016). En trigo se ha evidenciado la lignificación de células y acumulación de compuestos fenólicos, además de la activación de genes de resistencia contra patógenos foliares (Ochoa-Meza et al., 2021), mientras que en arroz y tabaco se observó el cierre estomático, producción de ROS y de cuatro fitoalexinas, además de muerte celular con la aplicación del oligosacárido manan, una molécula considerada como señal de infección o de peligro (DAMPs: *danger-associated molecular pattern*) (Zang et al., 2019). Estos elicitores DAMPs son análogos a los PAMPs (mencionados previamente), MAMPs (*microbe-associated molecular patterns*) y HAMPs (*herbivore-associated molecular pattern*), dependiendo del origen de la molécula señal (Meena et al., 2022). Un ejemplo de HAMPs son los compuestos presentes en las secreciones salivares de larvas del insecto herbívoro *Spodoptera frugiperda* (gusano cogollero), los cuales funcionan como moléculas señal y provocan reacciones de defensa en plantas de maíz (Acevedo et al., 2018). Algunos otros ejemplos de actividad IRVs inducida se observó en plantas de garbanzo, registrándose una mayor actividad peroxidasa, polifenol-oxidasa, mayor acumulación de fenoles, peróxido de hidrógeno y proteínas después del suministro de AS a 1.5 mM (War et al., 2011). En plantas de limón se aplicaron los inductores AS, *Azospirillum brasilense* (cepa Cd) y quitosán contra el HLB (Huanglongbing, *Candidatus Liberibacter asiaticus*), las cuales mostraron estadísticamente menor cantidad de células bacterianas que las plantas control a los 5 meses posttratamiento (Trinidad-Cruz et al., 2019). En maíz, el suministro de células de *A. brasilense* y sus metabolitos extracelulares (incluyendo fitohormonas y AS) provocó la activación de genes de defensa e indujo un mayor crecimiento vegetal (Fukami et al., 2017).

Se ha reportado que la RSA es la forma de resistencia vegetal que ha ofrecido los mejores resultados, pues su efecto es más duradero en el tiempo y puede hacer blanco contra una variedad de patógenos. Como tal, algunas formas que se han explorado para incrementar la producción endógena de ácido salicílico (AS) y activar la RSA es la aplicación de análogos químicos del AS (ácido acetilsalicílico, INA: 2,6- ácido dicloroisonicotínico, ASB: acibenzolar S-metil; benzotiadiazol), quitina, quitosán, fosfitos, laminarina (carbohidrato estructural en el alga café *Laminaria digitata*), quitoooligosacáridos, oligogalacturonidos, extractos vegetales y de levadura, aceites esenciales, biológicos (*Bacillus subtilis* y *Trichoderma harzianum*), ravs UV-C y estrés mecánico inducido. Sin embargo, la eficiencia de los IRVs ha sido altamente variable y poco adoptada en la práctica, en parte al alto nivel de presión de las enfermedades en monocultivos que pudiera ser exacerbado por el cambio climático y los patrones variables de temperatura y precipitación. Por tal razón se sugiere usar estos IRVs en condiciones de baja intensidad de enfermedad, combinar con otras estrategias o

mecanismos diferentes a la RSA (como la RSI) y dar al cultivo las condiciones adecuadas de crecimiento y nutrición (incluyendo nutrición adecuada) para fortalecer el sistema inmune vegetal natural (Urban et al., 2022). En algunos casos, la eficiencia de la aplicación de los IRVs es importante, así como conocer la morfología foliar, por lo que el uso de coadyuvantes que disuelvan la cera cuticular es crucial para poder alcanzar las células epidérmicas (incluyendo células guardas estomáticas) y disparar la respuesta inmune. Asimismo, es importante considerar y conservar la microbiota natural residente de la filósfera vegetal, pues su actividad enzimática puede jugar un rol importante en la transformación de algunos carbohidratos complejos en oligosacáridos que ejercen actividad inductora (Meena et al., 2022; Trouvelot et al., 2014).

La inducción o activación de los mecanismos de defensa vegetal contra fitopatógenos no es una herramienta nueva, pues ha sido una estrategia explorada desde hace más de 100 años y aunque algunos inductores son relativamente de bajo costo comercial, su implementación en la práctica aún es baja (Alexandersson et al., 2016). Sin embargo, por su bajo impacto ambiental, los IRVs han cobrado notable importancia en las últimas dos décadas ante la preocupación mundial que ha causado la actividad humana sobre el ambiente (incluyendo la contaminación por el uso de plaguicidas sintéticos y el cambio climático) y la creciente demanda por el consumo de alimentos inocuos y una agricultura sustentable (Jiang et al., 2021; Zhu et al., 2024). Por tal razón, los bioactivadores usados en el presente experimento representan una potencial herramienta para el control de la roya del café. Al cierre de la edición del presente artículo, la empresa SAS (Sustainable Agro Solutions S.A.) ha informado que los bioactivadores evaluados en este trabajo fueron moléculas que pasaron por un proceso de optimización y potenciación en su actividad como IRVs, siendo la base para la formulación del producto Cafedak®. Esta patente disponible comercialmente, es un bioactivador de las defensas naturales y estimulante del crecimiento en plantas de café, mismo que de acuerdo con su etiqueta contiene un macronutriente (azufre), microelementos (boro, hierro, zinc, molibdeno, manganeso) y compuestos orgánicos con actividad IRVs (consultado en www.sas-agri.com). En Tripathi et al. (2022) se muestran varios ejemplos del rol y los efectos que tienen estos nutrientes en la reducción de la severidad de varias enfermedades y en varios cultivos, por lo que la combinación de nutrientes y los IRVs contenidos en Cafedak® ofrecen una alternativa para el manejo de fitopatógenos económicamente importantes como la roya del café, aunado a su perfil ambientalmente amigable.

4. Conclusión

Las plantas de café asperjadas con el bioactivador PF5 acumularon significativamente menor cantidad de enfermedad que las plantas testigo, aunque fue similar a las plantas asperjadas con el oxiclورو de cobre, PF14-50 y PSD.

Al final del experimento el oxiclورو de cobre retrasó la enfermedad por 42 días, mientras que el PF5, PF14-50 y PSD retrasaron 27, 22 y 15 días, respectivamente, el progreso de la roya en comparación con el testigo.

Se concluye que el PF5 y el oxiclورو de cobre fueron los tratamientos más efectivos, además de hacer evidente el potencial de estos bioactivadores de defensa vegetal (IRVs) para reducir los niveles de severidad de la roya del café.

Agradecimiento

Los autores agradecen al Sr. Ignacio Méndez por haber otorgado todas las facilidades para realizar el experimento en su propiedad.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses alguno con el uso de los productos evaluados en el presente trabajo.

Referencias

- Acevedo FE, Peiffer M, Ray S, Meagher R, Luthe DS, Felton GW. 2018. Intraspecific differences in plant defense induction by fall armyworm strains. *New Phytologist* 218(1): 310-321.
- Achicanoy H. 2000. Descripción cuantitativa de las epidemias de las plantas. *Revista Facultad Nacional Agronomía Medellín* 53(1): 941-968.
- Alexandersson E, Mulugeta T, Lankinen Å, Liljeroth E, Andreasson E. 2016. Plant resistance inducers against pathogens in *Solanaceae* species-from molecular mechanisms to field application. *International Journal of Molecular Sciences* 17(10): 1673.
- Barrera JF, Avelino J, Huerta G, Herrera J, Gómez J. 2013. La roya del café, crónica de una devastación anunciada. *ECOFRONTERAS* 49: 22-25.
- 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*. Juan Pablos Editores. San Cristobal de las Casas, Chiapas, México. Pp. 115-139.
- Barrera-Gaytán JF, Pérez-Quintanilla J, Pinson-Rincón E, Díaz-Vicente VM, Rivas-Platero GG. 2014. Plagas y enfermedades del café: Identificación, bioecología y manejo agroecológico. ECOSUR-UNACH-IICA. México.
- Cai M, Zhang S, Su L, Li B, Li F, Borrás-Hidalgo O, Sun X, Sun Q, Sun L, Zhao C, Zhao L. 2023. Application of oligosaccharides to induce innate immunity in plants. *BIO Web of Conferences* 72: 01004.
- Canet-Brenes G, Soto Viquez C, Ocampo Thomason P, Rivera Ramirez 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. CIATEJ-IICA. Costa Rica.
- Carlier J, De Waele D, Escalant JV. 2002. Evaluacion global de la resistencia de los bananos al marchitamiento por *Fusarium*, enfermedades de las manchas foliares causadas por *Mycosphaerella* y nemátodos. Guías técnicas. INIBAP 6. Red Internacional para el mejoramiento del banano y plátano.

- Francia
- Delgado-Oramas BP. 2020. La resistencia inducida como alternativa para el manejo de plagas en las plantas de cultivo. *Revista de Protección Vegetal* 35(1): 1-12.
- Fukami J, Ollero FJ, Megías M, Hungria M. 2017. Phytohormones and induction of plant-stress tolerance and defense genes by seed and foliar inoculation with *Azospirillum brasilense* cells and metabolites promote maize growth. *AMB Express* 7(1): 153.
- Guarnizo N, Oliveros D, Murillo-Arango W, Bermúdez-Carmona MB. 2020. Oligosaccharides: defense inducers, their recognition in plants, commercial uses and perspectives. *Molecules* 25(24): 5972.
- 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. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Anuario estadístico y geográfico de Chiapas 2017. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx> Fecha de consulta: 27 de marzo de 2024.
- Jiang S, Wang F, Li Q, Sun H, Wang H, Yao Z. 2021. Environment and food safety: A novel integrative review. *Environmental Science and Pollution Research* 28(39): 54511-54530.
- Kaur S, Samota MK, Choudhary M, Choudhary M, Pandey AK, Sharma A, Thakur J. 2022. How do plants defend themselves against pathogens-biochemical mechanisms and genetic interventions. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 28(2): 485-504.
- 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.
- Kongala SI, Kondreddy A. 2023. A review on plant and pathogen derived carbohydrates, oligosaccharides and their role in plant's immunity. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications* 6: 100330.
- Libert-Amico A, Paz-Pellat F. 2018. Del papel a la acción en la mitigación y adaptación al cambio climático: la roya del café en Chiapas. *Madera y Bosques* 24: e2401914.
- Meena M, Yadav G, Sonigra P, Nagda A, Mehta T, Swapnil P, Harish, Marwal A. 2022. Role of elicitors to initiate the induction of systemic resistance in plants to biotic stress. *Plant Stress* 5: 100103.
- 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.
- Ochoa-Meza LC, Quintana-Obregón EA, Vargas-Arispuro I, Falcón-Rodríguez AB, Aispuro-Hernández E, Virgen-Ortiz JJ, Martínez-Téllez MÁ. 2021. Oligosaccharins as elicitors of defense responses in wheat. *Polymers*, 13(18): 3105.
- Pandit MA, Kumar J, Gulati S, Bhandari N, Mehta P, Kalyal R, Rawat CD, Mishra V, Kaur J. 2022. Major biological control strategies for plant pathogens. *Pathogens* 11(2): 273.
- Ramírez-Rodríguez RF, Castañeda-Hidalgo E, Robles C, Santiago-Martínez GM, Pérez-León MI, Lozano-Trejo S. 2020. Efectividad de biofungicidas para el control de la roya en plántulas de café. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(6): 1403-1412.
- Retinassababady C, Jeyalakshmi C. 2014. Bio-Fungicides: the best alternative for sustainable food security and ecosystem. En Kharwar RN, Upadhyay RS, Dubey NK, Raghuwanshi R. (eds). *Microbial diversity and biotechnology in food security*. Pp. 401-411.
- SIAP. 2023. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola 2023. Recuperado de <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> Fecha de consulta: 29 de marzo de 2024.
- Soenens A, Imperial J. 2020. Biocontrol capabilities of the genus *Serratia*. *Phytochemistry Reviews* 19(3): 577-587.
- Talhinhas P, Batista D, Diniz I, Vieira A, Silva DN, Loureiro A, Tavares S, Pereira AP, Azinheira HG, Guerra-Guimarães L, Várzea V, Silva MC. 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, Breieler JC, Etienne H, Campa C, Doubeau S, Urban L, Lambot 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.
- Trinidad-Cruz JR, Rincón-Enríquez G, Quiñones-Aguilar EE, Arce-Leal AP, Leyva-López NE. 2019. Inductores de resistencia vegetal en el control de *Candidatus Liberibacter asiaticus* en árboles de limón (*Citrus aurantifolia*) mexicano. *Revista Mexicana de Fitopatología* 37(2): 304-317.
- Tripathi R, Tewari R, Singh KP, Keswani C, Minkina T, Srivastava AK, De Coarto H, Sansinenea E. 2022. Plant mineral nutrition and disease resistance: A significant linkage for sustainable crop protection. *Frontiers in Plant Science* 13: 883970.
- Trouvelot S, Héloir MC, Poinsot B, Gauthier A, Paris F, Guillier C, Combiér M, Trdá L, Daire X, Adrian M. 2014. Carbohydrates in plant immunity and plant protection: roles and potential application as foliar sprays. *Frontiers in Plant Science* 5: 592.
- Urban L, Lauri F, Ben Hdech D, Aarouf J. 2022. Prospects for increasing the efficacy of plant resistance inducers stimulating salicylic acid. *Agronomy* 12: 3151.
- Van der Plank JE. 1963. *Plant diseases: epidemics and control*. Academic Press. New York. 349 p.
- War AR, Paulraj MG, War MY, Ignacimuthu S. 2011. Role of salicylic acid in induction of plant defense system in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Plant Signaling and Behavior*, 6(11): 1787-1792.
- Whitney PJ. 1976. *Microbial plant pathology*. Hutchinson & Co Ltd. London.
- Yang B, Yang S, Zheng W, Wang Y. 2022. Plant immunity inducers: From discovery to agricultural application. *Stress Biology* 2(1): 5.
- Zang H, Xie S, Zhu B, Yang X, Gu C, Hu B, Gao T, Chen Y, Gao X. 2019. Mannan oligosaccharides trigger multiple defence responses in rice and tobacco as a novel danger-associated molecular pattern. *Molecular Plant Pathology* 20(8): 1067-1079.
- Zhou M, Wang W. 2018. Recent advances in synthetic chemical inducers of plant immunity. *Frontiers in Plant Science* 9: 1613.
- Zhu F, Cao MY, Zhang QP, Mohan R, Schar J, Mitchell M, Chen H, Liu F, Wang D, Fu ZQ. 2024. Join the green team: Inducers of plant immunity in the plant disease sustainable control toolbox. *Journal of Advanced Research* 57: 15-42.