






Hemileia vastatrix: una prospección ante el cambio climático

Hemileia vastatrix: a climate change prospect

Paulo César Parada-Molina¹ ,
 Carlos Roberto Cerdán² ,
 Gustavo Ortiz Ceballos³ ,
 Víctor Luis Barradas Miranda⁴ ,
 Juan Cervantes-Pérez^{5*} 

¹Posgrado en Ciencias Agropecuarias, Facultad de Ciencias Agrícolas-Xalapa, Universidad Veracruzana. Circuito Aguirre Beltrán s/n, Zona Universitaria, CP. 91000, Xalapa, Veracruz, México.

²Facultad de Ciencias Agrícolas-Xalapa, Universidad Veracruzana. Circuito Aguirre Beltrán s/n, Zona Universitaria, CP. 91000, Xalapa, Veracruz, México.

³Facultad de Ciencias Agrícolas-Xalapa, Universidad Veracruzana. Circuito Aguirre Beltrán s/n, Zona Universitaria, CP. 91000, Xalapa, Veracruz, México.

⁴Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, CP. 04510, Coyoacán, Ciudad de México, México.

⁵Centro de Ciencias de la Tierra, Universidad Veracruzana, Francisco J. Moreno 207, CP. 91090. Xalapa, Veracruz, México.

*Autor de correspondencia:
jcervantes@uv.mx

Nota científica

Recibido: 03 de marzo de 2020

Aceptado: 27 de agosto de 2020

Como citar: Parada-Molina PC, Cerdán CR, Ortiz Ceballos G, Barradas Miranda VL, Cervantes-Pérez J (2020) *Hemileia vastatrix*: una prospección ante el cambio climático. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 7(3): e2507. DOI: 10.19136/era.a7n3.2507

RESUMEN. *Hemileia vastatrix*, hongo causante de la enfermedad más devastadora de *Coffea arabica* L. (roya del café), podría incrementar su distribución altitudinal debido al cambio climático, causando efectos adversos. Por ello, el objetivo fue se realizar una prospección del efecto del cambio climático en la incidencia de *H. vastatrix*. La investigación se realizó tomando datos de la zona cafetalera de Coatepec, Veracruz, México. Se analizaron las tendencias de temperatura máxima, mínima e índices de extremos climáticos de 1961 al 2010, propuestos por el Equipo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI). Las tendencias se relacionaron con las condiciones para la proliferación de *H. vastatrix*. La zona ha experimentado un aumento de temperatura máxima (0.2 °C década⁻¹) y mínima (0.3 °C década⁻¹); la precipitación y su intensidad diaria se han incrementado, aumentando la susceptibilidad a la incidencia y severidad de la roya del café y de otras enfermedades fúngicas.

Palabras clave: *Coffea arabica*, enfermedades, índices climáticos, roya del café, tendencias climáticas.

ABSTRACT. *Hemileia vastatrix*, the fungus that causes the most devastating disease of *Coffea arabica* L. (coffee rust), could increase its altitude distribution due to climate change, causing adverse effects. Therefore, realized a prospecting of the effect of climate change on the incidence of *H. vastatrix*. This study was conducted out taking data from the coffee growing area of Coatepec, Veracruz, Mexico. The trends of maximum, minimum temperature and climatic extremes indexes (1961-2010) proposed by the Team of Experts on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) were analyzed. Trends were related to conditions suitable for the proliferation of *Hemileia vastatrix*. The area has experienced an increase in the maximum temperature (0.2 °C decade⁻¹) and minimum (0.3 °C decade⁻¹). Annual rainfall and daily intensity have increased, increasing the susceptibility to incidence and severity from coffee rust and other fungal diseases.

Key words: *Coffea arabica*, diseases, climatic indices, coffee rust, climatic trends.

INTRODUCCIÓN

El Cambio Climático causa estragos en la agricultura, principalmente por la variabilidad climática, que es de gran importancia en el manejo de los cultivos. Esta variabilidad climática causa repercusiones en la producción cuando hay mayor intensidad de manejo y superficie sembrada, además de producción enfocada al comercio internacional (Nelson *et al.* 2014). Aunque el café en México se maneja en sistemas tradicionales bajo sombra (poco intensivos) en la mayoría de los casos, existen alrededor de 700 mil hectáreas que están enfocadas al mercado internacional (Figueroa *et al.* 2015).

Si bien todas las plantas cuentan con mecanismos de adaptación y resistencia, al estar sometidas a variaciones térmicas e hídricas anómalas, son más susceptibles a plagas y enfermedades, de forma que su manejo se vuelve más complejo (Songy *et al.* 2019). El café es afectado por diversas plagas y enfermedades que, como consecuencia del calentamiento global y de las variaciones en los regímenes de precipitación, podrían incrementar su distribución en un intervalo altitudinal más amplio, infestando plantaciones en todo el mundo (Toniutti *et al.* 2017, Ogundeji *et al.* 2019).

Entre las enfermedades del café destacan, por su importancia económica, las provocadas por hongos como la antracnosis (*Colletotrichum coffeanum*), que se propaga durante la estación húmeda y ocasiona manchas necróticas irregulares en hojas, flores y frutos, produciendo su caída prematura (Pereira *et al.* 2016). La mancha de hierro (*Cercospora coffeicola*), que se desarrolla con el inicio de las lluvias y es favorecida por la alta humedad y temperaturas entre 15 y 30 °C, la cual se caracteriza por la presencia de manchas necróticas circulares, crecimiento atrofiado de plantas y conducen a una defoliación prematura (Souza *et al.* 2019). El ojo de gallo (*Mycena citricolor*) que se desarrolla en ambientes con alto grado de humedad y temperaturas frescas, afectando principalmente hojas y frutos, originando su caída (Avelino *et al.* 2018) y la roya del café (*H. vastatrix*) que se produce a temperaturas entre 15 y 28 °C, con óptima de 22 °C (SENASICA

2019).

La plaga más devastadora de *C. arabica* es *H. vastatrix* (Silva *et al.* 2006, Burgiel y Muir 2010). El patógeno causa lesiones cloróticas en la parte inferior de las hojas, reduciendo el área fotosintética (Talhinhas *et al.* 2017, Koutouleas *et al.* 2019). En ataques severos puede ocurrir la defoliación, lo que lleva a la muerte de ramas, impactando de forma negativa la producción, lo que ocasiona pérdidas económicas para los agricultores (Cerdeira *et al.* 2017), como sucedió en nuestro país en 2013, situación de la que apenas se están recuperando muchos productores (Avelino *et al.* 2015).

El clima es un factor importante en la incidencia y severidad de las enfermedades (Bebber *et al.* 2016). Por lo que en los cafetales bajo sombra, debe considerarse que la cobertura arbórea modifica el microclima, creando condiciones distintas entre los cafetos aun cuando estén próximos (Barradas y Fanjul 1986). La tolerancia térmica de los hongos fitopatógenos es más amplia que la de *C. arábica*, que se desarrolla entre 18 y 21 °C (DaMatta *et al.* 2007, Ruiz *et al.* 2013); de modo que, frecuentemente, los hongos fitopatógenos resienten menos la variabilidad climática que los cafetos. Diversos estudios reportan, para las zonas cafetaleras, incrementos de temperatura (las máximas de menor magnitud que las mínimas), de los periodos cálidos y disminución de los periodos fríos; con aumento de la precipitación total anual, destacando la tendencia positiva en la intensidad de eventos de lluvia (Alexander *et al.* 2006, Marengo y Camargo 2008).

Para las principales regiones cafetaleras de Mesoamérica, Sudamérica, África y Asia-Pacífico se proyectan incrementos de temperatura de 2 °C y cambios en el régimen de precipitaciones para el 2050 (Ovalle-Rivera *et al.* 2015). Las zonas con condiciones más cálidas en sitios más lluviosos presentarían un incremento en la incidencia de enfermedades causadas por hongos (Granados-Ramírez *et al.* 2014, Läderach *et al.* 2017). Lo que impactaría en los sitios idóneos para el cultivo de *C. arabica* (Ovalle-Rivera *et al.* 2015).

En el estado de Veracruz, las condiciones climáticas no son homogéneas debido a su ubicación

geográfica, la orografía y la orientación; a pesar que algunas zonas se verán beneficiadas en su aptitud para el cultivo de *C. arabica* (Esperón-Rodríguez *et al.* 2016, Läderach *et al.* 2017), estas condiciones también podrían incrementar la viabilidad para el desarrollo de enfermedades fúngicas (Sánchez-Castillo *et al.* 2018); particularmente *H. vastatrix*, cuya tasa de infección está correlacionada con las temperaturas y las lluvias (Hinnah *et al.* 2018). Por lo anterior el objetivo del presente trabajo fue realizar una prospección del efecto del cambio climático en la incidencia de *H. vastatrix* en la zona cafetalera de Coatepec, Veracruz, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en la zona cafetalera de Coatepec, Veracruz, México. Esta zona fue seleccionada por: 1) la disponibilidad histórica de datos climatológicos, 2) ser una zona de altura (plantaciones hasta los 1 300 msnm), y 3) ser una de las zonas de calidad reconocida más boreales en México. El área de estudio se ubica entre los 19° 21' y 19° 36' LN y 96° 47' y 96° 58' LO, a una altitud entre 900 y 1 300 msnm, lo que la convierte, en una de las zonas de producción de café con características más extremas, con climas templado húmedo Cb (fm) (i') w" a semicálido húmedo (A)Ca(fm) (e)gw' (García 2004).

Datos y análisis

Para determinar los índices de cambio climático, y sus tendencias, se realizó un análisis estadístico de acuerdo a los procedimientos sugeridos por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) (Vázquez 2010). Se seleccionaron las series de datos diarios de temperatura máxima, temperatura mínima y la precipitación, del periodo 1961-2016, de tres estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional de México: Coatepec (19° 27' 20" LN y 96° 56' 40" LO, 1 188 msnm), Briones (19° 30' 58.9" LN y 96° 56' 34.6" LO, 1 349 msnm) y Xalapa (19° 30' 45" LN y 96° 54' 10" LO, 1 360 msnm). Las series de datos se sometieron a un

proceso de control de calidad, que consistió en verificar y corregir las observaciones a partir de pruebas basadas en estadística descriptiva y la inspección visual de las series gráficas, empleando la herramienta rclimindex_extraQC.r (Aguilar y Prohom 2011). Posteriormente, los datos se sometieron a una prueba de homogeneidad mediante el módulo RHTests v. 3.0 (Wang y Feng 2013), la cual se utiliza para detectar saltos en las series de datos debidos a factores externos a los climatológicos. Con el fin de corregir los saltos detectados, se les aplicó una prueba de homogenización relativa con el paquete estadístico climatol (Guijarro 2016).

Índices climáticos y tendencias

Se calcularon los índices de extremos climáticos: precipitación total anual (PRECPTOT), días con lluvia mayor a 5 mm (R05mm), índice simple de intensidad diaria (SDII), rango diurno de temperatura (DTR), frecuencia de noches y días cálidos (TN90p y TX90p) y la frecuencia de noches y días fríos (TX10p y TN10p), propuestos por el ETCCDI (Alexander *et al.* 2006) mediante el programa RClimDex v. 1.0 (Zhang y Feng 2004), para cada estación seleccionada.

Se construyeron series cronológicas de anomalías simples para cada índice de cada estación (desviación de los valores con respecto al promedio del período base 1961-2010), a escala anual e intra-anual. Mediante el promedio de las anomalías simples, de los índices de las tres estaciones, se construyeron las series cronológicas para la zona cafetalera de Coatepec (Jones y Hulme 1996). Estas series se sometieron a la prueba no paramétrica de Mann-Kendall para identificar tendencias crecientes o decreciente (Sneyers 1992). Para el análisis intra-anual se tomaron temporadas climáticas estándar de tres meses: dos secas, diciembre-febrero (DEF) y marzo-mayo (MAM); dos húmedas junio-agosto (JJA) y septiembre-noviembre (SON).

Los índices de cambio climático y sus tendencias se relacionaron con las condiciones aptas para la proliferación del hongo *H. vastatrix*, que requiere agua libre para su germinación; temperaturas entre 28 y 15 °C, con óptima entre 21 y 25 °C (Avelino y Rivas 2013). Con base en las tendencias de los índices

de cambio climático, proyectar su comportamiento para el 2050, por lo que se realizó una prospección sobre la incidencia del hongo de la roya del café por el efecto del cambio climático en la zona cafetalera de Coatepec, Veracruz, México.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la zona cafetalera estudiada, de 1961-2016 se presentó una precipitación total anual promedio de 1 553.34 mm; temperatura máxima de 25.9 °C y mínima de 12.9 °C. Pluviométricamente se ha presentado un incremento en la cantidad e intensidad de precipitación total anual (PCPTOT), lo que refleja aumento del número de días al año con lluvias mayores a 5 mm (R05mm) (Figura 1 y 2), además de una tendencia positiva en la intensidad de la precipitación diaria (SDII). Estacionalmente se presentan incrementos en la intensidad y cantidad de precipitación en las cuatro temporadas del año, siendo significativos en MAM y en SON. La incidencia de la roya del café está relacionada principalmente con los patrones temporales de precipitación. Ya que se desarrolla durante la temporada de lluvias y detiene su crecimiento en la temporada de seca (Avelino y Rivas 2013). La tendencia de incremento en la intensidad y cantidad diaria de la precipitación podrían potenciarla para el 2050 (Figuroa 2017) ya que favorecería la liberación de las uredosporas y la estimulación de la germinación, que requieren por lo menos 5 mm de precipitación y la infección generalmente ocurre sólo en la temporada de lluvias (Avelino y Rivas 2013, Merle et al. 2020, Yirga 2020). Mientras que una disminución de la precipitación reduciría los brotes de roya del café (Bebber et al. 2016).

Debido al cambio climático, la zona ha experimentado un calentamiento, por el incremento de la temperatura mínima y mínima extrema (0.33 y 0.76 °C década⁻¹, respectivamente) de mayor magnitud que el de las máximas (0.08 °C década⁻¹) (Figura 3). La temperatura máxima de la zona no es restrictiva para el desarrollo de la enfermedad ocasionada por *H. vastatrix* debido a su tolerancia a temperaturas relativamente altas (hasta 28 °C), pero temperaturas entre 21 y 25 °C incrementan la incidencia

la roya del café (De Oliveira et al. 2020, Silva et al. 2020). Mientras que temperaturas fuera del rango se retardaría de forma significativa las epidemias, por lo que la temperatura mínima podría ser un factor limitante para la roya del café (Hinnah et al. 2018, Daba et al. 2019, Yirga 2020), ya que hay episodios en los que su valor está por debajo del umbral mínimo para la proliferación de *H. vastatrix* (15 °C), lo que no le permitiría desarrollarse. No obstante, la temperatura mínima tiende a alcanzar el rango apropiado para el desarrollo del hongo de la roya del café para el 2050. Lo que ocasionaría un aumento de la esporulación del *H. vastatrix*, incrementando la susceptibilidad de las plantas al desarrollo de la enfermedad (Toniutti et al. 2017, Liebig et al. 2019). Además, de que favorecería la formación de apresorios en los estomas, que requieren temperaturas entre 13 y 16 °C, facilitando la penetración del hongo; en tanto que temperaturas entre 22 y 28 °C, favorecería la germinación de las esporas, acelerando la infección (Avelino y Rivas 2013). Tendencias climáticas similares se han reportado desde 2005 en América Central, incluidas las zonas cafetaleras, encontrando condiciones térmicamente menos extremas, con incrementos de las temperaturas máximas y mínimas (0.2-0.3 °C década⁻¹, respectivamente) (Aguilar et al. 2005).

El rango diurno de temperatura (DTR) se estrecha, presentando condiciones menos extremas, generando un ambiente menos frío (Figura 4). En el periodo 2008-2013, América Latina, experimentó brotes atípicos de la roya asociados a la reducción de DTR, debido a que las temperaturas máximas no se incrementaron, en comparación con el brote de roya del periodo 1991-1994 (Avelino et al. 2015), además de eventos de lluvia irregulares (McCook y Vandermeer 2015). Un DTR más bajo influye en periodos de latencia cortos, ya que la temperatura oscila cerca del óptimo, incrementando las condiciones para la infección por *H. vastatrix* (López et al. 2012, Avelino et al. 2015, Liebig et al. 2019). Además, la frecuencia de noches y días cálidos (TN90p y TX90p) ha aumentado y la frecuencia de noches y días fríos (TX10p y TN10p) ha disminuido; de acuerdo con Ovalle-Rivera et al. (2015), Brasil, Guatemala, Vietnam y México se verán afectados por la presión de enfermedades de-

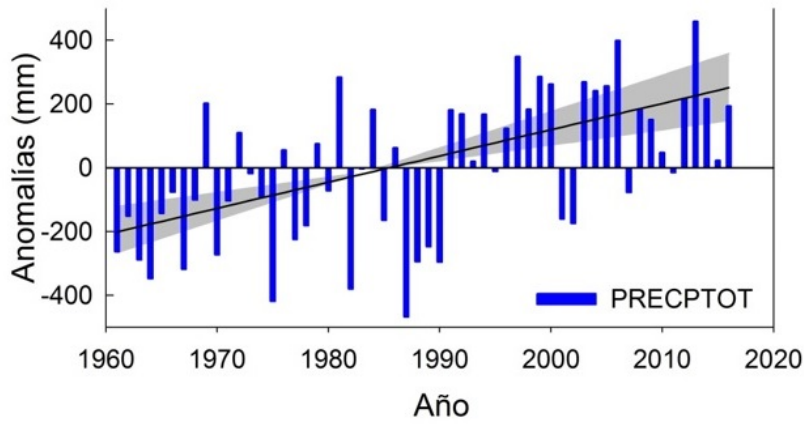


Figura 1. Serie de anomalías de precipitación total anual (PRECPTOT) para la zona cafetalera de Coatepec, Veracruz, Méx.

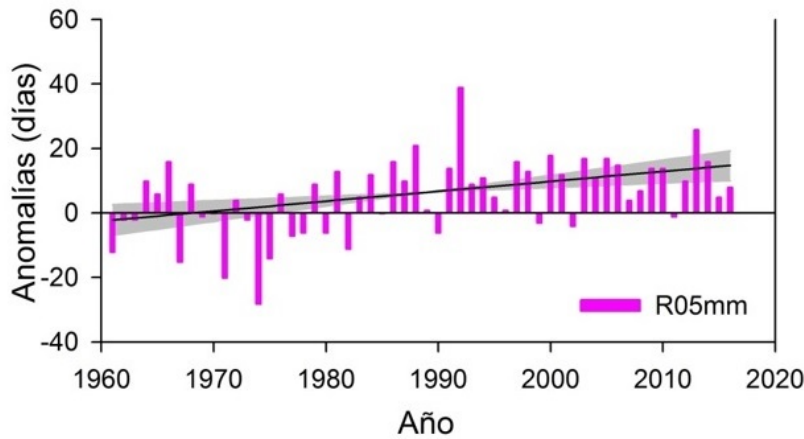


Figura 2. Serie de anomalías de días con lluvias mayores a 5 mm (R05mm) para la zona cafetalera de Coatepec, Veracruz, Méx.

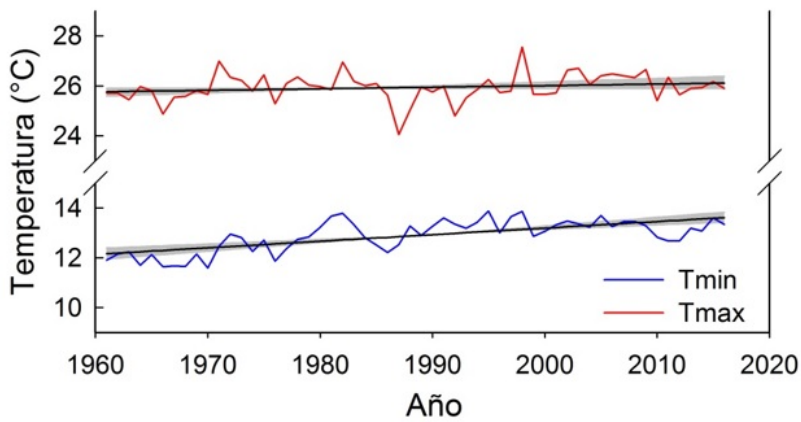


Figura 3. Series de temperatura máxima y mínima (Tmax y Tmin, respectivamente), para la zona cafetalera de Coatepec, Veracruz, Méx.

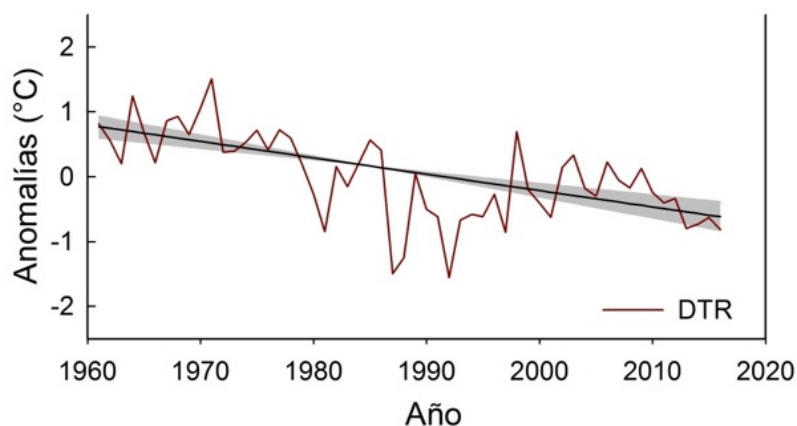


Figura 4. Serie de anomalías del rango diario de temperatura (DTR) para la zona cafetalera de Coatepec, Veracruz, Méx.

bido al incremento de temperatura, cambios en la distribución de las lluvias, aumento de los periodos cálidos y reducción de los periodos fríos. Condiciones similares se han proyectado para el sureste de México (Sierra Madre de Chiapas y Veracruz), que ya fue afectado por la epidemia de roya en el periodo 2008-2013 (Schroth *et al.* 2009, McCook y Vandermeer 2015).

Las tendencias climáticas proyectan condiciones térmicas menos extremas e incrementos en la cantidad e intensidad de la precipitación. Si bien, la combinación de estas condiciones aumentará la incidencia y la severidad de la roya del café y de otras enfermedades fúngicas, para el 2050, en la zona cafetalera estudiada, también debe considerarse que hay otros efectos que no fueron estudiados; como

el estrés hídrico en flores y frutos, los riesgos de heladas y granizo, la proliferación de insectos-plaga como la broca del café, la vulnerabilidad a la erosión, entre muchos otros. En este sentido, se recomienda que todas las decisiones de manejo que se tomen en la cafecultura sean de manera integral y holística, ya que una respuesta puntual a la roya como el cambio por variedades de café tolerantes a roya, no considera la complejidad de la situación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONACyT por la beca de posgrado número 464617 otorgada para realizar este proyecto.

LITERATURA CITADA

Aguilar E, Peterson T, Ramírez O, Frutos R, Retana J, Solera M, Soley, J, González I, Araujo R, Rosa, A, Valle V, Brunet M, Aguilar L, Álvarez L, Bautista M, Castañón C, Herrera L, Ruano E, Sinay J, Sánchez E, Hernández O, Obed F, Salgado J, Vázquez J, Baca M, Gutiérrez M, Centella C, Espinosa J, Martínez D, Olmedo B, Ojeda E, Núñez R, Haylock M, Benavides H, Mayorga R (2005) Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961-2003. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 110: 1-15. DOI: 10.1029/2005JD006119.

Aguilar E, Prohom M (2011) EXTRAQC quality control software. Centro de Cambio Climático y Servicio meteorológico de Catalunya, España. http://www.c3.urv.cat/data/Manual_rclimdex_extraQC.r.pdf. Fecha de consulta: 5 de diciembre de 2019.

Alexander L, Zhang X, Peterson T, Caesar J, Gleason B, Klein-Tank A, Haylock M, Collins D, Trewin B, Rahimzadeh

- F, Tagipour A, Rupa K, Revadekar J, Griffiths G, Vincent L, Stephenson D, Burn J, Aguilar E, Brunet M, Taylor M, New M, Zhai P, Rusticucci M, Vázquez J (2006) Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 111: 1-22. DOI: 10.1029/2005JD006290.
- Avelino J, Cristancho M, Georgiou S, Imbach P, Aguilar L, Bornemann G, Läderach P, Anzueto F, Hruska A, 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.
- Avelino J, Rivas G (2013) La roya anaranjada del cafeto. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01071036/document>. Fecha de consulta: 4 de noviembre de 2019.
- Avelino J, Allinne C, Cerda R, Willocquet L, Savary S (2018) Multiple-disease system in coffee: from crop loss assessment to sustainable management. *Annual Review of Phytopathology* 56: 611-635.
- Barradas VL, Fanjul L (1986) Microclimatic characterization of shaded and open-grown coffee (*Coffea arabica* L.) plantations in Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology* 38: 101-112.
- Bebber D, Castillo A, Gurr S (2016) Modelling coffee leaf rust risk in Colombia with climate reanalysis data. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 371: 20150458. DOI: 10.1098/rstb.2015.0458.
- Burgiel W, Muir A (2010) Invasive species, climate change and ecosystem-based adaptation: addressing multiple drivers of global change. *Global Invasive Species Programme*. Washington, DC, US and Nairobi, Kenya. http://www.gisp.org/whatsnew/docs/Climate_Change_ReportA4.pdf. Fecha de consulta: 7 de noviembre de 2019.
- Cerda R, Avelino J, Gary C, Tixier P, Lechevallier E, Allinne C (2017) Primary and secondary yield losses caused by pests and diseases: assessment and modeling in coffee. *Plos One* 12: e0169133. DOI: 10.1371/journal.pone.0169133.
- Daba G, Helsen K, Berecha G, Lievens B, Debela A, Honnay O (2019) Seasonal and altitudinal differences in coffee leaf rust epidemics on coffee berry disease-resistant varieties in Southwest Ethiopia. *Tropical Plant Pathology* 44: 244-250.
- De Oliveira E, De Souza G, Da Silva J, Costa T, de Souza P (2020) Machine learning algorithms for forecasting the incidence of *Coffea arabica* pests and diseases. *International Journal of Biometeorology* 64: 671-688.
- DaMatta F, Ronchi C, Maestri M, Barros R (2007) Ecophysiology of coffee growth and production. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 19: 485-510.
- Esperón-Rodríguez M, Bonifacio-Bautista M, Barradas V (2016) Socio-economic vulnerability to climate change in the central mountainous region of eastern Mexico. *Ambio* 45: 146-160.
- Figuroa G (2017) Índices de cambio climático en la cuenca del Río Grande, Chiapas, México. *Tecnología y Ciencias del Agua* 8: 137-143.
- Figuroa E, Pérez F, Godínez L (2015) La producción y el consumo del café. ECORFAN, España. 170p. https://www.ecorfan.org/spain/libros/LIBRO_CAFE.pdf. Fecha de consulta 30 de julio de 2020.
- García E (2004) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen. UNAM. Ciudad de México, México. 246p.
- Guijarro J (2016) Automatización de la homogeneización de series climáticas: nuevas funciones del paquete climatol 3.0. En: Olcina J, Rico A, Moltó E (ed). *Clima, sociedad, riesgos y ordenación del territorio*. AEC. Alicante, España. 131-140.

- Granados-Ramírez R, Medina B, Peña M (2014) Change and climate change in the slope of the Gulf of Mexico. Impacts on coffee production. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 5: 473-485.
- Hinnah F, Sentelhas P, Alves C, Naves R (2018) Weather-based coffee leaf rust apparent infection rate modeling. *International Journal of Biometeorology* 62: 1847-1860.
- Jones P, Hulme M (1996) Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations. *International Journal of Climatology* 16: 361-377.
- Koutouleas A, Jørgen L, Jørgensen H, Jensen B, Lillesø J, Junge A, Ræbild A (2019) On the hunt for the alternate host of *Hemileia vastatrix*. *Ecology and Evolution* 9: 13619-1363.
- Läderach P, Ramirez-Villegas J, Navarro-Racines C, Zelaya C, Martinez-Valle A, Jarvis A (2017) Climate change adaptation of coffee production in space and time. *Climatic Change* 141: 47-62.
- Liebig T, Ribeyre F, Läderach P, Poehling HM, Van Asten P, Avelino J (2019) Interactive effects of altitude, microclimate and shading system on coffee leaf rust. *Journal of Plant Interactions* 14: 407-415.
- López D, Virginio E, 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.
- Marengo J, Camargo C (2008) Surface air temperature trends in Southern Brazil for 1960-2002. *International Journal of Climatology* 28: 893-904.
- Merle I, Tixier P, de Melo E, Cilas C, Avelino J (2020). Forecast models of coffee leaf rust symptoms and signs based on identified microclimatic combinations in coffee-based agroforestry systems in Costa Rica. *Crop Protection* 130: 105046. DOI: 10.1016/j.cropro.2019.105046.
- Mccook S, Vandermeer J (2015) The big rust and the red queen: Long-Term perspectives on coffee rust research. *Phytopathology* 105: 1164-1173.
- Nelson G, Valin H, Sands R, Havlík P, Ahammad H, Deryng D, Elliott J, Fujimori S, Hasegawa T, Heyhoe E, Kyle P, Von Lampe M, Lotze-Campen H, Mason D, Van Meijl H, Van Der Mensbrugge D, Müller C, Popp A, Robertson R, Robinson S, Schmid E, Schmitz C, Tabeau A, Willenbockel D (2014) Climate change effects on agriculture: economic responses to biophysical shocks. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111: 3274-3279.
- Ogundeji B, Olalekan-Adeniran M, Orimogunje O, Awoyemi S, Yekini B, Adewoye G, Bankole I (2019) Climate hazards and the changing world of coffee pests and diseases in Sub-Saharan Africa. *Journal of Experimental Agriculture International* 41: 1-12.
- Ovalle-Rivera O, Läderach P, Bunn C, Obersteiner M, Schroth G (2015) Projected shifts in *Coffea arabica* suitability among major global producing regions due to climate change. *Plos One* 10: 1-13. DOI: 10.1371/journal.pone.0124155.
- Pereira J, Dos Santos S, Castro F, Santos A, Oliveira D (2016) Óleos essenciais como alternativa para o controle do *Colletotrichum coffeanum* no cafeeiro. *Agrotrópica* 28: 267-276.
- Ruiz J, Medina G, González A, Flores L, Ramírez O, Ortiz T, Byerly M, Martínez P, (2013) Requerimientos agroecológicos de cultivos. INIFAP. Tepatitlán de Morelos, México. 564p.
- Sánchez-Castillo V, Avendaño-Pizo Y, Gaviria-Astudillo A, Gómez C (2018) Cambio climático y café (*Coffea arabica*) en Acevedo, Huila: una lectura desde sus cultivadores. *I+ D Revista de Investigaciones* 12: 59-69.
- Schroth G, Läderach P, Dempewolf J, Philpott S, Hagggar J, Eakin H, Castillejos T, García J, Soto, L, Hernández R, Etzinger A, Ramírez J (2009) Towards a climate change adaptation strategy for coffee communities

- and ecosystems in the Sierra Madre de Chiapas, Mexico. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 14: 605-625.
- SENASICA (2019) Roya del cafeto *Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome. Dirección General de Sanidad Vegetal. Ciudad de México, México. http://www.cesavep.org/descargas/RDC/Ficha_Tecnica_Roya_del_cafeto.pdf. Fecha de consulta 27 de julio de 2020.
- Silva C, Várzea V, Guerra-Guimarães L, Azinheira H, Fernandez D, Petitot A, Bertrand B, Lashermes P, Nicole M (2006) Coffee resistance to the main diseases: leaf rust and coffee berry disease. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 18: 119-147.
- Silva M, De Carvalho M, Ampélio E (2020) Multispectral radiometric characterization of coffee rust epidemic in different irrigation management systems. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 86: 102016. DOI: 10.1016/j.jag.2019.102016.
- Sneyers R (1992) On the use of statistical analysis for the objective determination of climate change. *Meteorologische Eitschrift* 1: 247-256.
- Songy A, Fernandez O, Clément C, Larignon P, Fontaine F (2019) Grapevine trunk diseases under thermal and water stresses. *Planta* 249: 1655-1679.
- Souza P, Vilela M, dos Santos M, Ampelio E, Ogoshi C, Andrade A, García B, Maia V (2019) Temperature, incubation time and virulence of *Cercospora coffeicola* in the production of cercosporin. *Journal of Phytopathology* 167: 371-379.
- Talhinhas P, Batista D, Diniz I, Vieira A, Silva D, Lourerio A, Tavares S, Pereira A, Azinheira H, Guerra-Guimaraes L, Varzea V, Silva M (2017) The coffee leaf rust pathogen *Hemileia vastatrix*: one and a half centuries around the tropics. *Molecular Plant Pathology* 18: 1039-1051.
- Toniutti L, Breitler J, Etienne H, Campa C, Doubeau S, Urban L, Lambot C, Pinilla J, Bertrand B (2017) Influence of environmental conditions and genetic background of arabica coffee (*C. arabica* L) on leaf rust (*Hemileia vastatrix*). *Pathogenesis. Frontiers in Plant Science* 8: 2025. DOI: 10.3389/fpls.2017.02025.
- Vázquez J (2010) Guía para el cálculo y uso de índices de cambio climático en México. INE-SEMARNAT. México. 88p.
- Wang XL, Feng Y (2013) RHtestsV4 User manual. Climate research division, atmospheric science and technology directorate, science and technology branch, environment Canada. Ontario, Canada. http://etccdi.pacificclimate.org/RHtest/RHtestsV4_UserManual_10Dec2014. Fecha de consulta: 04 de noviembre de 2019.
- Yirga M (2020) Potential effects, biology and management options of coffee leaf rust (*Hemileia Vastatrix*): A review. *International Journal of Forestry and Horticulture* 6: 19-31.
- Zhang X, Feng F (2004) RClmDex (1.0). User manual. Climate Research Branch Environment. Ontario, Canada. <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/RClmDex/RClmDexUserManual.doc>. Fecha de consulta: 04 de noviembre de 2019.