



ESTADO DEL ARTE SOBRE EL CONOCIMIENTO DE  
RAZAS, MONITOREO Y CONTROL DE LA

# ROYA

D E L C A F É  
EN LOS PAÍSES DE PROMECAFE

EDITORES:

ELIAS DE MELO VIRGINIO FILHO

BAYRON MEDINA

LAÉRCIO ZAMBOLIM

JACQUES AVELINO







ESTADO DEL ARTE SOBRE EL CONOCIMIENTO  
DE RAZAS, MONITOREO Y CONTROL DE

# LA ROYA

D E L C A F É  
EN LOS PAÍSES DE PROMECAFE

Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE)

Agroforestería y Mejoramiento Genético de Café y Cacao

Turrialba, Costa Rica

2021



Este manual se elaboró con el apoyo financiero de la Unión Europea e IICA bajo el marco del Programa PROCAGICA. Las ideas de los autores no reflejan necesariamente el punto de vista de las instituciones que apoyaron esta guía. Se autoriza la reproducción parcial y total de la información contenida en este documento siempre y cuando se cite la fuente.

© **Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), 2021**

**Unión Europea (UE)**

**Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)**

**Programa Centroamericano de la Gestión Integral de la Roga del Café (PROCAGICA)**

Editores: Elias de Melo Virginio Filho, Bayron Medina, Laércio Zambolim y Jacques Avelino

Autores: Elias de Melo Virginio Filho, Bayron Medina, Laércio Zambolim, Jacques Avelino, Cristhian Lizardo, Miguel Barquero, Quisqueya Pérez, Mario Enrique Chocooj, Julio Grande, Roger Bolaños, , René León, Dulce Obin

Revisores: Mirna Barrios, Arlene López Sampson

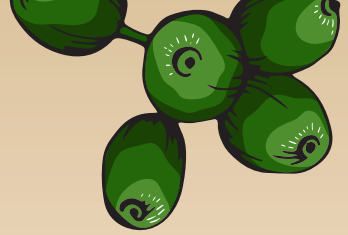
Diseño por: Luis Meza  
@16tres

Diagramación: Dulce Fuentes, Cesia Aragón





# ÍNDICE



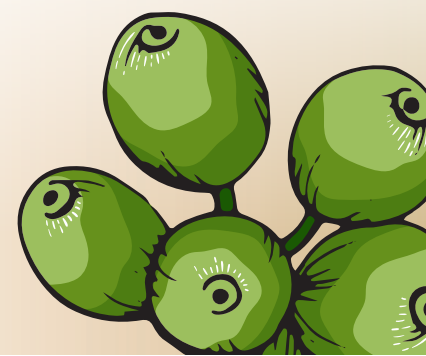
<b>1. AGRADECIMIENTOS</b>	<b>7</b>
<b>2. ACRÓNIMOS</b>	<b>8</b>
<b>3. PRESENTACIÓN</b>	<b>9</b>
<b>4. OBJETO DEL MANUAL Y SU UTILIZACIÓN</b>	<b>10</b>
<b>5. INTRODUCCIÓN</b>	<b>11</b>
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>Generalidades</b>	<b>12</b>
Importancia de la caficultura en el ámbito social, económico y ambiental	12
<b>CAPÍTULO 2</b>	
<b>Origen e impactos de la roya</b>	<b>14</b>
2.1. Origen y diseminación	15
2.2. Impactos en la producción y la economía	17
<b>CAPÍTULO 3</b>	
<b>Descripción y caracterización del ciclo de vida de la roya del café</b>	<b>20</b>
3.1. Clasificación, morfología y ciclo de vida	20
3.2. Infección y desarrollo de la epidemia	23
<b>CAPÍTULO 4</b>	
<b>Condiciones climáticas y manejo agronómico influyente</b>	<b>26</b>
4.1. Temperatura, precipitación, rocío, altitud	27
4.2. Efecto de la sombra del café en los factores ambientales	29
4.3. Nutrición de la planta	30
4.4. Carga fructífera	31

## **CAPÍTULO 5**

<b>Razas de roya del café</b>	<b>32</b>
5.1. Conservación de germoplasma y mejoramiento genético	33
5.2 Evolución de las razas de roya	34
5.3. Métodos para la determinación de razas de roya	37
5.4. Susceptibilidad y nuevas razas	38
5.5. Utilización de programas de variedades resistentes	39
5.6. Durabilidad de resistencia	40
5.7. Diversificación genética y renovación con variedades resistentes	40
5.8. Lanzamiento de una nueva variedad resistente a roya, en una región cafetalera específica	43

## **CAPÍTULO 6**

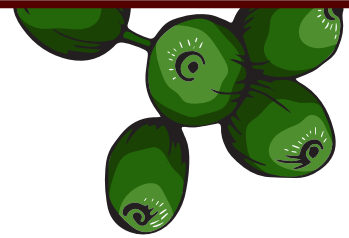
<b>Estado actual y estrategia de manejo de la roya del café en Centroamérica y República Dominicana (plataforma regional roya)</b>	<b>44</b>
6.1 Causas del surgimiento de nuevas razas en América Central y el Caribe	46
6.2 Avances y alternativas para el mejoramiento genético en los países de Centro América y el Caribe	47
6.3 Control químico del cultivo de café y su gestión integrada	48
6.4. Capacidad instalada de los diferentes países	50
6.5. Sistemas de alerta temprana, estado actual de los sistemas de alerta	51
6.6. Diseño e implementación de un SAT para el control de la roya del café en Centroamérica	51
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>53</b>





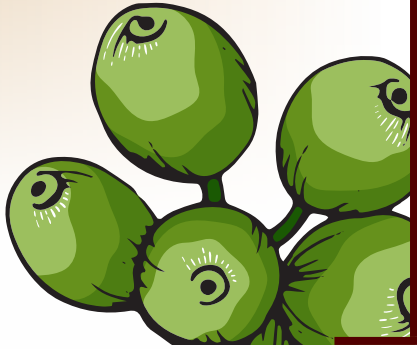
## 1. AGRADECIMIENTOS

Los editores y autores agradecen atentamente a todos los técnicos de las instituciones cafetaleras involucrados en el monitoreo, asistencia técnica y fortalecimiento de capacidades de familias y empresas productoras por su gran esfuerzo frente a los impactos del cambio climático y en particular las epidemias de roya en la región. Igualmente, el reconocimiento a todas las familias productoras que forman parte de la amplia red centroamericana y del Caribe de fincas de monitoreo y validación de innovaciones por sus importantes aportes en el aprendizaje aplicado de las prácticas de adaptación y mitigación ante la variabilidad climática que están siendo generadas. Un reconocimiento a cada una de las instituciones representantes del sector café en cada país por la colaboración y aporte al proceso de sistematización, estudio e socialización del conocimiento compartido en este manual (ANACAFÉ, CENTA, Consejo Salvadoreño del Café, IHCAFE, ICAFE, INTA, MIDA-IDIAP, INDOCAFE), así como al PROMECAFE por coordinar la integración de los esfuerzos regionales de la Plataforma Técnica Regional de la Roya y de Mejoradores Genéticos que permanentemente buscan consolidar las acciones necesarias para el fortalecimiento de la caficultura en la región. Por último, nuestro reconocimiento a la importante alianza IICA-CATIE-CIRAD, en el contexto del Programa Centroamericano de Gestión Integral de la Roya (PROCAGICA)-Unión Europea, por garantizar la implementación de acciones de fortalecimiento de capacidades nacionales y regionales determinantes para la construcción de una caficultura transformadora.



## 2. ACRÓNIMOS

<b>ANACAFE:</b>	Asociación Nacional del Café, Guatemala
<b>CENICAFÉ:</b>	Centro Nacional de Investigaciones de Café, Colombia
<b>CENTA:</b>	Consejo Salvadoreño del Café, El Salvador
<b>CIRAD:</b>	Investigación Agrícola para el Desarrollo, Francia
<b>ICAFFE:</b>	Instituto Costarricense del Café, Costa Rica
<b>IHCAFE:</b>	Instituto Hondureño del Café, Honduras
<b>INDOCAFE:</b>	Instituto Dominicano del Café, República Dominicana
<b>INTA:</b>	Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria, Nicaragua
<b>MIDA-IDIAP:</b>	Ministerio de Desarrollo Agropecuario (MIDA)-Instituto de Investigación Agropecuario (IDIAP), Panamá
<b>PROCAGICA:</b>	Programa Centroamericano de Gestión Integral de la Roca del Café
<b>PROMECAFE:</b>	Programa Cooperativo Regional para el Desarrollo Tecnológico y Modernización de la Caficultura
<b>SAGARPA:</b>	Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, México
<b>UFV:</b>	Universidad Federal de Viçosa, Brasil



### 3. PRESENTACIÓN

Con el apoyo del Programa Centroamericano de la Gestión Integral de la Roca del Café (PROCAGICA) y mediante un esfuerzo colaborativo entre el CATIE, PROMECAFE, los Institutos Nacionales de Café y el CIRAD, se generó en los últimos cuatro años un importante conocimiento sobre el comportamiento de la Roca (*Hemileia vastatrix*), en especial sobre la aparición de nuevas razas del patógeno.

El esfuerzo colaborativo coordinado por CATIE, en el marco de PROCAGICA-IICA-UE, contó con el importante apoyo del fitopatólogo Láercio Zambolim-UFV (Brasil), que contribuyó con el fortalecimiento de la capacidad regional de los países de la región de PROMECAFE para desarrollar estudios y monitoreo específicos sobre la enfermedad, con el propósito de mejorar las estrategias de prevención y su control.

Este documento permite conocer los esfuerzos y aprendizajes generados con una amplia participación de técnicos e instituciones dedicadas a construir una mejor caficultura, más resiliente y sostenible para el presente y futuro.

A handwritten signature in black ink, which appears to read "René León Gómez". The signature is fluid and cursive.

**René León Gómez**  
Secretario Ejecutivo del PROMECAFE

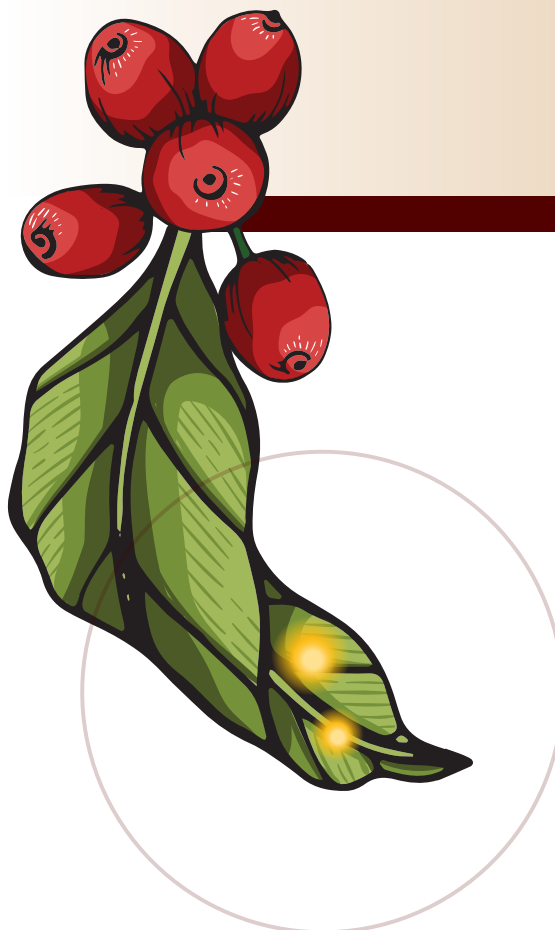
## 4. OBJETO DEL MANUAL Y SU UTILIZACIÓN

La información actualizada sobre el contexto de incidencia de plagas y enfermedades del café, en especial la roya, es determinante como apoyo al fortalecimiento de las capacidades de especialistas, investigadores, técnicos, empresas y familias productoras.

El presente manual ofrece una síntesis de la información más reciente sobre la gestión integral de la roya en países del área de PROMECAFE y busca ser una herramienta de apoyo para técnicos, investigadores y practicantes que participan en investigación, la asistencia técnica y el fortalecimiento de los procesos de aprendizaje integral.

Desde el punto de vista de las estrategias de capacitación y asistencia técnica es muy importante que las personas facilitadoras de procesos utilicen el contenido del manual como insumo de referencia.

La comunicación y el aprendizaje es efectivo cuando se relaciona las maneras de trabajo con los diferentes públicos que se quieren alcanzar. Por lo tanto, los contenidos, los formatos y estrategias deben ser distintos de acuerdo con los tomadores de decisión, técnicos, empresas y familias productoras.





## 5. INTRODUCCIÓN

La roya del cafeto (*Hemileia vastatrix*) es una de las enfermedades de mayor importancia para el cultivo del café, por lo que se dispone de referencia documental de estudios realizados para su manejo y alternativas de control integral.

Millones de caficultores en todo el mundo y sobre todo de países en Centroamérica, enfrentan los brotes de la roya del café. Un alto número de asociaciones y cooperativas de caficultores, gobiernos locales y nacionales, técnicos, investigadores, programas y organismos internacionales buscan respuestas frente a los impactos que trae consigo esta enfermedad con consecuencias adversas en la economía y seguridad alimentaria de un gran número de familias en las regiones donde se produce café.

Por esta razón este documento surgió como alternativa de apoyo a los procesos que buscan hacer frente a la roya del café (*Hemileia vastatrix*), ya que la dinámica de comportamiento histórico de este hongo ha mostrado que son ciclos de epidemias que se repiten a lo largo del tiempo y cada uno con sus particularidades, por lo que es importante estar permanentemente preparados para establecer medidas preventivas o de control que sean oportunas y efectivas.

Es indispensable plasmar una línea teórica base que permita reconocer a detalle el comportamiento de la enfermedad de la propagación de la roya en las plantaciones de café.

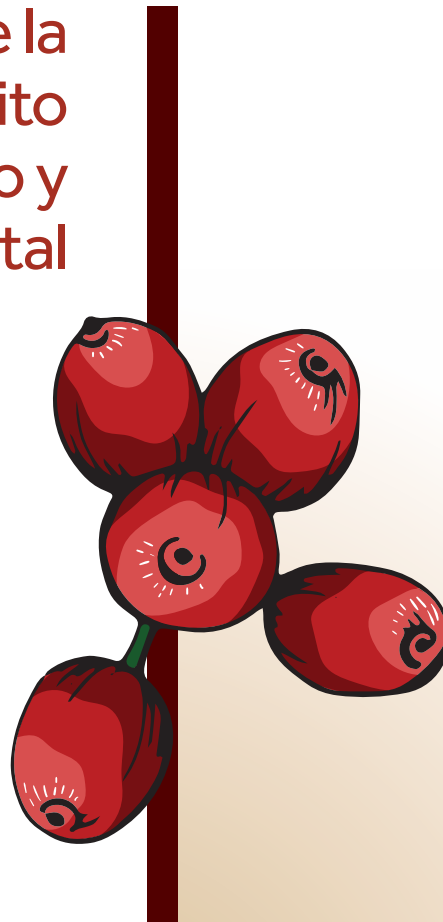
El contenido del Manual fue desarrollado a partir del trabajo de seguimiento a la Plataforma Técnica Regional de la Roya del Café, apoyada por el programa PROCAGICA desde el 2018 y que contó con la participación de especialistas de ANACAFÉ (Guatemala), CENTA CAFÉ/Consejo Salvadoreño del Café (El Salvador), INDOCAFE (República Dominicana), ICAFE (Costa Rica), IHCAFE (Honduras), INTA (Nicaragua), MIDA-IDIAP (Panamá), CIRAD (FRANCIA), UFV (Brasil).



C A P Í T U L O 1

# GENERALIDADES

Importancia de la  
caficultura en el ámbito  
social, económico y  
ambiental



# GENERALIDADES

## Importancia de la caficultura en el ámbito social, económico y ambiental

El café es uno de los productos tropicales más importantes del mundo, ya que proporciona beneficios económicos, sociales y ambientales. En los últimos 20 años, la demanda de café ha aumentado en más de 50% y las exportaciones de café verde generan ganancias de USD\$20,000 millones anuales.

Alrededor de 25 millones de hogares agrícolas en más de 50 países dependen de la producción de café. Junto con otros empleos indirectos y oportunidades económicas, se crean a lo largo de la cadena de valor del café más USD\$200,000 millones anuales (OIC, 2019).



Tomado de: [https://lab.org.uk/wp-content/uploads/2016/11/nicaragua\\_farming\\_royacoffeeblight\\_feb2013.jpg](https://lab.org.uk/wp-content/uploads/2016/11/nicaragua_farming_royacoffeeblight_feb2013.jpg)

A pesar de la importancia del café para el comercio internacional, los pequeños propietarios siguen siendo más vulnerables a la volatilidad del mercado y los precios fluctuantes que limitan las inversiones necesarias para la modernización y adaptación al cambio climático a nivel de finca. Por ejemplo, no incorporar variedades resistentes contra la roya representa un grave riesgo para la sostenibilidad del sector cafetero y el suministro futuro.

Precios bajos durante un período prolongado hace que los agricultores no puedan cubrir el costo de resiembra con variedades resistentes a las enfermedades, como roya y sequía. Además la variabilidad y el cambio climático se caracterizan por fenómenos meteorológicos extremos, como el aumento de las temperaturas, lluvias y vientos fuertes, así como estaciones secas prolongadas.



Estas variaciones son los principales riesgos climáticos que tienen impactos negativos en los caficultores, reducen los rendimientos, provocan brotes de plagas y enfermedades, así como la erosión del suelo, entre otras consecuencias.

Las plantaciones de café en la mayoría de los casos conforman agroecosistemas que, a su vez, están integrados por subsistemas. Un sistema de producción agrícola es una actividad dirigida a transformar componentes abióticos (oferta ambiental) por medio de componentes bióticos (genotipo), en arreglos espaciales y cronológicos con prácticas adecuadas de manejo, en productos de importancia económica. Por ejemplo, la planta de café (genotipo) en presencia de agua, luz solar y clorofila en el proceso de fotosíntesis fija el carbono de gas carbónico (CO<sub>2</sub>) en el aire, produce almidón y azúcares que son transportados a los granos de café.

En la región centroamericana y el Caribe, el café se cultiva en diferentes tipologías de sistemas agroforestales (SAF), en los cuales se siembran árboles dentro de los cafetos, con el fin de combinar atributos de productividad y sostenibilidad, con lo cual se obtienen productos tangibles y servicios ecosistémicos que contribuyen a la recuperación de tierras degradadas y mejora del paisaje, entre otros.

Es probable que el hongo *H. vastatrix* causante de la roya del café coevolucionó en el ecosistema con las plantas del género *Coffea*, siendo este un sistema agroforestal en África oriental.

El hongo crece dentro del tejido de las hojas del cafeto y llega a la superficie inferior de la hoja, donde produce pústulas anaranjadas en los estomas. Llegado el momento, cada pústula elimina miles de uredosporas finas, con una textura similar a la de la harina de cocina. Dichas esporas se diseminan en los cafetales por efecto del viento y la lluvia de baja intensidad o bien, viajan transportadas por los insectos, otros animales y las personas.

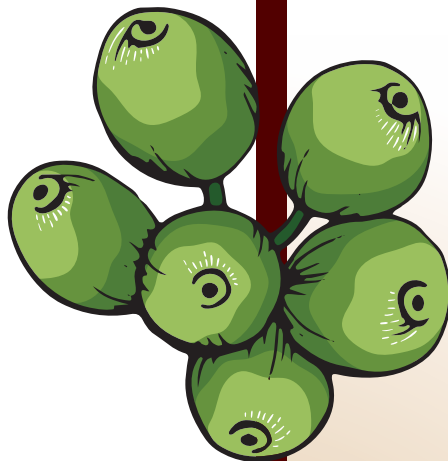
Algunas esporas son depositadas en la superficie inferior de otras hojas de café, germinan en presencia del agua y penetran en los estomas y luego infectan, colonizan los tejidos y producen síntomas y signos de que el hongo comienza de nuevo el ciclo.

Cuando una infección de la roya es grave, causa la caída prematura de las hojas y seca las ramas secas del cafeto. En consecuencia, genera al siguiente año una disminución en el rendimiento de las plantaciones (FAO, 2015).

C A P Í T U L O 2

# ORIGENE IMPACTOS DE LA ROYA

## 2.1. Origen y diseminación



# ORIGEN E IMPACTOS DE LA ROYA

## 2.1. Origen y diseminación

La roya del café fue reportada por primera en el año 1869, en una plantación de la isla de Ceilán, hoy Sri Lanka. En ese mismo año, el micólogo británico Berkeley describió y nombró el hongo responsable de la enfermedad como *Hemileia vastatrix*. Su repentina aparición y rápida expansión en una región alejada de los centros de origen (África) desató polémica sobre el origen de esta. Lo esperado hubiera sido primero en África (centros de origen de un hospedero y sus patógenos suelen coincidir).

La coexistencia entre una planta y un hongo conduce normalmente a una coevolución de ambos, la cual se traduce por la expresión de una gran variabilidad genética en cuanto a la resistencia de la planta hacia el hongo y la virulencia del hongo hacia la planta.

Al llegar a Ceilán, la enfermedad obtuvo condiciones propicias para su desarrollo, tanto de clima como de sistema de cultivo. La isla está bajo el régimen de lluvias monzónicas, que favorecen varios procesos de la enfermedad. Por otro lado, se habían establecido plantaciones homogéneas con materiales susceptibles, a pleno sol, lo que propicia altas producciones, otro factor que favorece la enfermedad. Finalmente, pocas opciones de control químico estaban disponibles en esa época. Hay que recordar que las propiedades fungicidas del caldo Bordelés no fueron documentadas sino hasta 1885 o sea, 16 años después del primer reporte de la roya en Ceilán (Avelino *et al.* 1991).



Antes de la llegada de la roya, Ceilán era el tercer productor mundial de café. Esta enfermedad causó estragos en plantaciones en la isla (Saccas y Charpentier 1971). El cultivo del café se volvió imposible y fue cambiado paulatinamente por el cultivo del té, teniendo esto consecuencias hasta en los hábitos del pueblo británico, el cual consumía café y no té hasta esas fechas.

A partir de Ceilán, la roya del cafeto se dispersó rápidamente a toda Asia, lo que causó grandes pérdidas. En las tierras bajas de Java y Sumatra, por ejemplo, la roya redujo la producción de café de 30% a 50% en una sola temporada. El cultivo del café Arábica en Java terminó siendo abandonado en altitudes inferiores a los 1.000 metros. También en Filipinas, la llegada de la roya tuvo consecuencias desastrosas. Este país era el cuarto exportador mundial de café en 1889. Paralelamente, la enfermedad fue detectándose en todas las plantaciones de África oriental con efectos similares.

La roya tardó en detectarse en África occidental. En 1960, algunos países de estas regiones todavía estaban aparentemente libres del hongo. En Angola, por ejemplo, la roya se detectó en 1966 solamente. Mc Cook propone que este lento progreso de la enfermedad se debió al lento progreso de la caficultura en África central y occidental en relación con las fuertes crisis económicas de la primera mitad del siglo XX (la gran depresión, la segunda guerra mundial). Al finalizar dicha guerra y con la recuperación económica, el cultivo del café en esas zonas se desarrolló fuertemente, lo que propició un nuevo período de expansión de la roya. Eskes (1989), por su lado, sugiere que la roya estaba ampliamente distribuida en África central y occidental, pero que esta pudo pasar inadvertida. Los *Coffea* locales, diploides, tienen en efecto un nivel de resistencia alto en general.





En América, la roya causó temor y preocupación por lo evidenciado en Ceilán y en otras áreas cafetaleras del viejo mundo. El temor era en parte justificado, ya que todas las variedades de Arábica cultivadas en América Latina eran susceptibles a la roya. Al ingreso de la roya a Brasil, la primera reacción fue erradicar los cultivos de café aproximadamente 500 metros arriba y abajo del lugar donde se encontró la enfermedad en Bahía. Sin embargo, esta medida no tuvo éxito (Zambolim, 2010 - información personal). En Nicaragua y México, la estrategia también consistió en tratar de erradicar la enfermedad apoyándose en el combate químico, con base en las experiencias de Papúa Nueva Guinea. Dicho Estado logró hacer tres erradicaciones temporales, en 1892, 1903 y 1965, hasta 1986 cuando la enfermedad se estableció definitivamente. Ninguno de estos intentos fue exitoso (Avelino y Rivas, 2013).

Afortunadamente, los países del área centroamericana pronto reaccionaron ante la presencia de la roya a través de la creación del proyecto PROMECAFE (Programa Regional para la Protección y Modernización de la Caficultura en Centroamérica y Panamá) en 1978. La creación de este programa marcó el inicio de un cambio de paradigmas, ya que se pensó que el aumento de la productividad y la rentabilidad eran necesarias para tener medios para combatir la enfermedad.

Se consideró que la roya se estableció definitivamente en el área y que la problemática, común a toda la región, podía resolverse a través de la investigación, la transferencia de tecnología y la capacitación. Desde este punto de vista, la roya fue un estímulo para la investigación cafetalera en el ámbito centroamericano.

Durante más de tres décadas, la zona centroamericana logró convivir con la roya, básicamente a través del uso de fungicidas, variedades resistentes (especialmente en Honduras) y la aplicación de técnicas que incrementaron la productividad, compensando así los costos y las pérdidas de producción relacionadas con la enfermedad. Así fue hasta el año 2012, cuando se desató la epidemia de roya más grave que la región haya conocido.



Tomado de: <http://www.minutaagropecuaria.com/wp-content/uploads/2017/09/2-2-8.jpg>



## 2.2. Impactos en la producción y la economía

Todos los países centroamericanos fueron fuertemente afectados por la epidemia de roya del 2012, así como los países del Caribe y México. Además, en la cosecha del 2013, Perú y Ecuador también fueron impactados severamente por la enfermedad. Si se agregan las epidemias previas de Colombia del 2008 al 2011, se puede decir que la roya tuvo un impacto casi continental en pocos años, a diferencia de las epidemias anteriores. La epidemia del 2012 tuvo efectos sobre la producción del mismo año (Tabla 1). Esto se explica por defoliaciones y muertes de ramas, lo que causó pérdidas de frutos antes de su cosecha. Esos efectos precoces indicaron que la epidemia también fue precoz, lo cual es poco frecuente (Avelino y Rivas, 2013).

Las epidemias se desarrollan normalmente durante la cosecha. Alcanzan su máximo en el pico de cosecha o hacia el final de esta y ocasionan, por lo mismo, pérdidas principalmente al año siguiente (Avelino *et al.* 1992). Factores climáticos podrían explicar el comportamiento inusual, especialmente por las temperaturas más elevadas. Los adelantos de la cosecha del café observados en Costa Rica son argumentos en favor de esta hipótesis.

La epidemia también estuvo asociada con una disminución de los precios del café. El indicador compuesto de precios de la OIC disminuyó 30% en 2012, llegando a precios que no permiten cubrir los costos de producción en muchos de los países del área centroamericana. Las pérdidas estimadas a nivel centroamericano para la cosecha 2012-2013 fueron de aproximadamente 20%, según lo reportado por PROMECAFE en una serie de foros nacionales llevados a cabo en el marco del proyecto "Control de la roya del café en Mesoamérica", financiado por Noruega. Los países más afectados fueron Honduras, Guatemala y El Salvador (Tabla 2). Tres países declararon un estado de emergencia: Honduras, Guatemala y Costa Rica.


**Tabla 1.** | Pérdidas causadas por la epidemia de roya del 2012 en la producción del ciclo 2012-2013






	Producción en la cosecha 2011-2012 [en millones de sacos de 46 kg de café oro]	Pérdida en 2012-2013 causada por la epidemia de roya anaranjada [en miles de sacos de 46 kg]	%	Estado de emergencia declarado
 HONDURAS	7,10	2.192*	31*	Sí
 GUATEMALA	4,85	730*	15*	Sí
 COSTA RICA	2,01	97**	5**	Sí
 NICARAGUA	2,01	58**	3**	No
 EL SALVADOR	1,50	442**	23**	No

**Fuente:** Avelino y Rivas, 2013. Datos proporcionados por los Institutos del Café o Ministerios de Agricultura de los países indicados (IHCAFE, ANACAFÉ, ICAFE, MAGFOR, PROCAFE) en el marco del proyecto CATIE-CIRAD-PROMECAFE "Control de la roya del café en Mesoamérica", financiado por Noruega.

\* Reducción de producción con respecto a la cosecha del año 2011-2012, mayormente atribuida a la roya.

\*\* Reducción de producción con respecto a los estimados de cosecha del año 2012-2013, atribuida a la roya.

**Tabla 2.****Áreas que requieren renovación o poda severa como resultado de la epidemia de roya del 2012 en los diferentes países de Centroamérica**

	Área sembrada (en miles de ha)	Área que requiere poda severa (en miles de ha)	Área que requiere renovación (en miles de ha)	Área no productiva en 2013-2014 (%)
 HONDURAS	282,5	70,0	22,0	32,6
 GUATEMALA	276,5	31,3	6,7	13,7
 COSTA RICA	93,8	14,6	5,1	21,0
 NICARAGUA	126,2	26,9	ND	21,3
 EL SALVADOR	150,2	13,0	1,7	9,7
<b>TOTAL</b>	<b>931,2</b>	<b>155,8</b>	<b>35,5</b>	<b>20,5</b>

**Fuente:** Avelino y Rivas, 2013. Datos proporcionados por los Institutos del Café o Ministerios de Agricultura de los países indicados (IHCAFE, ANACAFÉ, ICAFE, MAGFOR, PROCAFE) en el marco del proyecto CATIE-CIRAD-PROMECAFE "Control de la roya del café en Mesoamérica", financiado por Noruega. ND= No hay datos.

La roya tiene impactos económicos directos e indirectos en la producción de café. Los directos incluyen la disminución de la cantidad y la calidad del rendimiento producido por la planta enferma. Los indirectos contemplan el aumento de los costos para combatir y controlar la enfermedad. Los métodos para hacerlo consisten en la aplicación de fungicidas, la eliminación de plantas enfermas y su reemplazo por variedades resistentes. Ambos métodos tienen costos significativos de mano de obra y materiales, y en el caso de la acumulación, resulta en una disminución de la producción de un año de duración (las plántulas de café no son totalmente productivas durante 3 a 5 años después de la siembra).

El PROMECAFE-IICA (2013) indica que las pérdidas en el sector cafetalero en Centroamérica se han estimado en más de 19% de la producción; o sea, esto representa 3,5 millones de sacos de café de 60 kg (USD\$499 millones). El 80% de los caficultores afectados son pequeños productores que carecen de otras fuentes de ingresos. Se estima que aproximadamente 373.584 personas (17,2% de la fuerza laboral del sector) fueron desplazadas como consecuencia de la epidemia.



Tomado de: <https://www.entremundos.org/revista/wp-content/uploads/2015/05/roya-afectaciones-a-produccion-de-cafe.jpg>

Cerca de 1,9 millones de personas dependen del café para su sustento, incluidos algunos de los trabajadores sin tierra más pobres de la región (Avelino y Rivas, 2013). Se estimó que la actividad cafetera en Centroamérica requeriría al menos 2 a 3 años para recuperarse de los efectos de la roya, que afectó a la mitad de las plantaciones, aproximadamente 500.000 empleos y causó pérdidas por USD\$681 millones, según expertos (Virginio Filho, 2013). La estimación se basó en que, para frenar la plaga, los productores debieron efectuar extensas podas en hasta 28% de los cafetales, los cuales dejaron de producir al menos durante dos ciclos.

Por eso, en el 2013 se promulgó el “Plan de acción con medidas inmediatas: Programa integrado de combate a la roya del café y recuperación de la capacidad productiva en Centroamérica”, con la participación de los Institutos del Café, los Ministerios de Agricultura, el IICA-PROMECAFÉ-CATIE. Una de las acciones principales fue el proyecto “Control de la roya del café en Mesoamérica”, financiado por el Gobierno de Noruega (Avelino y Rivas, 2013).

Al problema de la alta incidencia de la roya en Centroamérica se unen otros dos factores que afectan la actividad cafetalera: los eventos climáticos extremos, que reducen la productividad de las plantas (temperatura mínima más alta en las noches, alto porcentaje de sombra en los cafetales, ausencia de fertilización y control

químico) y los bajos precios internacionales del grano, que agravan las pérdidas económicas. Este contexto adverso no permitió aplicar la estrategia adecuada para el manejo de la roya.

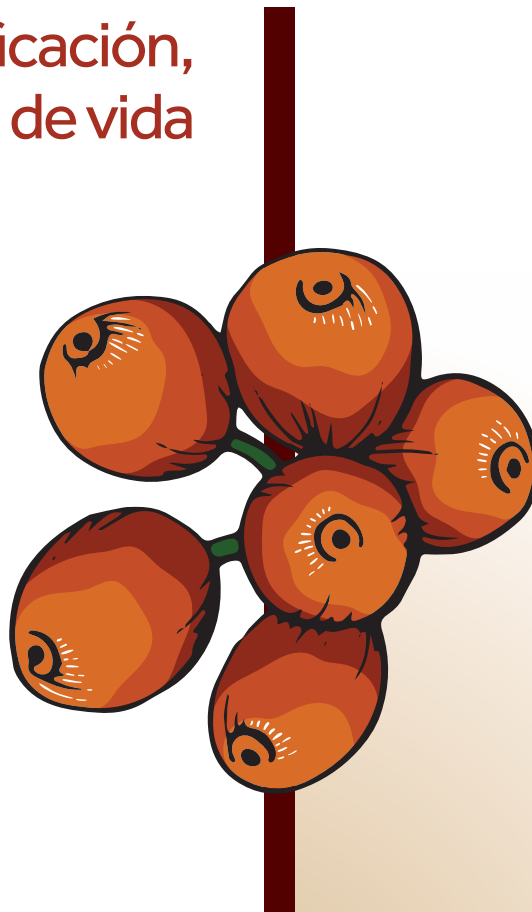
Para encontrar una mejor estrategia de control y reducción del impacto de la alta incidencia de la roya es importante que los productores y el personal técnico consideren la dimensión financiera y en particular, los beneficios de diferentes alternativas. El análisis debe orientar al caficultor sobre los costos del control integral de la roya (químico, orgánico, mecánico, etc.), así como mostrar la variación y el impacto económico de las opciones de manejo que permitan identificar las alternativas más adecuadas con base en las condiciones y enfoques de manejo de cada productor de café.

Tres factores son considerados clave en Colombia cuando se valoran las alternativas de control: 1) con base en un calendario fijo (se sugiere evitar), 2) considerar el período de floración principal y 3) tener en cuenta los niveles de infección (mejor alternativa) (Rivillas *et al.* 2011). Otro criterio importante es tomar en cuenta el clima (precipitación, temperatura y rocío, principalmente). Una vez evaluada la situación específica del cafetal por parte del productor, se define el tipo de producto y el equipo de aspersión adecuado o disponible en su finca para realizar la aplicación en el momento oportuno.

C A P Í T U L O 3

# DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL CICLO DE VIDA DE LA ROYA DEL CAFÉ

## 3.1 Clasificación, morfología y ciclo de vida



# DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL CICLO DE VIDA DE LA ROYA DEL CAFÉ

## 3.1 Clasificación, morfología y ciclo de vida

Las enfermedades de las plantas son procesos fisiológicos anormales y dañinos, provocados por la irritación continua de agentes patógenos (capaces de provocar enfermedad) y se llama síntomas a las manifestaciones morfológicas y fisiológicas anormales en la planta que resultan del desarrollo de una enfermedad.

**Agente causal o patógeno:** La roya del café es una enfermedad producida por un hongo (patógeno biótrofo) llamado *H. vastatrix*, que infecta las hojas. Los primeros síntomas que se observan son pequeñas manchas de color amarillo pálido en la parte superior de las hojas (Figura 1A). Estas manchas aumentan de tamaño gradualmente hasta producir unas masas amarillas en el envés de las hojas, que corresponden a las fructificaciones (esporulaciones) del hongo llamadas uredosporas, las cuales son las estructuras reproductivas asexuales del hongo (Figura 1B).

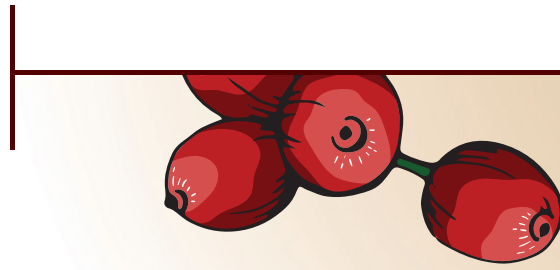
El hongo esporula a través de los estomas en el envés de las hojas (Figura 1C). Las lesiones polvorientas en el envés pueden ser de color amarillo-naranja a rojo-anaranjado y hay una variación considerable de una región a otra (Arneson, 2000).

Las lesiones pueden desarrollarse en cualquier parte de la hoja, aunque principalmente ocurren en los bordes, donde se concentran las gotas de lluvia y rocío (Figura 2A). El centro de las lesiones necróticas eventualmente se seca y se torna de color café; los márgenes continúan expandiéndose y produciendo uredosporas.

A inicios de la estación lluviosa, las primeras lesiones aparecen en las hojas inferiores y la infección progresa lentamente hacia la parte superior del arbusto. Las hojas infectadas pueden caer prematuramente y dependiendo de la nutrición de las plantas y del medio ambiente donde se desarrollan, pueden dejar largas extensiones de las bandolas (ramas plagiotrópicas) desprovistas de hojas (Figura 2B).

### Clasificación taxonómica del agente causal

La roya del café es producida por un hongo de la clase *Urediniomycetes*, perteneciente al género *Hemileia* (que significa mitad liso, por características que presentan sus uredosporas). Avelino y Rivas (2013) señalan que la clasificación taxonómica completa del hongo es:



## Figura 1. | Desarrollo de la roya en hojas de café



Fuente: Arneson, 2000.

A. Lesión inicial observada en el haz de la hoja

B. Inicio de la producción de uredosporas en el envés de la hoja

C. Pústula aislada con uredosporas

El hongo *H. vastatrix* es un organismo biótrofo (parásito que se alimenta de las células vivas), también conocido como un parásito obligado que parasita las hojas del género *Coffea*; es decir, se alimenta y completa su ciclo de vida en células vivas (Avelino *et al.* 1999; Zuluaga y Céspedes, 2009). De las especies cultivadas de café, la más atacada por *H. vastatrix* es *C. arabica* (Avelino y Rivas, 2013).

No se conocen reportes que indiquen que el hongo sobrevive en el suelo o tejido vegetal muerto. Cuando las hojas caen al suelo, la vida útil de las uredosporas es de aproximadamente 45 días. Las estructuras reproductivas del hongo son las uredosporas (reproducción asexual), que constituyen su medio de reproducción y dispersión más eficiente. Son de forma arriñonada, rugosas en su mitad superior y lisas ventralmente (Coutinho *et al.* 1995; Fernandes *et al.* 2009).

El primer autor que observó que la uredospora podía albergar un proceso de meiosis fue Rajendren (1967). Más tarde, Carvalho *et al.* (2011) informaron que las uredosporas podrían funcionar como teliospora (reproducción sexual oculta) en el ciclo de vida del hongo y se denominó criptosexualidad.

- Phylum: *Basidiomycota*
- Clase: *Urediniomycetes*
- Orden: *Uredinales*
- Familia: *Chaconiaceae*
- Género: *Hemileia*
- Especie: *vastatrix*



## Figura 2.

## Lesiones de roya en hojas y ramas plagiotrópicas defoliadas



A) Lesiones de roya del café. B) Bandolas (ramas plagiotrópicas) defoliadas.

### 3.1.1. Ciclo de vida del hongo y desarrollo en la planta de café

El proceso infectivo de la roya del cafeto comienza con los síntomas de la enfermedad que aparecen en el envés de las hojas, en donde se observan manchas pálidas. Con el tiempo, estas aumentan de tamaño y se unen formando las características manchas amarillas o naranja, con presencia de polvo fino amarillo. Ahí es donde producen las esporas del hongo.

Según Barquero (2013), el tiempo entre la germinación de la espora, penetración a los tejidos internos de la hoja e inicio de la producción de esporas oscila entre 20 a 40 días, dependiendo de las condiciones ambientales. Además, señala que entre más favorables sean las condiciones de temperatura y permanencia de agua sobre la hoja, menor será el tiempo para completar el ciclo reproductivo del hongo.

Para la germinación de las esporas se requiere la presencia de agua libre durante al menos seis horas, temperaturas entre 21 °C-25 °C y condiciones de oscuridad (Avelino y Rivas, 2013). Para la formación del apresorio (modificación de las hifas para la penetración en los estomas del huésped) se requiere un período de entre 5,3 y 8,5 horas después de la germinación de las uredosporas.

La germinación se inhibe con la presencia de luz y falta de agua, y varía entre 24 y 48 horas (Avelino y Rivas, 2013).

Cuando se evapora o se reduce la disponibilidad de agua en la hoja, se detiene el proceso de germinación, ya que afecta el crecimiento de los tubos germinativos de las esporas (SAGARPA, 2013).

Luego de germinar, el hongo penetra en las hojas a través de los estomas (aberturas naturales usadas por las plantas para la respiración y la transpiración) situados en el envés de las hojas (Rayner, 1961). Una vez que el hongo ha penetrado al interior de la hoja, desarrolla unas estructuras denominadas haustorios, los cuales entran en contacto con las células de la planta para extraer los nutrientes necesarios para su crecimiento.

Transcurridos entre 16 y 30 días aproximadamente, (en condiciones de temperatura y luz controladas) después de la colonización, el hongo está lo suficientemente maduro para diferenciarse en estructuras llamadas soros, que son las encargadas de producir nuevas uredosporas.

El tiempo transcurrido desde la infección hasta la producción de esporas se denomina período de latencia. En Costa Rica se ha determinado que el ciclo de la vida del hongo en campo es de alrededor de 30 días. Considerando los períodos de precipitación, la roya del café puede completar entre seis y ocho ciclos, dependiendo de la región (Barquero, 2013). Rivillas *et al.* (2011) señalan que en la zona cafetalera de Colombia, el período de latencia puede fluctuar entre 34 y 37 días al sol, mientras que en condiciones de sombra oscila entre 31 y 35 días.

Avelino y Rivas (2013) representan el ciclo de vida del hongo y los factores que lo afectan en un diagrama de flujo y señalan las condiciones que pueden favorecer o inhibir el desarrollo de la enfermedad.



Según el manual de la roya del café en Colombia (CENICAFÉ, 2011), durante su ciclo de vida la roya pasa por las siguientes etapas:

## Etapa de diseminación

Se realiza por medio de esporas de tamaño microscópico (30 micrómetros de largo por 20 micrómetros de ancho), denominadas uredosporas que, producidas en grandes cantidades, corresponden al polvillo amarillo o naranja que se visualiza en el envés de las hojas de café y es característico de esta enfermedad. La diseminación de las uredosporas ocurre por el viento y salpique de las gotas de lluvia.

## Etapa de germinación

Es el proceso donde la espora, una vez depositada en el envés de la hoja, emite de uno a cuatro tubos germinativos, en un período de 6 a 12 horas. Para esta etapa, el hongo requiere una capa de agua, condiciones de poca o ninguna luminosidad y temperaturas inferiores a 28 °C y superiores a 16 °C. El tubo germinativo crece hasta encontrar los estomas, que son aberturas naturales de la hoja para el intercambio gaseoso en la respiración.

## Etapa de colonización

Una vez que ha penetrado al interior de la hoja, el hongo desarrolla unas estructuras denominadas haustorios, los cuales entran en contacto con las células de la planta y extraen los nutrientes para su crecimiento. Las células de café parasitadas pierden su coloración verde y en este momento, se aprecian zonas cloróticas o amarillentas en la hoja, que corresponden a la aparición de los síntomas de la enfermedad. El tiempo transcurrido hasta ese instante se denomina período de incubación. Este varía de acuerdo con la temperatura. En la zona cafetera central de Colombia puede estar entre 21 y 24 días al sol, y entre 18 y 22 días a la sombra (Guzman, 2008, citado por Rivillas *et al*, 2011).

## Etapa de reproducción

Transcurridos 30 días, después de la colonización, el hongo está lo suficientemente maduro como para diferenciarse en estructuras llamadas soros, que son las encargadas de producir nuevas uredosporas, a razón de 1.600 por milímetro cuadrado (mm<sup>2</sup>) de hoja, por un período de 4 a 5 meses. Estas serán dispersadas por el viento para iniciar el nuevo ciclo de infección. El tiempo transcurrido desde la infección hasta la producción de esporas se denomina período de latencia. Para la zona cafetera de Colombia, el período de latencia puede fluctuar entre 34 y 37 días al sol, y entre 31 y 35 días a la sombra.

En investigaciones recientes realizadas por CENICAFÉ, en esos mismos lugares, se apreció el efecto de las variaciones climáticas de los últimos años sobre la roya, en particular sobre esos períodos de incubación y de latencia. Ambos períodos sufren transitoriamente aumentos o disminuciones, comparados con los valores anteriores, dependiendo de las condiciones ambientales, como la temperatura, en este caso.

El ciclo de vida del hongo se alcanza a repetir muchas veces dentro de un cultivo durante el mismo período de cosecha, por lo que se considera la roya del café como una enfermedad policíclica dentro de la misma planta y monocíclica de planta a planta.

### 3.2. Infección y desarrollo de la epidemia

La enfermedad en una planta consiste en una serie de procesos fisiológicos nocivos causados por la irritación continua de esta por un agente primario (Daniel y Boothroyd, 1972). De acuerdo con Zadoks y Schein (1979), el sistema epidémico se define como la integración de la población hospedante (café) con la población del patógeno (*H. vastatrix*), bajo la influencia de factores ambientales y la intervención humana, según el tetraedro de la enfermedad.

El brote de un ataque de roya y el posterior progreso de la enfermedad dependen de la ocurrencia simultánea de estos cuatro factores (CENICAFÉ, 2011) (Figura 3).

## El hospedero

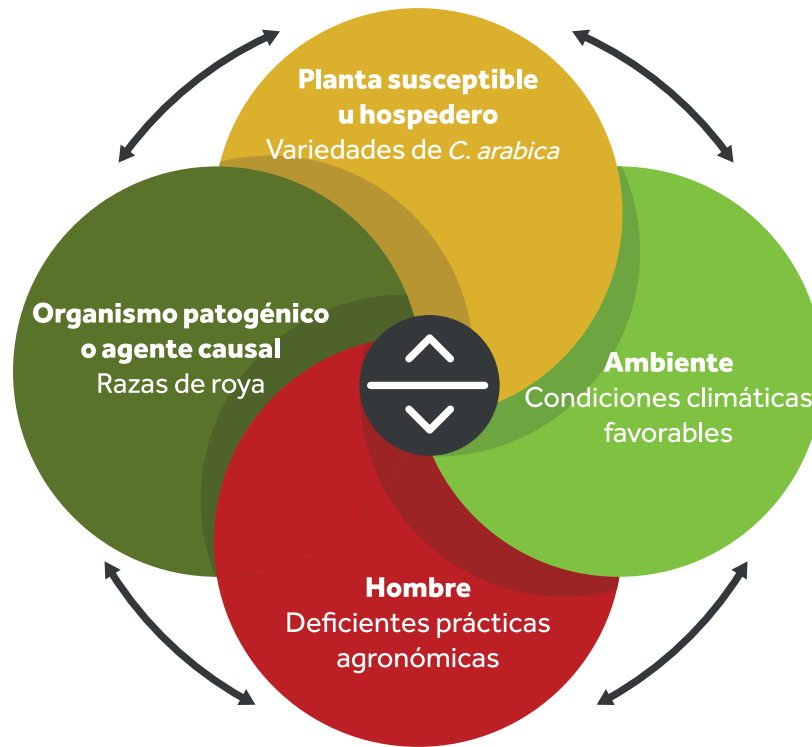
La especie *C. arabica* es la especie que produce los llamados cafés suaves. Dentro de la especie existe una gran cantidad de variedades; entre ellas se cuentan las tradicionales como Típica, Borbón y Caturra. Todas carecen de resistencia genética a la roya y en plantaciones con estas variedades, se pueden presentar fuertes ataques de la enfermedad. En otros países han sido utilizadas otras variedades de *C. arabica*, entre las que resaltan Catuaí, Mundo Novo, Blue Mountain, Laurina y Maragogipe.

## El patógeno

Pertenece a la familia *Pucciniaceae*, que se especializa en parasitar células vegetales vivas, lo que implica unos requerimientos nutricionales muy especiales, que hacen de este hongo un parásito obligado, el cual no puede sobrevivir en el suelo o material vegetal inerte. Sin embargo, las uredosporas pueden sobrevivir a grandes altitudes en la atmósfera, donde las temperaturas están muy por debajo de 0,0 °C.

## Figura 3.

Interrelación de factores para que se presente una epidemia de roya en café



Fuente: Zadoks y Schein (1979).

### Curva de progreso de la enfermedad

Una epidemia avanza progresivamente, tanto en el tiempo como en el espacio, con cuatro fases claramente reconocibles en procesos policíclicos, como el de la roya del cafeto, que se representan en una curva de progreso en las dos dimensiones (Figura 4).

La epidemia inicia con la infección de unas pocas hojas y no se observan síntomas hasta después de haber transcurrido el período de incubación, donde la producción de los primeros soros, que liberan nuevas esporas, confirmará la presencia de la roya. Durante esta fase, las infecciones solo se aprecian en menos de 10 de cada 100 hojas en el árbol.

### Fase de retraso (lag)

En esta fase, también denominada estacionaria, la enfermedad evoluciona lentamente (tasa de progresión de la enfermedad " $r$ " = 0,001 - 0,01).

### Fase logarítmica

En esta fase, la enfermedad comienza a crecer en una escala logarítmica (" $r$ " = 0,196 - 0,382).

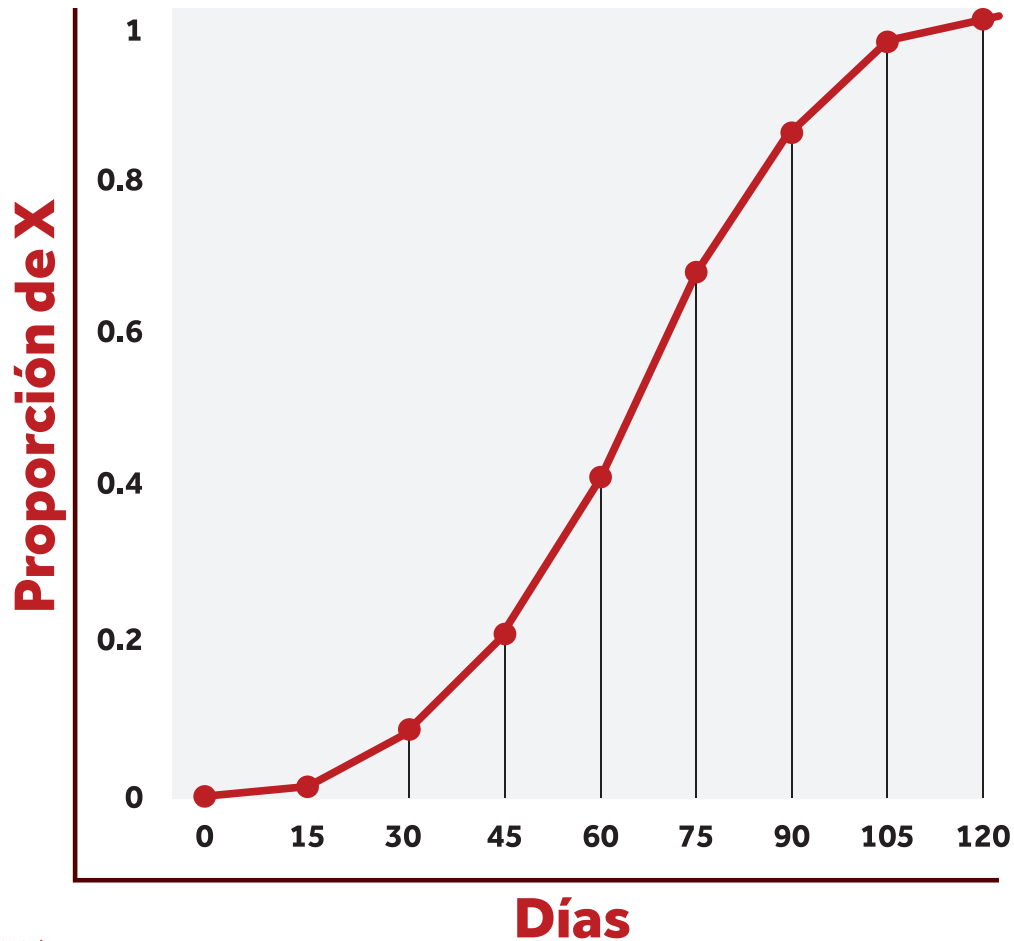
### Fase exponencial

La enfermedad crece exponencialmente (" $r$ " = >0,382 - 0,911).

### Meseta (plateau)

La enfermedad se detiene y no crece porque no hay más tejido vivo sano (" $r$ " = >971 - 0,999).

**Figura 4.** | Curva de progreso de la roya del café



Fuente: Zambolim (2020).

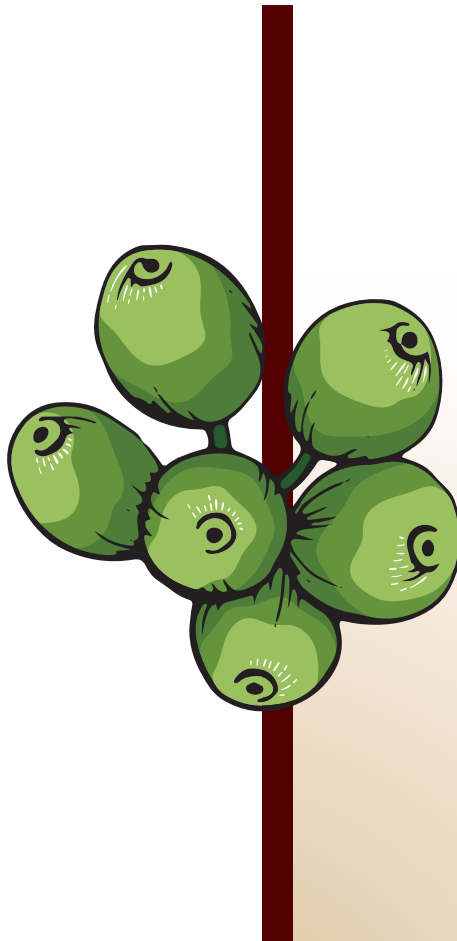
### Progreso de la enfermedad

La cantidad de inóculo residual (hojas con roya) presente en las épocas de mayor formación de follaje y de frutos determina la tasa de crecimiento de la epidemia y la severidad de esta. Los estudios de CENICAFÉ en cultivos bajo sombra indican que -en ausencia de control de la enfermedad y con condiciones climáticas propicias para el desarrollo de la epidemia- la enfermedad se desarrolla a una tasa diaria mayor de 0,19%, que si se mantiene

genera efectos negativos sobre la producción en el mismo año. Esto muestra que efectivamente existe una asociación entre los niveles de enfermedad (porcentaje de infección) y el efecto sobre la producción (daño económico), durante el desarrollo de la curva de la enfermedad (CENICAFÉ, 2011). En Brasil, donde la caficultura es a pleno sol, la epidemia en un año agrícola solamente causa daños al año siguiente.

C A P Í T U L O 4

# CONDICIONES CLIMÁTICAS Y MANEJO AGRONÓMICO INFLUYENTE



# CONDICIONES CLIMÁTICAS Y MANEJO AGRONÓMICO INFLUYENTE

Los factores ambientales tienen influencia positiva o negativa en el ciclo de vida del hongo que causa la roya del café. Entre los principales se pueden mencionar: temperatura, precipitación, humedad relativa, mojadura de la hoja, rocío y radiación solar. Estos se relacionan estrechamente con el desarrollo de la enfermedad y las funciones básicas del cultivo (mantenimiento, crecimiento y producción).

La nutrición de las plantas también es un factor muy importante en la severidad de la roya, también si son cafetales a plena exposición solar y bajo sombra en sistemas agroforestales (Virginio Filho y Astorga, 2015).

Para que el cultivo de café se desarrolle son necesarias condiciones agroecológicas, como precipitación anual entre 1.200 y 2.000 mm por año, períodos lluviosos y secos para el crecimiento, brote de follaje nuevo, floración y fructificación del cafeto. La cantidad y distribución de la lluvia necesaria para el cafeto depende de las propiedades de retención de humedad del suelo, la humedad atmosférica, la nubosidad y también, de las prácticas de manejo del cultivo (Fischersworing y Robkamp, 2001).

El café bajo sombra representa 74,4% de la caficultura del territorio centroamericano y propicia condiciones de microclima (humedad relativa, temperatura, luminosidad) óptimas para su cultivo que, sin embargo, pueden ser igualmente favorables para el proceso de infección de *Hemileia vastatrix* y el desarrollo de la roya si no se tiene un buen diseño y manejo.

El agua es esencial para la dispersión y germinación de las esporas del hongo. La existencia de una epidemia de roya del café requiere lluvia de baja intensidad. En regiones de manejo agroecológico bajo sombra, investigaciones han concluido que la dispersión de la roya por el aire es de poca o ninguna importancia y que las salpicaduras de la lluvia, son el agente principal, no solamente para la dispersión, sino también para la liberación de esporas.



## 4.1. Temperatura, precipitación, rocío, altitud

La temperatura está definida por la latitud y la altitud sobre el nivel del mar, aunque otros factores inciden en la temperatura, como la época del año y la nubosidad. Asimismo, la temperatura de un lugar está en función de dónde se registre: a plena exposición o bajo sombra. Este aspecto es determinante para entender el efecto de la temperatura en el desarrollo del hongo en cafetales con o sin sombra (Jaramillo y Gómez, 1989).

Las diferencias entre la temperatura ambiente en el cultivo y la temperatura de la hoja dependen principalmente de la cantidad de radiación solar que incide sobre las plantas durante el día. Con tiempo cálido y seco, se presentan mayores diferencias; con tiempo lluvioso y frío, las temperaturas del ambiente y de la hoja tienden a igualarse (Jaramillo y Gómez, 1989).

Según Orozco y Jaramillo (1978), las diferencias entre la temperatura de la hoja y la del aire dependen de la especie y del contenido de agua de la hoja. En *C. canephora*, las diferencias son mayores (1 °C a 3 °C) con respecto a *C. arabica*, lo que podría explicarse por las diferencias morfológicas, anatómicas y fisiológicas entre los tipos de hojas (área foliar, grosor de lámina, contenido de clorofila, tasa de transpiración, cantidad de agua en la hoja e intercambio de calor) (Zahner, 1968).

La temperatura óptima para el desarrollo de la roya del cafeto es de 22 °C-24 °C, la cual favorece el proceso de germinación de la uredospora, la penetración en los estomas y colonización de la hoja. El período de incubación de *H. vastatrix* se acorta en los meses con temperaturas favorables para la germinación. Entre más cercana esté la temperatura a los 22 °C, más probable es que se desarrolle la roya del café. La temperatura de los frutos fue similar a la registrada por las ramas (Jaramillo y Gómez, 1989).

El efecto del viento dentro del cafetal depende de la velocidad de este, la arquitectura de los árboles, el índice de área foliar, la distancia de siembra, las prácticas del cultivo y la orientación de los surcos. La velocidad del viento tiende a aumentar con la altura en forma logarítmica, debido a la disminución de la rugosidad de la superficie de la hoja y la menor fricción. Este factor contribuye a la dispersión de las uredosporas del hongo (Orozco y Jaramillo, 1978).

En café asociado con árboles, las variaciones diarias del microclima (temperatura y humedad) son menores que a pleno sol, debido a la disminución de la incidencia de radiación solar por la sombra ((Jaramillo y Gómez, 1989).

Las temperaturas del aire en el interior de un cafetal bajo sombra difieren con la altura sobre el nivel del suelo: más frías en los niveles inferiores. Las mayores diferencias se encuentran entre la superficie del suelo y un metro de altura. Estas diferencias son de hasta 4 °C en las horas de mayor radiación solar.

Entre 2-4 m de altura, las diferencias en temperatura son más pequeñas, 1,0 °C. a 1,5 °C. La temperatura del aire registrada a un metro de altura en medio de los árboles y dentro del follaje del cafeto es similar, aunque en las horas de mayor radiación en el interior del follaje, la temperatura del aire tiende a ser menor (Jaramillo, 1976).

La evaporación dentro del cafetal con sombra es menor en 50% con relación a la registrada en una estación meteorológica y la velocidad del viento es inferior (1,5-3 km/h) en relación con los cafetales a pleno sol (1,5-4 km/h). La mayor velocidad del viento proporciona condiciones favorables para el desarrollo de la enfermedad a pleno sol (Orozco y Jaramillo, 1978).

Estudios realizados por López (2010), sobre la incidencia y severidad de la roya en el cultivo del café bajo tres condiciones de lluvia, determinó que la mayor temperatura promedio del aire al sol alcanzó hasta 32 °C, mientras que en condiciones de sombra fue de 29 °C, entre las 10:00 a.m. y 2:00 p.m. Por la noche no se presentaron diferencias en cuanto a temperatura mínima entre plantas sembradas a pleno sol y bajo sombra.

En los dos años que tardó la investigación, se determinó que las temperaturas son menos altas en los días con lluvia y más cercanas a la temperatura óptima para la germinación de la uredospora. En las horas de la mañana, las temperaturas fueron semejantes en las plantas expuestas a pleno sol y las plantas bajo sombra en días con lluvia (>5 mm), mientras que con precipitaciones menores a 5 mm las temperaturas fueron más altas a pleno sol. Para los días sin lluvia, en el mismo período, se encontraron diferencias de hasta 2 °C en horas del mediodía (12:13 p.m.) y la tarde (3:43 p.m.). El estudio demostró que la temperatura promedio del aire es mayor en cafetales al sol en los tres momentos del día evaluados y los dos períodos de evaluación. Se concluye, entonces, que el café bajo sombra alcanza temperaturas más cercanas a la óptima para el desarrollo de la roya (López, 2010).

La disponibilidad de agua, también denominado balance hídrico, es otro factor que indirectamente influye en

el desarrollo de la enfermedad, por su influencia en el crecimiento de la planta de café. La producción de follaje nuevo, el crecimiento de las ramas, la floración y la maduración de los frutos se relacionan estrechamente con la disponibilidad de agua para la planta.

Asimismo, la cantidad de hojas se relaciona con la mayor o menor incidencia de la enfermedad, en función de la cantidad de tejido susceptible y disponible para la infección.

La precipitación es un factor muy importante en el desarrollo de una epidemia (incremento en intensidad y severidad) de roya del cafeto. La precipitación actúa como factor determinante en la germinación y dispersión de las esporas. Además, indirectamente, cuando la intensidad y frecuencia de las lluvias exceden determinados niveles, el contagio tiende a bajar, ya que la precipitación actúa a nivel de esporulación (diseminación y transporte). Esto explica por qué la epífita se desarrolla durante la época de lluvias (Gálvez *et al.* 1982; Santacreo *et al.* 1983; Holguín, 1985).

La sombra en el café intercepta parte de la lluvia (Imbach *et al.* 1989; Jaramillo y Chaves, 1998). Cuando la intensidad y duración de la lluvia es ligera (0,25-1,00 mm-hora), puede que el agua no llegue hasta las plantas de café bajo sombra.

Por el contrario, cuando la lluvia es intensa y larga, la sombra canaliza el agua, se forman grandes gotas (hasta de 9 mm de diámetro) que caen esparcidamente en el cafetal (Avelino *et al.* 2004). Se espera, por lo tanto, que en lluvias de baja intensidad la sombra contribuya a limitar la dispersión de esporas de la roya. Al contrario, las lluvias fuertes alientan la dispersión, por el impacto de las gotas grandes de agua en las hojas.

El cultivo del café requiere una humedad relativa de entre 70% y 85%. En cuanto a la roya, es poco lo que se sabe sobre el efecto de la humedad relativa en su desarrollo. Avelino y Rivas (2013) afirman que la humedad relativa y la mojadura de la hoja tienen un efecto sobre la germinación de la uredospora. Cuando hay alta humedad relativa en el ambiente, mejora la disponibilidad de agua y los tejidos (hojas, frutos y ramas) permanecen húmedos, esto favorece la germinación de la uredospora de la roya del café y la proliferación de la infección (Imbach *et al.* 1989; Jaramillo y Chaves, 1998).

El rocío es un fenómeno físico-meteorológico donde la humedad del aire se condensa en forma de gotas por la disminución brusca de la temperatura o el contacto con superficies frías. Se habla de rocío en general cuando hay condensación sobre una superficie, usualmente sobre la cubierta vegetal del suelo.

El punto de rocío es la temperatura a la que empieza a condensarse el vapor de agua contenido en el aire para transformarse en rocío, neblina u otro tipo de nube. Con temperaturas muy bajas se hace escarcha (López, 2010).

Cuando el aire se satura (humedad relativa igual al 100%), se llega al punto de rocío. La saturación se produce por un aumento de la humedad relativa con la misma temperatura o por un descenso de temperatura con la misma humedad relativa.



En el período entre las 6:00 p.m. y 6:00 a.m. en condición sin lluvia en café sembrado al sol, se da una estrecha relación entre la temperatura de la hoja y el punto de rocío (Figura 6), lo que favorece la germinación de las esporas de la roya del café (López, 2010). En condiciones del café bajo sombra regulada, la temperatura de la hoja está por encima del punto de rocío, lo cual reduce considerablemente la formación de rocío y en consecuencia, la posibilidad de germinación de las esporas del hongo. La presencia o ausencia de rocío en las hojas de café puede ser un aspecto determinante para que las esporas del hongo puedan o no desarrollarse (López, 2010).

Otro factor que influye en la infección con roya es la mojadura de la hoja del café. Avelino y Rivas (2013) indican que en condiciones de sombra el agua libre de las lluvias se conserva dentro de la plantación, aunque bajo sombra no hay rocío, que sería la única fuente de agua en días sin lluvia.

López (2010) señala que durante su investigación no se presentaron diferencias significativas de la mojadura entre la condición de plena exposición al sol y bajo sombra regulada durante las noches. Los datos obtenidos muestran que la mojadura de la hoja permaneció por encima de 15%, el umbral usado para determinar si las hojas permanecían mojadas o no. Durante el período de estudio se observó que entre las 8:43 a.m. y 3:43 p.m., se presenta una disminución en la mojadura de la hoja.

En condiciones de pleno sol sin lluvia se observaron porcentajes de humedad de la hoja por debajo de 15%. En todos los demás casos, la humedad de la hoja estuvo por encima de ese valor, razón por la cual esta mantenía humedad suficiente para que el hongo que causa la roya desarrolle su ciclo de vida en condiciones apropiadas.

## 4.2. Efecto de la sombra del café en los factores ambientales

De acuerdo con la información evaluada sobre los factores climáticos que inciden directa o indirectamente en el desarrollo de la roya del café, se concluye que el cultivo de café bajo sombra densa, con limitaciones de diseño y manejo, proporciona condiciones de microclima que propician el desarrollo de la enfermedad.

Bajo condiciones críticas de sombra, las hojas se mantienen mojadas por más tiempo, lo cual favorece la germinación de las esporas, las temperaturas son cercanas a las óptimas para la germinación y penetración del hongo y hay una mayor humedad relativa. Además, la sombra densa favorece una menor intensidad de luz que facilita la germinación de la espora. En condiciones soleadas, la mayor exposición a la luz inhibe la germinación de las esporas y las gotas de agua en la superficie de las hojas se evaporan más rápido (Rayner, 1961). Los estudios demuestran cómo la precipitación, altitud, temperatura, humedad relativa y mojadura de la hoja están estrechamente relacionados con el ciclo de vida, comportamiento y desarrollo de la roya del café. Por otro lado, es determinante establecer buenos diseños y manejos de sistemas agroforestales, en particular

combinando bien los árboles de servicio (leguminosas), maderables y frutales, garantizando en cada sitio el mejor equilibrio entre entrada de luz, temperatura, humedad, aporte de biomasa (materia orgánica) y fijación de nitrógeno al suelo.

A continuación se presenta el relato de Virginio Filho y Astorga (2015) acerca de estudio desarrollado sobre interacciones entre sistemas agroforestales y manejos:

En el año 2000, el CATIE estableció el “Experimento de café de largo plazo”, el cual combina sistemas de manejo desde el cultivo convencional de altos insumos hasta el manejo orgánico básico y varias combinaciones de sombra, incluyendo el manejo a pleno sol como testigo.

En el 2014, Pico Rosado culminó un estudio sobre los efectos de la sombra y el manejo del café en la incidencia, severidad, cantidad de inóculo y dispersión de *H. vastatrix* en Costa Rica, como parte del experimento mencionado. El objetivo principal del estudio fue esclarecer el efecto de la sombra sobre los procesos preinfecciosos, colonización, esporulación y dispersión de la roya del café.

Durante un año, el estudio evaluó tres niveles de sombra (*Chloroleucon eurycyclum* + *Erythrina poeppigiana*; *Erythrina poeppigiana*; pleno sol) combinados con tres intensidades de manejo agronómico (convencional con fungicida. Sin fungicida; orgánico). En el transcurso de la investigación se analizó el porcentaje de hojas enfermas, porcentaje de área enferma, cantidad de inóculo producido, área bajo la curva de progreso de la enfermedad (en hojas enfermas y área enferma), porcentaje de microparasitismo por *Lecanicillium lecanii*, porcentaje de crecimiento y defoliación y carga fructífera del hospedero (planta de café).

Los resultados permitieron dar respuesta a las interrogantes planteadas o bien, reconfirmar resultados de investigaciones previas. Las más destacados se presentan a continuación:

1. **Baja carga fructífera (baja producción) no favorece la epidemia de la roya.**
2. **La sombra densa con árboles de copa abierta (cobertura de sombra mayor a 40%) favorece la frecuencia de mojadura de la hoja, la temperatura óptima y una humedad relativa más alta. Todo favorece la germinación de las esporas del hongo.**
3. **A pleno sol, el crecimiento de hojas del café fue mayor que a la sombra. Este hecho pudo haber causado una dilución de la enfermedad en condiciones de pleno sol y dar la impresión de que bajo sombra la incidencia es mayor.**
4. **La sombra favorece el desarrollo del enemigo natural (hiperparásito) de la roya, el hongo *Lecanicillium lecanii*. La mayor actividad reguladora de este hongo se dio en la segunda parte de la época lluviosa, cuando a roya era abundante. Este indica que la sombra es hábitat de microorganismos benéficos y que estos contribuyen al control de plagas o enfermedades de forma natural, pero se desconoce el porcentaje de control.**

5. En el período de mayor carga fructífera en el 2014, la intensidad de la epidemia se revirtió; es decir, hubo una mayor incidencia de roya en condiciones de exposición solar. Como lo han explicado otros investigadores, a mayor carga fructífera hay más roya del café (Avelino *et al.* 2004; Avelino *et al.* 2006; López *et al.* 2012).
6. El manejo convencional medio con fungicidas controla la roya del café al inicio de la epidemia, pero cuando el fungicida deja de hacer su efecto, la epidemia aumenta. Por el contrario, el manejo orgánico no controla la roya al inicio, pero sí al final de la epidemia, debido a una mayor presencia del regulador natural de la roya del café, *L. lecanii* (Pico Rosado, 2014).

## Figura 5. Controladores naturales de la roya del café



*L. lecanii* (hongo blanco sobre la roya) y *Mycodiplosis sp.* (larva de mosca color café sobre la roya). Fotos: Shaline Fernández. Fuente: Virgínio Filho y Astorga (2015).

### 4.3. Nutrición de la planta

La nutrición consiste en el conjunto de procesos mediante los cuales las plantas toman las sustancias del medio exterior y las transforman en materia alimenticia y energía. El principal elemento nutritivo que utilizan es el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que lo toman del aire mediante el proceso de fotosíntesis. El carbono (C) es el constituyente principal de los alimentos que producen las plantas para satisfacer las necesidades nutricionales y la producción del grano.

La nutrición se realiza mediante el proceso de absorción de  $\text{CO}_2$  y de minerales en solución (con agua) que se encuentran en el suelo. Los nutrientes son absorbidos por las raíces y transportados por el xilema (el sistema vascular) de las plantas hasta las hojas, donde son utilizados en la elaboración de las sustancias alimenticias que necesitan para realizar las funciones de mantenimiento, crecimiento, producción de frutos y semillas.

En las hojas se realiza la fotosíntesis. La planta elabora aminoácidos y azúcares esenciales para la formación de los frutos. En la parte inferior de las hojas, los estomas (pequeñas ventanitas) permiten la evaporación de una parte del agua absorbida, la liberación de oxígeno ( $\text{O}_2$ ) y la absorción de  $\text{CO}_2$ . En la parte interna del tallo está el xilema, por donde circula el agua y los nutrientes desde la raíz hasta la parte aérea. En la parte exterior del tallo se encuentra el floema, encargado de transportar los carbohidratos producidos en la fotosíntesis hasta las raíces.

Los elementos nutritivos indispensables para la vida de una planta se agrupan en dos categorías: los macronutrientes y los micronutrientes. Para sus funciones vitales una planta necesita una mayor proporción de macronutrientes y una menor cantidad de micronutrientes; ambos son indispensables.

Entre los primeros están el hidrógeno (H), carbono (C), oxígeno ( $\text{O}_2$ ), nitrógeno (N), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), fósforo (P) y azufre (S). Los segundos, también conocidos como oligoelementos, son el cloro (Cl), hierro (Fe), boro (B), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni) y molibdeno (Mo) (Mengel y Kirkby, 2001).

Los elementos esenciales de las plantas se dividen en cuatro grupos (Mengel y Kirkby, 2001): Grupo 1: C, H, O, N, S. Se absorben en forma de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^-$ ,  $\text{N}_2$ ,  $(\text{SO}_4)_2^-$ ,  $\text{SO}_2$  en forma de iones de la solución del suelo y gases. Grupo 2: P y B, se absorben de la solución del suelo en forma de fosfatos y ácido bórico o borato. Grupo 3: K, Mg, Ca, Mn y Cl, son absorbidos como iones de la solución del suelo. Grupo 4: Fe, Cu, Zn, Mo, se absorben a partir de iones o quelatos de la solución del suelo.

Para que la planta de café realice sus funciones los macro y micronutrientes deben estar disponibles en el suelo en las cantidades apropiadas. Para determinar la concentración o disponibilidad de los elementos en el suelo se requiere hacer un análisis químico de este en el suelo en el laboratorio, donde se determina la cantidad de cada uno de los elementos disponibles.

Las plantas de café extraen constantemente elementos del suelo, ya que fotosintetizan todos los días. Por esta razón, es necesario realizar los análisis de suelo periódicamente. Lo recomendable cada uno o dos años. En caso de disponibilidad limitada de alguno(s) elemento(s), se debe proporcionar por medio de la fertilización. Los programas de fertilización para reponer los nutrientes a las plantas son elaborados en función de la disponibilidad de nutrientes en el suelo (ANACAFÉ, 2014).

Igual o más importante que el análisis de suelo es el análisis de los contenidos químicos de las hojas de café. El análisis foliar informa el estado nutricional de la planta y brinda evidencias de si efectivamente los nutrientes disponibles en el suelo o de aplicaciones foliares están siendo asimilados por la plantación.

Un estudio del desequilibrio nutricional en las hojas del café, encontró que durante la fase de crecimiento



Tomado de: <https://rehagro.com.br/blog/wp-content/uploads/2018/07/ferrugem-cafeeira.jpg>

de los frutos se producen grandes reducciones en las concentraciones de N, P y K en las hojas, con valores por debajo de los adecuados (Acuña *et al.* 1992). Esto podría deberse a que 80% del N, P, K, Ca y Mg se acumula en los frutos durante los primeros 120 a 150 días desde el inicio de la floración (Silva *et al.* 2018). Los niveles de Ca y Mg fueron bajos después de la floración, pero aumentaron paulatinamente a medida que los frutos comenzaron a madurar (Chaves y Sarruge, 1994).

Según Correa *et al.* (1986), la mayor demanda de nutrientes por los frutos se presenta en los años de mayor producción, mientras que en los años de menor producción la demanda por nutrientes es mayor en el área vegetativa (ANACAFÉ, 2014).

Un estudio sobre la aplicación de N, P y K encontró diferencias relevantes y positivas con el porcentaje de hojas atacadas por la roya. Los tratamientos que recibieron la dosis mayor de K mostraron la menor infestación en comparación con aquellos que no recibieron el nutriente. Por otro lado, una alta concentración de N en las hojas aumenta la severidad de la roya debido a que *H. vastatrix* es un patógeno biótrofo (Silva *et al.* 2018).

#### 4.4. Carga fructífera

En el cultivo del café, al igual que en los cultivos perennes en general, se presenta una producción bienal (bienalidad); es decir, las plantas producen mayor cantidad de frutos un

año y al siguiente disminuye la producción. Esto se debe a que la planta tiene que recuperar las reservas alimenticias que utilizó en el período de mayor producción.

Al estudiar el proceso de bienalidad productiva del café y su relación con los ataques de la roya del café, Chaves (2013) encontró que se presenta un desequilibrio nutricional en las plantas con fuerte producción, lo cual podría ser una de las causas que expliquen la mayor susceptibilidad a la enfermedad. Este desequilibrio podría originarse por la migración de algunos nutrientes desde las hojas hacia los frutos.

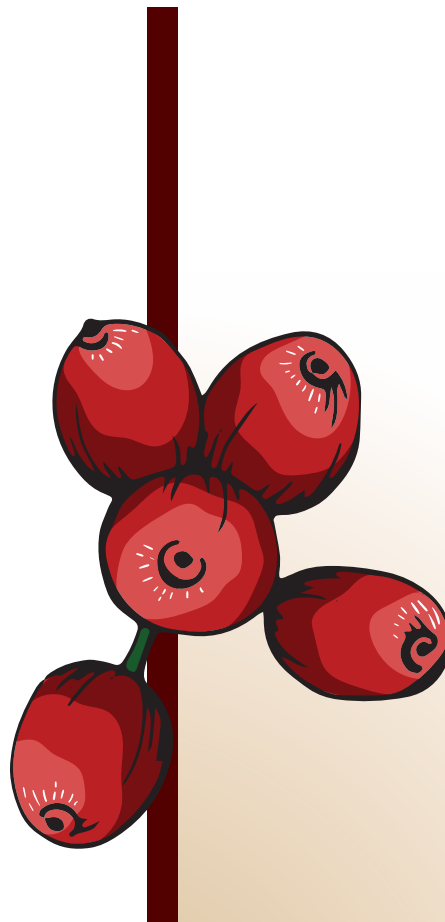
La predisposición de las hojas al ataque de la roya del café varía en función de la producción (carga fructífera). Un estudio realizado por Avelino *et al.* (1993) en Guatemala corroboró la existencia de una relación positiva altamente significativa (probabilidad 0,01%) entre la carga fructífera del café (evaluada después de la caída fisiológica de los frutos) y la infección posterior que sufrieron las plantas. 50% de la variabilidad de la infección observada fue atribuida a la carga fructífera.

Los ataques de roya al café tienden a ser de mayor severidad conforme aumenta la producción. En un ensayo en Brasil, Miguel *et al.* (1977) evaluaron el porcentaje de roya en parcelas de café con diferentes productividades, con y sin aplicación de fungicidas a base de cobre (cúpricos). Los resultados mostraron que en todos los casos el fungicida redujo el porcentaje de infección, aunque siempre fue considerablemente mayor en las parcelas de más alta productividad.



C A P Í T U L O 5

# RAZAS DE ROYA DEL CAFÉ



# RAZAS DE ROYA DEL CAFÉ



La especie *C. arabica*, la cual es dominante en Latinoamérica, es susceptible a plagas y enfermedades. Esta especie proviene de semillas como Típica y Bourbon, que han dado origen a otras variedades por medio de mutaciones naturales o cruzamientos espontáneos e inducidos, como el Caturra, Mundo Novo, Catuai, Pache, Villa Sarchí, Pacas, Pacamara, Maragogipe, etc. Esta situación explica la estrecha base genética de todas ellas, característica que no les permite tener tolerancia a ciertas plagas o resistencia a ciertas enfermedades, incluida la roya del cafeto (*Hemileia vastatrix*), a la cual son susceptibles (ANACAFÉ, 2019).

Sobre las variedades de introgresión (Catimor/Sarchimor) se conoce que en 1917 fue encontrado un híbrido natural producto de la reproducción sexual natural entre (*C. arabica* L. x *C. canephora*), en la isla de Timor, el cual recibió el nombre de 'Híbrido de Timor'. Este presenta las características morfológicas y agronómicas de *C. arabica* y la resistencia a la enfermedad de *C. canephora*. Este híbrido natural es utilizado en los programas de mejoramiento genético para desarrollar variedades resistentes a la roya del café (Cristancho *et al.* 2007).

El cruce entre el Híbrido de Timor (832/1) y el mutante natural Caturra Rojo dio origen a la variedad Catimor, la cual presenta resistencia a la roya. El Catimor es el nombre bautizado en la Universidad Federal de Viçosa y el Sarchimor es el cruzamiento entre la variedad Vila Sarchí x Híbrido de Timor (832/2).

El Híbrido de Timor ha sido ampliamente utilizado por su resistencia a *H. vastatrix*, derivada de cuatro genes mayores (SH 6, 7, 8, 9) de resistencia de *C. canephora*. Por otro lado, con el fin de conferirle vigor a la variedad Catimor, se llevó a cabo un retrocruce entre Catimor y la variedad Catuai. Además, para obtener variedades resistentes a la roya, la antracnosis de los frutos y los nemátodos, en Brasil se desarrolló la variedad Icatu, la cual es producto del cruzamiento artificial entre *C. arábica* tetraploide y *C. canephora* tetraploide (Berthouly, 1997). En 1985 en Kenia, se liberó el híbrido Ruiru 11, el cual presenta resistencia a la roya, la antracnosis del fruto y tiene una alta producción y calidad (Agwanda, 1999).

## 5.2. Conservación de germoplasma y mejoramiento genético

Existen más de 130 especies del género *Coffea*, pero únicamente tres de ellas son cultivadas comercialmente en el mundo: *C. arabica* L. ( $2n=4x=44$ ), *Coffea canephora* P. ( $2n=2x=22$ ) y *Coffea liberica* Bull. ( $2n=2x=22$ ). Estas presentan limitaciones para su mejoramiento genético por su carácter perenne y diferencias de nivel de ploidía e incompatibilidad (Villalta y Gatica, 2019).

El mejoramiento genético del café y la obtención de un nuevo cultivar con base en las metodologías tradicionales es un proceso que requiere alrededor de 16 años (Melese, 2016) y mucho esfuerzo. Comprende varios pasos, como la selección de las especies o variedades a utilizar, su consiguiente hibridación y evaluación de la progenie resultante, en algunos casos retrocruces y cruces interespecíficos (Orozco y Schieder, 1982). El mejoramiento, por medios convencionales, es un proceso largo y difícil de lograr, debido al prolongado ciclo de vida de las especies perennes, la heterogeneidad y extenso período de evaluación requerida (Echeverría, 2019).

La colección de germoplasma del café es clave para este desafío. El CATIE posee la más importante colección de café del mundo, desde el año 1949, la cual se encuentra bajo dominio público y ha permitido beneficiar a los países productores de la región de Mesoamérica. La distribución de los materiales en la región impacta positivamente a los investigadores y productores, y facilita el mejoramiento genético, producción, calidad y conocimiento científico del cultivo. La colección de germoplasma es un gran potencial para los retos de la caficultura en la mejora genética, selección y creación de progenitores.

La colección internacional del CATIE está compuesta por aproximadamente 2.000 accesiones de importancia para la diversidad genética (800 de ellas son materiales silvestres colectados en su origen [Etiopía, Kenia, Tanzania], donde 900 accesiones antiguas son derivadas del Typica y Borbón, así como variedades introgresadas de *C. canephora* [selecciones y mutantes]). Hay un grupo de 180 híbridos desarrollados en el CATIE. La otra sección es la de "Diferenciales". Son 43 accesiones de materiales que presentan resistencia a ciertas razas de roya. Los "diferenciales" reaccionan de manera diferente en presencia del agente causal y se ha logrado identificar ciertas razas (Cordero *et al.* 2019).

Desde 1991 en Centroamérica se desarrolla un programa de mejoramiento genético convencional de café, en el cual participan varias instituciones, tales como PROMECAFE, los Institutos de Café de los países centroamericanos, instituciones nacionales de investigación en café, la cooperación francesa (CIRAD, ORSTOM, MAE) y el CATIE.

Dicho programa tiene como finalidad cruzar variedades tradicionales de América Latina con individuos silvestres de Etiopía y Sudán, para recuperar una fuente de variabilidad y posteriormente, propagar a gran escala los híbridos F1 de *C. arabica* obtenidos. La importancia de propagar dichos híbridos se basa en las características de resistencia a la roya, tolerancia a nemátodos, gran vigor y alta productividad (Albarrán, 1999).

Mediante el PROGRAMA UE-PROCAGICA-IIICA/CATIE/CIRAD, el CATIE capacitó a personal técnico de los países de Mesoamérica sobre aspectos básicos del mejoramiento genético de café -lo que dio origen a los híbridos F1 y otras variedades comerciales-, así como, en las técnicas de propagación clonal de café desarrolladas por el CATIE, de manera que puedan replicar el modelo en sus propios países con las variedades de interés.

### 5.2.1 Mejoramiento genético asistido por marcadores moleculares

Los marcadores moleculares se han utilizado en café para evaluar la diversidad genética de las especies y construir mapas genéticos (De-Kochko *et al.* 2010), así como para la evaluación de introgresión, determinación del modo de herencia de enfermedad y resistencia a plagas, evaluación de calidad de bebida y análisis e identificación de loci de rasgos cuantitativos (QTL), los cuales tienen implicaciones claves para el mejoramiento genético (Melese, 2016).

El desarrollo de la selección asistida por marcadores (MAS) proporciona una alternativa para el mejoramiento genético convencional de café (Lashermes *et al.* 2000). El principio general de MAS es el uso y la selección de un marcador molecular identificado vinculado a un gen para un rasgo específico, en lugar de la selección del rasgo mismo y así reducir el número de retrocruzamientos requeridos (Lashermes *et al.* 2000).

### 5.2.2 Mejoramiento genético no convencional en café

Los principales objetivos del mejoramiento genético no convencional a través del uso de la técnica de ingeniería genética en el café son introducir nuevos rasgos en genotipos de élite, desarrollar nuevos cultivares con características deseables, como resistencia a plagas y a enfermedades, resistencia a herbicidas, tolerancia a sequía y heladas, y mejorar la calidad de la taza (Mishra y Slater, 2012).

La transformación genética de café tiene dos aplicaciones principales: 1) una herramienta para la validación de la función del gen y 2) la producción de cultivos transgénicos con características agronómicamente importantes (Mishra y Slater, 2012). Además, tecnologías como los marcadores moleculares, la multiplicación in vitro, la genómica, la proteómica y la metabolómica, deberían complementar los esfuerzos de mejoramiento convencional para acelerar el mejoramiento genético del café (Mishra y Slater, 2012).

En el caso del hongo *H. vastatrix*, su alta abundancia, capacidad de transferencia de los factores de virulencia, mutaciones y ciclos cortos posibilitan la aparición de diversidad patogénica que fácilmente sobrepasa las barreras genéticas de su hospedero café (Silva *et al.* 2018; Zambolim y Caixeta, 2018). Debido a esto, el desarrollo de nuevas técnicas para el mejoramiento debe ser explorado, validado y continuamente mejorado (Echeverría, 2019).

## 5.3 Evolución de las razas de roya

Los estudios realizados con *H. vastatrix* han permitido demostrar que el hongo ha evolucionado y desarrollado variantes genéticas (razas del hongo), las cuales atacan de forma diferenciada a las especies y variedades de café, dependiendo de los genes de resistencia de la planta y los genes de virulencia del hongo (Flor 1945, 1957).

Los primeros trabajos sobre caracterización de razas de *H. vastatrix* fueron realizados por Mayne (1932) en la India. Él encontró las razas 1, 2, 3 y 4, que corresponden a las razas II, I, IX y VIII, respectivamente, de la colección de *H. vastatrix* del Centro de Investigación de la Raza del Café (CIFC, por sus siglas en portugués), el cual se estableció en el año 1955 para el estudio de la roya del café y el desarrollo de variedades resistentes.

El CIFC ha caracterizado más de 50 razas de roya a partir de 3.500 muestras recolectadas en los diferentes países productores de café. La mayor diversidad de razas se encuentra en países de Asia, principalmente en la India (Várzea, 2013; Barquero, 2013).

En todos los países productores de café predomina la Raza II y América no es la excepción. Este hecho se atribuye a la uniformidad genética de los cultivares comerciales (Caturra, Catuai, Borbón, Mundo Novo) de *C. arabica*, cultivados en estas regiones con gran distribución y susceptibilidad a esta raza. El surgimiento de otras razas se atribuye a la plantación de variedades resistentes, lo que provoca presión de selección sobre el patógeno (Rodríguez *et al.* 1975; Zambolim *et al.* 2005).


La caracterización de las razas fisiológicas de *H. vastatrix* se basa en las diferencias fenotípicas observadas en la interacción entre este hongo y los clones de las series diferenciadoras de café. La interacción diferencial se debe a variaciones patotípicas en la población del patógeno. La mutación genética ha sido relatada como la principal causa de variación de nuevas razas (Várzea y Marques, 2005).

### 5.3.1. Teoría de gen a gen (interacción co-evolutiva entre huésped y patógeno)

El patógeno, en su lucha por la supervivencia, inicia el proceso de adaptación a las nuevas condiciones y evoluciona para atacar a las variedades resistentes y así continuar con su ciclo de vida (Várzea, 2013). Flor (1945, 1957, 1971) fue el primer científico en estudiar el modelo genético que explica la asociación coevolutiva entre una planta y un hongo. Su teoría es: "Para cada gen dominante de resistencia en el huésped (R) hay un gen dominante para avirulencia (V) en el patógeno" (Tabla 3).

### Tabla 3.

Reacción fenotípica da interacción de los genes en el patógeno y en el huésped (Flor 1945, 1957, 1971)

Gen en el patógeno	Gen en el huésped	
	R	r
V	V-R (Resistente -HR)	V-r (Susceptible)
V	v-R (Susceptible)	v-r (Susceptible)

Fuente: L. Zambolim, Universidad Federal de Viçosa, Brasil. Adaptación.  
 V – gen dominante para avirulencia (non patogénico).  
 v – gen recesivo para virulencia (patogénico).  
 R – gen dominante para resistencia (resistente).  
 r – gen recesivo para susceptibilidad (susceptible).  
 HR – reacción de hipersensibilidad.

### Tabla 4.

Reacción fenotípica de la interacción entre los genes complementares en dos locus diferentes del patógeno y huésped. Tabla basada en la teoría de Flor 1945, 1957, 1971

Gen en el patógeno	Gen en el huésped	Reacción
V1V2	R1R2	Resistente (R)
V1V2	R1r2	Resistente (R)
V1V2	r1R2	Resistente (R)
V1V2	r1r2	Susceptible (S)
V1v2	R1R2	Resistente (R)
V1v2	R1r2	Resistente (R)
V1v2	r1R2	Susceptible (S)
V1v2	r1r2	Susceptible (S)
v1V2	R1R2	Resistente (R)
v1V2	R1r2	Susceptible (S)
v1V2	r1R2	Resistente (R)
v1V2	r1r2	Susceptible (S)
v1v2	R1R2	Susceptible (S)
v1v2	R1r2	Susceptible (S)
v1v2	r1R2	Susceptible (S)
v1v2	r1r2	Susceptible (S)

Fuente: L. Zambolim, Universidad Federal de Viçosa, Brasil. Adaptación.

Debido a la especificidad de la interacción, la resistencia solamente es expresada cuando combinaciones V1-R1 o V2-R2 ocurrieren en el mismo sistema parásito-huésped.

La teoría de Flor (1956, 1971) encaja perfectamente con la interacción café-*Hemileia*, donde los genes dominantes de la virulencia del patógeno son inferidos por los genes de resistencia (dominantes) del café (Noronha y Bettencourt, 1967).

El hongo de la roya del café contiene genes de virulencia, denominados con la letra v y un número (ejemplo v5). Se ha encontrado que para cada gen de resistencia R en el arbusto de café hay un gen dominante de avirulencia V en el patógeno (Tablas 3 y 4). Esto se conoce como la relación gen-gen (Flor, 1945, 1957, 1971).

Basado en la teoría de Flor (1945, 1957, 1971), el CIFC hizo una modificación para determinar las razas de *H. vastatrix*. El CIFC consideró el gen era recesivo (v1) para la virulencia en el patógeno y que el gen de resistencia en la planta huésped como dominante (R). De esta forma, la teoría de Flor fue modificada en el CIFC para identificar razas: "Por cada gen de virulencia recesivo en el patógeno hay un gen de resistencia dominante en la planta huésped".

En el caso del CIFC, la raza II que porta el gen v5 (virulento recesivo) es patógena para la planta de café Caturra, que porta el factor de resistencia SH5 (dominante para la resistencia).

La diferenciación de las razas fisiológicas de *H. vastatrix*, se realiza actualmente utilizando clones diferenciadores de café con distintos genes (SH) dominantes. La reacción de hipersensibilidad o incompatible (HR) se utiliza para identificar razas fisiológicas que se caracterizan por presentar puntuaciones cloróticas y a veces, necróticas, en el sitio de la penetración del hongo.

Hasta los años 2010-2012, la caficultura centroamericana estaba establecida por cultivares altamente susceptibles a *H. vastatrix*, como Caturra, Mundo Novo, Bourbon, Pacas, Catuai y Pacamara. En los años posteriores, se introdujeron cultivares nuevos producto del cruce entre Caturra CIFC 19/1 y HDT CIFC 832/1, y entre Villa Sarchí y HDT CIFC 832/2.

Después de recibir las semillas, todos los países centroamericanos comenzaron la propagación de cultivares con genes de resistencia oriundos del HDT. Los principales cultivares actualmente establecidos en Centro América son Lempira e IHCAFE90, Costa Rica 95, Parainema y Colismor 8667. Otras denominaciones de Catimores y Sarchimores, así como los derivados del cultivar Icatú, también se están cultivando en la región.

### 5.3.2 Genes de resistencia del café y virulencia de la roya

Desde hace ya algunos años se ha venido trabajando en la resistencia a la roya por parte de las plantas de café. Actualmente se conocen nueve genes responsables de la resistencia a esta enfermedad, los cuales se denominan con la sigla SH (susceptible a *Hemileia*) y un número que corresponde al gen.

Diversos investigadores señalan que en las especies de café se encuentran genes de resistencia a la enfermedad. Bettencourt y Noronha (1971) reportan que los genes de resistencia SH1, SH2, SH4 y SH5 provienen de la especie *C. arabica*, los genes SH6, SH7, SH8, SH9 de la especie *C. canephora*, y el gen SH3 de la especie *C. liberica*. (tabla 5)

Los genes de *C. arabica* que se conoce son SH1, SH2, SH4 y SH5. Las variedades susceptibles Bourbon, Typica, Caturra, Mundo Novo, Catuai y Pacas contienen el gen SH5.

Lo que sí se sabe es que estas variedades son susceptibles a la raza II de la roya, la cual contiene el gen de virulencia v5. Las variedades mencionadas contienen el gen de susceptibilidad SH5, lo que explica por qué son susceptibles a la enfermedad.

El gen SH3 oriundo de *Coffea liberica* es resistente a la raza VII de *H. vastatrix*.

A medida que la combinación de genes de resistencia presentes en las variedades de café se incrementa, las razas de la roya van desarrollando más genes de virulencia y al cabo del tiempo, logran atacar los cafés. Esto se conoce como 'quiebre' de la resistencia; es decir, el hongo evoluciona y logra infectar los arbustos de café que originalmente eran resistentes.

El híbrido natural entre *C. arabica* y *C. canephora* hallado en la isla de Timor en 1917 abrió la posibilidad de incorporar nuevos genes de resistencia en variedades susceptibles a la roya del café (Caturra, Villa Sarchí, Catuai, Mundo Novo). Este híbrido incorporó cuatro genes de resistencia que provienen de *C. canephora* (SH6, SH7, SH8 y SH9).

Las descendencias 832, 1343 y 2570 del Híbrido de Timor heredaron los genes de resistencia de *C. canephora*. En consecuencia, las variedades desarrolladas a partir del cruce con las variedades Caturra, Villa Sarchí y Catuai –conocidas como catimores, sarchimores y cavimores, respectivamente– contienen ocho genes de resistencia: cuatro heredados de *C. arabica* y cuatro de *C. canephora*. Esto ha abierto nuevas posibilidades para obtener una resistencia más duradera contra la roya del café (Castro *et al.* 2013).

Las razas de *Hemileia vastatrix* de la India, caracterizadas en el CIFC\*, atacan el HDT 832/1 y HDT 832/2, las cuales son base para todo el programa de mejoramiento basado en la resistencia a la roya. Por la razón mencionada, la durabilidad de las variedades está amenazada. Además, se han caracterizado 8 genes de virulencia (v1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9) que les permite atacar también a la gran mayoría de los cultivares de Arábica. Los progenitores de todas las variedades resistentes actualmente cultivadas ya son susceptibles en la India.



## Tabla 5.

### Identificación fuentes de genes de resistencia de *Coffea* a *Hemileia vastatrix*

<i>C. arabica</i>	SH: 1, 2, 4, 5
<i>Coffea liberica</i>	SH: 3
<i>Coffea canephora</i> var. Robusta y Conilon)	SH: 6, 7, 8, 9
Híbrido de Timor ( <i>C. arabica</i> x <i>C. canephora</i> ) híbrido natural	SH: 6, 7, 8, 9

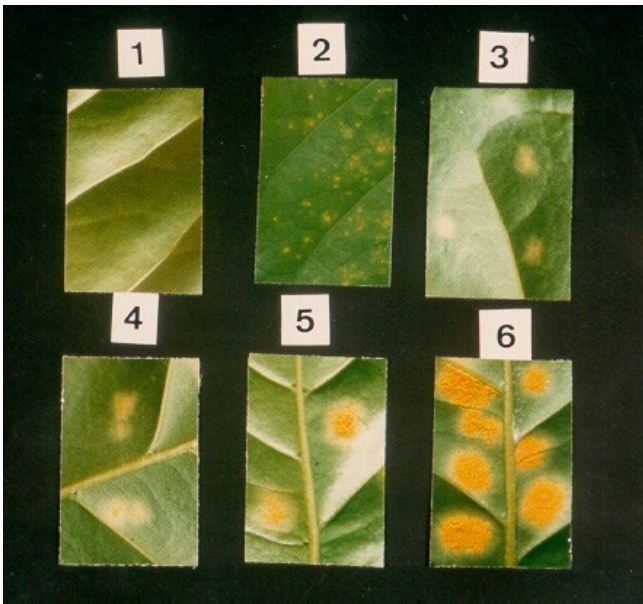
#### 5.4 Métodos para la determinación de razas de roya

Existen diferentes métodos para la determinación de las razas de roya. Una de ellas se realiza inoculando aislados monopustulares de roya en diferentes clones diferenciadores o híbridos interespecíficos de *Coffea canephora* x *C. arabica*. Cada planta de la serie diferenciadora tiene genes de resistencia a *H. vastatrix*, distintas una de las otras. A continuación se enumera los pasos para su realización según Zambolim y Caixeta (2018):

1. Recolectar muestras de hojas, preferentemente de plantas resistentes, que presentan pústulas con uredosporas en bolsas de papel identificadas.
2. Transportar inmediatamente las hojas con pústulas en bolsas de papel al laboratorio dentro de una hielera.
3. Seleccionar en el laboratorio pústulas aisladas con uredosporas, removerlas de las hojas utilizando pincel e inocular en plantas de café Caturra con tres meses de edad para buscar la multiplicación del aislado monopostular. Las plantas de Caturra deben estar bien nutridas con nitrógeno.
4. Tomar en cuenta que el número de pústulas por muestra que se va a multiplicar debe ser 10 máximo en cada muestreo.
5. Continuar multiplicando las esporas, inoculando en Caturra con tres meses de edad hasta obtener una cápsula de gelatina, que contenga aproximadamente 100 mg de esporas.
6. Almacenar las esporas en nitrógeno líquido o en congelador -80 °C.
7. Considerar que las esporas pueden ser almacenadas 2 a 3 meses en desecador en nevera a 5 °C con humedad relativa a 50% (Zambolim y Chaves, 1974).
8. Antes de la inoculación en los clones diferenciadores realizar la prueba de germinación de las esporas en agar-agar al 2%. Si la germinación es superior a 30%, proceder a la inoculación en los clones diferenciadores de razas.
9. Inocular en los clones diferenciadores de razas fisiológicas con el método del pincel o suspensión de esporas, empleando el método de disco de hojas de 1,0 cm<sup>2</sup> de diámetro. En cada caja germinadora (20 x 20 x 3 cm) empaquetar 16 discos de hojas con una rejilla de nailon húmeda, en la parte inferior y cerca de una rejilla de acero inoxidable. Depositar los discos de hoja sobre la tela de nylon.
10. Incubar la caja cerrada y etiquetada en la cámara con temperatura alrededor de 22 °C en el obscuridad. Cada 6 horas, humedecer la tela de nylon para mantener la humedad.
11. Después de 72 horas, retirar las cajas germinadoras de la cámara y mantenerlas en una cámara de incubación con una temperatura de 22 °C con 12 horas de luz y 12 horas de obscuridad, hasta la lectura de la reacción final.
12. Después de 20 días, iniciar la lectura de la reacción positiva o negativa. Si surgieron esporas en las lesiones, la reacción es positiva (susceptible); si no han aparecido esporas en la lesión, la reacción es negativa (resistencia). La lectura final, sea positiva (reacción susceptible - S) o sea negativa (reacción de resistencia - R) final, debe realizarse 45 días después de la inoculación.
13. Luego, utilizar la escala de evaluación simplificada de Resistente a Susceptible. La escala varía del número 1 al 6 (del 1 al 3 muestra ausencia de uredosporas, lo que caracteriza la resistencia vertical (RV) reacción R y del 4 al 6 existe la presencia de uredosporas, lo cual caracteriza grados de la resistencia horizontal (RH) reacción S.

## Figura 6.

### Escala para la evaluación de reacción a la roya



Fuente: Zambolim *et al.* (2005).

La escala simplificada para la evaluación de reacción a la roya: RESISTENCIA (R) - Nota 1, 2, 3 - ausencia de uredosporas (RV) reacción R; SUSCEPTIBILIDAD (S) - Nota 4, 5 y 6 - presencia de uredosporas (RH) reacción S. La presencia de esporas es lo que determina el rompimiento de resistencia. La medición de severidad puede ser calculada por área de lesión con esporas. Sin embargo, es más práctico el número de pústulas promedio por hojas (por ejemplo, más de 10 pústulas por hoja es muy alta severidad).

El hongo presenta varios genes de avirulencia (V) que delatan su presencia si son detectados por los correspondientes genes de resistencia (R) presentes en café por la teoría de Flor (1942, 1945, 1971).

En caso de la variedad Caturra, solo posee el gen de resistencia SH5. Es atacada por el gen correspondiente de virulencia v5 de la raza II (sistema CIFC).

En la variedad Colombia y Castillo® existen varios genes de resistencia que pueden detectar la presencia del patógeno y generan una reacción de HR - hipersensibilidad para algunas razas y susceptibilidades a otras.

El patógeno *H. vastatrix* tiene una dependencia total de la planta de café, debido a que este género es el único hospedero conocido y solo puede alimentarse de células vivas de la hoja para crecer y reproducirse. La capacidad de realizar este parasitismo depende de una compleja interacción entre estos dos organismos. Para que una infección sea exitosa y culmine en enfermedad, el hongo debe desactivar señales químicas propias y así pasar

inadvertido a los mecanismos de resistencia que tenga la planta.

Para el caso de la roya del cafeto, hasta el momento se reconocen al menos señales del patógeno, denominadas genes dominantes de avirulencia, que son detectadas por otros mecanismos en el hospedero, conocidos como genes de resistencia.

Las diversas combinaciones de los genes de avirulencia que pueda tener un aislamiento de *H. vastatrix* determinan el rango de posibles genotipos de café donde pueden causar la enfermedad. A estos aislamientos del hongo con combinaciones específicas se les conoce como Razas Fisiológicas. Por su parte, a los genotipos de café con diferentes combinaciones conocidas de genes de resistencia se les denomina "Diferenciales".

La raza más sencilla y que tiene mayor dispersión en todo el mundo es la raza II, que presenta el gen de virulencia v5. La variedad Caturra presenta el gen SH5. En este grupo se encuentran la mayoría de las variedades tradicionales cultivadas de la especie *C. arabica*, incluyendo Caturra, Típica, Mokka, Geisha, Pacamara y Maragogipe.

El principal mecanismo para la aparición de las razas es la mutación, que puede ocurrir por fenómenos como la exposición a la luz ultravioleta, entre otros. El segundo factor es la alta cantidad de urediniosporas que produce el hongo durante su ciclo infeccioso. Esto genera la probabilidad de aparición de nuevas variantes, con cambios en los genes de avirulencia por mutación.

En un período de entre 4 y 5 meses, una sola pústula de roya puede producir en el envés de la hoja 1.600 urediniosporas por milímetro cuadrado (mm<sup>2</sup>) y como la enfermedad es policíclica, lo cual significa que en el transcurso de un período del cultivo se presentan varios ciclos de infección y reproducción que pueden sobreponerse, el resultado es un alto número de urediniosporas por lote.

Finalmente, el tercer factor que puede generar nuevas razas de roya es la presión de selección natural, que favorece la proliferación de aquellos individuos que han cambiado, y la definen condiciones externas, en particular la presencia de plantas de café con genes de resistencia diferentes a SH5.

Si en los lotes se tienen únicamente plantas con un gen de resistencia, rápidamente puede seleccionarse una nueva raza de roya capaz de atacarlas. Por el contrario, si tienen combinaciones de varios genes de resistencia en las variedades cultivadas, será muy difícil la proliferación de razas nuevas, pues se requerirían muchos cambios en el hongo para evadir los mecanismos de resistencia del hospedero.

Las razas con numerosos cambios en sus genes de avirulencia se conocen como razas complejas (cuando la raza tiene muchos genes de virulencia).

Los estudios de evolución e identificación de nuevas razas de patógenos de plantas tienen gran importancia, ya que no se debe descartar la aparición de razas hipervirulentas

que pueden ser devastadoras para un cultivo. El caso del surgimiento de la raza ug99 de la roya negra del trigo (*Puccinia graminis*), que ha tenido efectos dramáticos en la reducción de la producción del cultivo en África, ilustra la precaución necesaria en la vigilancia del desarrollo de razas de los microorganismos fitopatógenos. En *Hemileia vastatrix* hasta ahora no se tiene detectado razas hipervirulentas.

## 5.5. Susceptibilidad y nuevas razas

Los tres factores que explican por qué hay nuevas razas de roya son:

### 1. Factores de virulencia

Las razas de roya se diferencian según los factores de virulencias presentes. Estos factores, al menos 9, están asociados en combinaciones para constituir las diferentes razas de roya. El número de factores de virulencia aumentó en las nuevas razas, lo cual crea nuevas combinaciones con mayores cantidades de genes de virulencia que superan más fácilmente la resistencia genética de la variedad. En Honduras actualmente hay dos razas (I y II) y 16 patotipos.

### 2. Presión de selección

La presión de selección favorece la presencia de nuevas razas. Cuando se cultivan variedades con las mismas fuentes de resistencia –como ocurrió en Honduras con el uso extensivo de una sola variedad (Lempira)– o sea, cuando hay una fuerte presión de selección, la probabilidad de seleccionar mutantes (nuevas razas) que superen la resistencia aumenta.

En otros términos, un patógeno que aparece aleatoriamente con la capacidad de superar esta resistencia se mantendrá más fácilmente si el área sembrada con ese material es grande. Además, dado que las esporas de roya tienen gran capacidad de dispersión por el viento, es posible que las nuevas razas también lleguen fácilmente a otras zonas y países, y por tanto, superen la resistencia de variedades en esos lugares

### 3. Población del patógeno

Cuando nos setoman medidas preventivas, como aplicación de fungicidas, buena nutrición de la planta, uso de sombra y otras, el hongo patógeno tiene las condiciones ideales para desarrollarse, tiende a multiplicarse y aparecen más mutantes, entre ellos más razas. Las epidemias de roya que ha tenido recientemente han sido, por lo tanto, propicias para la diversificación de razas de roya (Solano *et al.* 2019).

### Híbridos F1 de café resistencia a la roya y estrategia de futuro

**¿Los híbridos F1 liberados podrían ser resistentes a las nuevas razas de roya?** Los híbridos F1 generados en el marco colaborativo CATIE-CIRAD-PROMECAFE, fueron creados a inicios del año 1990, con el objetivo de aumentar la base genética de las variedades existentes en la región. Los criterios para desarrollo de estos materiales fueron: alta productividad, vigor, excelente calidad de taza y resistencia a enfermedades (a las razas de roya presentes en esa época y nemátodos).

Nueve de los veinte híbridos F1 seleccionados provienen de progenitores que contienen genes de resistencia del Híbrido de Timor heredados del ancestro *C. canephora* y presentes en Catimores y Sarchimores. El Híbrido de Timor posee varios genes de resistencia dominantes, que se transmiten y se expresan al nivel de la primera generación.

Varios híbridos F1 presentaron resistencia a la roya por casi 20 años, hasta que recientemente algunos de ellos empezaron a presentar síntomas y signos de roya. Debido a que la resistencia que poseen es vertical, se podía prever que esto llegaría a ocurrir. Por mutación y recombinación la roya (nuevas razas) superó dicha resistencia.

Observando la evolución de la roya en Latinoamérica, se puede presagiar que en el futuro todas las variedades de café con estos mismos genes de resistencia serán susceptibles, pero con resistencia horizontal a las nuevas razas que vayan apareciendo.

El esquema general de utilización de híbridos F1 en el marco del mejoramiento genético de las variedades de café presenta una ventaja competitiva, ya que los híbridos son todavía más resistentes a la roya que las variedades con estos genes de resistencia, debido a la heterosis, que les otorga más vigorosidad para contrarrestar la enfermedad. Hasta el momento lo observado en el campo con los híbridos F1 liberados en 2005 es que han presentado síntomas de roya, pero la severidad es muy baja.

Es muy importante destacar que cualquier material con resistencia, aun cuando puede ser afectado por nuevas razas de *H. vastatrix* siempre tendrá una mejor respuesta al manejo y control de la enfermedad que los materiales susceptibles. Por ejemplo, se sabe que Lempira tiene un buen comportamiento porque la defoliación producida por la roya ocurre después de la cosecha –y no antes– o sea, la epidemia es más lenta y permite concluir la cosecha. El periodo de latencia en Lempira es más largo.

### ¿Qué hacer en las fincas de café que tienen híbridos F1 que pueden ser susceptibles a nuevas razas de roya?

Para reducir o evitar el impacto de la roya y sus nuevas razas, incluso si se dispone de variedades resistentes, se debe emplear un manejo integrado, incluyendo las siguientes prácticas:

- Establecer un manejo apropiado de la nutrición de las plantas. Mantener un buen pH y conocer el balance de nutrientes de un cafetal es clave para determinar una adecuada fertilización (orgánica o inorgánica). Las plantas bien nutridas tendrán mejores posibilidades de aguantar el ataque de nuevas razas. Pero el nivel de nitrógeno no puede ser alto (Zambolim, 2016; Zambolim y Caixeta, 2018).
- Usar un dosel de sombra uniforme, seleccionando árboles (leguminosos, frutales o maderables) deseablemente con hojas pequeñas, flexibles y recortadas. Una sombra uniforme que no sea excesiva permitirá regular mejor la carga fructífera y hasta desarrollar la presencia de controladores naturales de la roya. Generalmente no se debería tener más de 50% de cobertura de sombra.
- Utilizar productos químicos y/o bioplaguicidas. Lo ideal sería usar siempre productos en forma preventiva para disminuir las condiciones favorables para el hongo, así como fungicidas cuando sea necesario. Sin embargo, no son eficaces para controlar la roya.

## 5.6. Utilización de programas de variedades resistentes

Es la manera más fácil y más barata de controlar enfermedades de plantas.

Para el desarrollo de programas con variedades resistentes se debe considerar:

- Incorporación de los genes de resistencia en variedades comerciales.
- Trazar la mejor estrategia para que la resistencia sea duradera.
- Emplear variedades de café con resistencia horizontal.
- Emplear variedades de café con tolerancia a la roya.

### 5.6.1. Variedades que perdieron la resistencia a la roya en Brasil

A continuación se listan las variedades que perdieron su resistencia a la roya después de 3 a 5 años de su lanzamiento (Zambolim, 2016; Zambolim y Caixeta, 2018):

Oeiras MG 6851 (Catimor)

IPR 3 (Catucaí)

IPR 99 (Sarchimor)

IPR 108 (Catucaí x Sarchimor)

Acauã (Mundo Nuevo x Sarchimor)

H 419-3-3-7-16-4-1 (Catucaí x HDT)

Obatán IAC 1669-20 (Catucaí x Sarchimor)

Sabiá 398 (Catimor x Acaia)

Tupi IAC 1669-33 (Sarchimor)

Palma I (Catucaí x H. de Timor)

Palma II (Catucaí x H. de Timor)

Paraíso (Catucaí x H. de Timor)

Sacramento (Catucaí x H. de Timor)

+ otras 15 variedades

Las que aún mantienen su resistencia vertical son IPR 99, IPR 108 y Acauã (en algunas regiones en Brasil).

La durabilidad de la resistencia a la roya es crucial para lograr la sostenibilidad de la caficultura. La resistencia duradera es aquella que permanece efectiva mientras se despliega ampliamente durante un largo período y en un ambiente propicio para la enfermedad.

La vigilancia de razas de roya para estimar el peligro de nuevas combinaciones de virulencia provee un conocimiento detallado de los genes de resistencia presentes en material de reproducción y las combinaciones de genes de resistencia para contrarrestar los posibles cambios en la estructura de virulencia del patógeno.

## 5.8. Diversificación genética y renovación con variedades resistentes

Una consecuencia negativa de la uniformidad genética es un aumento en la vulnerabilidad a enfermedades causadas por patógenos como la roya. Si la uniformidad genética hace que un cultivo sea más vulnerable a la enfermedad, entonces, un método potencial y de bajo costo para suprimir enfermedades es aumentar la diversidad genética del cultivo. Los altos rendimientos de los cultivos son un objetivo principal de la agricultura moderna logrado a través de la hibridación y la selección de plantas.

La uniformidad genética para la altura de la planta, la madurez y las características de calidad también facilitan la recolección, comercialización y procesamiento del cultivo. Por eso sembrar variedades diferentes en lotes distintos dentro de las fincas (no mezclar susceptibles con resistente en el mismo lote) es una buena alternativa, evaluando el efecto de las mezclas de cultivares-variedades en la evolución de razas de patógenos o patotipos. En Centro América, los programas de mejoramiento genético y propagación de variedades de plantas resistentes a la roya del café que inicialmente mostraron



resistencia fueron: Obata, Parainema, Marsella ANACAFÉ 14, Colismor, Maratimor, Valentina, Guapa E. Pasos - Borbón resistente, Pacamara amarillo Centroamericano, IHCAFE 90, San Pacho, Caticic, Costa Rica 95, Cuscatleco, Icatu y Lempira en República Dominicana.

Acerca de los Híbridos de Timor (HDT) y su resistencia, existe bastante material de Timor con fuentes de resistencia. Por eso la resistencia vertical sigue vigente, así como la búsqueda de nuevas fuentes de resistencia aún no explotadas en Híbrido de Timor.

La pérdida de la resistencia de las progenies derivadas del HDT está asociada con el surgimiento de nuevas razas. En el banco de germoplasma de la UFV hay más de 15 genotipos de HDT para ser caracterizados (Zambolim, 2016; Zambolim y Caixeta, 2018).

En relación con las fuentes de resistencia a la roya en Derivados del Híbrido de Timor se han encontrado las siguientes:

1. **Obata:** Híbrido natural de un F2 del híbrido H364/4 (Villa Sarchí x Híbrido de Timor) x Catuaí Rojo. Resistente.
2. **IAPAR-59:** Y en el caso de las mujeres. Resistente.
3. **Tupi:** Derivado del F2 del híbrido 361/4. Duro.
4. **Oeiras MG 6851:** Caturra Rojo (CIFC 1'9/1) x Híbrido de Timor (CIFC 832/1). Moderadamente resistente.
5. **Acauã Caturra x Híbrido de Timor** -> Sarchimor x Nuevo Mundo -> Acauã (resistente a la roya)
6. **Catiguá MG1 y MG2,** MG 3 x 86 Yellow Catuaí IAC Timor híbrido UFV 440-10.
7. **Oeiras MG 6851 Caturra Rojo** CIFC 19/1 x Híbrido de Timor CIFC 832/1,
8. **Paraíso MGH 419-1** Catuaí Amarelo IAC 30 x Híbrido UFV 445-46.
9. **Sacramento MG1** Catuaí rojo IAC 81 Timor X Hybrid UFV 438-52.
10. **Pau-Brasil MG1** Catuaí Rojo IAC 15 y el Híbrido de Timor UFV 442-34.
11. **Araponga MG1** Catuaí Amarelo IAC 86 x Híbrido de Timor UFV 446-08.
12. **Catuaí: Catuaí rojo** XICATU (*C. canephora* Bourbon).

Las fuentes de resistencia a la roya (5.9.1) en derivados del Híbrido de Timor en Brasil han perdido la resistencia vertical (Zambolim, 2016; Zambolim y Caixeta, 2018).

## Tabla 6.

### Serie diferenciadora (27 clones) para identificación de razas de *Hemileia vastatrix*

	Serie diferenciadora
S <sub>H</sub> ?	849/1 - Matari
S <sub>H</sub> 1	128/2 - Dilla & Alghe
S <sub>H</sub> 4	635/2 - S 12 Kaffa
S <sub>H</sub> 5	63/1 - Bourbon
S <sub>H</sub> 6	1343/269 - H. Timor
S <sub>H</sub> 2, 5	32/1 - DK 1/6
S <sub>H</sub> 3, 5	33/1 - S. 288-23
S <sub>H</sub> ?	644/18 H. Kawisari
S <sub>H</sub> 5, 6, 9	H 419/20
S <sub>H</sub> 5, 8	H 420/2
S <sub>H</sub> 5, 6, 7, 9	H 420/10
S <sub>H</sub> ?	263/1 - <i>C. congensis</i> Uganda
S <sub>H</sub> ?	681/7 - <i>C. congensis</i> Uganda
S <sub>H</sub> ?	1621/13 - <i>C. congensis</i> Uganda
S <sub>H</sub> 5, 7 o S <sub>H</sub> 5, 7	7960/15 = 7963/117 - Catimor
S <sub>H</sub> ?	829/1
S <sub>H</sub> 4, 5	110/5 - S 4 Agaro
S <sub>H</sub> 1, 2, 5	1006/10 - KP 532 (pl 31)
S <sub>H</sub> 1, 3, 5	H 153/2
S <sub>H</sub> 1, 4, 5	635/3 - S 12 Kaffa
S <sub>H</sub> 2, 4, 5	H 152/3
S <sub>H</sub> 3, 4, 5	H 151/1
S <sub>H</sub> 1, 2, 4, 5	HW 17/12
S <sub>H</sub> 2, 3, 4, 5	H 147/1
S <sub>H</sub> 6, 7, 8, 9?	832/1 - H. Timor
S <sub>H</sub> 1, 4	134/4 - S 12 Kaffa
S <sub>H</sub> 1, 5	87/1 - Geisha

**Tabla 7.** | Variedades diferenciadoras (18) de *Hemileia vastatrix*

Grupos fisiológicos	Designación (CIFC)	Genes resistencia
β	849/1-Matari	S <sub>H</sub> ?
α	128/2 - Dilla & alghe	S <sub>H</sub> 1
*	635/2 - S. 12 Kaffa *	S <sub>H</sub> 4
E	63/1 - Bourbon	S <sub>H</sub> 5
R	1343/269 - HDT	S <sub>H</sub> 6
D	32/1 - DK 1/6	S <sub>H</sub> 2, 5
G	33/1 - S 288-23	S <sub>H</sub> 3, 5
M	644/18 - H. Kawisari	S <sub>H</sub> ?
3	H 419/20 - HDT	S <sub>H</sub> 5, 6, 9
2	H 420/2 - HDT	S <sub>H</sub> 5, 8
1	H 420/10 - HDT	S <sub>H</sub> 5, 6, 7, 9
F	369/3 - <i>C. racemosa</i>	S <sub>H</sub> ?
N	168/12 - <i>C. excelsa Longkoi</i>	S <sub>H</sub> ?
B	263/1 - <i>C. congensis Uganda</i>	S <sub>H</sub> ?
P	681/7 - <i>C. canephora Uganda</i>	S <sub>H</sub> ?
Q	1621/13 - <i>C. congensis Uganda</i>	S <sub>H</sub> ?
K	829/1 - <i>C. canephora</i>	S <sub>H</sub> ?

Aún no asignado 7960/15 - Catimor

S<sub>H</sub> 5, 7 o S<sub>H</sub> 5, 7, 9

## Tabla 8. | Serie diferenciadora actual

Antes	Actual	Serie diferenciadora
S <sub>H</sub> ?		849/1 - Matari**
S <sub>H</sub> 1	S <sub>H</sub> 1, 10, F*	128/2 - Dilla & Alghe**
S <sub>H</sub> 4	S <sub>H</sub> 4?	635/2 - S 12 Kaffa**
S <sub>H</sub> 5	S <sub>H</sub> 5	63/1 - Bourbon**
S <sub>H</sub> 6	S <sub>H</sub> 6, 10, A*	1343/269 - H. Timor**
SH 2, 5	SH 2, 5	32/1 - DK 1/6**
S <sub>H</sub> 3, 5	S <sub>H</sub> 3, 5	33/1 - S. 288-23**
S <sub>H</sub> ?	SH 10, G*	644/18 H. Kawisari**
S <sub>H</sub> 5, 6, 9	S <sub>H</sub> 5, 6, 9, 10, C*	H 419/20**
S <sub>H</sub> 5, 8	S <sub>H</sub> 5, 8	H 420/2**
S <sub>H</sub> 5, 6, 7, 9	S <sub>H</sub> 5, 6, 7, 9, 10, B*	H 420/10**
S <sub>H</sub> ?	S <sub>H</sub> ?	263/1 - <i>C. congensis</i> Uganda**
S <sub>H</sub> ?	S <sub>H</sub> ?	681/7 - <i>C. congensis</i> Uganda**
S <sub>H</sub> ?	S <sub>H</sub> ?	1621/13 - <i>C. congensis</i> Uganda**
S <sub>H</sub> 5, 7 o SH 5, 7, 9	S <sub>H</sub> 5, 7, 9, D* o 5, 7, D*	7960/15 = 7963/117 - Catimor**
S <sub>H</sub> ?	S <sub>H</sub> ?	829/1
S <sub>H</sub> 4, 5	S <sub>H</sub> 4, 5?	110/5 - S 4 Agaro
S <sub>H</sub> 1, 2, 5	S <sub>H</sub> 1, 2, 5	1006/10 - KP 532 (pl 31)
S <sub>H</sub> 1, 3, 5	S <sub>H</sub> 1, 3, 5	H 153/2
S <sub>H</sub> 1, 4, 5	S <sub>H</sub> 1, 4, 5?	635/3 - S 12 Kaffa
S <sub>H</sub> 2, 4, 5	S <sub>H</sub> 2, 4, 5	H 152/3
S <sub>H</sub> 3, 4, 5	S <sub>H</sub> 3, 4, 5	H 151/1
S <sub>H</sub> 1, 2, 4, 5	S <sub>H</sub> 1, 2, 4, 5	HW 17/12
S <sub>H</sub> 2, 3, 4, 5	S <sub>H</sub> 2, 3, 4, 5	H 147/1
S <sub>H</sub> 6, 7, 8, 9?	S <sub>H</sub> 6, 7, 8, 9, 10?	832/1 - H. Timor
S <sub>H</sub> 1, 4	S <sub>H</sub> 1, 4	134/4 - S 12
S <sub>H</sub> 1, 5	S <sub>H</sub> 1, 5, E*	87/1 Geisha

\* Genes que pueden tener los diferenciadores en su composición genética.

### 5.9. Lanzamiento de una nueva variedad resistente a la roya, en una región cafetalera específica

Se debe seguir los siguientes pasos:

- a. Tener conocimiento sobre el "background" genético de la resistencia de la variedad
- b. Evitar el lanzamiento de variedades sin el conocimiento de su "background" genético de resistencia.
- c. Tener el conocimiento sobre las razas predominantes en las regiones cafeteras donde la variedad será lanzada.
- d. Conocer las razas de *H. vastatrix* existentes y/o predominantes en los lugares donde se lanza la variedad.
- e. Proteger las variedades resistentes: Evitando o retardando la aparición de nuevas razas (evitar el efecto "paso a paso").
- f. Utilizar variedades con resistencia horizontal, además de atomización, puede ser alternativa.

En Brasil existen variedades que presentan resistencia vertical en una determinada región y susceptibilidad en otra región.

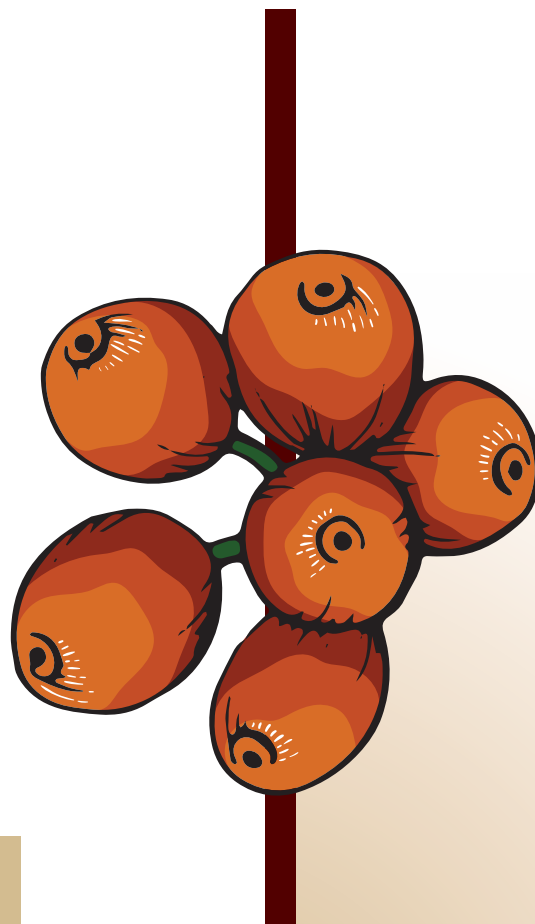
#### ¿Una variedad susceptible en Brasil o en la India podrá presentar resistencia duradera en Centroamérica?

Depende del material genético lanzado en Centroamérica, el clima y la capacidad de dispersión del hongo.



C A P Í T U L O 6

# ESTADO ACTUAL Y ESTRATEGIA DE MANEJO DE ROYA DEL CAFÉ EN CENTROAMÉRICA, REPÚBLICA DOMINICANA (PLATAFORMA REGIONAL ROYA)



# ESTADO ACTUAL

## Y ESTRATEGIA DE MANEJO DE ROYA DEL CAFÉ EN CENTROAMÉRICA, REPÚBLICA DOMINICANA (PLATAFORMA REGIONAL ROYA)



En el marco del Programa Centroamericano de Gestión Integral de la Roya del Café (PROCAGICA), el cual es coordinado por el IICA y financiado por la Unión Europea, el CATIE facilitó actividades de investigación aplicada y fortalecimiento de capacidades. Para eso, en mayo de 2018 se estableció la Plataforma Técnica Regional de la Roya del Café, que opera a través de acuerdos de colaboración y con el apoyo de enlaces por cada institución y país. Como parte de las acciones, se realizaron caracterizaciones de nuevas razas de roya.

En coordinación con el Dr. Laercio Zambolim, de la Universidad de Viçosa (UFV) y los Institutos Nacionales de Café, el CATIE programó visitas para los estudios en Centroamérica y República Dominicana a través de esta plataforma. Asimismo, se ha podido evaluar el avance y actualización de la roya y sus razas al 2020, donde se reportan el siguiente número de razas: para Guatemala (5), Honduras (8), Costa Rica (7), Nicaragua (2), Salvador (3), Panamá (2), República Dominicana (4) y México (3). (ver tabla 9).

Se mantiene el mejoramiento de la colección de CATIE, en Turrialba, Costa Rica, con plantas indicadoras de razas de roya y mejoramiento genético, creando híbridos F1 de

café que tienen nuevas fuentes de genes de resistencia no usados anteriormente. Por eso, durante 2020 esta institución realizó un taller regional sobre técnicas de reproducción vegetativa de híbridos, propagación de plantas y establecimiento de viveros demostrativos en los países, para lo que se creó una red de viveros.

El IHCAFE ha tenido la confianza de la UFV (Universidad de Viçosa), con la disponibilidad de compartir el material de Híbridos Timor (160 UFV), un patrimonio potencial para el apoyo a los países de PROMECAFE. El ICAFE tiene resultados de materiales mejorados de Brasil, con potencial para intercambio (CATIGUA, OBATA) y otros 17 materiales, como Paraíso.

Además, el CATIE y el IICA coordinaron con el ICAFE el fortalecimiento de un laboratorio para estudios de análisis molecular al servicio de la plataforma que permita, con la colaboración del Dr. Zambolim, el fortalecimiento de dicho laboratorio, el cual jugará un rol protagónico en la región. Igualmente se ha realizado un trabajo coordinado para compartir información sobre el proceso de armonización de sistemas de alerta temprana, facilitado por el CIRAD en el marco del PROCAGICA-IICA.



## Tabla 9. Actualización de información de razas, monitoreo de la roya del café

Diagnóstico regional sobre monitoreo y estado actual de las razas de roya en ocho países					
Países	Sistema de monitoreo de variedades susceptibles	Sistema de monitoreo de variedades resistentes	Sistema de Alerta Temprana (SAT)	Razas de roya conocidas actualmente	Nuevos estudios en marcha (L. Zambolim) (Zambolim, 2016; Zambolim y Caixeta, 2018), Memorias Plataforma Centroamericana Roya 2018-2021.
Guatemala	SÍ	SÍ	SÍ	I, II, III, XXIII, XXV	Razas complejas en Catimor 5175, Anacafé 14, 90, Sarchimor T 5269, Marsellesa, Paraneima, Costa Rica 95, Tupi, Obatá.
Honduras	SI	SÍ	SÍ	I, II, III, XIV, XVI, XX, XXII, XXXVI	8 patotipos más en proceso de identificación (IHCAFE-UFV) apoyo CATIE-PROCAGICA. Tesis de Deras <i>et al.</i> 2019-UFV – UFV reportó 10 nuevas razas y 6 patotipos, IHCAFE (2019), 2 patotipos más.
Costa Rica	SÍ	SÍ	SÍ	II, XXII, XXIV, XXIX, XXXIII, XXXV, XXXVI	Razas complejas, Costa Rica 95, Catiguá MG2, Obatá. (CIFC y UFC)
El Salvador	SÍ	SÍ	SÍ	I, II, III	Caticis y Cuzcatleco Razas complejas.
Nicaragua	SI	SÍ	SÍ	I, II	No se realizó colecta.
Panamá	SI	NO	En Chiriquí	I, II	No se realizó colecta.
República Dominicana	SÍ	SÍ	SÍ	I, II, III, XXXIII	
México	SÍ	-	-	I, II, III	

Fuente: Memorias talleres regionales plataforma roya, PROMECAFE- UE/CATIE/PROCAGICA

Se evidencia que recientemente el hongo de la roya adquirió genes más complejos y ha generando nuevas razas, las cuales están causando síntomas de la enfermedad en variedades de café con resistencia. Por esta razón, la plataforma regional realiza un monitoreo constante de la incidencia de la roya en diferentes variedades de café, manteniendo así una vigilancia continua en los distintos países.

### 6.1 Causas del surgimiento de nuevas razas en América Central y el Caribe

La explicación no es sencilla, pero es seguro que no hay una sola explicación. Se podrían mencionar tres factores:

1. La presión de selección, que existe en la naturaleza, en la región centroamericana, ya que había variedades cultivadas con resistencia vertical a la roya.
2. Las razas también se pueden establecer en variedades como Caturra, Typica, Catuai, Villa Sarchí y otras. Sin embargo, las razas con factores simples de virulencia predominan en estas variedades.
3. La importancia de la incidencia de la epidemia 2012/2013, que ocurrió debido a factores favorables donde el patógeno estuvo presente en grandes cantidades con condiciones ambientales adecuadas y con variedades susceptibles. Además, algunos países dejaron de asperjar con fungicidas sus cafetales por falta

de apoyo económico y gubernamental. En Honduras la epidemia tuvo el menor efecto, debido a que gran parte de sus áreas cultivadas tenían variedades resistentes.

En la epidemia 2012/2013 hubo nuevas razas más complejas presentes, ya que las variedades resistentes como Lempira, Parainema y otras no fueron atacadas en el 2013. El surgimiento de las nuevas razas complejas se debe, por lo tanto, a la presión de selección ejercida por el cultivo de variedades resistentes en América Central y el Caribe.

La epidemia de 2012/2013 se extendió y dispersó las razas de roya y los patotipos en toda la región. La durabilidad fue de entre 8 a 25 años, dependiendo de la variedad. En 2012/2013 ya existían en el campo las variedades resistentes. Por lo tanto, la epidemia contribuyó en gran medida a la aparición de nuevas razas al propagar esporas, el clima favorable y variedades plantadas muy susceptibles (Caturra, Catuai, Borbón y otras) sin fumigación. La aparición de nuevas razas complejas, por consiguiente, ocurrió en 2, 3 y hasta 5 años después de la epidemia que afectaba a las variedades resistentes.

De las visitas a la República Dominicana por parte del Dr. Zambolim, se observó que las plantaciones de Catimores y Sarchimores siguen siendo verticalmente resistentes a las razas de *H. vastatrix*. No obstante, las mismas plantaciones mezcladas con la variedad Caturra son susceptibles y no se encontró roya en las variedades Tupi, Obatá, Castillo, Marsellesa. En algunas plantas de Costa Rica 95 se observaron pústulas, pero en pocas hojas.

## 6.2 Avances y alternativas para mejoramiento genético en los países de centroamérica y el caribe

El desarrollo de variedades mejoradas en la región PROMECAFE es un esfuerzo conjunto de los países de la región, que inició con el apareamiento de la roya en 1970. Comenzó una fuerte cooperación bilateral con los países para realizar investigación, fortalecimiento de capacidades e identificación de fuentes de resistencias con CATIE y CIRAD.

Fruto de estas investigaciones se logró desarrollar estas variedades, teniendo como base los trabajos de mejoramiento de híbridos en Portugal (CIFC) de los cruces entre robusta y arábica (Híbrido de Timor 832, 2252 y 1343), que ofrecían genes de resistencia y han sido la base para los programas de mejoramiento genético.

El CATIE y los gobiernos e instituciones miembros de PROMECAFE iniciaron acciones en busca de variedades que presentaran fuentes de resistencia a la enfermedad. A partir de 1978, se establecieron decenas de ensayos, primero en el CATIE y luego en los países miembros (Echeverri y Fernández, 1989). Como base se utilizaron líneas descendientes del Híbrido de Timor introducidas

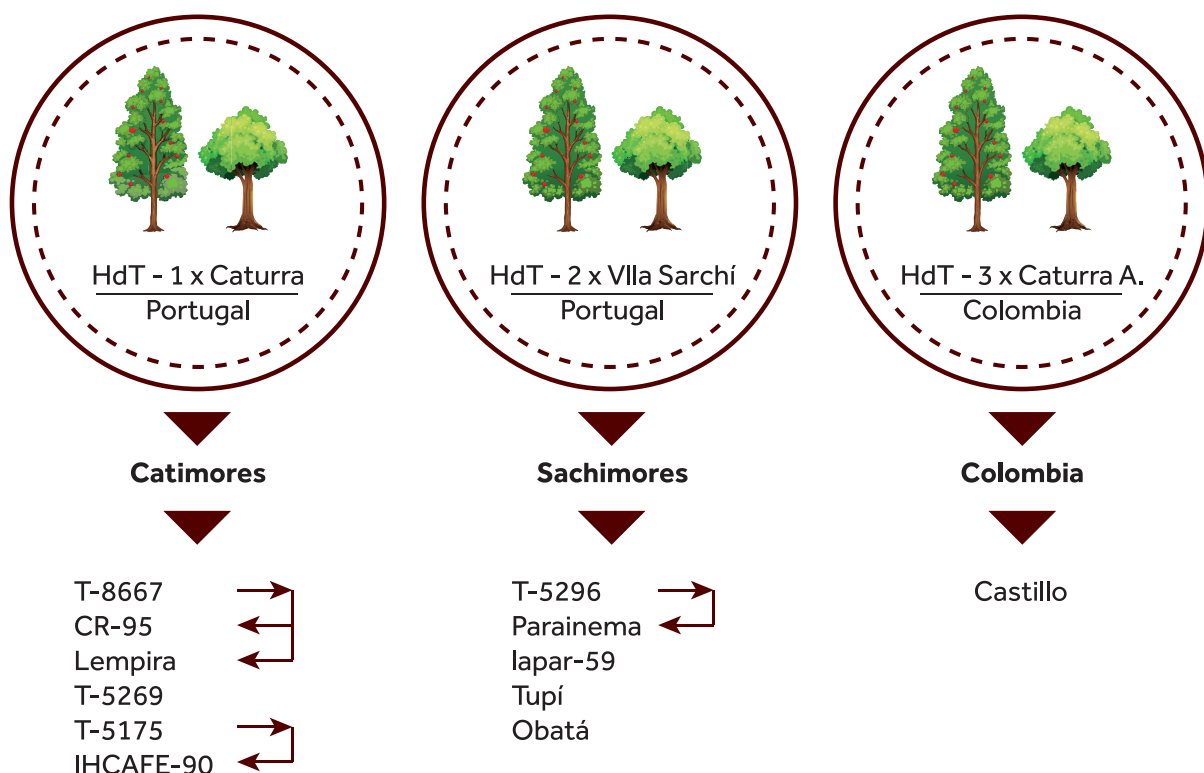
en generaciones F3 o F4, identificaron las fuentes de resistencia y se hizo la evaluación regional de progenies de Catimores y Sarchimores, los cuales vienen de un mismo híbrido, lo que provoca una reducida diversidad genética de las variedades cultivadas.

Producto de 12 años de investigación, se liberó en Honduras la primera variedad Catimor con alta resistencia a la roya del café, denominada "IHCAFE 90". En 1995 Costa Rica liberó otro Catimor denominado "Costa Rica 95 (CR95)" y posteriormente en 1996 el MIDA de Panamá liberó la variedad "Mida 96" y en Honduras la variedad "Lempira 98". Estas son casi idénticas a la variedad CR95 (Bertrand *et al.* 1999).

A las descendencias del cruzamiento de Caturra por el Híbrido de Timor 1 (CIFC 832/1) se les conoce genéricamente como "Catimores" y las del cruzamiento de Villa Sarchí por el Híbrido de Timor 2 (CIFC 832/2) como "Sarchimores". Del cruzamiento de Caturra Amarillo por el Híbrido de Timor 3 (CIFC 1343) y su selección se origina la variedad compuesta Colombia y luego con ciclos complementarios las variedades Castillo regionales (ANACAFÉ, 2019).

La resistencia del Híbrido de Timor y sus derivados es del tipo completa, que es menos duradera en el tiempo. Los futuros programas de mejoramiento genético deberán considerar nuevas fuentes de resistencia a la roya para la creación varietal (ANACAFÉ, 2019).

**Figura 7.** Derivados del Híbrido de Timor (HdT)



Fuente: ANACAFÉ, [https://www.anacafe.org/glifos/index.php/Varietades\\_resistentes\\_a\\_roya](https://www.anacafe.org/glifos/index.php/Varietades_resistentes_a_roya) (10-12-2018).

A mediados de la década de 1990, el PROMECAFE, CATIE y CIRAD, junto con los Institutos del Café, iniciaron el proyecto de mejoramiento genético para la producción de híbridos F1.

Se realizaron cruces entre accesiones silvestres con variedades comerciales (Caturra principalmente y catimores y sarchimores). Producto de este trabajo se seleccionaron 20 híbridos F1 que presentaban alta producción ( $\geq 50\%$ ) respecto al testigo (variedad Caturra) y resistencia a la roya del café.

Estos materiales se establecieron en una red de ensayos en Costa Rica y otros países de Centroamérica (Bertrand *et al.* 1999). Los resultados de los ensayos regionales permitieron seleccionar dos híbridos F1 que presentaron características sobresalientes en diferentes ambientes: alta producción, resistencia a la roya del café y buena calidad de taza.

Mediante consulta a nivel regional, PROMECAFE nombró los dos híbridos F1 elegidos como "Centroamericano" y "Milenio". Estos proceden del cruce de una variedad silvestre (Rume Sudán) con una variedad Sarchimor (T05296) (Virginio Filho y Astorga, 2015).

Actualmente, las variedades con potencial que se están utilizando son: T-5175 (IHCAFE-90), -8667 (Costa Rica 95, Lempira 98), T-5296 (Parainema 2004, Cuscatleco), Oro Azteca (México), ANACAFÉ 14 (Guatemala), Marsellesa, EC15, EC 16 en Nicaragua (Morales Yonis, 2019; información personal).

Los híbridos F1 de café no se pueden propagar por semilla. Además, se desarrollaron técnicas en embriogénesis somática, indirecta en café. El CATIE inició con los procesos de embriogénesis somática, para lo cual se comienza con una pequeña parte de una hoja. A partir de esta se podría producir de 300 hasta 2.000 y se reduce el tiempo para la propagación. Por otra parte, se comenzó una fase de propagación comercial vegetativa de híbridos F1 de café. No obstante, se conoce que los materiales tienen respuestas diferentes a la regeneración de callos embriogénicos y número de embriones. Estos aspectos se deben mejorar y documentar.

Las lecciones aprendidas de la reproducción por embriogénesis somática, en la multiplicación comercial de los F1, con la participación del sector privado en Veracruz México, Nicaragua y Guatemala (Pilonés), señala que es mejor reproducir plantas madres en laboratorio, complementado con obtención de mini-estacas en invernadero (macetas y bancales hidropónicos), ya que se mejora la productividad. Toda planta F1 proveniente de embriogénesis somática o mini-estacas debe ser injertada para garantizar la uniformidad del sistema radicular y la estabilidad de las características fenotípicas en campo definitivo.

Con respecto a la comercialización de híbridos F1 de café en Centroamérica, la capacidad instalada es limitada para suplir la demanda regional a precios accesibles para todos los productores y existen dificultades técnicas en la metodología de embriogénesis somática e injerto en

Nemaya.

Es necesario optimizar técnicas de propagación comercial y definir condiciones óptimas de distribución, así como promover la investigación en producción de líneas puras mediante la regeneración de plantas haploides. También se requiere identificar fuentes de androesterilidad e investigar la herencia para desarrollo de líneas, variedades comerciales y materiales élites en evaluación que se vuelven susceptibles con mayor frecuencia y en menor tiempo, incluyendo HDT 832/1, 1343 y sus materiales derivados. Es importante promover el uso de variedades sintéticas considerando aptitud combinatoria general y piramidación de genes y utilizando mejoramiento asistido por marcadores moleculares.

No se dispone de la huella genética de las variedades e híbridos desarrollados en la región, por lo que es necesario identificar y registrar dicha huella. Se requiere la certificación molecular de la pureza genética (equipamiento de laboratorios para biología molecular) en lotes de producción, semilla certificada y protección del obtentor.

### 6.3 Control químico del cultivo de café y su gestión integrada

El control químico es uno de los componentes más importantes en el manejo integrado de la roya del cafeto cuando se tienen plantaciones susceptibles a la enfermedad. El éxito de las aspersiones de fungicidas dependerá del adecuado manejo agronómico del cultivo y la correcta tecnología de aplicación (calibración, volumen y preparación de las aplicaciones) para lograr una alta efectividad biológica del fungicida y mantener al mínimo los niveles de roya sobre el follaje.

Para lograr esta efectividad biológica es necesario cumplir con tres requisitos: 1) utilizar el tipo de fungicida más eficiente, 2) determinar el momento oportuno de la aplicación, con base en la fenología del cultivo y la incidencia de la enfermedad cuando se usa fungicidas sistémicos y 3) realizar la aspersión con una adecuada tecnología de aplicación.

Actualmente se cuenta con información sobre la eficiencia de ingredientes activos (cobre, triazoles, estrobilurina), así como las dosis adecuadas para lograr un control efectivo. En Brasil, hay por lo menos 16 ingredientes activos para combatir a la roya.

Igualmente, el manejo de podas en el cultivo de café es una práctica que estimula el crecimiento de tejido productivo de la planta y elimina parte del inóculo, así como el tejido dañado y/o muerto por efecto de la roya. Debe ser planificado y realizado de acuerdo con la edad de la plantación, registros de producción y sanidad de tejidos, entre otros.



Es importante considerar la equilibrada fertilización, adaptada al requerimiento de la planta. Los nutrientes ejercen funciones específicas en el metabolismo del cafeto, apoyan el crecimiento y la producción. Manejar adecuadamente la fertilización mejora las condiciones de resistencia del cafeto a enfermedades. El requerimiento de la planta de café es mayor cuando manifiesta su máxima producción.

Es necesario realizar análisis de suelo, análisis foliar y adicionar materia orgánica desde la siembra, ya que mejora las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo. También se trabaja en la nutrición del cultivo para mantener un follaje que soporte la capacidad de carga de la planta.

Se desarrollan fungicidas que inhiben la síntesis de ergosterol en el hongo, tales como Difenoconazol y Hexaconazol, y más recientemente, una mezcla entre estrobilurina con un triazol.

Los avances son significativos en cuanto a la sostenibilidad y la protección ambiental. Las cantidades de fungicidas de última generación actualmente llegan a centímetros cúbicos por hectáreas, mientras que a comienzos de siglo se utilizaban kilogramos por hectárea.

Desde que fue descubierta la roya del cafeto en el año de 1861, distintas alternativas de protección han surgido. Reportes de 1895 relatan cómo se utilizaba el caldo bordelés (un kilogramo de sulfato de cobre, un kilogramo de cal extinta-hidróxido de calcio y 100 litros de agua-) para el manejo de la enfermedad. Por la misma época, también se trabajaba con oxiclورو de cobre en Asia, África e India, con dosis que oscilaban entre 3,0 y 6,0 kilogramos por hectárea, utilizando volúmenes de aplicación desde 100 hasta 1.100 litros por hectárea.

Posteriormente en 1958, Saccas y Charpentier (1971) llevaron a cabo en África experimentos de aplicaciones de fungicidas para evaluar la eficacia de otros productos como Captan, Zineb y Ziram, los cuales dieron resultados similares a los del oxiclورو de cobre, pero con una disminución en la caída de hojas. Sin embargo, el Captan, el Zineb y el Ziram no son eficaces para controlar la roya en comparación con los cúpricos.

En la década de 1980 surgieron los triazoles (Triadimefón y Triadimenol) que translocan siguiendo la ruta de la transpiración en el apoplasto (xilema) de las plantas de café. Dentro de estos fungicidas sistémicos se encuentran principalmente los que pertenecen al grupo de los triazoles. También eliminan las estructuras del hongo en el periodo de infección hasta la formación de las esporas.

En el grupo de los triazoles se encuentran los siguientes fungicidas: Tebuconazole, Difenoconazole, Epoxiconazole, Cyproconazole, Flusilazol, Hexaconazol, Triadimenol, Propiconazole, Tetraconazole y Flutriafol (Granados y Zambolim, 2019). Estos inhiben la formación de una sustancia esencial para el hongo llamada ergosterol (Barquero, 2013b).

Más recientemente ha surgido un nuevo grupo de fungicidas llamados mesostémicos para el control de la roya del café, denominado estrobilurinas, cuyo modo de acción consiste en inhibir la respiración de la mitocondria de la célula. Entre los fungicidas que pertenecen a este grupo están: Piraclostrobina, Azoxystrobina, Trifloxystrobina, Picoxystrobina y Kresoxim-methyl (Granados y Zambolim, 2019).

Para la producción de café orgánico de países de América Central están disponibles en el mercado productos autorizados para el control de la roya. Un ejemplo son los productos a base de Sulfato de Cobre ("Caldo Bordelés", 1 kg/200 litros de agua) y cobre (4 oz/bomba de 20 litros). Se ha logrado obtener buenos resultados con sustancias fungicidas encontradas originalmente en el hongo *Strobilurus tenacellus*, conocidas como estrobilurinas, las cuales presentan efecto sobre la germinación, penetración y esporulación del patógeno. Las estrobilurinas tienen efecto translaminar.

También se han desarrollado productos en mezcla entre triazoles y estrobilurinas. Esto permite tener un amplio manejo sobre todas las etapas de desarrollo del patógeno; por ejemplo, los fungicidas Azoxystrobina (Estrobilurina) a 70 cc/ha en mezcla con Cyproconazole (Triazol) a 30cc/ha de ingrediente activo, respectivamente.

Desde la década de los 90 se han venido desarrollando trabajos con microorganismos, tales como *Bacillus thuringiensis*, distintas especies de *Pseudomonas* y *Lecanicillium lecanii* entre otros, sin embargo, debido a su inconsistente desempeño en campo, actualmente la aplicación de estos productos no es una práctica común.

Algunos expertos plantean una convivencia con la enfermedad, ha permitido fortalecer una cultura cafetera con conocimiento, la cual utiliza distintas medidas de control de manera integrada y coherente con el desarrollo agronómico no solo de la enfermedad, sino en general de todas las variables que afectan el sistema productivo cafetero.

Los Institutos Nacionales del Café y los Ministerios de Agricultura de los países centroamericanos hacen énfasis en la necesidad de emplear control químico para el manejo de la roya del café, así como en el uso de prácticas culturales apropiadas y frecuentes.

El personal que brinda asistencia técnica maneja con detalle los nombres de los productos y las formulaciones que se deben aplicar al café y los momentos oportunos de aplicación. En términos generales, la recomendación es que la primera aplicación para el control de la roya del café debe realizarse después de la primera floración y esta, por lo general, ocurre con el inicio de la estación lluviosa.

Cada país lleva un programa integral para el manejo de la roya del café con estrategias diferenciadas e integradas donde interactúan las prácticas culturales, el control genético de mediano y largo plazo, el monitoreo de la enfermedad y el control químico, que buscan la sostenibilidad para el ambiente, la salud humana y la economía del productor.



## 6.4. Capacidad instalada de los diferentes países

### El Salvador

Las instituciones CSC/CENTA cuentan con un laboratorio para el diagnóstico de enfermedades, análisis y estudios fitopatológicos del café. El laboratorio sirve a otros cultivos de importancia económica también del país. La consulta fue realizada en el marco de actividades desarrolladas en la Plataforma Regional de la Roya, coordinada por PROMECAFE y con el apoyo del proyecto CATIE-PROCAGICA-IICA-UE.

El equipamiento de los laboratorios es el básico, por lo que no existe uno específico para análisis molecular.

### Honduras

En Honduras, tanto con el apoyo del IHCAFE como de instituciones nacionales, hay capacidad de hacer estudios de caracterización taxonómica basada en características morfológicas del patógeno o plaga. En el caso de la roya, se puede realizar caracterizaciones de razas a partir de deducciones de genes basados en clones diferenciadores de genes de virulencia de las razas documentadas. En términos de equipo y materiales, existe disponibilidad de cámara de flujo laminar, incubadoras, autoclave, freezer, baño maría, balanzas, microscopio, vortex, cámara de desecación y clones diferenciadores de genes de virulencia de *H. vastatrix*.

### Nicaragua

El INTA cuenta con un laboratorio de diagnóstico de enfermedades, análisis y estudios fitopatológicos del café, así como un área de biología molecular para tejido vegetal y puede apoyar estudios de caracterización molecular de controladores biológicos para café.

En el laboratorio dispone de: termociclador, sistema de electroforesis, transluminador y fotodocumentador.

### Guatemala

ANACAFÉ tiene un laboratorio de diagnóstico de enfermedades, análisis y estudios fitopatológicos del café. También existe un laboratorio de análisis molecular con énfasis en hongos fitopatógenos en el café. Dicho laboratorio cuenta con el apoyo de la academia y otros colaboradores a nivel nacional.

Guatemala realiza estudios de hongos fitopatógenos, nemátodos, microbiología del suelo e insectos plaga. Los equipos para realizar el trabajo de laboratorio y de campo están listados a continuación: equipo de microscopía de alta gama, áreas aptas para el diagnóstico, áreas aptas para el diagnóstico, centrifugadora (equipo de diagnóstico de nemátodos), equipo para el diagnóstico de microorganismos.

### Panamá

IDIAP/MIDA dispone de una infraestructura de laboratorio para diagnóstico y análisis de hongos y análisis molecular, ubicado en el Subcentro del IDIAP, Alanje, Chiriquí.

Se contempla la parte de biología molecular y se realiza extracción de ADN, amplificación de ADN de las regiones de interés, electroforesis y fotodocumentación de las bandas de ADN en el gel de agarosa.

Para el año 2021 en *Coffea canephora*, se tiene programado hacer un diagnóstico de los hongos que ocasionan enfermedades en esta especie.

Se utilizará la caracterización taxonómica acompañada con extracción de ADN, PCR, electroforesis y fotodocumentación de geles de agarosa con las bandas de ADN.

### Costa Rica

Con respecto a la capacidad instalada del ICAFE, se cuenta con laboratorios de análisis fitopatológico y molecular para apoyo a diferentes acciones. Entre los análisis que se pueden realizar están: pruebas de eficacia biológica, sensibilidad de moléculas, susceptibilidad de cultivos y patogenicidad de microorganismos, selección asistida de genotipos por marcadores moleculares, cultivo de tejidos, producción de entomopatógenos, identificación de patógenos y cultivos. En relación con los equipos, posee: microscopios, estereoscopios, PCR, qPCR, cámaras de flujo laminar, rotador orbital, purificador de agua ultrapura, centrifuga refrigerada, centrifuga industrial, autoclave, cámara de crecimiento, invernadero, refrigerador 4 °C, -30 °C y -80 °C, electroforesis y descartables.

### República Dominicana

Según informe de INDOCAFE, en República Dominicana, en cuanto a la capacidad instalada, se realiza trabajo a nivel de laboratorio y campo. Posee un plan de monitoreo de la roya en campo a través de parcelas y equipo de laboratorio para la propagación de la roya y su investigación.

En cuanto al laboratorio, en la Facultad de Ciencias Agrarias y Veterinarias de la UASD, se cuenta con un laboratorio de biología molecular, con el siguiente equipamiento:

- i. Termocicladores para PCR convencional.
- ii. 2 congeladores, uno -30 °C y otro -80 °C.
- iii. 3 neveras normales.
- iv. 1 incubadora con agitador y control de temperatura.
- v. Fuentes para electroforesis y un documentalista fotográfico.
- vi. 2 agitadores eléctricos, de las microcentrifugas, uno de 15 K RPM a temperatura ambiente y otro de 17 K RPM refrigerado.
- vii. 1 cámara de flujo laminar para PCR y otras cosas.
- viii. 1 pequeña cámara climática.
- ix. Se cuenta con un laboratorio para trabajar la inoculación a través de discos, para evaluar la patogenicidad de los granos de café; esto en la Universidad Autónoma de Santo Domingo.

### 6.5. Estado actual de los sistemas de alerta temprana

Los sistemas de alerta temprana (SAT) son un conjunto de acciones que se desarrollan para mantener la vigilancia de un evento previsible, que se pueda presentar en un momento determinado (Unesco *et al.* 2011). Los SAT ayudan a conocer con anticipación y con cierto grado de certeza en qué tiempo y espacio una amenaza o evento natural o causado por la actividad humana puede desencadenar situaciones potencialmente peligrosas. Los eventos pueden ser de muy diferentes características, por ejemplo, prever inundaciones o deslizamientos de tierra.

Los SAT también son aplicables a la producción agrícola para monitorear las condiciones de clima, manejo de cultivo y muchas otras variables que tengan influencia directa en la producción (enfermedades, por ejemplo).

Para establecer un SAT se deben definir un conjunto de procedimientos y hacer uso de instrumentos y equipos que permitan mantener un monitoreo (vigilancia) permanente de los factores naturales (bióticos y abióticos) y antrópicos (hombre) que contribuyan a que se presente o no el evento (Unesco *et al.* 2011).

Para el caso de la roya del café, un SAT permitiría registrar y usar información meteorológica, de prácticas de cultivo y comportamiento del mercado internacional del café para predecir, con cierto grado de precisión, el riesgo de que se presente un brote de la roya. Es bien conocido que cuando

los precios del café disminuyen, los productores reducen las actividades de manejo (podas, fertilización, manejo de sombra) y monitoreo de la enfermedad, lo que redundará en el repunte de la enfermedad. El SAT, entonces, ayuda a prever la posibilidad de que se presente o no una epidemia, como ocurrió en el año 2012 y hacer las previsiones de manejo del cultivo y aplicar las medidas necesarias para prevenir o disminuir el impacto de una epidemia.

Cuando se aplica un SAT a la producción agrícola, el objetivo es recabar información que permita a los productores realizar acciones para minimizar los efectos de un determinado evento (incremento de la incidencia de la roya del café debido a condiciones climáticas propicias). Así, se podrían planificar las acciones para proteger el cultivo mediante prácticas de manejo y aplicación de enmiendas (fungicidas) que reduzcan el impacto de la enfermedad.

### 6.6. Diseño e implementación de un SAT para el control de la roya del café en Centroamérica

En los años 2012 y 2013 se presentó una fuerte epidemia de roya del café en Centroamérica. El PROMECAFE, en colaboración con otras instituciones de investigación y desarrollo como el CATIE, IICA, ARS-USDA, OIRSA, FAO y los Institutos Nacionales de Café, planteó la necesidad de establecer un SAT para prevenir nuevas epidemias en el cultivo y paliar los efectos socioeconómicos de la epidemia vivida.

En octubre de 2013, se realizó en Guatemala el “Primer Taller Regional sobre sistemas de alerta temprana de la roya del café”. Dicho evento reunió a expertos de las instituciones, representantes del sector cafetalero, organismos internacionales y regionales, y expertos en el cultivo del café con el objetivo de diseñar el SAT.

Esta acción forma parte de las necesidades identificadas por el Programa Integrado de Combate a la roya del café, el cual fue aprobado por los Ministerios de Agricultura del istmo, con el objetivo de buscar la recuperación de la capacidad productiva del café en Centroamérica y el Caribe. Del taller en cuestión salió una propuesta que se presentó a la FAO (Hruska, 2014), la cual considera diversas fuentes de datos e información, entre ellas:

- Factores abióticos importantes: temperatura, humedad, radiación solar, fenología del cultivo.
- Sistema de estaciones meteorológicas para recolectar datos.
- Modelo para predecir brotes del hongo.
- Recomendaciones precisas para el manejo a corto y mediano plazo.

En el mes de mayo de 2014 se realizó un segundo taller sobre la implementación piloto del sistema de alerta temprana para la roya del café. El evento tuvo lugar en El Salvador, fue organizado por el CENTA, participaron 30 técnicos de la cadena de café y contó con el apoyo de OIRSA.

El IHCAFE de Honduras impulsó la conformación de un comité técnico especializado del sistema de alerta temprana para la roya del café de ese país. En el primer boletín emitido por el comité se presentaron los resultados del primer muestreo nacional de roya realizado en abril del 2014, el cual detectó una incidencia de la roya a nivel nacional de 12% incidencia y 1% de severidad.

Las condiciones agrometeorológicas del momento y las previsiones para el ciclo productivo se hicieron las siguientes recomendaciones:

- Realizar una primera aplicación preventiva para el control de la roya del café a partir del día 30 de abril y hasta el 10 de mayo, con productos sistémicos de doble acción validados por el IHCAFE.
- Aplicar la segunda fertilización vía foliar (post-floración) junto con el fungicida para el control de la roya.
- Mantener un nivel de sombra regulado en la plantación.
- Continuar con las podas en el cafetal.
- Hacer un adecuado control de malezas.
- Continuar con los muestreos de roya en el cafetal para monitorear los niveles de presencia de la enfermedad.

Entre los años 2017 y 2020, durante el proyecto PROCAGICA y bajo la facilitación de CIRAD, se establecieron procesos de mejora en los sistemas de alerta temprana, con métodos de eficiencia y armonización territorial de muestreo de la roya del café (*Hemileia vastatrix*) en al menos siete países de América Central y Caribe (Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Panamá y República Dominicana), conformándose una red regional de vigilancia, denominada Red Regional de Alerta Temprana (RRAT).

## • BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, R., Zambolim, L., Venegas, V. e Chaves, G. 1992. Relação entre produção de grãos, o teor foliar de macronutrientes e da severidade da ferrugem do cafeiro. *Revista Ceres*, 39(224):365-377.
- Agwanda, C. 1999. Twenty-seven years of coffee breeding in Kenya: prospects for the release of new varieties. 18th International Scientific Colloquium on Coffee. ASIC, FIN. <https://www.asic-cafe.org/conference/18th-international-scientific-colloquium-coffee/twenty-seven-years-coffee-breeding-kenya> (accessed Mar. 13, 2006).
- Albarrán, J.G. 1999. Influencia de los factores químicos y físicos sobre la regeneración de embriones somáticos de *Coffea Arabica* en biorreactor simplificado. Tesis MSc., CATIE, Turrialba, CRI.
- ANACAFE, 2019. Guía de variedades de café. Guatemala: Velásquez, R. Segunda Edición. 49 p.
- ANACAFE, 2014. Guía de variedades de café y selección de semilla. Guatemala, Cuarta edición, 71 p.
- Arneson, P. 2000. Coffee rust. The Plant Health Instructor. DOI: 10.1094/PHI-I-2000-0718-02. Updated 2011.
- Avelino, J. y Rivas, G. 2013. La roya anaranjada del café. Recuperado de <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01071036>.
- Avelino, J., Zelaya, H., Merlo, A., Pineda, A., Ordoñez, M. y Savary, S. 2006. The intensity of a coffee rust epidemic is dependent on production situations. *Ecological Modelling* 197(3-4): 431-447.
- Avelino, J., Willocquet, L. y Savary, S. 2004. Effects of crop management patterns on coffee rust epidemics. *Plant Pathology* 53: 541-547.
- Avelino, J., Müller, R.M., Eskes, A.B., Santacreo, R. y Holguín, F. 1999. La roya anaranjada del café: mito o realidad. In Bertrand, B; Rapidel, B. (Eds.). *Desafíos de la caficultura en Centroamérica*. San José, Costa Rica, IICA, PROMECAFE, CIRAD. p. 193-241.
- Avelino, J., Toledo, J. y Medina, B. 1993. Développement de la rouille orangée (*Hemileia vastatrix*) dans une plantation du sud ouest du Guatemala et évaluation des dégâts qu'elle provoque, in: Quinzième colloque scientifique international sur le café, ASIC: Montpellier, France. 302 p.
- Avelino, J., Riveiro, R. y Toledo, J. 1992. Epidemiología de la roya anaranjada (*Hemileia vastatrix*) y evaluación de las pérdidas en la producción del café: avances de un año. Guatemala (Guatemala). Asociación Nacional del Café, Guatemala (Guatemala). 1992. 115 p.
- Avelino, J., Müller, R., Cilas, C. y Velasco Pascual, H. Ene-Mar 1991. *Café, Cacao, Thé* (Francia). v. 35(1) p. 21-37. 4 tab. 20 ref. Sum. (De, En, Es, Fr). Traducción en español p. 38-42. También sumario en: *Bibliocafé - Boletín Bibliográfico Informativo*. 1991. v.14(1-2) 32 p.
- Barquero, M. 2013. Las variaciones climáticas en el incremento inusual de la roya del café. *Revista Informativa Icafé I*: 1-7.
- Barquero, M. 2013b. Recomendaciones para el combate de la roya del café. 3 ed. San José, Costa Rica, Icafé. 63 p.
- Berthouly, M. 1997. Biotecnologías y técnicas de reproducción de materiales promisorios en *Coffea arabica*. EN: *Memorias del XVII Simposio Latinoamericano de Caficultura*. Heredia, Costa Rica. 49 p.
- Bertrand, B., Aguilar, G., Santacreo, R., Anzueto, F., Bertrand, B. y Rapidel, B. (1999). *El mejoramiento genético en América Central; Desafíos de la caficultura en Centroamérica*. San José (Costa Rica). 456 p.

- Bettencourt, A. J. y Noronha, M. 1971. Genetic factors conditioning resistance of *Coffea arabica* L. to *Hemileia vastatrix* Berk. & Br. *Agronomía Lusitana* 31: 285-292.
- Carvalho, C.R., Fernandes, R.C., Carvalho, G.M.A., Barreto, R.W. y Evans, H.C. 2011. Cryptosexuality and the genetic diversity paradox in coffee rust, *Hemileia vastatrix*. *PLoS ONE* 6, e26387.
- Castro, B.L., Cortina, H.A., Rouxl, J. y Wingfield, M.J. 2013. New coffee (*Coffea arabica*) genotypes derived from *Coffea canephora* exhibiting high levels of resistance to leaf rust and *Ceratocystis* canker. *Tropical Plant Pathology* 38(6): 485-494.
- CENICAFÉ (Centro Nacional de Investigaciones de café). 2011. La roya del café en Colombia: impactos, manejo y costos de control. Colombia. 52 p.
- Chaves, C.O. y Sarruge, J.A. 1994. Alterações nas concentrações de macro nutrientes nos frutos e folhas dos cafeeiros durante um ciclo produtivo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 19: 427-432.
- Chaves, VM. 2013. Relación de la carga fructífera y la nutrición en la susceptibilidad del café al ataque de la roya. *Revista Informativa Icafé* 1: 7-10.
- Cordero, C., Solano, W., Avelino, J., Medina, B., Somarriba, E., Virginio Filho, E. de M., Cordero, C. 2019. Fortalecimiento de la colección internacional de café para la colaboración sobre la investigación en roya (*Hemileia vastatrix*) dentro del marco de la plataforma interinstitucional de países de PROMECAFE. In: XXIV Simposio Latinoamericano de Caficultura - La investigación, un pilar por una caficultura rentable, innovadora, competitiva y socialmente sostenible en cada eslabón de la cadena del café. PROMECAFE, ANACAFÉ. Guatemala: PROMECAFE, 71 p.
- Correa, J.B., García, A.W. y Costa, P.C. 1986. Extração de nutrientes pelos cafeeiros Mundo Novo e Catuaí. In: Congresso Brasileiro sobre Pesquisas Cafeeiras [13. São Lourenço, Minas Gerais, Bra. Resumos]. 41 p.
- Coutinho, T.A., Rijkenberg, F.H.J. y Asch, M.A.J. 1995. Teliospores of *Hemileia vastatrix*. *Mycological research* (8): 932-934. 10.1016/S0953-7562(09)80751-X
- Cristancho, M.A., Escobar, O. C. y Ocampo, M. J.D. 2007. Evolución de razas de *Hemileia vastatrix* en Colombia. *CENICAFÉ* 58(4):340-359.
- Daniel, A. & Boothroyd, C.W. 1972. *Fundamentals of plant pathology*. W.H. Freeman and Company, San Francisco. 424 p.
- De-Kochko A, Akaffou S, Andrade AC, et al. 2010. *Advances in Coffea genomics*. *Advances in Botanical Research*; Volume 53. Edited by: Kader JC, Delseny M. Oxford, Academic Press 53, 23–53.
- Echeverria F. 2019. El transcriptoma del café ante el estrés por la roya. In XXIV Simposio Latinoamericano de Caficultura [Guatemala, septiembre de 2019]. Guatemala, PROMECAFE. p. 73-81.
- Echeverri, J.H. y Fernández, C.E. 1989. The Promecafé program for Central America. In: Kushalappa, A.C. y Eskes, A.B. (Eds). *Coffee rust: epidemiology, resistance and management*. Boca Ratón, Florida, EE.UU. 337 p.
- Eskes, A.B., 1989. Resistance, in: *Coffee rust: epidemiology, resistance and management*, A.C. Kushalappa y A.B. Eskes, Editores, CRC Press: Florida. p. 171-291.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2015. *Statistical Pocketbook Coffee 2015*. Roma, Italia.
- Fernandes, R. de C., Evans, H.C. y Barreto, R.W. 2009. Confirmation of the occurrence of teliospores of *Hemileia vastatrix* in Brazil with observations on their mode of germination. *Tropical Plant Pathology* (2): 108-113.
- Fischersworing, B.H. y Robkamp, R.R. 2001. *Guía para la caficultura ecológica*. 3 ed. Eschborn, Alemania, GTZ. 153 p.
- Flor, H.H. 1971. Current status of the gene-for-gene concept. *Annu Rev Phytopathol*. 9: 275–296. doi:10.1146/annurev.py.09.090171.001423.



- Flor, H.H. 1957. The vegetative origin of a new race of flax rust fungus. *Phytopathology*, 47:11.
- Flor, H.H. 1956. The complementary genic systems of flax and flax rust. *Adv. Genet.* 8:29-54. United States Depart.
- Flor, H.H. 1945. Identificação de raças de ferrugem do linho por linhas com genes de condicionamento de ferrugem simples. *Us Dept. Agr. Tech. Touro.* 1087.
- Flor, H.H. 1942. Inheritance of pathogenicity in *Metampsora lini*. *Phytopathology*, 32, 653-669.
- Galvez, G., Galindo, J.J. y Castaño, M. 1982. La mustia hilachosa y su control. *Guía de estudio.* CIAT, Cali, Colombia. 20 p.
- Granados, E. y Zambolim, L. 2019. Drying Time of Systemic and Protectant Fungicides on Coffee Leaves Exposed to Artificial Rain for the Control of Leaf Rust. *Journal of Agricultural Science*; Vol. 11, No. 6; 2019. Doi:10.5539/jas.v11n6p329.
- Holguín, F. 1985. Epidemiología de la roya del cafeto bajo diferentes condiciones ecológicas. In 2 Reunión Regional del PROMECAFE sobre el Control de la Roya del Cafeto, Tegucigalpa, Honduras, 20-23 agosto, 1985. Honduras, IICA, p. 150-158
- Hruska, A. 2014. Sistema de alerta temprana para la roya del café en Centroamérica. Propuesta presentada a la FAO. (Presentación power point: 30 imágenes).
- Imbach, A.C., Fassbender, H.W., Beer, J., Borel, R. y Bonnemann, A. 1989. Sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica*) con laurel (*Cordia alliodora*) y café con poró (*Erythrina poeppigiana*) en Turrialba, Costa Rica. 6. Balances hídricos e ingresos con lluvias y lixiviación de elementos nutritivos. *Turrialba (CR)* 39: 400-414.
- Jaramillo, A. y Chaves, B. 1998. Intercepción de la lluvia en un bosque y en plantaciones de *Coffea arabica* L. *CENICAFÉ (CO)* 49: 129-134
- Jaramillo, A. y Gómez, L. 1989. Microclima en cafetales a libre exposición solar y bajo sombrío. *CENICAFÉ (Colombia)*.
- Jaramillo, A. 1976. Condiciones meteorológicas en un cafetal bajo sombrío en Colombia. *CENICAFÉ (CO)* 27(4): 180-184.
- Lashermes, P., Combes, M.C., Topart, P., Graziosi, G., Bertrand, B. and Anthony, F. 2000. Molecular breeding in coffee (*Coffea arabica* L.). In: T. Sera et al., editors, *Coffee biotechnology and quality.* Springer, Dordrecht, NLD. p. 101-112. doi:10.1007/978-94-017-1068-8\_7.
- López, D.F., Virginio Filho, E. de M. and Avelino, J. 2012. Shade is conducive to Coffee rust as compared to full sun exposure under standardized fruit load conditions. *Crop Prot.* 38:21-29. Doi:10.1016/j.cropro.2012.03.011.
- López, D. 2010. Efecto de la carga fructífera sobre la roya anaranjada (*Hemileia vastatrix*) del café, bajo condiciones microclimáticas de sol y sombra en Turrialba, Costa Rica. Tesis Mg. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 99 p.
- Mayne, W. 1932. Physiological specialization of *Hemileia vastatrix* B. and Br. *Nature.* 129(3257): 510.
- Melese, K. 2016. The role of biotechnology on coffee plant propagation: A current topics paper. *J. Biol. Agric. Healthcare* 6(5):13-19.
- Mengel, K. & Kirkby, E. 2001. *Principals of plant nutrition.* 5.ed. Dordrecht, Kluwer, Academic. 849 p.
- Miguel, A., Matiello, J. y Almeida, S. 1977. Observações sobre efeitos de três níveis de produção na incidência e controle de ferrugem do cafeeiro. *Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras* [5. Guarapari. Resumos], p. 220-222.
- Mishra, M.K., and A. Slater. 2012. Recent advances in the genetic transformation of coffee. *Biotechnol. Res. Int.* 2012:580857. doi:10.1155/2012/580857. Publishing Corporation Biotechnology Research International Volume 2012, Article ID 580857, 17 p.



- Noronha, M. y Bettencourt, A. J. (1967), Genetic study of resistance of *Coffea* sp. to leaf rust. I. Identification and behaviour of four factors conditioning disease reaction in *Coffea arabica* to twelve physiologic races of *Hemileia vastatrix* Canadian Journal of Botany, v.45, p. 2021-2031.
- OIC (Organización Internacional del Café). 2019. Informe de la OIC sobre desarrollo cafetero de 2019. Londres, Inglaterra. 17 p.
- Orozco, C.F.J. y Schieder, O. 1982. Aislamiento y cultivo de protoplastos a partir de hojas de café. CENICAFÉ (Colombia) 33(4): 129-136.
- Orozco, F.J. y Jaramillo, A. 1978. Efecto del déficit de humedad en el suelo sobre la temperatura del suelo y de las hojas en plantas de *Coffea canephora* y *Coffea arabica*. CENICAFÉ (CO) 29(4): 121-134.
- Pico Rosado J. 2014. Efecto de la sombra del café y el manejo sobre la incidencia, severidad, cantidad de inóculo y dispersión de *Hemileia vastatrix* en Turrialba, Costa Rica. Turrialba : CATIE, 79 p. Tesis Magister : Scientiae.
- PROMECAFE-IICA. 2013. La crisis del café en Mesoamérica, causas y respuestas apropiadas. Boletín PROMECAFE, 8p. Obtenido de <https://promecafe.net/documents/Publicaciones/la%20roya%20en%20centroamerica.p>
- Rajendren, RB. 1967. A new type of nuclear life cycle in *Hemileia vastatrix*. Mycologia 59(2): 279-285 p.
- Rayner, R. W. 1961. Spore liberation and dispersal of coffee rust *Hemileia vastatrix* Berk. Et Br. Nature 191 (4789): 725.
- Rivillas, O.C., Serna, G.C., Cristancho, A.M. y Gaitán, B.A. 2011. La roya del café en Colombia (Impacto, manejos y costos del control, resultados de investigación). Chinchiná, Caldas, Colombia, CENICAFÉ. 53 p.
- Rodríguez Jr., C.J., Bettencourt, A.J. y Rijo, L. 1975. Races of the pathogen and resistance to coffee rust Arm. Rev. Phytopathol. 13: 49-70.
- Saccas, A.M. y Charpentier, J. 1971. La rouille des caféiers due à *Hemileia vastatrix*. BulletinIFCC V.10: 123 p.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, MX). 2013. Ficha técnica roya del café *Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome. México, Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria. 28 p.
- Santacreo, R., Escoto, J.A. y Oseguera, S. 1983. Evaluación de fungicidas comerciales en el control de la roya del cafeto (*Hemileia vastatrix* Berk et Br.) en Honduras. 19 p.
- Silva, R.A., Zambolim, L., Castro, I.S.L., Rodrigues, C.D.C. y Caixeta, E.T. 2018. The Híbrido de Timor germplasm: identification of molecular diversity and resistance sources to Coffee Berry disease and leaf rust. Euphytica 214, 153. <https://doi.org/10.1007/s10681-018-2231-2>.
- Solano, W., Dessauw, D., Cerda, R., Virginio Filho, E. de M., Somarriba, E. y Avelino, J. 2019. Híbridos F1 de café, resistencia a la roya y estrategias a futuro. Comunicación Técnica, PROCAGICA-UE-IICA-CIRAD-CATIE-CIRAD. 4 p.
- Unesco, Comisión Europea, SICA, Cepredenac, Meduca. 2011. Manual sistemas de alerta temprana: 10 preguntas y 10 respuestas. Panamá. 60 p.
- Várzea, V. 2013. Avances del conocimiento sobre las razas de roya del café, con énfasis en la caficultura de Latinoamérica, Turrialba, Costa Rica, CATIE. Presentación power point.
- Várzea, V.M. y Marques, D.V. 2005. Population variability of *Hemileia vastatrix* vs. coffee durable resistance. In: Zambolin L,

- Zambolim EM, Várzea VM (Eds.) Durable Resistance to Coffee Leaf Rust. Viçosa MG, Brazil. Editora UFV, p. 53-74.
- Villalta, J. y Gatica, A. 2019. Una mirada en el tiempo: mejoramiento genético de café mediante la aplicación de la biotecnología (en línea). *Agronomía Mesoamericana*, Costa Rica 30(2):577-599. Disponible en: <https://doi.org/10.15517/am.v30i2.34173>.
- Virginio Filho, E. de M. y Astorga, C. 2015. Prevención y control de la roya del café, Manual de buenas prácticas para técnicos y facilitadores. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) noviembre de 2015.
- Virginio Filho, E. de M. 2013. Ensayo de sistemas agroforestales con café: más de una década de resultados pioneros en el mundo: algunas conclusiones sobre enfermedades, con énfasis en roya (*Hemileia vastatrix* Berk et Br.). In Simposio sobre la roya del café [Memoria. Turrialba, Costa Rica, UCR, Sede del Atlántico. 10-11 jul 2013]. sp. Presentación power point.
- Zadoks, J.C., and R.D. Schein. 1979. *Epidemiology and plant disease Management*. New York: Oxford Univ. Press. Zandstha, H. G., E.C. 427 p.
- Zahner, R. 1968. Water deficits and growth of trees. In Kozlowiski, TT. (Ed.). *Water deficits and plant growth*. New York, Academy Press. V. 2: 191-254.
- Zambolim, L. 2020. Documento técnico descriptivo de la metodología del estudio de razas de roya (*Hemileia vastatrix*) en América Central y Caribe. Turrialba, Costa Rica, CATIEPROCAGICA-IICA-UE. (Documento sin publicar).
- Zambolim, L. y Caixeta, E.T. 2018. Ferrugem. *Enfermedades del café en Central America*. Zambolim, L. & Brenes, B.M. (Eds.). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, p. 17-48.
- Zambolim, L. 2016. Current status and management of coffee leaf rust in Brazil. *Tropical Plant Pathology*, 41(1), p. 1-81.
- Zambolim, L., Maciel-Zambolim, E., Vale, F.X.R., Pereira, A.A., Sakiyama, N.S. y Caixeta, ET. 2005. Physiological races of *Hemileia vastatrix* Berk. et Br. in Brazil: Physiological variability, current situation and future prospects. In Zambolim, L; Zambolim, EM; Várzea, VMP (Eds.). *Durable resistance to coffee leaf rust*. Viçosa, Brazil, Universidade Federal de Viçosa, p. 75–98.
- Zambolim, L. y Chaves, G.M. 1974. Efeito de baixas temperaturas e do binômio temperatura-umidade relativa sobre a viabilidade dos uredosporos de *Hemileia vastatrix* Berk. et Br. e *Uromyces phaseolityca* Arth. *Experientiae*, 17, p. 151-184.
- Zuluaga, C.M. y Céspedes, P.B. 2009. Generalidades de los uredinales (Fungi: Basidiomycota) y de sus relaciones filogenéticas. *Fundamentals of rust fungi (Fungi: Basidiomycota) and their phylogentic relationships*. *Acta biol. colomb* (1): 41-56.



El Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) es un centro regional dedicado a la investigación y la enseñanza de posgrado en agricultura, manejo, conservación y uso sostenible de los recursos naturales. Sus miembros son Belice, Bolivia, Colombia, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, República Dominicana, Venezuela y el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).



Solutions for environment and development  
Soluciones para el ambiente y desarrollo

**Sede Central, CATIE**

**Cartago, Turrialba, 30501**

**Costa Rica**

**Tel. + (506) 2558-2000**

**[www.catie.ac.cr](http://www.catie.ac.cr)**