



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA Y CAMBIO CLIMÁTICO

**FACTORES AMBIENTALES QUE MODULAN LA LIBERACIÓN y
TRANSPORTE DE UREDINIOSPORAS DE LA ROYA DEL CAFETO
(*Hemileia vastatrix* Berk. & Broome) COLECTADAS DEL AIRE EN
VERACRUZ, MEXICO**

TESIS

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTORA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

PRESENTA:

HILDA ADRIANA GUERRERO PARRA

TUTOR PRINCIPAL:

DRA MARÍA DEL CARMEN CALDERÓN EZQUERRO
INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA Y CAMBIO CLIMÁTICO

COMITÉ TUTOR:

DRA. MARÍA DEL ROCÍO ALICIA REYES MONTES
FACULTAD DE MEDICINA
DR. BENJAMÍN MARTÍNEZ LÓPEZ
INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA Y CAMBIO CLIMÁTICO
DR. FRISO HOLWERDA
INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA Y CAMBIO CLIMÁTICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., JULIO, 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



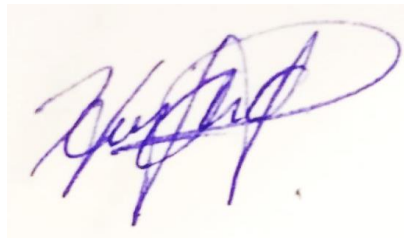
UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

"Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, la obra de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales".

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Hilda Adriana Guerrero Parra', written on a light-colored background.

Hilda Adriana Guerrero Parra

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, mi alma máter.

Al Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM.

Al Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático. donde desarrollé mi trabajo de investigación durante estos años, por el apoyo recibido, así como por el uso de sus instalaciones y el apoyo invaluable tanto del personal académico como administrativo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para la realización de mis estudios de posgrado.

A SENASICA-SAGARPA, por conducto del Dr. Francisco Javier Trujillo Arriaga, quienes otorgaron el financiamiento para la realización del proyecto en el que se enmarcó el presente trabajo.

A mi Tutora Principal, Dra. María del Carmen Calderón Ezquerro; así como mi Comité Tutor: Dra. María del Rocío Reyes Montes, Dr. Benjamín Martínez López y Dr. Friso Holwerda por su guía, observaciones y apoyo durante el desarrollo de mi proyecto de investigación.

A los miembros de mi Jurado: Dra. Ana Cecilia Conde Álvarez, Dra. María del Mar Trigo Pérez y Dra. Carolina Brunner Mendoza por sus valiosas observaciones y revisión al presente escrito.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) Campo Experimental Teocelo, así como al Sr. Leonardo Zapata y la Sra. Marina por permitir colocar nuestros muestreadores y estaciones meteorológicas al interior de sus parcelas.

Al Área de Instrumentación Meteorológica del ICCACC por colaborar siempre con apoyo técnico y por la instalación de las estaciones meteorológicas en la zona de estudio, en particular al Ing. Wilfrido Gutiérrez López (q.e.p.d.) y al Ing. Manuel García Espinosa.

Al Dr. César Guerrero Guerra por su apoyo en el análisis estadístico de datos.

Al Mtro. Miguel Ángel Meneses por su apoyo técnico.

A la Biól. Sandra Ramírez, Biól. Ivonn Santiago, LI. Abraham Onofre y M. en C. Alberto Díaz por todo su apoyo en el trabajo de campo.

DEDICATORIAS

A mi mayor fuente de inspiración, mis amados hijos Iván Alejandro y Diana Marina, así como mi sobrinita Mariel, quienes son el amor presente y futuro y la esperanza del mañana.

A mi esposo Alberto por tomarme de la mano y ser mi compañero en este camino.

A mis papás Hilda y Rey, y mis hermanas Gaby y Miriam por estar siempre ahí con su inmenso amor y apoyo incondicional.

A toda la familia Díaz Morales por acogerme y hacerme sentir parte suya, en especial al Sr. Alberto Díaz Solano quien ahora nos cuida desde el Cielo.

A la hermosa amistad de Ivonn y César; Rosario y Ángel.

A mi asesora y amiga María del Carmen Calderón por el apoyo y las facilidades para continuar mi trabajo experimental a la par de mi debut como mamá.

A todos mis compañeros y amigos del laboratorio del ICACC-UNAM durante todos estos años.

A toda mi familia, amigos y personas compañeras de tiempo y espacio, al mundo, a la vida, a la naturaleza... gracias a Dios...

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	2
DEDICATORIAS	3
RESUMEN	6
1. INTRODUCCIÓN	7
2. MARCO TEÓRICO	9
2.1 Generalidades del cultivo de café	9
2.1.2 El cultivo de café en México	10
2.1.3 El cultivo de café en Veracruz	10
2.2 Sistemas de cultivo de café	12
2.2.3 Rústicos	14
2.3 Descripción botánica del cafeto	15
2.3.1 Descripción de <i>Coffea arabica</i> Linneo (café arábigo)	16
2.3.1.1 C. arabica var. Typica	17
2.3.1.2 C. arabica var. Bourbon	18
2.3.1.3 C. arabica var. Caturra	18
2.3.1.4 C. arabica var. Mundo Novo	18
2.3.1.5 C. arabica var. Catuai	18
2.3.1.6 C. arabica var. Oro Azteca	19
2.3.2 Descripción de <i>Coffea canephora</i> (Pierre ex Froehener) (café robusta)	19
2.4 La roya del cafeto (<i>Hemileia vastatrix</i>)	19
2.4.1 Aspectos biológicos de la roya del cafeto	21
2.4.1.4 Ciclo biológico	24
2.4.2 Factores ambientales que afectan el desarrollo de <i>H. vastatrix</i>	25
2.4.3 Origen y distribución de la roya del cafeto	26
3. ANTECEDENTES	31
3.1 Aerobiología de organismos patógenos de plantas	31
3.2 Estudios sobre dispersión en la atmósfera de <i>H. vastatrix</i>	32
4. HIPÓTESIS	34
5. OBJETIVO GENERAL	35
5.1 OBJETIVOS PARTICULARES	35

6. MATERIAL Y MÉTODO	36
6.1. Área de estudio	36
6.2 Monitoreo de urediniosporas del aire	36
6.3 Determinación de la incidencia de la enfermedad en la finca de Pacho Viejo	40
6.4 Registro de variables meteorológicas	40
6.5. Análisis estadístico	41
7. RESULTADOS	42
7.1 Monitoreo diario de urediniosporas con la trampa de esporas tipo Hirst (1.5 m)	42
7.1.1 Pacho Viejo	42
7.1.2 Teocelo	43
7.2 Monitoreo mensual de urediniosporas de <i>H. vastatrix</i> con las TPE y TEH.	45
7.2.1 Pacho Viejo	45
7.2.2 Teocelo	48
7.3 Comparación de conteos de Trampas Pasivas de Esporas en Pacho Viejo y Teocelo	50
7.4 Determinación de la incidencia y severidad de la enfermedad en la finca de Pacho Viejo	50
7.5 Condiciones ambientales.	51
7.5.1 Temperatura	51
7.5.2. Humedad Relativa	54
7.5.3 Precipitación acumulada	54
7.5.4. Viento	56
7.6 Correlaciones con variables ambientales	57
7.7 Análisis de componentes principales	59
7.8 Comparación entre localidades	60
8. DISCUSIÓN	61
9. CONCLUSIONES	67
10. REFERENCIAS	68

RESUMEN

La roya del cafeto, *Hemileia vastatrix*, es la enfermedad más destructiva y de mayor importancia económica para los cultivos de cafeto. Recientemente se han presentado brotes más agresivos de la enfermedad en todo el mundo, incluso en México, donde la producción de café mostró una disminución del 40%. Este trabajo tuvo como objetivo determinar las condiciones ambientales que favorecen la liberación y transporte aéreo de las urediniosporas de *H. vastatrix* en cultivos de café en Veracruz. El monitoreo de las urediniosporas de la roya del cafeto en el aire se realizó utilizando tres tipos de trampas aerobiológicas colocadas a diferentes alturas: Trampa de Esporas tipo Hirst (TEH, 1,5 m), Trampa de Esporas Pasiva (TPE 1,5, 3, 6 y 9 m) y Trampa de Esporas por Sedimentación (SSS 1 m) de enero de 2014 a octubre de 2015, en dos parcelas de café en Veracruz, México. Los conteos de urediniosporas en el aire exhibieron una distribución bimodal. Bajas concentraciones que aumentan con el tiempo son evidentes de enero a abril, disminuyendo abruptamente en mayo y junio, para volver a aumentar en agosto, alcanzando el récord más alto de urediniosporas en el aire durante el periodo de canícula. La dispersión de las urediniosporas de la roya del café está influenciada principalmente por la temperatura, la lluvia, el viento y la humedad en las hojas. Pueden alcanzar alturas en el aire de hasta 9 m (sobre el dosel) en cultivos de café de sombra. La dispersión de patógenos en la atmósfera comprende procesos complejos interconectados; su conocimiento permite una mejor gestión integral de los mismos.

1. INTRODUCCIÓN

La roya del cafeto, *Hemileia vastatrix* Berk & Br., es la enfermedad más destructiva para los cultivos de café y la de mayor importancia económica a nivel mundial (Agrios, 2005); es capaz de causar infecciones en todas las especies conocidas del género *Coffea* (McCook, 2006), incluyendo *Coffea arabica* L., uno de los agroproductos más importantes en el mundo. Esta enfermedad ocasiona la caída prematura de las hojas, propiciando la reducción de la capacidad fotosintética, así como el debilitamiento de árboles enfermos. En infecciones severas puede ocasionar muerte regresiva en ramas e incluso la muerte de los árboles (Agrios, 2005; APS, 2011), lo cual se traduce en disminuciones significativas de la producción (Moreno y Alvarado, 2000).

La presencia de *H. vastatrix* representa un gran peligro para la actividad cafetícola de México, noveno productor mundial (OIC, 2018), con una superficie sembrada de 722,444.32 ha y un valor de producción que supera los 250 millones de dólares (4.9 mil millones de pesos) (SIAP, 2019). A pesar de que esta enfermedad se encuentra presente en el país desde 1981, no había causado daños importantes a la producción cafetalera nacional. Sin embargo, a partir de 2012, se han reportado brotes más agresivos de la enfermedad en todo el mundo (Yamaoka, 2014; Avelino *et al.* 2015; Zambolim, 2016), debido a la variación de las condiciones climáticas, la diversificación genética del hongo y un inadecuado manejo del cultivo, ocasionando un comportamiento inusual de la enfermedad, con un aumento de su incidencia y severidad, como es el caso de Brasil (Zambolim, 2016), Colombia (Cristancho *et al.*, 2012) y otros países de Centroamérica (Avelino, 2013; Avelino *et al.* 2015). De hecho, en el periodo de 2012 a 2018, la producción de café en México tuvo una disminución del 40%, debido principalmente al efecto de *H. vastatrix* sobre los cultivos (SIAP, 2019), los cuales se siembran con variedades altamente

susceptibles como Typica, Bourbon, Mundo Novo; Caturra y Garnica (Zamarripa Colmenero, A. y E. Escamilla Prado, 2002). De acuerdo a la Organización Internacional del Café (OIC, 2018), los factores económicos (descapitalización de productores) y agronómicos (falta de manejo del cultivo) también han contribuido a alcanzar dichas pérdidas.

La agresividad de la enfermedad está influenciada por los factores ambientales como la temperatura, la precipitación y la cantidad de sombra (Avelino, 2013). De hecho, se ha sugerido que el viento puede transportar las urediniosporas a grandes distancias, incluyendo a escalas continentales (Brown y Hovmøller, 2002; APS, 2011; Acosta, 2015). Sin embargo, estas hipótesis sólo habían sido respaldadas por los estudios de Bowden *et al.* (1971) y Becker y Kranze (1977). No obstante, a pesar de que la roya del cafeto siguió diseminándose alcanzando el continente americano, durante cuarenta años no se habían realizado estudios con base en muestreos aerobiológicos que reafirmaran dichos reportes. Recientemente, Boudrot *et al.* (2016) y Gagliardi *et al.* (2020) realizaron muestreos aerobiológicos de urediniosporas de *H. vastatrix*. Sin embargo, a la fecha no se han realizado estudios de este tipo con diferentes tipos de muestreadores aerobiológicos, a diferentes alturas del cultivo, ni en las condiciones ambientales de los cultivos cafetaleros en México, los cuales son, en su mayoría, bajo sombra.

Por ello, es importante determinar las condiciones ambientales que favorecen la liberación y transporte en el aire de las urediniosporas de *H. vastatrix* mediante métodos aerobiológicos, con el fin de profundizar en la epidemiología de la enfermedad para la planeación estratégica de medidas para su mitigación y control.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Generalidades del cultivo de café

2.1.1 Origen del cultivo de café

El café es originario de las regiones tropicales y subtropicales de África (Berthaud *et al.*, 1988), es uno de los principales cultivos en el mundo, se produce en alrededor de 80 países (Pearl *et al.*, 2004). Los inicios del cultivo de café datan del siglo XIII y como bebida fue comercializado en el siguiente siglo por los árabes, lo cual condujo a creer que el café era originario de Arabia, pero se ha comprobado que su origen son las montañas de Abisinia (actualmente Etiopía, África). La difusión del consumo de café se realizó en primer lugar en Asia y África, y para el siglo XVII, fue introducido a Europa por comerciantes venecianos y holandeses que negociaban marítimamente con los otomanos. Su introducción al continente americano ocurrió en el siglo XVIII, aproximadamente entre 1717 y 1720, cuando los holandeses iniciaron el cultivo en la isla de Martinica y posteriormente en casi todas sus colonias. A partir de 1730 y hasta 1825, la plantación del café fue intensiva en América Central y América del Sur, generando así, dos de las regiones más importantes de producción del café (Avelino y Rivas, 2013).

A pesar de la importancia que representa el café, de las 126 especies descritas (Davis *et al.*, 2006; Davis *et al.*, 2008), tan sólo dos son las especies explotadas comercialmente y de impacto económico, *Coffea arabica* L (arabica) y *Coffea canephora* Pierre (robusta) (Berthaud *et al.*, 1988; Herrera *et al.*, 2002). La especie *C. arabica* comprende diversas variedades (Caturra, Típica, Bourbon, Catuai y Mundo Novo, entre otras), siendo las más cultivadas con un 70% del mercado mundial; mientras que el 30 % de producción restante corresponde a la especie *C. canephora* formada por diferentes genotipos de Robusta (Herrera *et al.*, 2002).

2.1.2 El cultivo de café en México

El café se cultiva en 15 estados de la República Mexicana, distribuido en cuatro regiones: la Vertiente del Golfo que comprende los estados de Hidalgo, México, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Tabasco y Veracruz; la Vertiente del Pacífico, conformada por los estados de Colima, Guerrero, Jalisco, Morelos, Michoacán, Nayarit y Oaxaca; la zona Centro-Norte de Chiapas y la Región Soconusco en el estado de Chiapas. El 80 % de la superficie cultivada se encuentra ubicada en los estados de Chiapas, Veracruz, Oaxaca y Puebla (SIAP, 2019). El estado de Chiapas, encabeza la producción nacional, tanto de café convencional, como de café orgánico, el cual es muy demandado en los mercados norteamericanos y europeos (SIAP, 2019).

2.1.3 El cultivo de café en Veracruz

Veracruz es el segundo estado con mayor producción de café en la República Mexicana. Los cultivos de café en Veracruz cubren una superficie de 139,000 hectáreas, principalmente con las variedades de alta calidad de la especie *Coffea arabica* (PRONATURA, 2017). En Veracruz, las zonas cafetaleras se dividen en 10 regiones: en el norte del estado se encuentra Huayacocotla y Papantla; en el centro están Atzalan, Misantla, Coatepec, Huatusco, Córdoba, Zongolica y en el sur comprende Tezonapa y Los Tuxtlas (Figura 1) (Sanchez-Méndez y Arguijo-Hernández, 2018).



Figura 1. Regiones cafetaleras de Veracruz (PRONATURA, 2017)

En el estado de Veracruz se cultivan ampliamente las variedades de café Typica, Garnica, Bourbon, y Caturra (Hernández-Solabac *et al.*, 2011; Läderach *et al.*, 2010). Este estado aporta 21.25 % de la producción total de café cereza en México y presenta un rendimiento promedio de 2.2 t ha⁻¹. El principal periodo de cosecha de frutos de café en México es de enero a marzo (ASERCA, 2010).

Veracruz es el estado con mayor número de ejidos y comunidades agrarias con un total de 3,337 (INEGI, 2020), es el segundo productor de café en México; y la región centro del estado es la más importante: se cultivan 145 mil ha (SIAP, 2019), de las cuales, la región centro aporta el 42%. Tiene 85 mil productores y la región centro contribuye con el 25%. En el año 2005, Veracruz produjo un millón 83 mil Qq, y la zona centro aportó el 10% de la producción nacional. El cultivo del café en Veracruz representa el 24% de las zonas agrícolas, lo que corresponde al 7.3% de la superficie cultivada en México (Cafés de México, 2006).

2.2 Sistemas de cultivo de café

En México se pueden diferenciar de manera general dos principales modalidades de producción (café bajo sombra y café bajo sol) dentro de las que es posible distinguir cinco grandes sistemas productivos, los cuales se enlistan a continuación:

2.2.1 Monocultivos

En este tipo de estructura de finca es frecuente que se planten árboles de una sola especie para dar sombra a los cafetos, frecuentemente árboles de una leguminosa del género *Inga* sp. En este tipo de cultivo se encuentran una gran densidad de plantas de café. En este caso el uso de agroquímicos se torna una práctica obligada y la unidad productiva se concentra en una producción exclusivamente dirigida al mercado (Figura 2) (Nolasco, 1985; Hernández-Martínez, 2008; PRONATURA, 2017).

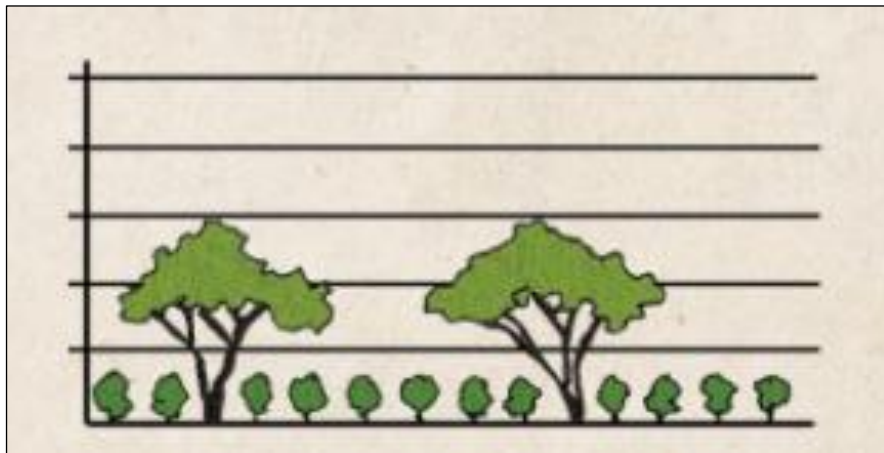


Figura 2. Sistema de monocultivo (Modificado de Moguel y Toledo (1999).

2.2.2 Policultivos

Estas fincas tienen una estructura de vegetación con árboles no muy altos con gran cantidad de árboles jóvenes frutales, maderables e introducidos para dar sombra, lo que produce

bosques ricos y con gran variedad de especies forestales, muchas de las cuales no son autóctonas (Hernández- Martínez, 2008; PRONATURA, 2017).

Las fincas con policultivo simple (PS) y policultivo diverso (PD) son fincas bajo sombra que mantienen diversas especies de árboles que pertenecen al bosque nativo y donde crecen los cafetos junto con numerosas especies de plantas útiles formando un sistema de manejo de especies nativas y exóticas con la meta de aumentar ganancias y disminuir costos de producción.

En las fincas con *Policultivo Simple*, los productores usan variedades mejoradas, agroquímicos y como sombra introducen plantaciones de *Inga* spp. y de otras pocas especies comerciales como cítricos (Figura 3).

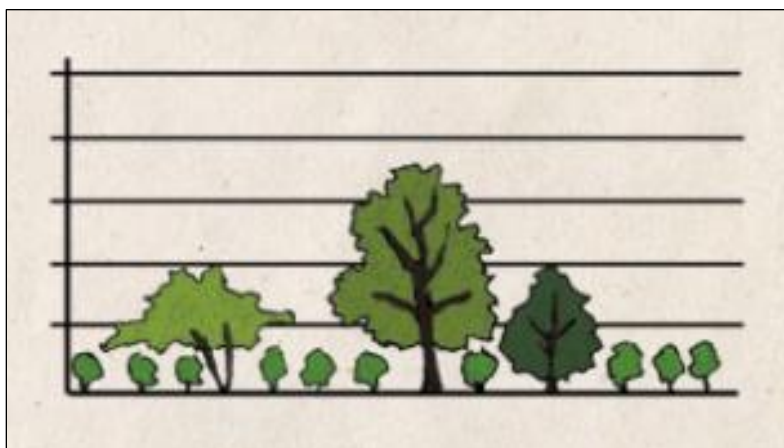


Figura 3. Sistema de policultivo simple (Modificado de Moguel y Toledo (1999)

Mientras que en el manejo de *Policultivo Diverso*, los propietarios quieren obtener diversos productos del cafetal, así las fincas son resultado de acumular especies de árboles útiles a través del tiempo y de tomar ventaja de los árboles nativos ya presentes en sus tierras (Figura 4).



Figura 4. Sistema de policultivo diverso (Modificado de Moguel y Toledo (1999))

2.2.3 Rústicos

Son fincas con sombra y poco manejo o donde las prácticas agrícolas tienen bajo impacto ecológico. En este tipo de finca la intención del productor es proveer sombra a las plantas de café sin obtener algún tipo de aprovechamiento de los árboles. Las estructuras rústicas pueden parecer un bosque “maduro”, es decir, con árboles altos, epifitas en los troncos, sombra y se observan hasta cuatro niveles de estratos de altura de las copas de los árboles (Figura 5) (Hernández-Martínez, 2008; PRONATURA, 2017).

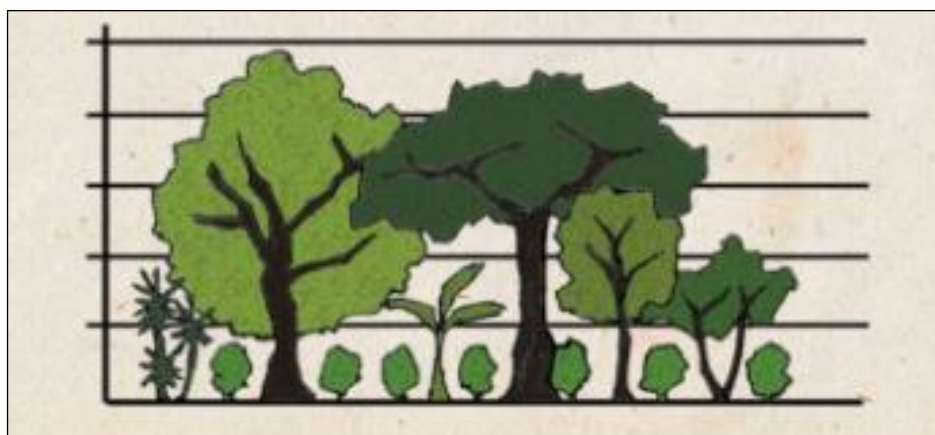


Figura 5. Sistema rústico (Modificado de Moguel y Toledo (1999))

2.2.4 A sol

Las plantaciones a sol no tienen ninguna cobertura de árboles y presentan una gran densidad de plantas de cafeto. Esta modalidad representa un sistema totalmente agrícola que pierde el carácter agroforestal de los sistemas anteriores. Los cafetos alcanzan los más altos rendimientos por unidad de superficie debido al estrés de ser cultivados bajo sol, presionando al cafeto para tener una mayor producción de frutos. Para que las plantas bajo este sistema no enfermen, sean atacadas por plantas o mueran, se usan grandes cantidades de fertilizantes, herbicidas y/o plaguicidas (Figura 6) (Nolasco, 1985; Hernández-Martínez, 2008; PRONATURA, 2017).

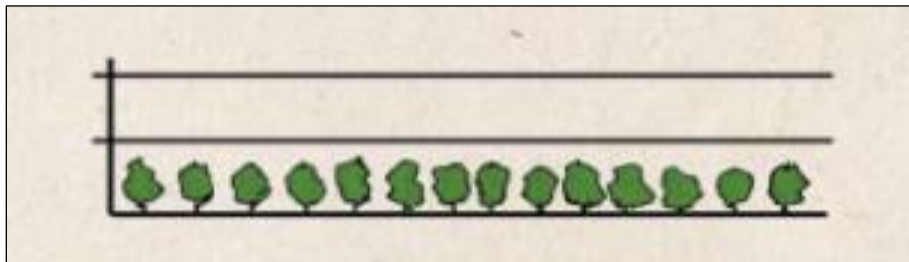


Figura 6. Sistema de cultivo a sol (Modificado de Moguel y Toledo (1999))

En Veracruz se distinguen 3 tipos de productores de café: pequeños productores o minifundistas, productores agrícolas o agroindustriales y productores secundarios, que son aquellos que no tienen como actividad principal el cultivo de café. La gran mayoría de los productores son minifundistas y mantienen sus fincas con sistemas de policultivos y rústicos. El 93.5% de las fincas cafetaleras tienen una superficie menor a 3 ha (PRONATURA, 2017).

2.3 Descripción botánica del cafeto

El café pertenece a la familia de las Rubiáceas (Tabla 1). El género *Coffea* incluye por lo menos 70 especies, de las que sólo resaltan por su valor comercial en grano para bebida estimulante: *Coffea arabica* Linneo y *Coffea canephora* Pierre. Esta planta produce frutos,

conocido como cereza, que son de color verde en estado inmaduro y rojo-amarillento cuando madura (Castillo *et al.*, 1996).

Tabla 1. Clasificación de *C. arabica* y *C. canephora*

Dominio:	Eucariota
Reino:	Plantae
Phylum:	<i>Spermatophyta</i>
Subphylum:	<i>Angiospermae</i>
Clase:	<i>Dicotyledonae</i>
Orden:	<i>Gentianales</i>
Familia:	Rubiaceae
Género:	<i>Coffea</i>
Especies	<i>C. arabica</i> , <i>C. canephora</i>

Fuente: CABI (2020)

2.3.1 Descripción de *Coffea arabica* Linneo (café arábigo)

Es un árbol perennifolio que puede llegar a medir hasta 6 m de altura, de forma cónica o irregular y bajo condiciones normales de crecimiento desarrolla un solo eje (Costa Rica, 1984). El cafeto puede crecer con una sola raíz y desarrolla posteriormente múltiples raíces en la base o en la parte baja de la raíz principal o pivotante. Estas ramificaciones laterales son las responsables de la nutrición mineral y de proveer a la planta de agua. La mayoría de las raíces se distribuyen a 30 cm de profundidad y en un radio de 2.5 m del tronco (Costa Rica, 1989). Las hojas son elípticas, oblongas, lanceoladas, miden de 7 a 17 cm de largo y de 3 a 8 cm de ancho, de color verde oscuro, brillante en el haz, cerosas y coriáceas, con un verde más pálido y menos brillante en el envés, con nervadura central prominente y márgenes de ondulaciones diversas (Morfin *et al.* 2006; Liogier, 1997). Las flores se agrupan en una inflorescencia llamada cima, normalmente se presentan de dos a tres cimas por axila, con dos a cuatro flores por cima, es decir, de cuatro a 12 flores por axila. Las flores individuales son completas, hermafroditas y autógamias, presentan cáliz, corola, estambres

y pistilo, son de color blanco y miden de 6-12 mm de largo y 3-4 mm de ancho, tienen un ovario ínfero con dos óvulos (Morfin *et al.* 2006).

El fruto es una drupa ovoide conocida como cereza que mide de 10-17 mm de largo por 8-14 mm de ancho, consta de epicarpio o epidermis, mesocarpio o pulpa, endocarpio o pergamino y endospermo o semilla, es de color verde en estado inmaduro, para convertirse de rojo a amarillo cuando madura (Morfin *et al.* 2006).

Las semillas de café son oblongas, planoconvexas, cubiertas por una película plateada o perisperma (vestigios del tegumento del óvulo). La semilla se constituye por el endospermo cuya coloración es verde oscuro amarillento, mide de 10 a 15 mm de largo por 5–10 mm de ancho, con un embrión pequeño basal de 1 a 2 mm. La semilla se encuentra cubierta por un endocarpio fibroso, conocido como pergamino, el endospermo es córneo formado por hemicelulosa, proteínas, cafeína, aceite, azúcares, dextrina, celulosa, ácido clorogénico y otros compuestos. La madurez fisiológica de la semilla se alcanza alrededor de los 220 días después de la antesis y carece de periodo de latencia, siendo capaces de germinar en forma inmediata (Morfin *et al.* 2006).

Las variedades más representativas del café arábica son la Typica, Bourbon, Caturra, Mundo Novo, Garnica y Catuai; cada una de ellas presenta diferencias en la calidad, el volumen producido, rendimiento, resistencia a plagas, aroma, acidez, cuerpo, etc. (CEFP, 2001; Nolasco, 1985; Pérez, 2005).

2.3.1.1 *C. arabica* var. Typica

Es la variedad más cultivada en México. Nolasco (1985) reporta que el 85% de los productores tienen plantaciones establecidas con dicha variedad. En los estados de Veracruz, Puebla, Oaxaca, Hidalgo y Guerrero es la variedad con mayor superficie de cultivo (Escamilla, 1993; Santoyo *et al.*, 1995). La variedad Typica es susceptible a *H. vastratix* causante de la roya anaranjada, es sensible a la insolación y vientos (Carbajal, 1972; Villaseñor, 1987).

2.3.1.2 *C. arabica* var. Bourbon

Esta variedad se encuentra distribuida en todas las zonas cafetaleras, favoreciéndole las alturas de más de 1000 msnm. Es una variedad sensible a los vientos, tolera la insolación y es muy susceptible a *H. vastatrix* (ISIC, 1976).

2.3.1.3 *C. arabica* var. Caturra

La variedad Caturra fue introducida a México en 1952, es el resultado de una mutación de la variedad Bourbon (Castillo y Moreno, 1988). Se caracteriza por ser de porte bajo con un sistema radical bien desarrollado. Los frutos y semillas son similares al Bourbon; se considera más precoz y productiva que Typica y Bourbon (Villaseñor, 1987).

2.3.1.4 *C. arabica* var. Mundo Novo

Es una cruce o híbrido natural de las variedades Bourbon con la Sumatra (selección de Typica). Se introdujo a México en 1951 (León, 1962; Coste, 1969), esta variedad se encuentra en la mayor parte de las regiones cafetaleras del país (Santoyo *et al.*, 1995). Es una variedad rústica de gran adaptación a zonas bajas con tolerancia a las sequías pero susceptible a *H. vastatrix* (Villaseñor, 1987).

2.3.1.5 *C. arabica* var. Catuaí

Se adapta a diferentes condiciones ecológicas a menos de 1000 msnm, es susceptible a *H. vastatrix*; es una variedad similar a Caturra de porte bajo y entrenudos cortos. Los brotes terminales son de color verde claro, muestra segregación al color de los frutos maduros, rojos o amarillos, se considera una variedad precoz y con madurez tardía (Villaseñor, 1987).

2.3.1.6 *C. arabica* var. Oro Azteca

Fue el primer híbrido desarrollado en México, por el Instituto Mexicano del Café en Xalapa, Veracruz (Morfin, 2006). La variedad se formó por generaciones avanzadas del cruzamiento entre Mundo Novo 15 (fruto color rojo), por Caturra Amarillo. Su color es verde oscuro. Su rendimiento medio es de 6.5 kg de café cereza por planta (Villarreal, 1987), pero muy susceptible a *H. vastatrix* y con frutos maduros persistentes.

2.3.2 Descripción de *Coffea canephora* (Pierre ex Froehener) (café robusta)

El café robusta (*Coffea canephora* Pierre ex Froehener) es un árbol o arbusto, con hojas anchas que en ocasiones adquieren apariencia corrugada u ondulante, oblonga, elíptica, corta, además de redondeadas de 15-30 cm de largo y 5-15 cm de ancho. La nervadura media es plana por arriba y prominente por debajo, las nervaduras laterales son de 8-13 pares, el peciolo es de 8 a 20 mm de largo. Tiene flores blancas, ligeramente difusas, en dos racimos auxiliares y sésiles. La corola tiene de 5-7 lóbulos, los estambres y el estilo bien salidos. *C. canephora* se adapta mejor a tierras bajas, cálidas y húmedas (Morfin *et al.* 2006).

2.4 La roya del cafeto (*Hemileia vastatrix*)

La roya del cafeto, causada por el hongo *Hemileia vastatrix* Berk & Br., es la enfermedad más destructiva del cafeto (*Coffea arabica* L.) y la de mayor importancia económica a nivel mundial; provoca la caída prematura de las hojas, propiciando la reducción de la capacidad fotosintética, así como el debilitamiento de árboles enfermos (Figura 7). En infecciones severas puede ocasionar muerte regresiva en ramas e incluso la muerte de los árboles (APS, 2011; SINAVEF, 2009).



Figura 2. Defoliación de cafeto atacado por la roya del café (Imagen propia, Coatepec, Veracruz)

La agresividad de la enfermedad está estrechamente relacionada con la abundancia del inóculo y con su rápida diseminación, influenciada por los factores ambientales (Aguilar, 1995). La fuerte defoliación causada por la enfermedad se traduce en disminuciones significativas de la producción (Moreno, 2000). Con un nivel de infección de 68% se han reportado pérdidas en la producción de hasta 48% (Avelino *et al.* 1999).

Entre los factores abióticos que favorecen la dispersión del hongo se encuentran el viento y la lluvia mediante el salpique (splashing). La dispersión local del agente patógeno

de hoja a hoja o entre plantas, principalmente en áreas con altas densidades de plantación, es favorecida por la salpicadura del agua de lluvia. A grandes distancias el viento juega el rol más importante al dispersar las urediniosporas entre regiones productoras de café (APS, 2011; Rivillas *et al.* 2011).

Las interacciones entre un brote infeccioso o el incremento en la población de una plaga son muy complejas, así como la respuesta del cultivo ante la presión de éstos y las medidas que se deben tomar para evitar pérdidas significativas en la producción. Entre las variables involucradas en estas interacciones se encuentran las meteorológicas como la temperatura, la precipitación y la humedad relativa. Además, otros factores como la condición fisiológica del cultivo y factores intrínsecos del agente patógeno, como la población inicial, el estadio de desarrollo y la virulencia de las cepas de *H. vastatrix*

2.4.1 Aspectos biológicos de la roya del cafeto

2.4.1.1 Clasificación taxonómica

Reino: Fungi

Phylum: Basidiomycota

Subphylum: Puccinioniomycotina

Clase: Pucciniomycetes

Orden: Pucciniales

Género: *Hemileia*

Especie: *Hemileia vastatrix*

2.4.1.2 Descripción biológica

El hongo fue descrito por primera vez por Berkeley en 1869, con base en muestras enviadas desde Ceilán; algunas observaciones adicionales fueron hechas por Abbay en 1878. Word publicó en 1882 los resultados de sus investigaciones detalladas en Ceilán y desde entonces ha habido pocas adiciones relevantes. La siguiente descripción se basa en varias fuentes, pero principalmente en las realizadas por Ward (1882b), Delacroix (1911) y Roger (1951) (Citados por Rayner, 1972).

El micelio se encuentra completamente dentro del mesófilo y está principalmente confinado a zonas de la hoja donde los tejidos están descoloridos y cloróticos. Consiste de hifas hialinas en abundancia, de aspecto tortuoso y frecuentemente ramificadas en forma muy irregular; el diámetro de las hifas es bastante uniforme y oscila entre 5 y 6 μm . En ocasiones, el contenido de las hifas tiene una coloración anaranjada —rojiza. Las hifas crecen entre las células del mesófilo y penetran en ellas mediante ramificaciones cortas, filiformes que terminan en expansiones ovas, reniformes o un poco irregulares. Miden de 7-8 μm x 4-4.5 μm (Chevaugéon, 1956) y contienen citoplasma denso con uno o dos gránulos refringentes. Estas expansiones constituyen los haustorios que sirven como órganos que absorben los nutrientes. Generalmente hay uno o dos haustorios en cada célula hospedante, pero a veces existen en número mayor. Estos haustorios se tiñen fuertemente con azul de anilina y otros colorantes. El micelio es más abundante en el parénquima esponjoso de la hoja y en las especies y variedades más resistentes de café queda confinado a esta parte del mesófilo. En las variedades más susceptibles, el micelio tiende a penetrar al tejido de empalizada y hasta puede enviar haustorios a las células de la epidermis (Rayner, 1972).

Cuando las células del hospedante son invadidas, los cloroplastos se tornan gradualmente amarillentos, el contenido de las células afectadas se contrae, tornándose encu; esta decoloración también se extiende hasta cierto grado a las paredes celulares. A veces el citoplasma desaparece y es reemplazado inicialmente por un líquido acuoso y posteriormente por aire (Delacroix 1911, citado por Rayner, 1972).

Las hifas forman masas entretrejidas de micelio de apariencia coralina, en las cavidades subestomáticas. De estas masas, un fascículo de filamentos finos (llamados "esterigmas" por algunos autores), crecen a través del poro del estoma. El fascículo se hace más grueso, pero raras veces rompe la epidermis en la región del estoma. Las ramificaciones que forman las urediniosporas están llenas de un citoplasma grisáceo, de granulación fina; al llegar al exterior de la hoja se expanden para formar un saco ovoide (Rayner, 1972).

La forma de las urediniosporas maduras varía ligeramente, suelen ser angostas y triangulares—redondeadas con un corte transversal. La forma es similar a la de una nuez de Brasil o un gajo de naranja, pero más redondeada. A veces, las urediniosporas tienden a tener una forma piramidal. La parte más redondeada de la espora está densamente ornamentada con espinas pequeñas y erectas de 3 a 4 μm de largo, y tienden a ser más cortas y escasas hacia la parte lisa, aunque en la línea de demarcación existe una zona donde están más densamente apretadas. Las espinas son excrecencias de la gruesa capa exospórica. La naturaleza media ornamentada y media lisa de la espora es el detalle característico que condujo al nombre del género. *Hemi*=medio y *leios*=liso. La forma exacta y el espaciamiento de las espinas es bastante difícil de distinguir, aun cuando en el microscopio se use el máximo de luz (Rayner, 1972).

El contenido de las esporas es granular y generalmente anaranjado; a veces contiene gotitas aceitosas de color anaranjado—rojizo intenso, pero otras veces el contenido es gris lechoso. Las dimensiones de las esporas son 25 a 35 x 12 a 28 μm con pequeñas diferencias entre las muestras.

2.4.1.3. *Producción de esporas*

Se producen esporas nuevas debajo de las ya formadas cuando no son perturbadas, formándose columnas irregulares de un ancho de varias esporas. Estas columnas están en contacto con otras producidas por fascículos vecinales, de modo que se forma un retículo irregular de filamentos de esporas o para dar lugar a una costra esponjosa en la superficie de la lesión. Esta costra es muy inestable y una ligera agitación mecánica, tal como un toque suave de la hoja, hace que la estructura completa se desintegre en agregados de esporas de varios tamaños, que se desprenden de la hoja como una nube polvorienta (Rayner, 1972).

El número de urediniosporas producidas es muy elevado. Ward (1882) contó 150,000 esporas en una instancia en una sola lesión. Rayner (1972), al golpear una lesión a intervalos de 2 a 3 semanas, logró liberar al aire un total de 366,100 esporas durante tres meses. Desde el comienzo de la producción, la lesión tenía un área de unos 272 mm² y 18 mm en diámetro. Alrededor de 50,000 esporas podían removerse adicionalmente mediante un lavado vigoroso al final de este periodo, dando un total de unas 416,000 esporas. La lesión bajo observación tenía una vida corta, una lesión puede permanecer activa hasta 5 meses. Por lo tanto, es de esperar que frecuentemente se produzca un número mucho mayor de esporas que en el caso estudiado (Rayner, 1972).

2.4.1.4 Ciclo biológico

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 que con el tiempo 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 (Rivillas *et al.*, 2011). La germinación de esporas requiere de la presencia de agua libre por al menos 6 horas y también es favorecida con temperaturas entre 21-25 °C y condiciones de oscuridad. Para la formación del apresorio, se requiere de un periodo de 5.3-8.5 h. La germinación se inhibe por la luz y cuando se evapora el agua de la hoja, ya que afecta el crecimiento de los tubos germinativos. Después de germinar, el hongo penetra en las hojas a través de las aberturas naturales (estomas) situadas en el envés de las hojas maduras (Rayner, 1961). 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 con éstos extraen los nutrientes para su crecimiento. Una vez transcurridos 30 días, después de la colonización, el hongo está lo suficientemente maduro para diferenciarse en estructuras llamadas uredios, que son las encargadas de producir nuevas urediniosporas. Aproximadamente, se producen 1,600 esporas por mm² de hoja. Durante un período de 4 a 5 meses, éstas serán dispersadas para iniciar el nuevo ciclo de infección (Rayner, 1972) El

tiempo transcurrido desde la infección hasta la producción de esporas se denomina periodo de latencia. En la Figura 8 se muestra el ciclo de vida de *H. vastatrix*.

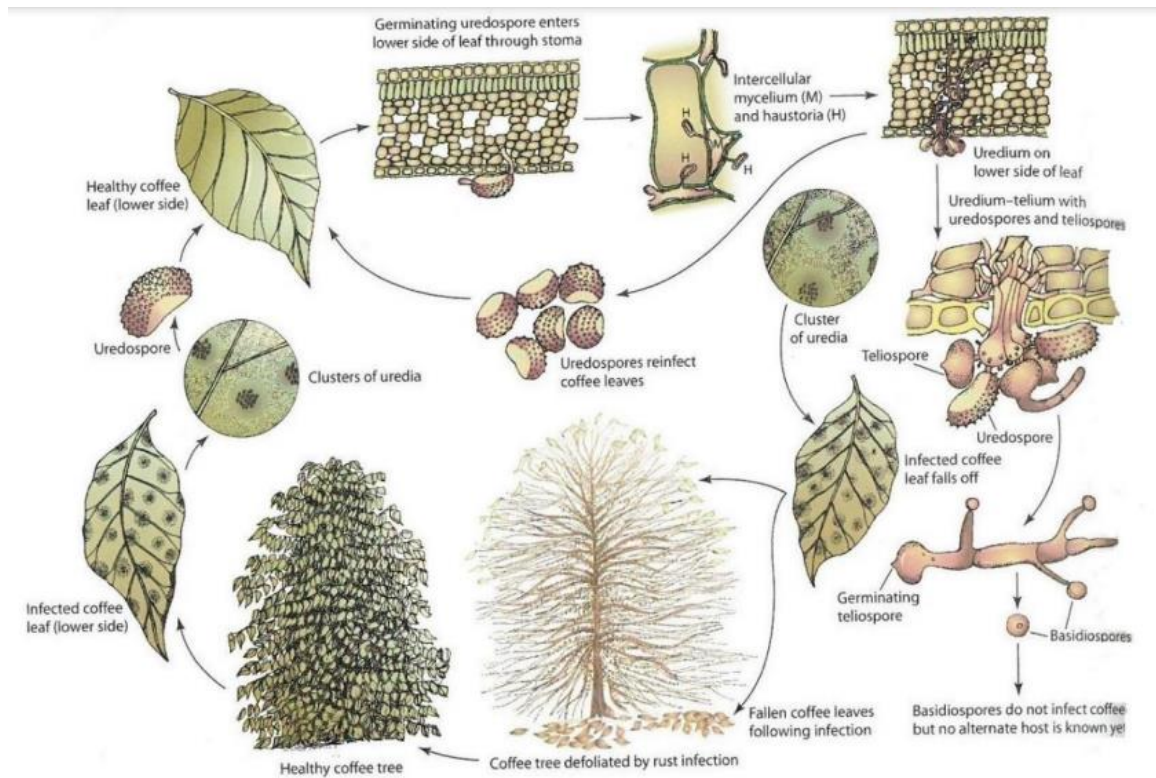


Figura 3. Ciclo de vida de la roya del café (Agrios, 2005)

2.4.2 Factores ambientales que afectan el desarrollo de *H. vastatrix*

Los factores que afectan la viabilidad de las urediniosporas según Nutman y Roberts (1963) son la edad del micelio que las producen y la edad de las esporas (por ejemplo, el período de tiempo entre la abscisión y el inicio de la germinación). Asimismo, los factores que afectan la germinación e invasión son la humedad, temperatura, luz, naturaleza del sustrato, la concentración del inóculo (Nutman y Roberts, 1963; Hocking, 1968 y Bigirimana 2012). Las condiciones climáticas óptimas para el desarrollo de la enfermedad se describen en la Tabla 2:

Tabla 2. Condiciones ambientales favorables para el desarrollo de *H. vastatrix* (Nutman y Roberts, 1965; Hocking, 1968 y Bigirimana 2012)

Característica	Variable	
Germinación de urediniosporas	Humedad	Solo con presencia de agua líquida
	Luz	Óptima: Más de 9 horas de oscuridad al día o luz de baja intensidad
	Temperatura	En medio de agar: Óptima 22 °C, Mínima 15.5°C Máxima 28.5 °C
		En hojas: Óptima 21°C
	Preacondicionamiento	Aumenta con la exposición previa a 15-17°C durante 3.3 horas
	Viabilidad	Las urediniosporas secas pierden su viabilidad al 50% después de dos días. Asimismo, disminuye cuando se humedecen y después se desecan.
	Hojas infectadas	La germinación es más frecuente en hojas jóvenes que en hojas viejas. Principalmente en los bordes.
Desarrollo de la enfermedad	Temperatura	Óptima: 22°C
	Luz	Prevalciendo oscuridad
	Altura sobre el nivel del mar	Correlación negativa entre severidad y altura msnm.

2.4.3 Origen y distribución de la roya del café

La roya anaranjada del café fue reportada formalmente por primera vez a principios de 1869 en una plantación de la isla asiática de Ceilán, hoy Sri Lanka (Avelino y Rivas, 2013). En ese mismo año, el micólogo británico Berkeley describió y nombró al hongo responsable de la enfermedad: *Hemileia vastatrix* (Berkeley y Broom, 1869). La repentina aparición de la enfermedad y su rápida expansión en una región tan alejada de los centros de origen y de diversificación del café localizados en África central y África oriental, desató una gran polémica sobre el origen de ésta. Lo esperado hubiera sido que el hongo se detectara

primero en África, ya que los centros de origen de un hospedero y sus patógenos suelen coincidir (Avelino y Rivas 2013). 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 en cuanto a la virulencia del hongo hacia la planta. Ahora bien, las especies originarias de Ceilán e India, pertenecientes al género *Psilanthus*, que hoy se propone incluir en el género *Coffea* (Davis, *et al.* 2011) son altamente susceptibles a la enfermedad, lo que comprueba que ésta es de un origen ajeno a esos lugares. La hipótesis más verosímil es que la roya anaranjada fue introducida a Ceilán desde África del Este de forma accidental a través de plantas infectadas siguiendo la expansión imperial británica, la cual facilitó el movimiento de personas y bienes, y por consiguiente de plantas y sus patógenos (McCook, 2006; Avelino y Rivas, 2013).

La gran diversidad en cuanto a la resistencia del cafeto hacia la roya anaranjada especialmente en los cafetales silvestres de Etiopía, sugiere que el origen de la enfermedad es efectivamente África. En esta zona, las especies de café más susceptibles eran naturalmente raras, lo que explica que durante muchos años el hongo pudiera pasar prácticamente desapercibido (Saccas y Charpentier; 1971). A partir de Ceilán, la roya anaranjada del cafeto se dispersó rápidamente a toda Asia, causando estragos especialmente en las zonas de bajío, donde las temperaturas son más adecuadas para esta enfermedad. En las tierras bajas de Java y Sumatra, por ejemplo, la roya anaranjada redujo la producción 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 anaranjada tuvo consecuencias desastrosas. Filipinas era el cuarto exportador mundial de café en 1889 con más de 7,000 t. En el año 1892 cuando se presentó el primer brote de roya anaranjada en esa zona, las exportaciones se redujeron drásticamente (Rayner, 1972). Paralelamente, la enfermedad fue detectándose en todas las plantaciones de África oriental con efectos similares. La producción de la isla de “La Reunión” bajó así en un 75% en las décadas de los 1880 y 1890. Para inicios del siglo veinte, como resultado de estos ataques intensos en bajas altitudes, la caficultura de Asia y África

se había concentrado en algunas áreas de altura donde las condiciones climáticas permitían convivir con la roya del cafeto (Mc Cook, 2006).

La roya anaranjada tardó bastante en detectarse en África occidental. En 1960, algunos países de estas regiones todavía estaban aparentemente libres del hongo. En Angola, por ejemplo, la roya anaranjada se detectó solamente en 1966 (Rayner, 1972). McCook (2006) 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 veinte (la Gran Depresión, la Segunda Guerra Mundial). Al finalizar la Segunda Guerra Mundial, y con la recuperación económica, el cultivo del café en África central y occidental se desarrolló fuertemente, lo cual propició un nuevo periodo de expansión de la roya anaranjada. Eskes (1989), por su lado, sugiere que la roya del cafeto estaba ampliamente distribuida en África central y occidental pero que ésta pudo pasar desapercibida. Las especies de *Coffea* sp. originarias de esta zona son diploides, tienen en efecto un nivel de resistencia alto en general. La llegada tardía de la enfermedad a África del Oeste puede explicar que la roya anaranjada no se conociera en América sino hasta 1970, y es compatible con la hipótesis de Bowden *et al.* (1971), los cuales sugirieron que las urediniosporas del hongo fueron transportadas por los vientos alisios desde África del Oeste hasta Brasil. Waller (1972), sin embargo, sugiere que la enfermedad fue introducida accidentalmente a través de material vegetal o de ropa contaminada.

El primer brote fue detectado en noviembre de 1976 en Brasil, entre San Marcos y Masatepec, sobre la costa del Pacífico (Avelino y Rivas 2013). Extrañamente, Nicaragua fue el segundo país productor de importancia en verse afectado por la roya anaranjada en América Latina. Paulatinamente, todos los países del área centroamericana fueron invadidos por la enfermedad: El Salvador (1979) ; Honduras y Guatemala (1980); Chiapas, México (1981) y Costa Rica (1983). En menos de veinte años después de su llegada a Brasil, la roya anaranjada se hizo presente en todos los países latinoamericanos productores de

café. Sólo Hawái y Australia quedan hoy libres de la enfermedad en el mundo (Avelino y Rivas 2013).

Durante más de tres décadas, la zona centroamericana logró convivir con la roya anaranjada, básicamente a través del uso de fungicidas, de variedades resistentes (especialmente en Honduras) y de la aplicación de técnicas que incrementaron la productividad, compensando así los costos y las pérdidas de producción relacionadas con la roya anaranjada (McCook, 2009). Así fue hasta el año 2012, cuando se desató la epidemia de roya anaranjada más grave que la región haya conocido hasta entonces (Cressey, 2013). En realidad, ésa no fue la primera epidemia grave desde la introducción de la enfermedad a la región. En 1989-90, se dio una epidemia severa en Costa Rica, otra en Nicaragua en 1995-96, otra en El Salvador. Dos de ellas coincidieron con bajos precios del café: la del 1989-90, en relación con el abandono de las cuotas de exportación y el regreso a un mercado libre; y la del 2002-03, en el peor momento de la crisis de sobreproducción de los años 2000. Los bajos precios incidieron sobre el manejo agronómico de las fincas, en las que se redujeron la fertilización y el control químico, poniendo la caficultura en un estado de fragilidad frente a los ataques de plagas y enfermedades (Avelino y Rivas 2013). Algo similar sucedió en Colombia con las recientes epidemias de roya anaranjada del 2008 al 2011 (Cristancho 2012). Se puede decir que la roya anaranjada tuvo un impacto casi continental en pocos años, a la diferencia de las epidemias anteriores que fueron aparentemente epidemias a nivel nacional (Avelino y Rivas; 2012).

Hemileia vastatrix fue detectada por primera vez en México en 1981, en la región del Soconusco en Chiapas y, actualmente, está presente prácticamente en todas las zonas productoras del país (SENASICA, 2019). En septiembre y octubre de 2012, se presentaron condiciones ambientales favorables para que la roya del cafeto tuviera un comportamiento agresivo en la región del Soconusco, Chiapas, trayendo como resultado defoliaciones severas que fueron favorecidas por la ocurrencia de vientos fuertes y el movimiento de personal que realiza las labores de cosecha. A partir de entonces, la enfermedad se ha

convertido en uno de los principales problemas de la cafeticultura en México. De hecho, la producción de café cereza ha disminuido desde entonces en un 40% en el país, debido principalmente al efecto negativo ejercido en los últimos años de la roya del cafeto (SIAP, 2019).

3. ANTECEDENTES

3.1 Aerobiología de organismos patógenos de plantas

La atmósfera contiene una gran cantidad de esporas de hongos. Los estudios aerobiológicos son importantes para comprender la distribución, ecología y deposición de esporas que se dispersan en la atmósfera a considerables distancias de sus fuentes. Muchas esporas mueren durante su dispersión como consecuencia de la exposición a agentes atmosféricos. Sin embargo, un gran número de esporas permanecen viables, algunas de las cuales pueden ser inofensivas, mientras que otras pueden causar enfermedades a las plantas. Por ello, el monitoreo del contenido de esporas del aire es importante para una mejor comprensión de la epidemiología de las enfermedades de las plantas (Frenguelli, 1998).

En diversas partes del mundo se han realizado estudios aerobiológicos que han señalado a una amplia variedad de hongos fitopatógenos de dispersión aérea sobre diferentes cultivos de importancia económica. Así se ha comprobado que la propagación a través de Europa de *Blumeria graminis* (DC.) Speer, patógeno del trigo, se debe a la dispersión aérea de sus esporas (Limpert, *et al.* 1999). Las esporas de especies de *Phytophthora*, un oomiceto responsable de pérdidas económicas significativas en diversos cultivos, pueden ser dispersadas también por el aire (Ristaino, 2000). Por otra parte, se ha comprobado que los conidios de *Stemphylium vesicarium* (Wallr.) E.G. Simmons se liberan al aire, favorecidos por la lluvia causando el tizón de la hoja del ajo (Prados-Ligero, *et al.* 2003).

En estudios realizados en poáceas se ha demostrado que *Pyricularia grisea* Sacc. y *Bipolaris oryzae* (Breda de Haan) Shoemaker producen esporas que se dispersan en la baja atmósfera sobre siembras de arroz y afectan el cultivo en diferentes épocas de su crecimiento (Picco *et al.* 2002). Además *Gibberella zeae* (Schwein.) Petch, agente causal del tizón de las cabezuelas que afecta el trigo y otros cereales produce esporas que se dispersan a través del aire y sus eventos de mayor deposición son principalmente en la noche (Del Ponte *et al.* 2005). Otros estudios realizados sobre la liberación, dispersión y deposición de

las esporas de *G. zae* demostraron que las esporas viables de este hongo fueron abundantes durante cada hora del día y la noche; además, que las esporas fueron más abundantes en días nublados (Maldonado-Ramírez, 2005).

En años recientes se han utilizado métodos aerobiológicos como base para la creación de modelos de pronóstico de enfermedades causadas por hongos fitopatógenos, asociadas a parámetros meteorológicos. Isard *et al.* (2007) propusieron un Sistema Integral de Modelado Aerobiológico, lo que les permitió pronosticar el movimiento de las urediniosporas de *Packopsora pachyrhizi*, causante de la roya asiática de la soya, de zonas subtropicales hacia latitudes medias del continente americano y su dispersión en Norteamérica. Jedryczka *et al.* (2008), desarrollaron una red de trampeo aerobiológico para la detección de ascosporas de *Leptosphaeria maculans* – *L. biglobosa* en cultivos de colza, permitiendo el desarrollo de un sistema para el pronóstico del cancro del tallo en cultivos de Polonia. Asimismo, Meno *et al.* (2020) establecieron umbrales de variables climáticas para el pronóstico del tizón temprano de la papa, mediante el modelo TOMCAST, el cual relaciona los niveles de conidios de *Alternaria solani* y *A. alternata* con los niveles de humedad en hoja y temperatura ambiente para calcular valores diarios de severidad en cultivos de Limia, España.

3.2 Estudios sobre dispersión en la atmósfera de *H. vastatrix*

La agresividad de la roya del cafeto está estrechamente relacionada con la abundancia del inóculo y con su rápida diseminación, influenciada por los factores ambientales (Avelino, 2003). La diseminación de *H. vastatrix* consiste de una fase de liberación, en la que la urediniospora se despegga del uredio, una fase de dispersión, en la cual la espora abandona la lesión, y otra fase de su deposición sobre la hoja (Avelino, 2013). Según Nutman *et al.* (1960), la liberación de las urediniosporas, solamente es posible en presencia de agua libre, lográndose a través de las salpicaduras provocadas por la lluvia (Bock, 1962; Nutman *et al.* 1960). Guzmán y Gómez (1987), encontraron que una lluvia de 5 mm era necesaria para que el agua acumulada sobre la cara superior de la hoja rebalsara, pasara a la cara inferior

y, por lo tanto, tuviera la posibilidad de despegar directamente las urediniosporas del uredio. Rayner (1961) afirmaba que el viento o las vibraciones causadas por los impactos de las gotas sobre las hojas podían liberar las esporas en seco. De hecho, se ha sugerido que el viento puede transportar las urediniosporas a grandes distancias, incluyendo a escalas continentales (Brown y Hovmøller, 2002; APS, 2011; Acosta, 2015). Sin embargo, estas hipótesis sólo habían sido respaldadas por los estudios de Bowden *et al.* (1971) quienes midieron con un impactador en cascada la velocidad de caída de las urediniosporas, indicando una velocidad terminal de 0.6 cm s^{-1} , similar a la de esporas de royas que se transportan a grandes distancias; así como los trabajos de Becker y Kranze (1977), quienes detectaron urediniosporas en el aire mediante un monitoreo con trampas de esporas tipo Hirst en la localidad de Ruiru en Kenia a una altura de 1,500 msnm, con una temperatura promedio anual de $17.5 \text{ }^\circ\text{C}$ y una precipitación anual acumulada de 1,280 mm.

No obstante, a pesar de que la roya del cafeto siguió diseminándose, alcanzando el continente americano, durante cuarenta años no se habían realizado estudios basados en muestreos aerobiológicos que reafirmaran dichos reportes. Recientemente, Boudrot *et al.* (2016) realizaron un estudio en la localidad de Turrialba, Costa Rica (600 msnm; precip. acum. 2996 mm; temp prom. 22.5°C) para determinar el efecto de los árboles de sombra sobre la dispersión de las urediniosporas en el aire con trampas de esporas tipo Hirst. Dicho estudio mostró que la lluvia es el principal agente dispersor bajo sombra y que las ráfagas de viento promueven la dispersión de las urediniosporas bajo condiciones secas bajo sol, mientras que en condiciones bajo sombra no tiene efecto, debido probablemente a que el dosel bloquea el viento. Gagliardi *et al.* (2020), realizaron un muestreo de urediniosporas de *H. vastatrix* utilizando dos equipos Spore Watch (Burkard), los cuales fueron colocados a sotavento y barlovento de los límites de una parcela de café en Costa Rica, los muestreadores se colocaron a una altura de 1.5 m, durante 3 días de 11:00 a 17:00 hr sin encontrar diferencias significativas en las cantidades de urediniosporas colectadas. Sin embargo, no se han realizado estudios de este tipo con distintos muestreadores.

4. HIPÓTESIS

La liberación y transporte de urediniosporas de *H. vastatrix* a diferentes alturas del cultivo de cafeto dependerá de las condiciones ambientales presentes, principalmente temperatura media, temperatura mínima, precipitación acumulada y humedad en hoja.

5. OBJETIVO GENERAL

- Determinar las condiciones ambientales que favorecen la liberación y transporte de urediniosporas de *Hemileia vastatrix* a diferentes alturas en cultivos de café de los Municipios de Coatepec y Teocelo.

5.1 OBJETIVOS PARTICULARES

- Realizar el monitoreo aerobiológico de urediniosporas de *H. vastatrix* en parcelas centinelas del estado de Veracruz con diferentes tipos de trampas y a diferentes alturas del cultivo.
- Determinar la influencia de las condiciones ambientales (temperatura máxima, media y mínima, así como la precipitación acumulada, humedad relativa, humedad en hoja y magnitud del viento) en la liberación y transporte en la atmósfera de las urediniosporas de *H. vastatrix*.

6. MATERIAL Y MÉTODO

6.1. Área de estudio

El estudio aerobiológico se llevó a cabo de manera continua durante el periodo de enero de 2014 a octubre de 2015 en dos parcelas de cultivo de café del estado de Veracruz. La primera en una finca con policultivo tradicional ubicada en la localidad de Pacho Viejo, municipio de Coatepec, Veracruz ($19^{\circ}28'38''\text{N}$; $96^{\circ}55'06''\text{O}$) a una altura de 1207 msnm (Figura 9). La segunda en una parcela de cultivo con un sistema bajo sombra especializada, localizado dentro de las instalaciones del Campo Experimental Teocelo del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, SAGARPA, en el municipio de Teocelo, Veracruz ($19^{\circ}23'42''\text{N}$; $97^{\circ}00'06''\text{O}$) a una altura de 1,277 msnm (Figura 9). El clima dominante de la región es semicálido húmedo y subhúmedo con una temperatura promedio de 19.2°C y precipitación pluvial media anual de 1926 mm (INEGI, 2016)

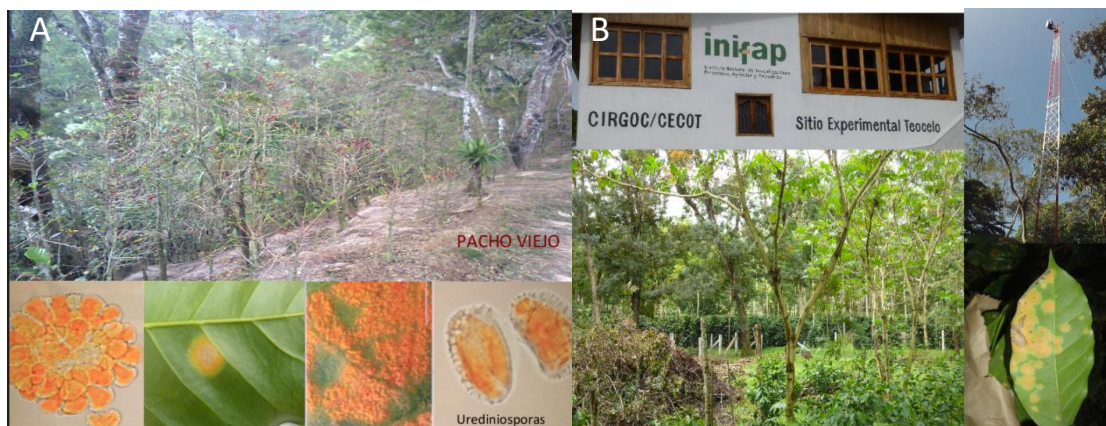


Figura 9. a) Policultivo tradicional ubicado en la localidad de Pacho Viejo, Mpio. de Coatepec, Veracruz. B) Campo Experimental Teocelo del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, SAGARPA, en el municipio de Teocelo, Ver

6.2 Monitoreo de urediniosporas del aire

El monitoreo de urediniosporas del aire en las parcelas centinelas seleccionadas fue realizado mediante tres tipos de trampas:

a) Trampa de Esporas tipo Hirst (TEH).

Se colocó una Trampa de Esporas tipo Hirst (Burkard Manufacturing Co Ltd, Rickmansworth, UK) en cada parcela. La TEH tiene un orificio de entrada de 14 x 2 mm y un tambor en el que se impactan las partículas sobre una cinta de celofán (Melinex) impregnada con una mezcla de vaselina con hexano (5:1). El tambor se fija a un mecanismo de reloj que se mueve 2 mm/h, permitiendo el muestreo horario y continuo de las partículas presentes en el aire. Cuenta con una veleta que mantiene el orificio de entrada de aire en dirección del viento dominante; así como una bomba de vacío, que succiona 10 l/min durante 7 días. La cinta muestreada fue dividida en secciones equivalentes a cada día de muestreo (7x24hr). Cada fragmento fue colocado sobre un portaobjetos y fijado para su análisis al microscopio óptico. Se contó el número total de urediniosporas colectadas por hora, por día y por periodos mensuales (Figura 10A).

b) Trampa Pasiva de Esporas (TPE)

La Trampa Pasiva de Esporas (Martínez Bracero *et al.*, 2018) es un sistema tubular que en su interior cuenta con un portaobjetos con un adhesivo (vaselina con hexano 1:5) para coleccionar las aeropartículas por impacto. La superficie del área de colecta del portaobjetos fue de 60 x 25 mm. Este sistema cuenta con una veleta que gira a favor del viento. Se colocaron ocho TPE en Pacho Viejo y diez TPE en Teocelo. Las TPE fueron colocadas a diferentes alturas del nivel del suelo (TPE 1.5 m, TPE 3 m, TPE 6 m y TPE 9 m), realizándose el monitoreo de manera quincenal durante el periodo de enero de 2014 a septiembre de 2015. Al término del muestreo, la laminilla fue desmontada y transportada al laboratorio para su fijación y análisis al microscopio óptico. Se contabilizó el promedio total de urediniosporas colectadas a cada altura de forma quincenal y sumada para obtener el total mensual (Figura 10B).

c) Trampa Pasiva de Esporas por Sedimentación (TPES)

La Trampa Pasiva de Esporas por Sedimentación (Sedimentation Spore Sampler, (SSS) UNAM, 2013, modificada de Durham, 1946) consiste en una superficie de plástico, sobre la cual se colocaron portaobjetos cubiertos por una ligera capa de vaselina con hexano (5:1), para el impacto de aeropartículas de forma pasiva. Las trampas tienen un soporte metálico que las coloca a un metro de altura de la superficie del suelo. Se encuentran protegidas de la lluvia mediante una cubierta plástica en forma de cúpula. Se colocaron 4 TPES el 10 de mayo de 2014, las cuales se dejaron funcionando durante periodos de 15 días, coincidiendo con el muestreo de las TPE. Al término de cada muestreo, la laminilla fue desmontada y transportada al laboratorio para su fijación y análisis al microscopio óptico. Se contabilizó el promedio total de urediniosporas colectadas y sumada para obtener el promedio total mensual (Figura 10C).



Figura 10. A) Trampa de Esporas tipo Hirst (TEH). B) Trampa Pasiva de Esporas (TPE). C) Trampa Pasiva de Esporas por Sedimentación (TPES).

6.3 Determinación de la incidencia de la enfermedad en la finca de Pacho Viejo

Se determinó el porcentaje de incidencia de *H. vastatrix* en el cultivo de café en la localidad de Pacho Viejo de acuerdo al método de Montes *et al.* (2012). Para ello, se realizaron 17 muestreos en la finca (una vez al mes) de marzo de 2014 a septiembre de 2015. Se realizaron recorridos en zig-zag en la parcela y se seleccionaron 10 árboles al azar y 10 ramas de cada uno de ellos, para un total de 100 ramas por lote. Se contó y registró en cada rama, el número total de hojas y el número de hojas con roya

El porcentaje de incidencia se calculó de la siguiente manera:

$$\% \text{ Incidencia} = \frac{\text{Total de hojas con roya en 100 ramas} \times 100}{\text{Total hojas en 100 ramas}}$$

6.4 Registro de variables meteorológicas

Se instaló una estación meteorológica (Davis Vantage Pro 2 USA) por zona de estudio, para medir las condiciones ambientales. Se midieron variables como la temperatura media, máxima y mínima, precipitación acumulada, velocidad del viento promedio y máxima, humedad relativa y humedad en hojas, las cuales fueron analizadas y asociadas con la cantidad de urediniosporas colectadas en cada trampa. Debido a que la temperatura es un factor fundamental para que inicie la infección en las plantas de cafeto, se realizó un análisis comparando la temperatura promedio registrada con la estación meteorológica instalada en Teocelo durante 2014 y 2015, y los datos meteorológicos obtenidos de ERA5-Land (ERA5; Hersbach y Dick, 2016) para ambos años. El ERA5-Land, producido por el Centro Europeo de Pronósticos a Medio Plazo, proporciona valores de diversas variables ambientales por hora de los ciclos de agua y energía con una resolución espacial de 9 km, describiendo la evolución de éstos ciclos sobre la Tierra de manera consistente durante el período de producción, que abarca desde 1950 hasta el presente. Recientemente, Muñoz-Sabater *et al.* (2021) mostró que ERA5-Land tiene un rendimiento comparable con ERA5 que describe las variables del ciclo energético, pero ERA5-Land tiene una mejora general

del ciclo del agua en comparación con reanálisis anteriores. Como señalaron estos autores, aunque la resolución temporal es la misma tanto en ERA5-Land como en ERA5 (por hora), una mejor resolución espacial de 9 km es la principal ventaja de ERA5-Land en comparación con ERA5 (31 km). Estas características hacen de ERA5-Land un valioso conjunto de datos para respaldar los estudios ambientales y de la tierra.

6.5. Análisis estadístico

Se realizaron pruebas de normalidad para determinar la distribución de todos los datos de conteos de urediniosporas en cada tipo de trampa. Debido a que los conteos de urediniosporas presentaron una distribución no normal, se realizó una normalización de datos (Ln) para realizar pruebas paramétricas para el análisis de los resultados. Se utilizó la prueba ANOVA ($p < 0,05$) con una prueba complementaria de Tukey para comparar los conteos de urediniosporas entre trampas y promedios de grupo significativamente diferentes entre sí. Se realizaron correlaciones de Pearson ($p < 0,05$) y un análisis de componentes principales para determinar qué variables ambientales influyen en la liberación y transporte de urediniosporas de *H. vastatrix*. El software utilizado fue IBM SPSS ver. 22.

7. RESULTADOS

7.1 Monitoreo diario de urediniosporas con la trampa de esporas tipo Hirst (1.5 m)

7.1.1 Pacho Viejo

Durante el periodo de enero a marzo de 2014 se registraron registros de entre 0 y 10 urediniosporas en el aire (Figura 11A). Sin embargo, se obtuvo un incremento durante marzo y abril, alcanzando 37 urediniosporas, colectadas el día 11 de abril (Figura 11B). Entre agosto y octubre, se observaron los mayores picos de urediniosporas en el año, llegando a un máximo de 138 de esporas el 18 de octubre de 2014 (Figura 11C). Para el mes de noviembre y diciembre de 2014, así como la primera mitad del año 2015, se registraron registros por debajo de las 10 urediniosporas (Figura 11D); sin embargo, se incrementaron gradualmente en julio y agosto, para alcanzar incluso, un conteo de 110 urediniosporas el 15 de agosto del 2015 (Figura 11E). Asimismo, se observó una disminución hacia el mes de septiembre.

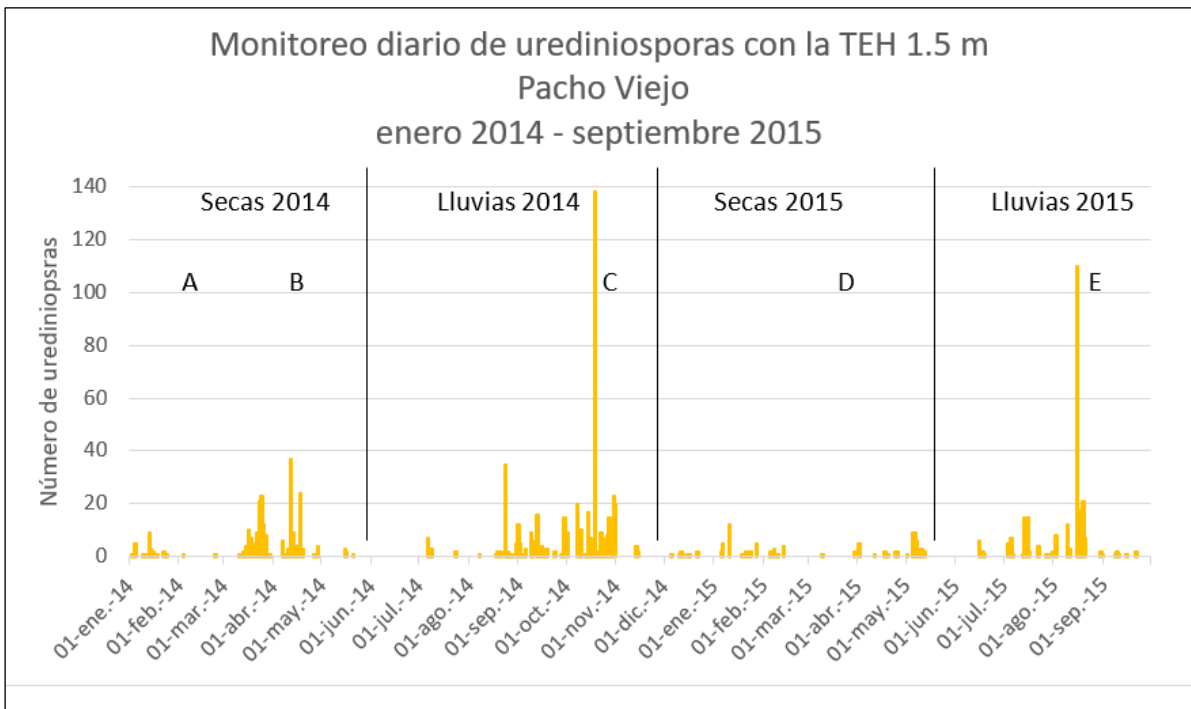


Figura 11. Conteos diarios de urediniosporas de *H. vastatrix* colectadas del aire de Pacho Viejo del 1 de enero de 2014 al 30 de septiembre de 2015.

Se observa que las condiciones de alta humedad relativa del ambiente (90-100%), temperatura media menor a 16 °C; así como humedad de las hojas mayor a 12, no favorecen la dispersión de las esporas en el aire (Tabla 3A, D); mientras que condiciones de humedad relativa < 80%, temperaturas promedio mayores a 19°C, y humedad de la hoja <7, favorecen la liberación y dispersión de las esporas en el aire (Tabla 3B, C, E).

Tabla 3. Condiciones meteorológicas prevalecientes en Pacho Viejo, en días con ausencia y presencia de urediniosporas colectadas del aire con la TEH (1.5m)

Parámetros Meteorológicos	A (0 esporas)	B (37 esporas)	C (138 esporas)	D (0 esporas)	E (110 esporas)
Fecha	25/enero/2014	11/abril/2014	18/octubre/2014	28/febrero/15	16/agosto/15
Temperatura media	15°C	19°C	20°C	15°C	21°C
HR	98 a 100%	40-60%	86%	91%	82%
Magnitud del viento	1 a 3 m/s	1 m/s con ráfagas de 6m/s	1m/s	0.3 m/s	1m/s con ráfagas de 5 m/s
Dirección del viento	Noreste - Noroeste	Sur-suroeste	Sur-suroeste	Sur-sureste	Norte noroeste
Humedad de la hoja en hora de colecta (escala de 0 = seco a 15 = mojada)	15	0	7	12	-
Horario de colecta	-	0:00-7:00 horas 12:00-18:00 horas	16:00-17:00 horas	-	0:00-2:00

7.1.2 Teocelo

Durante el período de enero a febrero de 2014 se registraron conteos menores a diez urediniosporas (Figura 12A). Sin embargo, a partir de marzo de 2014 se registró un incremento, colectando hasta 35 urediniosporas a mediados de abril de 2014 (Figura 12B). El número de urediniosporas colectadas permaneció bajo en comparación a ese mes

durante el resto del año (Figura 12C). En 2015, solo se registraron algunos picos puntuales, de 30 urediniosporas en los días 27 abril (Figura 12D) y de 120 urediniosporas el 15 de agosto de 2015 (Figura 12E).

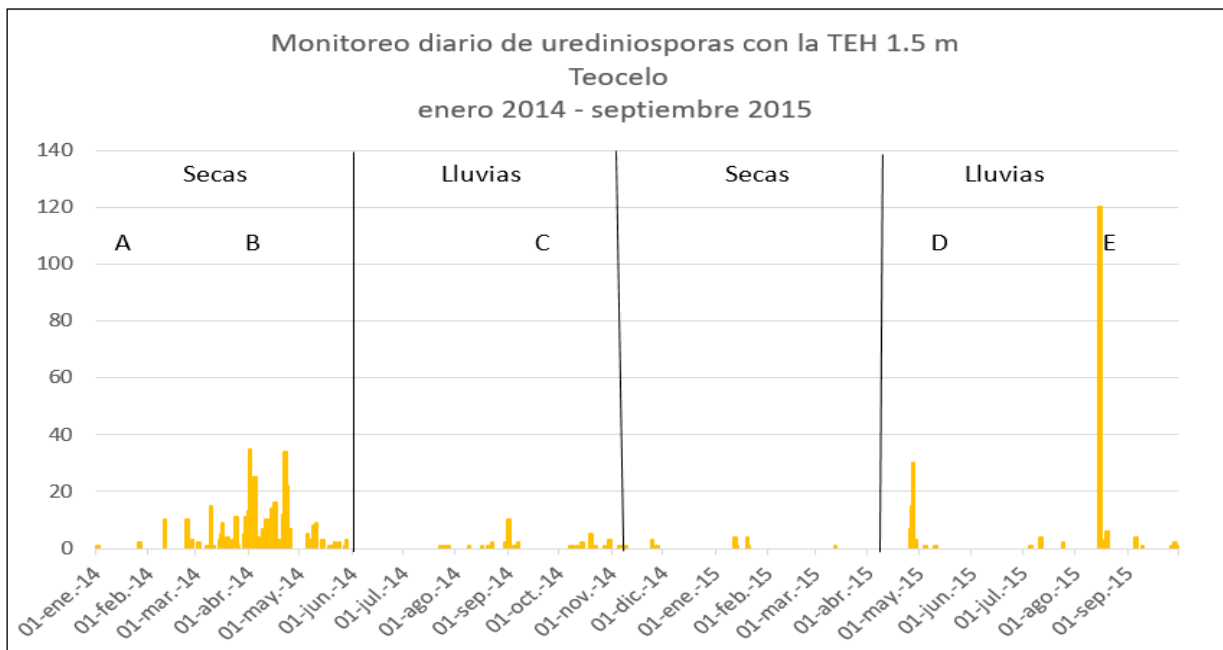


Figura 12. Conteos diarios de urediniosporas de *H. vastatrix* colectadas del aire de Teocelo del 1 de enero de 2014 al 30 de septiembre de 2015.

Se observó que las condiciones de alta humedad relativa del ambiente (90-100%), temperatura media menor a 16 °C; así como humedad de las hojas >14, no favorecen la dispersión de las esporas en el aire (Tabla 4A, C); mientras que condiciones de menor humedad relativa (< 80%), temperaturas promedio mayores a 21 °C, y humedad de la hoja de 0-4, favorecen la liberación y dispersión de las esporas en el aire (Tabla 4 B, D, E).

Tabla 4. Condiciones meteorológicas prevalecientes en Teocelo, en días con ausencia y presencia de urediniosporas colectadas del aire con la TEH (1.5m)

Parámetros Meteorológicos	A (0 esporas)	B (35 esporas)	C (0 esporas)	D (30 esporas)	E (120 esporas)
Fechas	28ene14	22abr2014	28ene15	27abr15	15ago15
Temperatura media	18 °C	21°C	12.5°C	25°C	21°C
HR	90 y 100%	85 %	90%	50%	80%
Magnitud del viento	1 a 3 m/s	1 a 2 m/s	1 m/s	1m/s	1-2 m/s
Dirección del viento	Calmas	Oeste	Oeste	Este	Oeste
Humedad de la hoja en hora de colecta (escala de 0 = seco a 15 = mojada)	15	0	14	0-4	1
Hora de colecta	-	2:00-9:00	-	0:00-9:00	0:00-10:00

7.2 Monitoreo mensual de urediniosporas de *H. vastatrix* con las TPE y TEH.

7.2.1 Pacho Viejo

El conteo de las urediniosporas colectadas del aire con las TPE, TPES y TEH (conteos quincenales acumulados) durante 2014, en Pacho Viejo, mostró una distribución bimodal. Bajas concentraciones (<40 urediniosporas), las cuales se incrementan con el tiempo son evidentes durante el periodo de enero a abril y disminuyen abruptamente en mayo y junio. Durante el mes de julio se incrementan nuevamente, alcanzando un pico máximo durante el mes de agosto con un promedio de 2563 urediniosporas en el aire con la TPE 1.5 m, 1664 urediniosporas; con la TPE 3 m, 174 urediniosporas; con la TPE 6 m, 521 urediniosporas con la TPE 9 m; así como 63 urediniosporas en la TEH (1.5 m). El conteo con las TPES alcanzó un valor máximo de 29017 urediniosporas. El número de urediniosporas disminuyó gradualmente durante los últimos meses del año mostrando en todos los tipos de trampas

el mismo comportamiento bimodal. En contraste, en el año de 2015 se contabilizaron pocas urediniosporas durante los primeros meses del año, presentándose como en el año anterior, un pico durante el mes de agosto colectándose un promedio de 3,721 urediniosporas en la TPE 1.5 m de altura, 1,511 urediniosporas en la TPE 3 m , 337 urediniosporas en la TPE 6 m y 300 urediniosporas en la TPE 9 m, así como 199 urediniosporas en la TEH (1.5 m) y 29823 en la TPES. Cabe resaltar que, en ocho meses del muestreo, la TPE 9 m presentó un mayor número de urediniosporas que la TPE 6 m; asimismo, en abril y noviembre de 2014 la TPE 9 m presentó un mayor número de urediniosporas que las TPE 3 y 6 m.

Se realizó la prueba de ANOVA para determinar diferencias entre las TPE a diferentes alturas, encontrando solo diferencias significativas entre la TPES y las otras trampas ($p < 0.001$). (Tabla 5)

Tabla 5. Promedios mensuales de urediniosporas colectadas por las TPE, TPES y la TEH acumuladas mensuales de enero de 2014 a septiembre de 2015 en la localidad de Pacho Viejo

	TPE 1.5m	TPE 3m	TPE 6m	TPE 9m	TEH Acumulado mensual	TPES Promedio
ene-14	6	21	21		29	-
feb-14	22	34	7		2	-
mar-14	110	74	7	43*	110	-
abr-14	95	77	44	84**	108	-
may-14	1	24	1	0	6	8
jun-14	0	19	2	2	0	381
jul-14	373	438	0	370*	12	5790
ago-14	2563	1664	174	521*	63	29017
sep-14	181	109	48	9	71	1083
oct-14	1049	346	56	215*	322	9621
nov-14	420	57	57	62**	6	792
dic-14	0	10	0	0	9	36
ene-15	34	12	0	11	31	17
feb-15	0	0	0	0	10	0
mar-15	0	0	0	0	3	0
abr-15	5	4	0	0	14	31
may-15	141	2	0	6	32	231
jun-15	87	6	28	9	9	879
jul-15	1123	654	122	125*	54	11413
ago-15	3721	1511	338	300	194	29823
sep-15	543	116	14	53*	7	4345
ANOVA	AB	B	B	B	B	A
<p>*Número de urediniosporas suspendidas en el aire recolectadas a una altura de 9 m mayor que las recolectadas a una altura de 6 m.</p> <p>** Número de urediniosporas suspendidas en el aire recolectadas a una altura de 9 m mayor que las recolectadas a 3 y 6 m de altura.</p> <p>ANOVA: La prueba ANOVA se realizó con los datos transformados (Ln). De acuerdo con la prueba adicional de Tukey, las medias de conteo entre trampas que no comparten una letra son significativamente diferentes entre sí (p<0.0001)</p>						

7.2.2 Teocelo

Al igual que en la localidad de Pacho Viejo, se observó una distribución bimodal en los conteos de urediniosporas durante el año 2014, aunque la cantidad de urediniosporas fue notablemente menor que en la localidad de Pacho Viejo. Se observó un ligero incremento durante los meses de marzo y abril, disminuyendo hacia los meses de mayo y junio, y alcanzando un pico máximo durante el mes de agosto, con un promedio de 92 urediniosporas en la TPE 1.5, 696 urediniosporas en la TPE 3 m, 159 urediniosporas en la TPE 6 m y 128 urediniosporas en la TPE 9 m, así como 17 urediniosporas en la TEH (1.5 m). Al final del año fue evidente la disminución en la concentración de urediniosporas.

En el año 2015, en contraste con el año anterior, hubo cantidades muy bajas de urediniosporas (incluyendo registros de cero urediniosporas), durante los meses de febrero y marzo. A partir del mes de abril, se observó un incremento, registrándose entre 12 y 50 urediniosporas en las TPE, disminuyendo nuevamente en mayo con el inicio de las lluvias. Sin embargo, a partir del mes de julio se incrementaron considerablemente en comparación con el año anterior, contabilizando un promedio de 3473 urediniosporas en la TPE 1.5m, 3,536 urediniosporas en la TPE 3 m, 147 urediniosporas en la TPE 6 m y 1808 esporas en la TPE 9 m, así como 131 en la TEH (1.5), manteniendo niveles similares en el mes de agosto. En el mes de septiembre, el número de urediniosporas disminuyó nuevamente.

Se realizó la prueba de ANOVA para determinar diferencias entre las TPE a diferentes alturas. Sólo se encontraron diferencias significativas entre la TPE a 1.5 m y la TPE a 6 m ($p < 0.05$) (Tabla 6).

Tabla 6. Promedios mensuales de urediniosporas colectadas por las TPE y la TEH acumuladas mensuales de enero de 2014 a septiembre de 2015 en la localidad de Teocelo.

	TPE 1.5 m	TPE 3 m	TPE 6m	TPE 9m	Hirst acum.
ene-14	0	0	0	6*	4
feb-14	0	0	3	2	23
mar-14	44	17	14	44**	90
abr-14	16	23	27	207**	240
may-14	1	7	1	38**	46
jun-14	0	1	0	0	0
jul-14	69	44	72	14	3
ago-14	92	696	159	128	17
sep-14	196	66	39	37	13
oct-14	182	416	80	109*	16
nov-14	121	126	0	20*	6
dic-14	27	31	32	8	0
ene-15	65	28	0	25*	10
feb-15	0	0	0	0	0
mar-15	5	5	1	2*	1
abr-15	43	50	6	12*	55
may-15	75	50	0	0	2
jun-15	193	230	10	10	0
jul-15	3473	3536	147	1808*	7
ago-15	2213	3372	200	2469*	131
sep-15	99	98	0	48	9
ANOVA	A	AB	AB	AB	AB

*Número de urediniosporas suspendidas en el aire recolectadas a una altura de 9 m mayor que las recolectadas a una altura de 6 m.
 ** Número de urediniosporas suspendidas en el aire recolectadas a una altura de 9 m mayor que las recolectadas a 3 y 6 m de altura.
 ANOVA: La prueba ANOVA se realizó con los datos transformados (Ln). De acuerdo con la prueba adicional de Tukey, las medias de conteo entre trampas que no comparten una letra son significativamente diferentes entre sí (p<0.0001)

7.3 Comparación de conteos de Trampas Pasivas de Esporas en Pacho Viejo y Teocelo

Los conteos totales de urediniosporas de Teocelo fueron superiores a los de Pacho Viejo, sin embargo, la distribución temporal fue similar durante todo el período de muestreo, mostrando los picos máximos en agosto de ambos años (Figura 13).

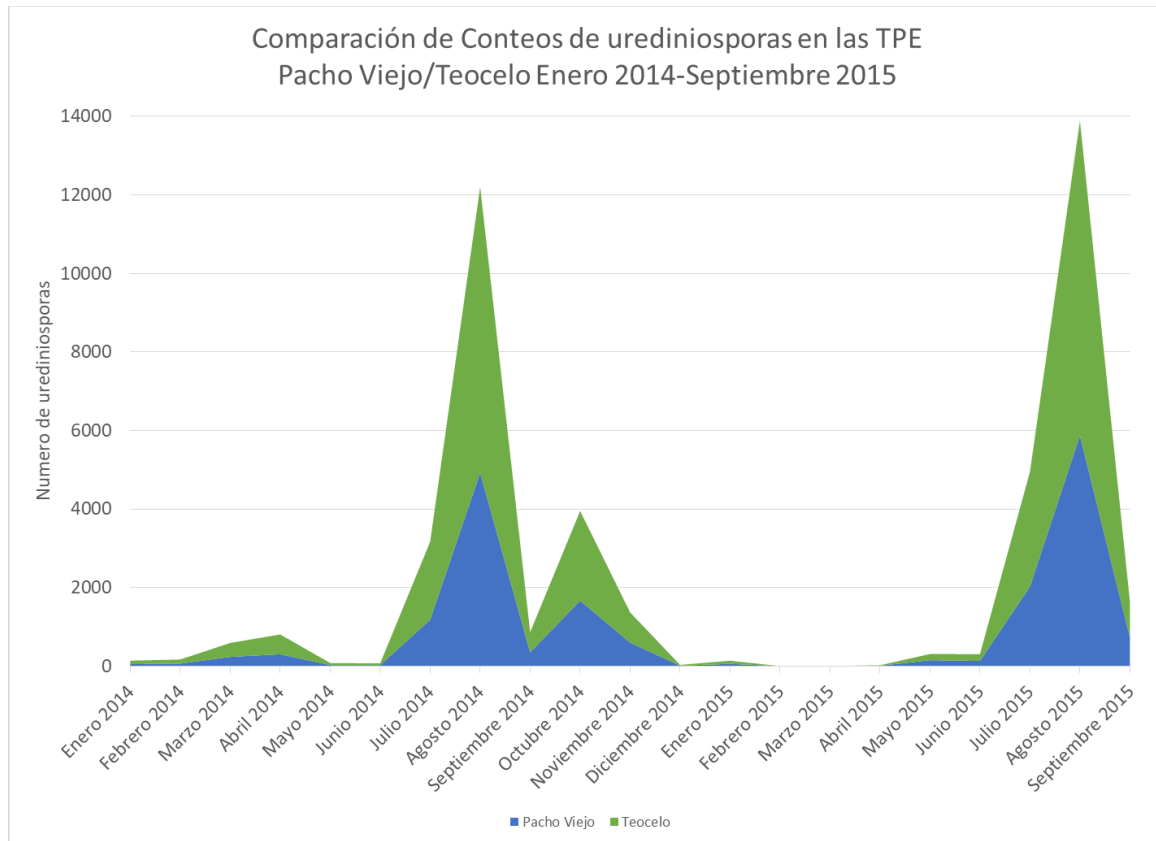


Figura 13. Comparación de conteos de urediniosporas con las TPE en Pacho Viejo y Teocelo de Enero de 2014 a Septiembre de 2015.

7.4 Determinación de la incidencia y severidad de la enfermedad en la finca de Pacho Viejo

En la Figura 14 se muestra la incidencia de la enfermedad a partir de marzo de 2014 hasta septiembre de 2015. Se observa que, a partir del mes de abril de 2014 hay un marcado ascenso en la incidencia de la enfermedad hasta llegar a 69.49% en el mes de noviembre de 2014, cuando comienza a disminuir paulatinamente hasta llegar a un 14.45% durante el mes

de mayo de 2015. Nuevamente comienza a incrementarse a partir del mes julio, partiendo del 29.05% y alcanzando un 51.20% en septiembre de 2015. Se observa claramente que la mayor incidencia del hongo es en el periodo de septiembre a diciembre.

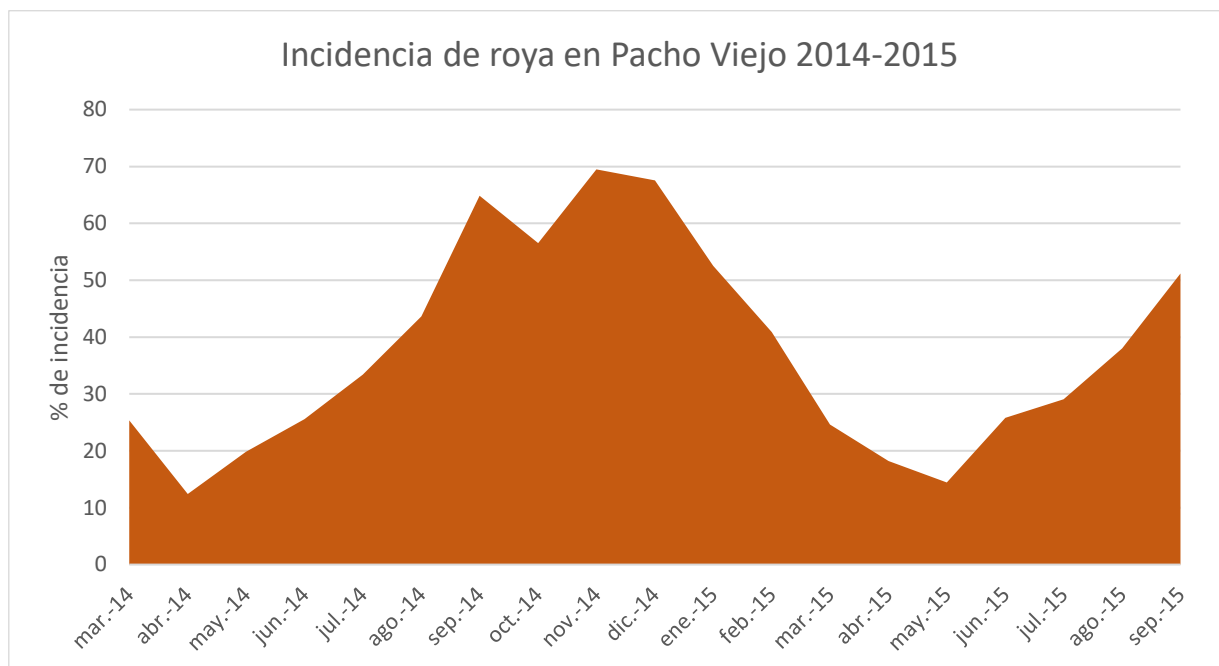


Figura 14. Porcentaje de incidencia de *H. vastatrix* en cultivos de cafeto en la localidad de Pachó Viejo, Coatepec, Veracruz.

7.5 Condiciones ambientales.

7.5.1 Temperatura

En la Figura 15 se muestra la temperatura media y la concentración de urediniosporas colectadas del aire con las TPE y la TEH para el periodo de enero de 2014 a septiembre de 2015 en Pachó Viejo (A) y Tecocelo (B). Se observa que, en el mes de enero y diciembre de 2014, así como enero y febrero de 2015, la temperatura media se encuentra, por debajo de 16°C, el cual es el umbral mínimo de crecimiento para el hongo. A partir de marzo y hasta octubre, la temperatura media se encuentra dentro de un intervalo favorable para la germinación del hongo, acercándose a la temperatura óptima para su desarrollo en abril. Se puede observar que el incremento de la temperatura hacia el óptimo para la germinación y desarrollo de *H. vastatrix* resulta en conteos más altos de urediniosporas.

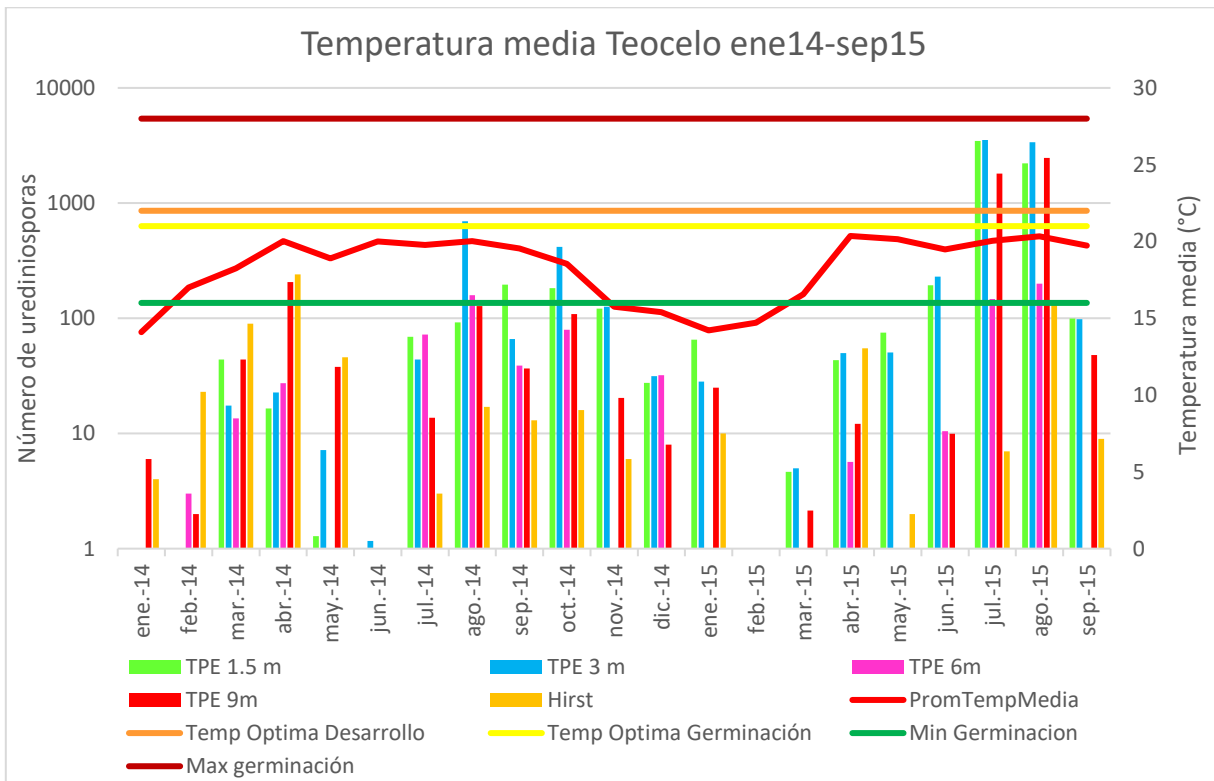
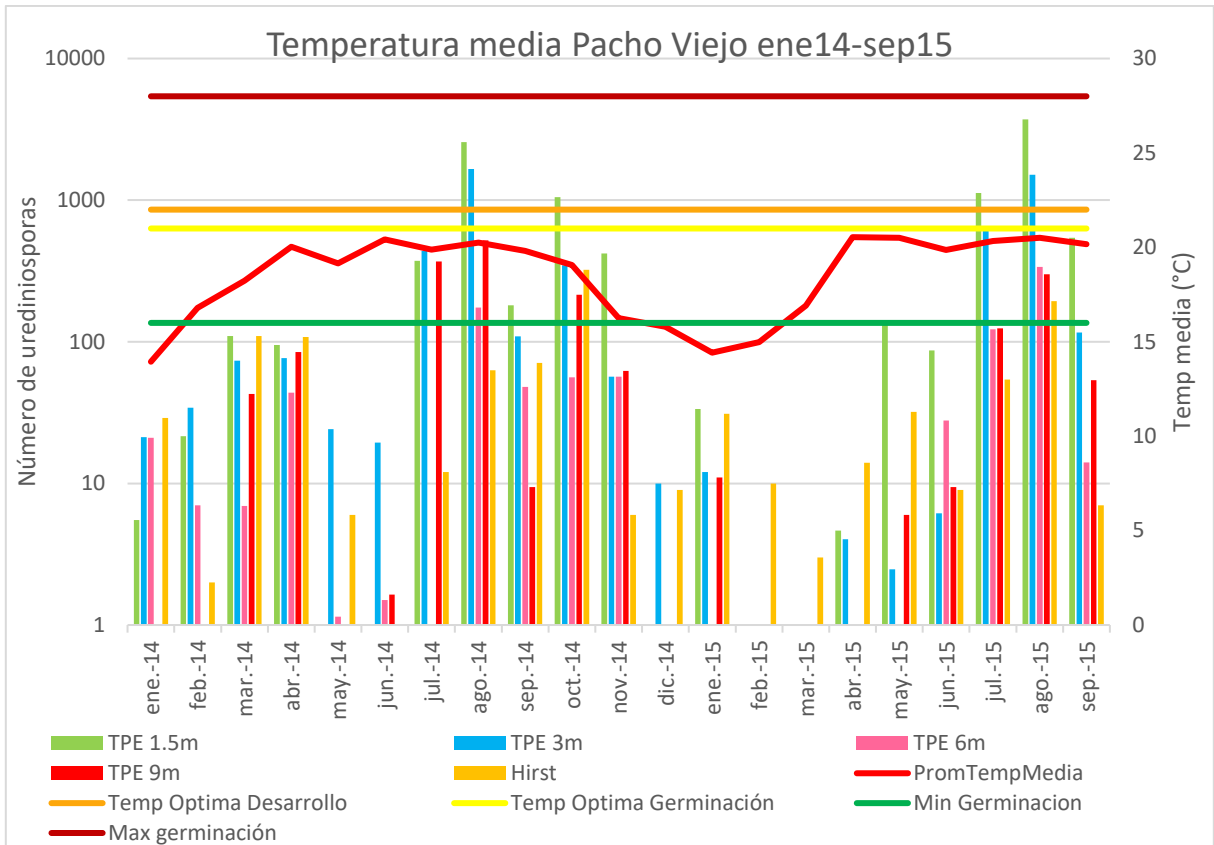


Figura 15. Temperatura media y número de urediniosporas colectadas con la TPE y TEH, para el periodo de enero de 2014 a septiembre de 2015 en la localidad de Pachó Viejo y Teocelo, Veracruz.

Debido a que la temperatura es un factor fundamental para que ocurra la infección en la planta del cafeto, también se llevó a cabo un análisis comparando la temperatura media registrada con nuestra estación meteorológica localizada en la zona de Teocelo durante 2014 y 2015 y los datos meteorológicos obtenidos del reanálisis ERA5-Land para 2014 y 2015 (Figura 16).

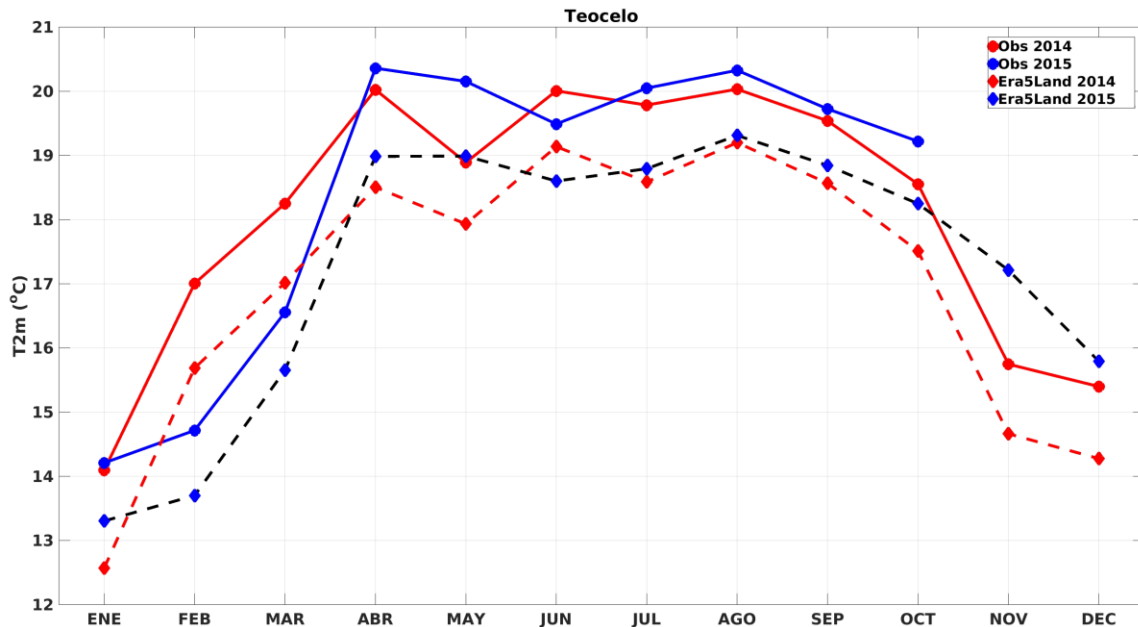


Figura 16. Temperatura media registrada en Teocelo durante los años 2014 y 2015 comparada con la obtenida del reanálisis ERA5Land para los mismos años.

Se observa que los primeros meses del año 2015 fueron más fríos que los de 2014, con un decremento en la temperatura de 17°C a aproximadamente 14.5°. Esta condición resultó en una disminución significativa de 2.5°C en febrero de 2015, la cual fue registrada por las estaciones meteorológicas, es consistente con los datos del reanálisis ERA5-Land (Figura 16, líneas punteadas). Basándonos en los datos de reanálisis, fue posible determinar que ese comportamiento de la temperatura no fue local, sino que fue parte de un patrón regional que abarcó gran parte del sureste mexicano durante los primeros meses de 2015 (Figura 17).

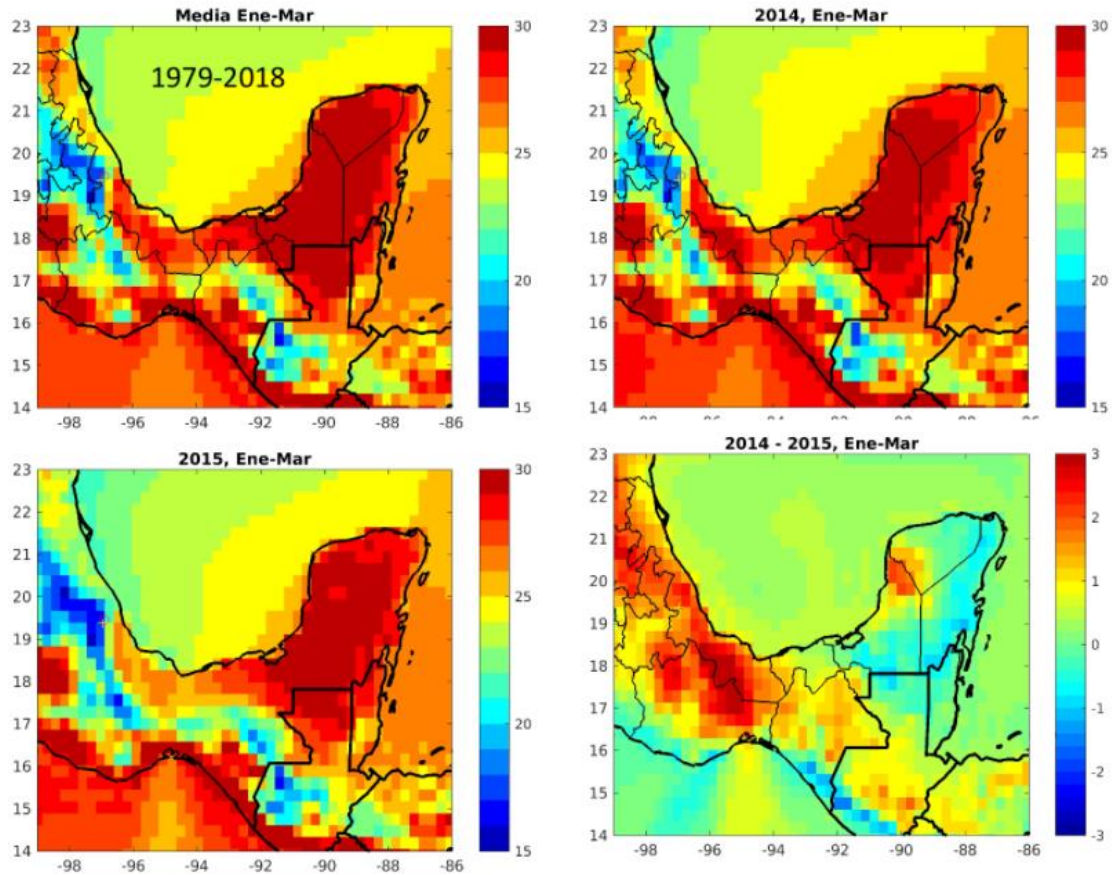


Figura 17. Valores de temperatura media de enero a marzo de la región sureste de México. a) Valores de temperatura promedio del periodo 1979-2018. b) Temperatura media del año 2014 c) temperatura media del año 2015 y d) Anomalías de temperatura sustrayendo los valores de temperatura media de 2015 a los correspondientes al año 2014.

7.5.2. Humedad Relativa

La humedad relativa fue favorable para la germinación y desarrollo del hongo durante todo el periodo, los promedios diarios siempre fueron superiores al 60%.

7.5.3 Precipitación acumulada

En la Figura 18 se muestran los promedios mensuales de urediniosporas colectadas por las TPE a diferentes alturas y con la TEH, en el periodo de enero de 2014 a septiembre de 2015 en la localidad de Pacho Viejo (A) y Teocelo (B), así como los datos de precipitación acumulada mensual para el mismo periodo.

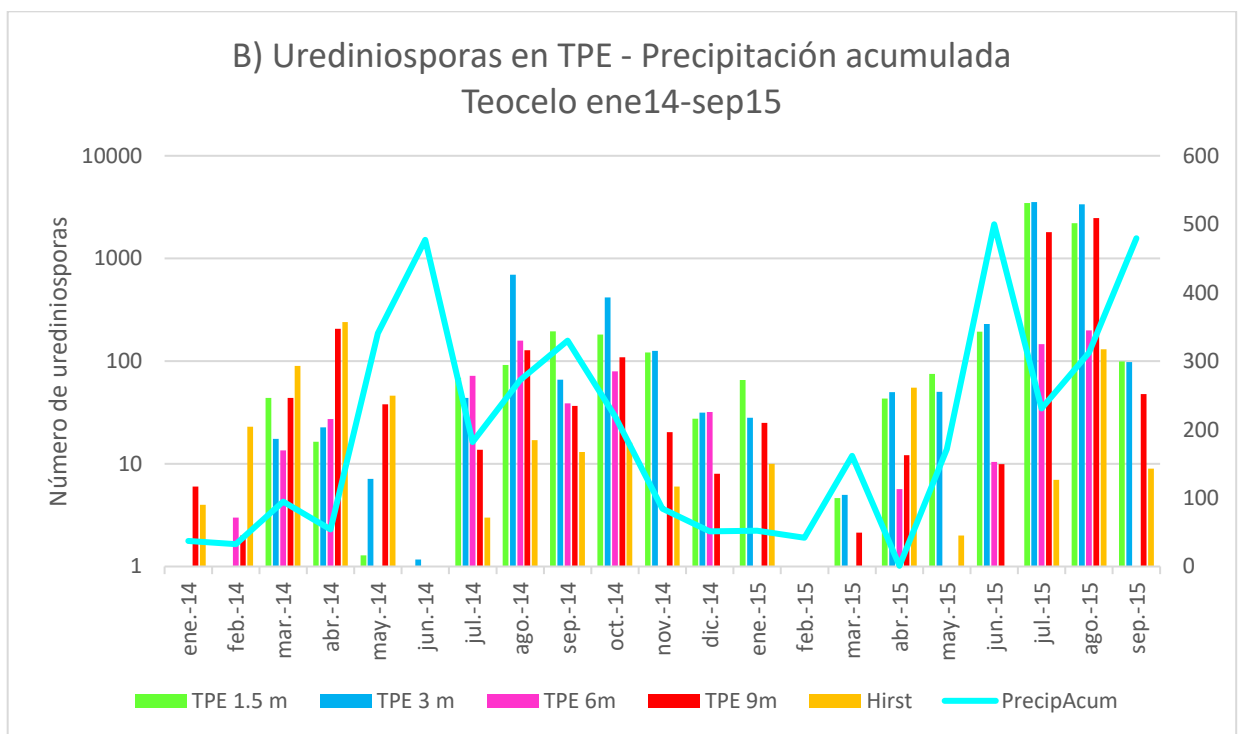
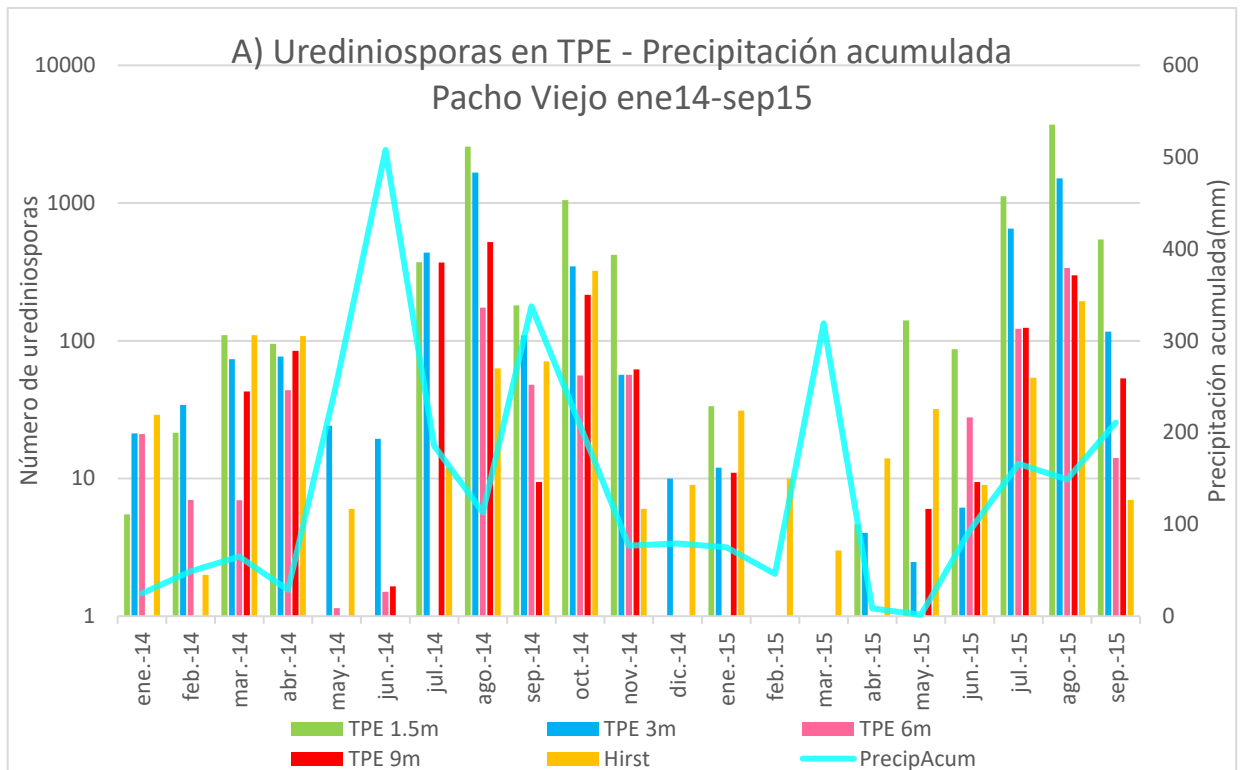


Figura 18. Conteos de urediniosporas colectadas con las TPE colocadas a 1.5, 3, 6 y 9 m de altura y con la TEH a 1.5 m, así como la precipitación acumulada de la localidad de Pacho Viejo (A) y Teocelo (B)

Al iniciar la época de lluvias, durante los meses de mayo y junio de 2014, se observó una disminución en el número de urediniosporas colectadas con respecto a los meses anteriores, sobre todo en el mes de junio, con una precipitación de 507.82 mm en Pacho Viejo y 477.06 mm en Teocelo. Sin embargo, en los meses de julio y agosto, se presenta una disminución en la cantidad de lluvia (185.49 y 182 mm respectivamente), período en el cual se presentó el pico más alto de urediniosporas en el año para ambas localidades. Posteriormente, con el aumento de lluvias en el mes de septiembre de 2014, nuevamente se observó una disminución gradual en la cantidad de urediniosporas colectadas. Hacia los meses de noviembre y diciembre de 2014, terminó la época de lluvia, por lo que la precipitación disminuyó junto con la cantidad de urediniosporas en ambas localidades.

Durante los primeros meses del año 2015, se presenta una precipitación acumulada mayor en que en el año de 2014 en ambas localidades, sobre todo en marzo (319.08 mm Pacho Viejo; 161.5 mm, Teocelo), lo cual coincide con una disminución en el número de urediniosporas en relación al año anterior. Sin embargo, para el mes de mayo en Teocelo, así como mayo y junio de 2015 para Pacho Viejo, se presentaron valores de precipitación por debajo de los del año anterior. Durante los meses de julio, agosto y septiembre, la precipitación acumulada es elevada, y la cantidad de urediniosporas se mantuvieron altos.

En general, se observa una mayor presencia de urediniosporas dentro de la época de lluvias, sin embargo, en los periodos de mayor precipitación, disminuye el número de urediniosporas colectadas del aire.

7.5.4. Viento

El promedio de la velocidad del viento, fue constante a lo largo del año (0.7-1.4 m/s) en ambas localidades. En Teocelo, aunque hubo un incremento significativo en el número de urediniosporas colectadas de 2014 a 2015, los ciclos diarios del viento en julio y agosto de ambos años, fueron comparables en magnitud y dirección. En esta localidad, el campo de

viento es dominado por la componente zonal, la cual solo presenta pequeñas diferencias entre esos años.

Durante la noche y temprano por la mañana, el régimen de viento muestra vientos hacia el mar, mientras que cambia hacia el resto del día con vientos provenientes de la costa, con valores máximos ocurriendo entre las 13:00 y 14:00 horas (Figura 19)

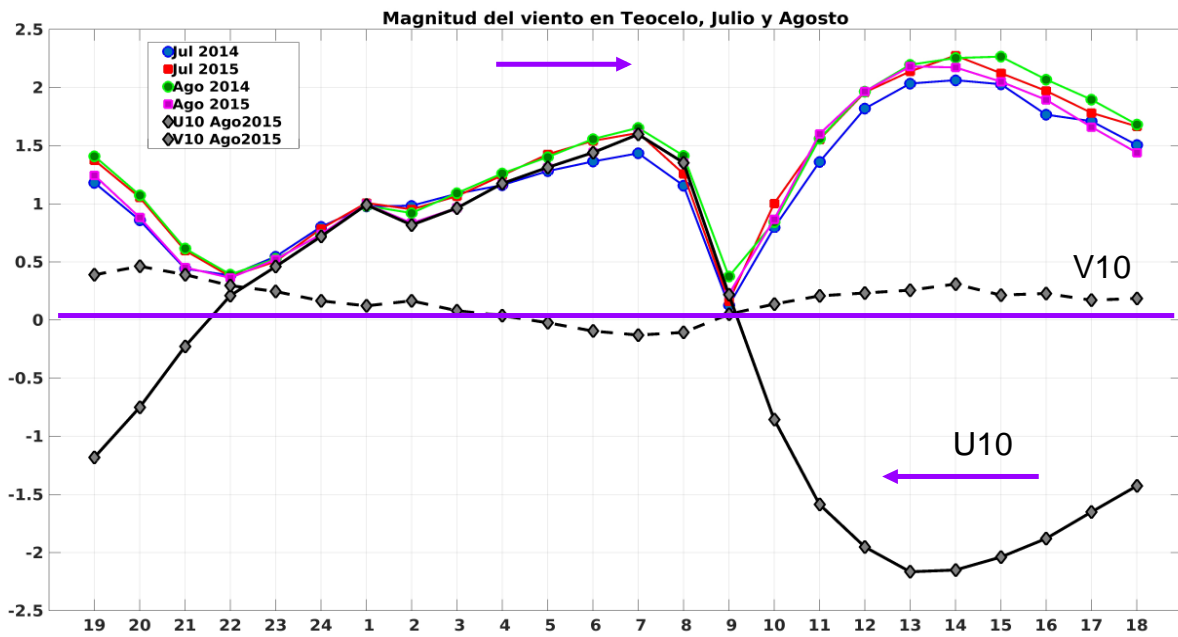


Figura 19. Régimen de viento durante julio y agosto de 2014 y 2015 en la localidad de Teocelo, Veracruz.

7.6 Correlaciones con variables ambientales

Los resultados de las correlaciones entre los conteos de urediniosporas de cada trampa y las variables ambientales (Pearson, $p < 0.5$) se muestran en la Tabla 7 y 8.

En ambas localidades se observan algunas correlaciones entre el número de urediniosporas y las variables de temperatura promedio, máxima, mínima; así como la velocidad del viento y humedad relativa. No se observan correlaciones con las variables de precipitación acumulada ni humedad en hoja.

Tabla 7. Correlaciones de Pearson entre conteos de urediniosporas colectadas en Pacho Viejo y variables ambientales

	Temp Media	Temp Max	Temp Min	HR	Vel Media Viento	Vel Max Viento	Precip Acum	Humedad en hoja
TPE 1.5m	0.367	-0.259	0.437	-0.059	0.132	-0.525*	0.069	0.230
TPE 3m	0.342	-0.309	0.276	-0.304	0.557*	-0.013	0.186	0.174
TPE 6m	0.187	-0.274	0.104	-0.275	0.074	-0.400	-0.276	0.088
TPE 9m	0.107	-0.056	0.009	-0.484	0.389	-0.153	-0.396	-0.057
TPES 1m	0.292	-0.431	0.229	-0.695*	0.242	-0.477	-0.559	0.020
TEH	0.314	-0.009	0.292	-0.391	0.198	-0.103	-0.136	0.113

*p<0.05

**p<0.01

Tabla 8. Correlaciones de Pearson entre conteos de urediniosporas colectadas en Pacho Viejo y variables ambientales.

	Temp Media	Temp Max	Temp Min	HR	Vel Media Viento	Vel Max Viento	Precip Acum	Humedad en hoja
TPE 1.5m	0.393	-0.210	0.435	-0.021	0.174	-0.079	0.330	-0.279
TPE 3m	0.375	-0.203	0.319	-0.124	0.214	-0.135	0.211	-0.245
TPE 6m	0.451	-0.141	0.514	-0.108	0.279	-0.090	0.187	-0.292
TPE 9m	0.578**	0.105	0.405	-0.187	0.347	0.023	0.352	-0.224
HST 1.5 m	0.346	0.506*	0.031	-0.481*	0.390	0.074	-0.037	-0.365

*p<0.05

**p<0.01

7.7 Análisis de componentes principales

Los resultados del análisis de componentes principales para las localidades de Pacho Viejo y Teocelo se observan en las Figuras 20 y 21.

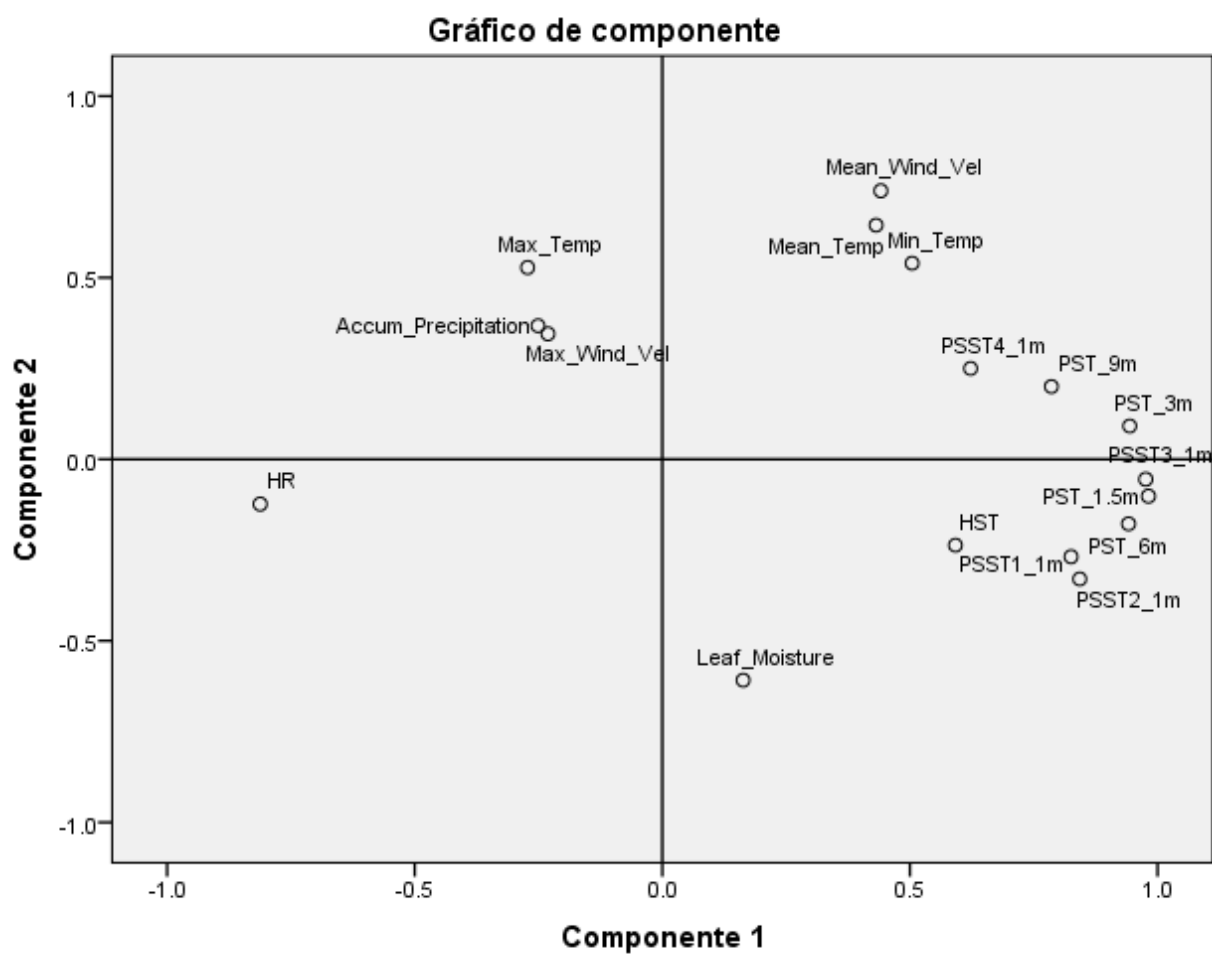


Figura 20. Gráfico de componentes principales para localidad de Pacho Viejo.

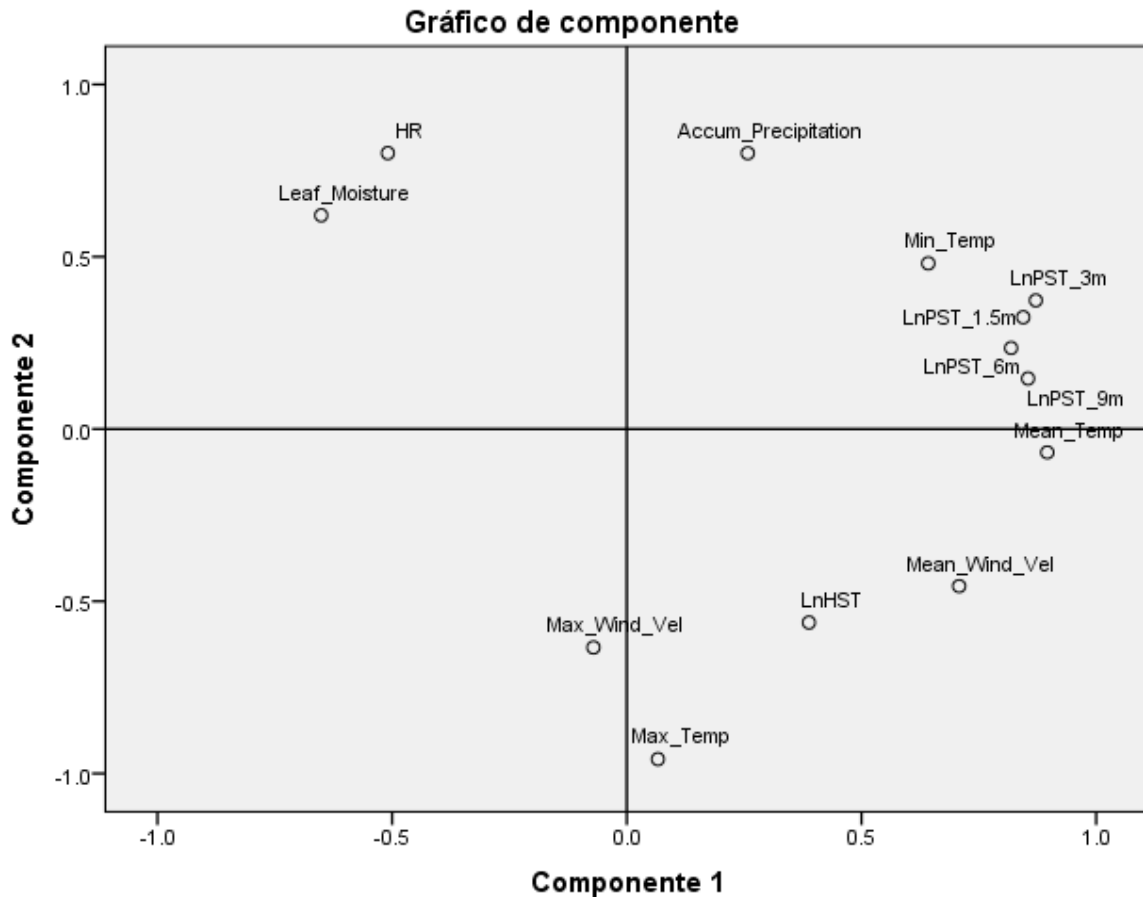


Figura 21. Gráfico de componentes principales para localidad de Teocelo

Se observa que las variables que más influyen sobre los conteos de urediniosporas con las TPE son la temperatura media y mínima, así como la velocidad de viento promedio. Por el contrario, la TEH se separó del grupo de trampas y se ve influida principalmente por la velocidad del viento y a la temperatura máxima.

7.8 Comparación entre localidades

De acuerdo con el ANOVA realizado para comparar los conteos de urediniosporas de las TPE y TEH de ambas localidades, no se observan diferencias significativas ($p < 0.5$) respecto al mismo tipo de trampa en diferente zona.

8. DISCUSIÓN

Las observaciones puntuales del monitoreo diario de urediniosporas con la TEH en ambas localidades, tomando en cuenta los días con mayor número de urediniosporas colectadas, mostraron que las variables ambientales que influyen para la presencia de urediniosporas en el aire son: a) temperaturas promedio entre 19 a 23 °C, lo cual coincide con el intervalo de temperaturas favorables para el desarrollo del hongo descrito por Nutman *et al.* (1963) quien determinó que la temperatura óptima para la misma es de 21°C; con un intervalo entre 15.5 y 28.5°C b) humedad relativa menor a 85% y ráfagas de viento mayores a 3m/s, como lo han descrito Becker (1975) y Boudrot *et al.* (2016) quienes colectaron un mayor número de urediniosporas del aire en condiciones de baja humedad relativa y presencia de ráfagas de viento mayores a 2m/s; las cuales favorecen la liberación de las urediniosporas; c) el grado de humedad en la superficie de la hoja que sea menor a 7 (escala de 0 = seco a 15 = mojada), ya que un mayor grado de humedad evita la liberación de las urediniosporas en el aire.

Con base en las condiciones ambientales registradas en los períodos de colecta de urediniosporas con las TPE, TPES, así como con los acumulados con la TEH, se observó la relación de las variables ambientales con el desarrollo y liberación de urediniosporas. Se observó una distribución temporal de la presencia de urediniosporas en el aire colectadas similar en los 3 tipos de trampas, aunque cuantitativamente diferente en el caso de la PSST de Pacho Viejo, las cuales tuvieron una mayor capacidad de colecta.

En ambas localidades, se colectaron bajas cantidades de urediniosporas (<60) desde enero a febrero de ambos años, tanto en las TPE colocadas en alturas de 1.5, 3, 6 y 9 m, como en la TEH. Esto se relaciona con los valores de temperatura registrados menores a 16°C, los cuales se encuentran debajo del umbral mínimo para la germinación y desarrollo del hongo (Nutman *et al.* 1963). Sin embargo, también se ha reportado que temperaturas bajas, seguidas de humedad y temperatura favorables, incrementan la capacidad de germinación de las urediniosporas de *H. vastatrix* (Nutman, *et al.* 1963). Por ello, es interesante señalar que el invierno tan frío de los primeros meses de 2015 tuvo un papel

fundamental para favorecer el proceso de infección e incremento de esporas como el observado en Teocelo en 2015. Y lo cual se refleja en el análisis de componentes principales donde la temperatura mínima está estrechamente ligada a la cantidad de urediniosporas colectadas

Durante marzo y abril de 2014, las cantidades de urediniosporas colectadas aumentaron gradualmente, esto fue asociado al incremento de la temperatura por arriba del umbral mínimo de desarrollo (19°C), aunado a lluvias ligeras a finales de febrero y durante marzo (precipitación acumulada para el periodo de 25-60 mm), que permitieron la germinación y liberación de urediniosporas durante el mes de abril. Esto es debido a que el hongo requiere de un mes, después de germinar, para formar nuevas pústulas y liberar las urediniosporas (periodo de latencia), según lo reportado por Rivillas *et al.* (2011). Sin embargo, en el mes de marzo de 2015, los registros de urediniosporas fueron nulos, esto debido a un incremento extraordinario en la precipitación en la región, el cual alcanzó valores de hasta 197 mm arriba de la normal mensual (58 mm) para la dicha región, ocurrida durante ese periodo (CONAGUA-SMN, 2015), ocasionando la deposición húmeda de las urediniosporas. De esta manera, se demuestra el efecto negativo que lluvias abundantes puede tener en la dispersión por aire de las urediniosporas.

A mediados de mayo y junio de ambos años, la temperatura media subió hasta alcanzar entre $20\text{-}21^{\circ}\text{C}$, lo cual, aunado al inicio de la temporada de lluvias, con precipitaciones por arriba de 300 mm por periodo, brindaron las condiciones de temperatura y presencia de agua líquida adecuadas, para la germinación y desarrollo del hongo. Si bien la colecta de urediniosporas disminuyó durante este periodo debido a la deposición húmeda, el nivel de incidencia de roya sobre los árboles de café comenzó a incrementarse a partir de estos meses en la localidad de Pacho Viejo.

Un mes después, hacia finales de julio y principios de agosto se presentó el fenómeno de la canícula (Mid Summer drought MSD), esta condición presente sólo en México y en algunos países de Centroamérica y el Caribe, consiste en un incremento en la

temperatura y disminución de las lluvias que provoca una distribución bimodal en la precipitación anual, con máximos en junio y en septiembre-octubre (Magaña *et al.* 1999). De esta manera, el aumento de la temperatura cerca del óptimo para el desarrollo (21-22°C) y la disminución de la precipitación (30—100 mm por periodo), resultaron en el mayor registro de urediniosporas colectadas con las TPE y TPES en ambos años, alcanzando valores promedio durante agosto de 2015 de hasta 18478 urediniosporas en las TPES a 1 m, 2213 esporas en TPE 1.5 m, 3372 urediniosporas en TPE 3 m y 2469 urediniosporas en TPE 9 m en la localidad de Teocelo. Por ello, este período fue crucial para la liberación, transporte y dispersión de la enfermedad en esta región de Veracruz.

Durante los meses de septiembre, octubre y noviembre de 2014 y septiembre de 2015, se registraron cantidades elevadas de urediniosporas, a pesar de incrementarse nuevamente las lluvias, lo que indica que este período fue importante para el desarrollo posterior al periodo máximo de dispersión de *H. vastatrix*; el cual se vio reflejado en un rápido incremento de la incidencia de la enfermedad a partir de septiembre, un mes después de los mayores picos de urediniosporas colectadas, el cual coincide con el periodo de latencia de *H. vastatrix*. El desarrollo de la enfermedad en el cultivo se prolongó hasta noviembre, cuando la temperatura volvió a disminuir por debajo del mínimo para su germinación y desarrollo.

El análisis de componentes principales, así como algunas correlaciones muestran claramente que la temperatura es el factor determinante para el desarrollo y transporte del hongo, ya que cuando tiene valores cercanos o por debajo de los 16°C, la presencia de urediniosporas es casi nula. Por el contrario, cuando se aproxima a la temperatura óptima de germinación, ésta se incrementa de manera significativa. Esto se observa claramente en el análisis de componentes principales, donde la temperatura promedio está estrechamente relacionada a la cantidad de esporas, siendo esta variable la que mostró una mayor cantidad de correlaciones con el número de urediniosporas (Spearman $p < 0.5$). Durante todo el año, la humedad relativa diaria fue mayor a 60%, la cual es siempre favorable para el desarrollo y germinación del hongo. Sin embargo, cuando ésta es mayor a

90%, la liberación y dispersión de las urediniosporas por el viento disminuye significativamente, en particular se demostró una correlación negativa entre esta variable y los conteos observados en la TEH y una TPES. Asimismo, la humedad de la hoja con valores cercanos a 15 (presencia de agua líquida) es favorable para el inicio de la germinación de la urediniosporas, tal como lo reporta Nutman *et al.* (1963), pero no para su liberación y dispersión por el viento, ya que, para ello, se requieren de condiciones con menor humedad en hoja (<10). Sin embargo, se observó que ambas condiciones se pueden presentar en un mismo día debido a la formación de rocío, tal como lo reporta López-Bravo *et al.* (2012) y Avelino *et al.* (2015), por ello, no se observó correlación alguna entre esta variable y el número de urediniosporas colectadas. La precipitación moderada (30-100 mm por periodo) tiene un papel fundamental para la germinación y desarrollo del hongo, pero valores elevados de precipitación previa al periodo de mayor incidencia (>300 mm) provoca un lavado de urediniosporas hacia el suelo que evita su dispersión a través del viento, así como su fijación en las hojas. Sin embargo, también se observa que durante el periodo de mayor incidencia de roya en el cultivo, la lluvia no es un factor limitante para su dispersión y posterior colecta en las trampas, por ello, no se observaron correlaciones entre el número de urediniosporas colectadas y la precipitación acumulada.

El análisis de la magnitud y dirección del viento no es asociado con el incremento y la ocurrencia de picos en las cantidades de urediniosporas colectadas durante los meses de julio y agosto, ya que no hay diferencias significativas en relación a fenómenos de convergencia-divergencia que pudieran incidir en ésta. En un trabajo previo reportamos que la convergencia de los vientos era un factor importante para el aumento temporal de las concentraciones de polen en la Ciudad de México (Calderón *et al.* 2018), pero en Teocelo este proceso parece ser marginal, ya que sólo se registró un periodo importante de convergencia a finales de agosto de 2015. Sin embargo, si se presentan algunas correlaciones entre los conteos de las trampas TPES y TPE de 1.5 y 3 m y la velocidad del viento los cuales podrían estar asociados a turbulencias al interior del cultivo.

Se colectó un número significativamente mayor de urediniosporas en las TPES colocadas a 1 m ($p < 0.05$), indicando la importancia del transporte local por deposición húmeda y seca, así como a la salpicadura de gotas de agua en épocas de lluvia, como lo reportan Nutman *et al.* 1960 y Boudrot *et al.* 2016 para la colecta de urediniosporas de *H. vastatrix*. Con las TPE de 1.5 m y 3 m, también se colectaron urediniosporas, a pesar de registrarse velocidades de viento menores a 1 m/s, esto se debió a movimientos intermitentes de turbulencia al interior del cultivo, ya que la superficie del dosel es irregular, generando diferencias térmicas que pueden remover y resuspender las urediniosporas, favoreciendo las turbulencias como ha sido reportado con las urediniosporas de *Puccinia graminis* (Sache, 2000), así como por acción de salpicadura de lluvia como lo reporta (Boudrot *et al.* (2016) para la colecta de urediniosporas de *H. vastatrix*. No obstante, los registros obtenidos de urediniosporas de las TPE, tanto a 6 como a 9 m sugieren que las urediniosporas pueden ser liberadas y transportadas a gran altura, inclusive por arriba del dosel de un policultivo tradicional, por lo tanto, ser transportadas a grandes distancias, aun en condiciones de sombra. Esto se observó también en periodos donde la TPE a 9m incluso presentó conteos mayores que la TPE a 6 m e inclusive que la TPE a 3m. Esto podría indicar que las urediniosporas colectadas por arriba del dosel podrían provenir de otra fuente e inclusive tener el potencial de viajar grandes distancias, como lo reporta Bowden *et al.* (1970) en un estudio que mostró el transporte aéreo transatlántico de urediniosporas de *H. vastatrix* de Angola a Bahía, Brasil en 1970 (Brown *et al.* 2002) y en contraste por lo reportado, recientemente, por Boudrot *et al.* 2016 quienes sugieren que las turbulencias dentro del cultivo no tienen efecto bajo condiciones de sombra, ya que el dosel bloquea el viento. Asimismo, ya ha sido demostrado que las características morfológicas y estructurales, como lo son los carbohidratos de la pared de las urediniosporas de *H. vastatrix* (β -glucomanos) son bastante similares a las de *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* y *Uromyces phaseoli*, esta naturaleza hidrofóbica permite a los hongos su transporte a grandes distancias (Leal, 1983).

El monitoreo de estos patógenos en la atmósfera, así como la generación de conocimiento sobre cómo los factores y eventos biológicos o meteorológicos pueden modificar su transporte a pequeña y gran escala, es esencial para realizar futuros pronósticos de dispersión de fitopatógenos que permitirán establecer medidas cuarentenarias efectivas, (Schmale y Ross, 2015). La dispersión de patógenos en la atmósfera comprende procesos complejos que están interconectados y sólo su conocimiento permitirá realizar un manejo integral de los mismos.

9. CONCLUSIONES

- Las observaciones del monitoreo diario de urediniosporas con la TEH mostraron que las variables ambientales que influyen en la liberación y transporte de urediniosporas en el aire son: a) temperaturas promedio entre 19 y 23°C, b) humedad relativa menor a 85%, y c) un valor de humedad en hojas <7.
- La dispersión de urediniosporas de *H. vastatrix* es influenciado principalmente por lluvia y temperatura.
- El periodo de canícula (Mid Summer Drought MSD) causa un incremento en la temperatura y un decremento en las lluvias, lo que provee condiciones ambientales más favorables para la liberación, transporte y dispersión de *H. vastatrix* en esta región de Veracruz.
- Temperaturas bajas seguidas de humedad y temperatura favorables, incrementan la capacidad de germinación de las urediniosporas de *H. vastatrix*, ya que las temperaturas por debajo de los 16° C registradas los primeros meses de 2015, jugaron un papel importante en el favorecimiento del proceso de infección y en el gran incremento de urediniosporas que se registró en Teocelo en 2015.
- El análisis de la magnitud y dirección del viento no se asoció con el incremento y presencia de picos en los conteos de urediniosporas colectadas durante julio y agosto; sin embargo, si se relacionan con el transporte de esporas en los estratos bajos del cultivo.
- Las urediniosporas pueden alcanzar alturas de 9 m sobre el cultivo (sobre el dosel) en cultivos de café de sombra, sugiriendo que el viento puede transportarlos a grandes distancias.

10. REFERENCIAS

- Abbay, R. (1878). Observations on *Hemileia vastatrix*, the so-called Coffee-leaf Disease. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 17(100), 173-184.
- Acosta-Martinez, V., Van Pelt, S., Moore-Kucera, J., Baddock, M. C. y Zobeck, T. M. (2015) Microbiology of wind-eroded sediments: Current knowledge and future research directions. *Aeolian Research*, (18), 99-113.
- Aguilar G. (1995). *Variedad Costa Rica 95*. Instituto del Café de Costa Rica (ICAFE). San José, Costa Rica. 33 p
- Agrios, G. N. (2005). *Plant pathology*. Academic Press, San Diego, USA. ISBN:9780080473789.
- American Phytopathological Society (APS) (2011). Coffee rust (*Hemileia vastatrix*).En: <http://www.apsnet.org/edcenter/intropp/lessons/fungi/Basidiomycetes/Pages/CoffeeRust.aspx>
- ASERCA, Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de Mercados Agropecuarias (2010). Escenario actual del café. SAGARPA. 16 p.
- Avelino, J., Muller, R. A., Eskes, A., Santacreo, R., y Holguin, F. (1999). La roya anaranjada del cafeto: mito y realidad. En: B. Bertrand y B. Rapidel (eds.). *Desafíos de la Caficultura en Centroamérica*. Editorial Agroamerica, San José, Costa Rica. pp. 193-241
- Avelino, J. y Rivas, G. (2013). La roya anaranjada del cafeto. HAL. En: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01071036>
- Avelino, J., Cristancho, M., Georgiou, S., Imbach, P., Aguilar, L., Bornemann, G. y Morales, C. (2015). The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008–2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Security*, (7), 303-321.
- Becker, S., y Kranz, J. (1977). Vergleichende Untersuchungen zur Verbreitung von *Hemileia vastatrix* in Kenia / Comparative studies on the dispersal of *Hemileia vastatrix* in Kenya. *Zeitschrift Für Pflanzenkrankheiten Und Pflanzenschutz / Journal of Plant Diseases and Protection*, 84(9), 526-539. Retrieved July 24, 2021, from <http://www.jstor.org/stable/43213550>
- Berkeley, M. J., y Broome, C. E. (1869). *Hemileia vastatrix*. *Gardeners' Chronicle*. (6), 1157.
- Berthaud, J., y Charrier, A. (1988). Genetic resources of *Coffea*. *Coffee*, (4), 1-42.
- Bettencourt A.J., Rodrigues Jr. C.J., y Lopes J. (1965). Study of the physiologic specialization of the coffee rust *H. vastatrix* and selection of coffee clones for the establishment of a

- standard range of differential hosts for this rust. En: Progress report 1960-65, pp.28-46, Coffee Rusts Research Center, Oeiras, Portugal.
- Bigirimana, J, Njoroge K, Gahakwa D, y Phiri. N.A. (2012). Incidence and severity of coffee leaf rust and other diseases in Rwanda. *African Journal of Agricultural Research*. 7(26), 3847-3852.
- Bock, K. R. (1962). Dispersal of uredospores of conditions *Hemileia vastatrix* under field. *Transactions of the British Mycological Society*. 45(1), 63-74.
- Boudrot, A., Pico, J., Merle, I., Granados, E., Vílchez, S., Tixier, P. y Rice R.A. (2016). Shade effects on the dispersal of airborne *Hemileia vastatrix* uredospores. *Phytopathology*, 106, 572-580.
- Bowden, J., Gregory, P. H. and Johnson, C. G. (1971). Possible wind transport of coffee leaf rust across the Atlantic Ocean. *Nature* (229), 500-501.
- Brown, J. K. and Hovmøller, M. S. (2002). Aerial dispersal of pathogens on the global and continental scales and its impact on plant disease. *Science*, 297, 537-541.
- CABI. 2020. Crop Protection Compendium. CAB International, Wallingford, UK, 2020. En: <http://www.cabi.org/compendia/cpc/>.
- Cafés de México. (2006). SAGARPA entregó el FIDECAFE a la Asociación Mexicana de la Cadena Producto de Café A. C. Edición especial –diciembre-. <http://www.cafesdemexico.com>
- Calderon-Ezquerro, M. C., Guerrero-Guerra, C., Galán, C., Serrano-Silva, N., Gidos-Fogelbach, G., Jiménez-Martínez, M. C., y Ayala-Balboa, J. (2018). Pollen in the atmosphere of Mexico City and its impact on the health of the pediatric population. *Atmospheric Environment*, (186), 198-208.
- Carbajal J. R. (1972). Cafeto cultivo y fertilización. Instituto Internacional de la Potasa. Gebr. Fretz. A. G. Zurich, Suiza. 141 pp
- CEFP. (2001). El mercado del café en México. Centro de Estudios de las Finanzas Públicas, Cámara de Diputados. H. Congreso de la Unión. Clave de proyecto: CEFP/054/2001
- CONAGUA-SMN. Comisión Nacional del Agua-Sistema Meteorológico Nacional. (2015). En: <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=ver>

- Costa Rica. (1984). Curso fundamentos de la cafecultura moderna. *Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE)*, Turrialba, Costa Rica, 47 pp.
- Costa Rica. (1989). Manual de recomendaciones para el cultivo de café. Editor Sánchez Vindos. 6ª. Del Instituto de café de Costa Rica. MAG. San José Costa Rica. 121 pp.
- Coste R. (1969). El café. Editorial Blume. 255 pp
- Cristancho, M. A., Rozo, Y., Escobar, C., Rivillas, C. A., and Gaitán, A. L. (2012). Outbreak of coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*) in Colombia. *New Disease Reports*, (25), 2044-2588.
- Davis A., Maurin O., Chester M., Mvungi F., y Fay F. (2006). Phylogenetic relationships in *Coffea* (Rubiaceae) inferred from sequence data. 21e Colloque: Association Scientifique Internationale du Café, Montpellier: 56
- Davis, A. P., y Rakotonasolo, F. (2008). A taxonomic revision of the baracoffea alliance: nine remarkable *Coffea* species from western Madagascar. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 158(3), 355-390.
- Davis, A. P., Tosh, J., Ruch, N., y Fay, M. F. (2011). Growing coffee: *Psilanthus* (Rubiaceae) subsumed on the basis of molecular and morphological data; implications for the size, morphology, distribution and evolutionary history of *Coffea*. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 167(4), 357-377.
- Delacroix, G., Maublanc, A., y Prillieux, É. E. (1911). *Maladies des plantes cultivées dans les pays chauds*. Augustin Challamel.
- Del Ponte, E. M., Fernandes, J. M. C., y Pavan, W. (2005). Um modelo de simulação do risco de infecção da giberela do trigo. *Fitopatologia Brasileira*, 30(6), 634-642.
- Durham, O. C. (1946). The volumetric incidence of atmospheric allergens: IV. A proposed standard method of gravity sampling, counting, and volumetric interpolation of results. *Journal of Allergy*, 17(2), 79-86.
- 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.
- Escamilla P. (1993). El café Cereza en México. Tecnología de Producción. Universidad Autónoma Chapingo. CIESTAAM-DCR. Chapingo, México. 116p.
- Frenguelli, 1998. The contribution of aerobiology to agriculture. *Aerobiologia*. 14:95-100

- Gagliardi, S., Avelino, J., Beilhe, L. B., y Isaac, M. E. (2020). Contribution of shade trees to wind dynamics and pathogen dispersal on the edge of coffee agroforestry systems: A functional traits approach. *Crop Protection*, (130), 105071.
- Guzman, O. y Gomez, L. (1987). Permanence of free water on coffee leaves. *Experimental Agriculture*, (23), 213-220.
- Hersbach, H. and Dick, D. (2016). ERA5 reanalysis is in production, ECMWF Newsletter, 147, p. 7.
- Hernandez-Martínez, G. 2008. Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz biodiversidad, manejo y conservación. Manson, R.H. Ed. Instituto Nacional de Ecología. Pág. 15
- Hernández-Solabac J. A. M., M. E. Nava-Tablada, S. Díaz-Cárdenas, E. Pérez-Portilla y E. Escamilla-Prado. (2011). Migración internacional y manejo del café en dos comunidades del Centro de Veracruz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* (14):807-818
- Herrera, J. C., Combes, M. C., Anthony, F., Charrier, A., y Lashermes, P. (2002). Introgression into the allotetraploid coffee (*Coffea arabica* L.): segregation and recombination of the *C. canephora* genome in the tetraploid interspecific hybrid (*C. arabica* × *C. canephora*). *Theoretical and Applied Genetics*, 104(4), 661-668.
- Hirst, J. (1952). An automatic volumetric spore trap. *Annals of applied Biology*, 39(2), 257-265.
- Hocking, D. (1968). Effects of light on germination and infection of coffee rust *Hemileia vastatrix*. *Transactions of the British Mycological Society*, 51(1), 89-93.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020) In: http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/30/30038.pdf
- Läderach P., Ramirez-Villegas J., Navarro-Racines C., Zelaya C., Martinez-Valle A. y Jarvis A. (2017). Climate change adaptation of coffee production in space and time. *Climatic Change* 141: 47-62
- Leal, J. A., Gomez-Miranda, B. and Ruperez, P. (1983). Polysaccharides from *Hemileia vastatrix* uredospores. *Experimental Mycology* (7),82-89.

- León J. 1962. Especies y cultivares (variedades) de café. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA. Centro Tropical de Investigación y Enseñanza para Graduados. Turrialba. Costa Rica. 69 pp.
- Limpert, E., Godet, F., y Müller, K. (1999). Dispersal of cereal mildews across Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 97(4), 293-308.
- Liogier H. A. (1997). Descriptive flora of Puerto Rico and adjacent islands. Vol. 5 Editorial de la Universidad de Puerto Rico. 436 pp.
- López-Bravo, D. F., Virginio-Filho, E. D. M., y Avelino, J. (2012). Shade is conducive to coffee rust as compared to full sun exposure under standardized fruit load conditions. *Crop Protection*, (38), 21-29.
- Magaña, V., Amador, J. A., y Medina, S. (1999). The midsummer drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, (12), 1577-1588.
- Maldonado-Ramirez, S. L., Schmale III, D. G., Shields, E. J., y Bergstrom, G. C. (2005). The relative abundance of viable spores of *Gibberella zeae* in the planetary boundary layer suggests the role of long-distance transport in regional epidemics of Fusarium head blight. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132(1-2), 20-27.
- Martínez-Bracero M., Alcázar P., Velasco-Jiménez M.J., Calderón-Ezquerro C., y Galán C. (2018). Phenological and aerobiological study of vineyards in the Montilla-Moriles PDO area, Cordoba, southern Spain. *Journal of Agricultural Science*. 156: 821 – 831. Cambridge University Press.
- Mayne WW (1932) Physiologic specialization of *Hemileia vastatrix* Be. et Br. *Nature* (129):510.
- McCook, S. (2006). Global rust belt: *Hemileia vastatrix* and the ecological integration of world coffee production since 1850. *Journal of Global History* 1(2), 177-195.
- Meno, L., Escuredo, O., Rodríguez-Flores, M. S., y Seijo, M. C. (2020). Modification of the TOMCAST model with aerobiological data for management of potato early blight. *Agronomy*, 10(12), 1872.
- Montes, C., Armando O. y Amilcar, R.E. (2012). Infestation and incidence study of the coffee borer, coffee rust and iron spot disease on the coffee crop in Cuaca department. *Bioagro*. 10: 98-108.

- Moreno, L. G. y Alvarado, G. (2000). La Variedad Colombia: Veinte años de adopción y comportamiento frente a nuevas razas de la roya del cafeto. Cenicafé. Boletín técnico 22, 1-32. ISSN: 0120-047-X.637638
- Morfin, V. A., P. G. Castillo y G. A. Vízcaíno. (2006). EL cultivo de café (*Coffea arabica* L.) En Colima. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Folleto Técnico Num. 1 Campo Experimental Ticomán. 85 pp
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martens, B., Miralles, D. G., Piles, M., Rodríguez-Fernández, N. J., Zsoter, E., Buontempo, C., y Thépaut, J.-N. (2021) ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications, *Earth Syst. Sci. Data*, 13, 4349–4383.
- Nolasco M. 1985. Café y Sociedad en México. Centro de Ecodesarrollo. Pág. 108-109, 148, 412-413.
- Nutman, F. J., Roberts, F. M., y Bock, K. R. (1960). Method of uredospore dispersal of the coffee leaf-rust fungus, *Hemileia vastatrix*. *Transactions of the British Mycological Society*, 43(3), 509IN5-515IN6.
- Nutman, F. J., Roberts, F. M., y Clarke, R. T. (1963). Studies on the biology of *Hemileia vastatrix* Berk. & Br. *Transactions of the British Mycological Society*, 46(1), 27-44.
- Organización Mundial del Café, OIC (2020) En: http://www.ico.org/es/new_historical_c.asp
- Prados-Ligero, A. M., Melero-Vara, J. M., Corpas-Hervias, C., & Basallote-Ureba, M. J. (2003). Relationships between weather variables, airborne spore concentrations and severity of leaf blight of garlic caused by *Stemphylium vesicarium* in Spain. *European Journal of Plant Pathology*, 109(4), 301-310.
- Pearl, H. M., Nagai, C., Moore, P. H., Steiger, D. L., Osgood, R. V., y Ming, R. (2004). Construction of a genetic map for arabica coffee. *Theoretical and Applied Genetics*, 108(5), 829-835

- Pérez R. 2005. Impacto económico por daño de la broca de café *Hypothenemus hampei* Ferrari (Coleoptera: Scolytidae) en Santiago Choapan, Oaxaca. Tesis de licenciatura. Parasitología Agrícola, Universidad Autónoma de Chapingo
- Picco, A. M., & Rodolfi, M. (2002). *Pyricularia grisea* and *Bipolaris oryzae*: a preliminary study on the occurrence of airborne spores in a rice field. *Aerobiologia*, 18(2), 163-167.
- PRONATURA. (2017) Veracruz: Regiones cafetaleras de Veracruz. Aroma de la Biodiversidad. Pronatura México A.C.
- Rayner, R. W. (1961a). Germination and penetration studies on coffee rust (*Hemileia vastatrix* B. & Br.). *Annals of Applied Biology*, 49(3), 497-505.
- Rayner, R.W. (1961b). Spore liberation and dispersal of coffee rust *Hemileia vastatrix* Berk. et Br. *Nature*. 191(4789): 725.
- Rayner, R. W. (1972). Micología, historia y biología de la roya del cafeto. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA.
- Rivillas O. C., Serna G. C., Cristancho A. M. y Gaitán B. A. (2011). La Roya del Cafeto en Colombia (Impacto, manejos y costos del control, resultados de investigación). Centro Nacional de Investigación del Café (Cenicafé). Chinchiná, Caldas, Colombia. pp.53.
- Saccas, A. M. y Charpentier, J. (1971). La rouille des caféiers due à *Hemileia vastatrix*. Bulletin IFCC. Vol. 10, France: IFCC. 123 p.
- Sache, I. 2000. Short-distance dispersal of wheat rust spores. *Agronomie*, 20, 757-767.
- Sánchez-Méndez, A. G., y Arguijo-Hernández, S. P. (2018). Análisis de imágenes multiespectrales para la detección de cultivos y detección de plagas y enfermedades en la producción de café. *Research in Computing Science*, 147, 309-317.
- Santoyo Cortés V. H., Díaz, C. S. y Rodríguez, P. B. (1995). Sistema Agroindustrial Café en México, diagnostico problemática y alternativas. Universidad Autónoma Chapingo

- Schmale III, D. G. y Ross, S. D. (2015). Highways in the sky: Scales of atmospheric transport of plant pathogens. *Annual Review of Phytopathology*, 53, 591-611.
- SENASICA. 2019. Roya del cafeto (*Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome). Dirección General de Sanidad Vegetal. Programa de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria. México, D.F. Ficha Técnica No. 40. 23 p. ISBN: 978-607-715-1500. In: <https://prod.senasica.gob.mx/SIRVEF/ContenidoPublico/Roya%20cafeto/Fichas%20tecnicas/Ficha%20T%C3%A9cnica%20de%20Roya%20del%20cafeto.pdf>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) 2018: In: https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2018/Atlas-Agroalimentario-2018.
- SINAVEF (Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria). 2009. El cambio climático y su influencia en las plagas agrícolas. Climatología Sanitaria. Informe 2009. 17 pp
- Villaseñor L. A. 1987. Cafeticultura Moderna en México. Agrocomunicación Sáenz Colín y Asociados. Editorial Futura, S. A. México. Pág.71-78
- Waller, J.M. (1972). *Coffee rust in Latin America*. PANS. 18(4): 402-408.
- Ward, H. M. (1882). Researches on the life history of *Hemileia vastatrix*. *Journal of the Linnaean Society.*, (19), 299-335.
- Yamaoka, Y. (2014). Recent outbreaks of rust diseases and the importance of basic biological research for controlling rusts. *Journal of General Plant Pathology*, (80), 375-678
- Zambolim, L. (2016). Current status and management of coffee leaf rust in Brazil. *Tropical Plant Pathology*, (41), 1-8.
- Zamarripa Colmenero, A. y E. Escamilla Prado. 2002. Variedades de café en México: origen, características y perspectivas. Huatusco, CRUO-Universidad Autónoma Chapingo/Fundación Produce de Veracruz A. C., 39 p.