



Scientia Agropecuaria

Web page: <http://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientiaagrop>

Facultad de Ciencias
Agropecuarias

Universidad Nacional de
Trujillo

RESEARCH ARTICLE



Climatic suitability for *Coffea arabica* L. front to climate events extreme: Tree cover importance

Aptitud climática para *Coffea arabica* L. ante eventos climáticos extremos: Importancia de la cobertura arbórea

Paulo César Parada-Molina¹ ; Víctor Luis Barradas-Miranda² ; Gustavo Ortiz Ceballos¹ ; Juan Cervantes-Pérez³ ; Carlos Roberto Cerdán Cabrera¹ 

¹ Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Veracruzana. Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán s/n, 91000, Xalapa, Veracruz. México.

² Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, 04510, Ciudad de México. México.

³ Facultad de Ciencias Atmosféricas, Universidad Veracruzana. Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán s/n, 91090, Xalapa, Veracruz. México.

* Corresponding author: ccerdan@uv.mx (C. R. Cerdán Cabrera).

Received: 13 September 2021. Accepted: 4 February 2022. Published: 28 February 2022.

Abstract

Negative impacts of climate change are expected in the production of *Coffea arabica* L. one of the most commercialized tropical agroproducts in the world. However, most studies work with global circulation models, being of little use in making decisions on the scale of farm management. Given this, the objective of this study was to identify the suitability for the cultivation of *C. arabica* in the face of climate change and how tree cover mitigates the impacts of climate change in an agroforestry plot. The indices of climatic extremes were calculated (1961 to 2016 for Coatepec; 1985 to 2016 for Briones) and a trend analysis was carried out (Mann-Kendall). The temperature inside a plot, and on an open site, was monitored for two years (2017-2019). This was related to the climatic requirements of *C. arabica*. Trends of increase ($p < 0.05$) of the minimum and minimum extreme annual temperatures were identified in the two stations near the plot (0.24 and 0.69 °C:decade⁻¹ in Coatepec and 0.46 and 0.79 °C:decade⁻¹ in Briones). The maximum temperature did not present significant increases, reducing the thermal amplitude. Both annual and seasonal precipitation shows trends of increase in intensity. All these conditions are still suitable for the cultivation of *C. arabica*. At the plot scale, the importance of tree cover is demonstrated, which in this agroforestry system allows to reduce the maximum temperature by 1.9 °C compared to an open site. Tree cover has also made it possible to mitigate extreme events.

Keywords: climate anomalies; phenology; climate change indices; agroforestry system; climate trends.

Resumen

Se prevén impactos negativos del cambio climático en la producción de *Coffea arabica* L. uno de los agroproductos tropicales más comercializados en el mundo. Sin embargo, la mayoría de los estudios trabajan con modelos de circulación global, siendo poco útiles en la toma de decisiones a escala de manejo de una finca. Ante ello, el objetivo de este estudio fue identificar la aptitud para el cultivo de *C. arabica* ante el cambio climático y cómo la cobertura arbórea mitiga los impactos del cambio climático en una parcela agroforestal. Se calcularon los índices de extremos climáticos (1961 a 2016 para Coatepec; 1985 a 2016 para Briones) y se realizó un análisis de tendencias (Mann-Kendall). Se monitoreó la temperatura en el interior de una parcela, y en un sitio abierto, durante dos años (2017-2019). Esto se relacionó con los requerimientos climáticos de *C. arabica*. Se identificaron tendencias de incremento ($p < 0,05$) de las temperaturas mínima y mínima extrema anual en las dos estaciones cercanas a la parcela (0,24 y 0,69 °C:década⁻¹ en Coatepec y 0,46 y 0,79 °C:década⁻¹ en Briones). La temperatura máxima no presentó incrementos significativos, reduciendo la amplitud térmica. Tanto la precipitación anual y estacional muestran tendencias de incremento en intensidad. Todas estas condiciones siguen siendo aptas para el cultivo de *C. arabica*. A escala de parcela, se demuestra la importancia de la cobertura arbórea, que en este sistema agroforestal permite reducir la temperatura máxima 1,9 °C en comparación con un sitio abierto. Asimismo, la cobertura arbórea ha permitido mitigar eventos extremos.

Palabras clave: anomalías climáticas; fenología; índices de cambio climático; sistema agroforestal; tendencias climáticas.

DOI: <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2022.005>

Cite this article:

Parada-Molina, P. C., Barradas-Miranda, V. L., Ortiz Ceballos, G., Cervantes-Pérez, J., & Cerdán Cabrera, C. R. (2022). Aptitud climática para *Coffea arabica* L. ante eventos climáticos extremos: Importancia de la cobertura arbórea. *Scientia Agropecuaria*, 13(1), 53-62.

1. Introducción

El cambio climático ha afectado significativamente la agricultura mundial en el siglo XXI (Ochieng et al., 2016). Se espera que, a consecuencia de este, la producción agrícola disminuya en varias regiones del mundo (Giannini et al., 2017; Granados-Ramírez et al., 2014) debido a que las condiciones en las cuáles los cultivos se desarrollan cambiarán. Para la agricultura tropical, que se realiza mayoritariamente sin infraestructura de riego, se han calculado pérdidas potenciales por US\$5 mil millones por año (Stevanović et al., 2016).

La producción de café, uno de los agroproductos tropicales más comercializados en el mundo, se ha incrementado cerca del 43,8% a escala global en los últimos 20 años (FAOSTAT, 2021). El aumento en el consumo y las oscilaciones de precios han influido en este incremento, aunque ahora los fenómenos climáticos extremos y el clima cambiante contribuyen a que la producción fluctúe cada año (Davis et al., 2021a). Los impactos del cambio climático no pueden generalizarse a la producción global del café, ya que estos son distintos en cada una de las regiones geográficas productoras del mundo. Por ejemplo, en la región ecuatorial de Tanzania, entre 1000 y 1800 m s.n.m, se identifican aumentos de sequías que afectan negativamente la producción (Wagner et al., 2021); mientras que en regiones tropicales (13 a 20°) de Brasil, Ferreira et al. (2019) no prevén efectos negativos en la producción de *C. arabica* debido al cambio climático. Además, los efectos sobre este cultivo dependen tanto de la sensibilidad de las variedades de café cultivadas, así como del manejo de la cobertura arbórea y otras prácticas de adaptación.

De acuerdo al informe del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2021) la temperatura promedio mundial se ha incrementado 1,1 °C desde el periodo 1850-1900. Este aumento ha acrecentado la probabilidad de fenómenos climáticos extremos (Hao et al., 2014), destacando la ocurrencia de temperaturas cada vez más altas, la disminución de la frecuencia de temperaturas bajas y cambios en la cantidad, intensidad y frecuencia de eventos de precipitación (Aguilar et al., 2005; Omondi et al., 2014; Supari et al., 2017).

Estos fenómenos impactarán negativamente la aptitud climática para el cultivo de café en las regiones productoras, sobre todo aquellas que latitudinalmente se encuentran más alejados (sur o norte) del Ecuador. El ciclo fenológico de *C. arabica*, especie de café más cultivada en sistemas agroforestales, podría verse afectado ya que ha demostrado ser sensible a cambios de temperatura y precipitación (Bunn et al., 2015; DaMatta & Ramalho, 2006; Läderach et al., 2017; Wagner et al., 2021). Esto sumado con su vulnerabilidad a organismos plagas, provoca riesgos para mantener la producción actual de café (Dufour et al., 2021; Libert et al., 2020; Valencia et al., 2018).

Estudios realizados con modelos de circulación global han proyectado que, a nivel mundial, las áreas adecuadas para la producción de café disminuirán cerca del 50% a mediados del siglo XXI. En India, Vietnam y Mesoamérica, las regiones de altitudes más bajas y, en América del Sur, las de latitudes altas serían las regiones más afectadas (Ovalle-Rivera et al., 2015); en el este de África y en la región de las islas del Pacífico la reducción de áreas

adecuadas para la producción sería menor (Bunn et al., 2015). Estudios a escala regional (o continental) sugieren que los impactos serán mayores en latitudes y altitudes bajas; reduciendo los rendimientos de *C. arabica* por el incremento de temperatura (Bunn et al., 2015; Läderach et al., 2013, 2017). Para América Latina se estima que las áreas actuales se reducirán entre un 73 y 88% en 2050. Un descenso del 46-76% mayor de lo estimado en evaluaciones mundiales, debido principalmente al incremento de temperatura y decremento de precipitación. Países como Costa Rica, El Salvador y Nicaragua podrían ser afectados drásticamente disminuyendo más del 40% de la superficie que actualmente se considera idónea para *C. arabica*; Guatemala presentaría una reducción de 19% (Läderach et al., 2013, 2017). Para México, el país productor de Latinoamérica más alejado latitudinalmente de la línea ecuatorial, se prevé una disminución aproximada del 30% de su superficie idónea para el cultivo de *C. arabica* y se proyecta que la idoneidad se encontraría en altitudes más elevadas (>1500 m s.n.m.) (Ovalle-Rivera et al., 2015).

El esfuerzo por determinar el efecto del cambio climático sobre las condiciones adecuadas para el cultivo de *C. arabica* ha sido significativo. Sin embargo, la escala espacial de análisis no ha permitido identificar y promover acciones eficientes para contrarrestar los cambios de idoneidad a escala local, que sean aplicables en los sistemas de producción de pequeños agricultores (Craparo et al., 2015).

Asimismo, varios estudios están basados en datos climáticos interpolados y proyecciones de modelos de circulación global (Jassogne et al., 2013; Läderach et al., 2013; Ovalle-Rivera et al., 2015); la incertidumbre de las simulaciones de estos modelos se ve incrementada conforme se reduce la escala espacial de análisis, además quedan solapados los efectos de las características locales en las variaciones del clima. Por ello, el análisis de datos observados puede permitir identificar el comportamiento del clima, y su influencia sobre el cultivo de café, a escalas espaciales más pequeñas (Ferreira et al., 2019); además, de resaltar que los sistemas agroforestales permiten mitigar los efectos de los extremos de temperatura y precipitación (Moreira et al., 2018; Wagner et al., 2021), resulta importante identificar la aptitud climática para el cultivo de *C. arabica* ante eventos climáticos extremos y cómo la cobertura arbórea mitiga las temperaturas extremas en una parcela agroforestal, a partir de evidencia observacional.

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

El estudio se realizó en la zona localizada entre 19° 27' 20" y 19° 31' 12" y 96° 57' 39,6" y -96° 55' 51,6", a una altitud entre 1100 y 1400 m s.n.m., en la zona central del estado de Veracruz, México. Lo cual la convierte en Latinoamérica en una de las zonas de características más extremas, con climas templado húmedo Cb (fm) (i') w" a semicálido húmedo (A) Ca (fm) (e) gw' (García, 2004) (Figura 1).

De acuerdo a las normales climatológicas de las estaciones Coatepec (30026) y Briones (30452), la precipitación oscila entre 1650 a 1800 mm distribuidos en todo el año

temperatura media anual entre 18 y 19,6 °C, con un periodo de heladas de diciembre a febrero y de temperaturas altas de marzo a mayo (SMN, 2019). El área de estudio se caracteriza por la presencia de cultivo del café bajo sistemas agroforestales, principalmente con los sistemas de policultivo tradicional (Moguel & Toledo, 1999) entre los pequeños productores y policultivo comercial efectuado por medianos y grandes productores con la introducción de árboles que generen beneficios económicos adicionales.

2.2 Condiciones climáticas favorables para el café

La precipitación anual óptima para el desarrollo de *C. arabica* oscila entre 1200-1800 mm, con buena distribución estacional (Alègre, 1959); aunque puede adaptarse a precipitaciones superiores a 2000 mm (DaMatta et al., 2007). Requiere un periodo seco no mayor de tres meses de duración (lluvia menor a 50 mm/mes), seguido de un periodo de amplia disponibilidad de humedad para la apertura de flores (Ruiz et al., 2013).

Tabla 1

Requerimientos agroclimáticos para *C. arabica* y promedios climáticos de la zona de estudio

Variable	Unidad	Valor óptimo	Valor en área de estudio*
Precipitación total anual	mm	1200 – 1800	1700 – 1800
Temp. máxima	°C	21 – 30,6	25 – 27
Temp. media	°C	17 – 23	18 – 19,6
Temp. mínima	°C	10 – 19,9	11 – 12,6
Temp. máxima extrema	°C	> 33	29,5 – 34
Temp. mínima extrema	°C	07 – 10	4 – 6

Fuente: elaborado con información de Barva (2011), DaMatta et al. (2007), Granados-Ramírez et al. (2014) y Ruiz et al. (2013). *Calculado a partir de normales climatológicas de SMN (2019). Temp.: Temperatura.

Puede tolerar temperaturas bajas entre los 7 y 14 °C y altas entre los 30 y 33 °C, presentando un potencial productivo

bajo. En la **Tabla 1** se comparan los requerimientos agroclimáticos para *C. arabica* y los promedios climáticos de la zona de estudio calculados a partir de las normales climatológicas de 1981-2010 (SMN, 2019).

2.3 Determinación de índices de cambio climático

a) Datos climatológicos: Se seleccionaron dos estaciones climatológicas del SMN de México localizadas dentro del área de estudio: 30026 (Coatepec), ubicada a 19° 27'20", -96° 56'40" y 1188 msnm; 30452 (Briones) ubicada a 19° 30' 30", -96° 56' 58" y 1349 m s.n.m. Se recopilaban las series de datos diarios de temperatura máxima, temperatura mínima y la precipitación diaria comprendidas de 1961 a 2016 para Coatepec, y de 1985 a 2016 para Briones. Se empleó el paquete estadístico Climatol (Gujarro, 2019) para realizar el control de calidad de las series de datos, con la finalidad de identificar y corregir valores atípicos. Climatol también se empleó para la homogenización (Gujarro, 2018) y el llenado de datos faltantes en las series climáticas. Este software permite normalizar los datos de tres maneras: dividiéndolos por sus valores medios, restando las medias y por estandarización completa. Climatol calcula las medias usando los datos disponibles para cada serie, completa los datos faltantes empleando medias provisionales y desviaciones estándar, y los recalcula con la serie completa. Este proceso se repite hasta que no exista cambios en el promedio cuando los datos se redondean a su precisión inicial (Gujarro, 2018).

Las series estimadas se emplean como referencia para sus correspondientes series observadas. Con ellas se determina una serie restando los valores estimados de los observados; estas series permitirán controlar la calidad de la serie, eliminar anomalías y comprobar su homogeneidad a partir de la prueba de homogenización normal estándar (SNHT) (Alexandersson, 1986).

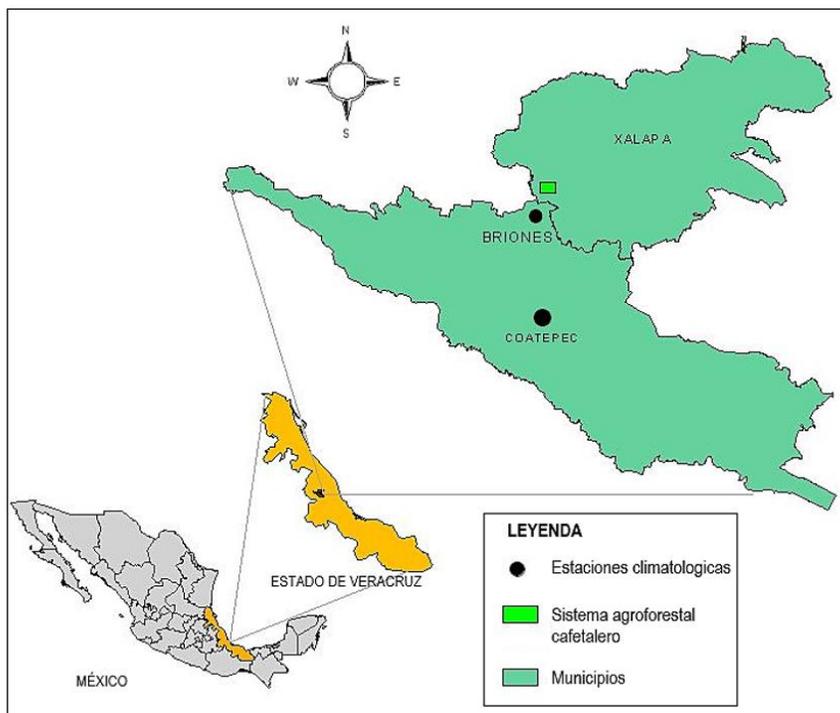


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

Tabla 2

Índices de cambio climático calculados en el estudio

Índice	Descripción	(unidad)	Índice	Descripción	(unidad)
<i>DTR</i>	Rango diario de temperatura	(°C)	*GLS	Estación de crecimiento	(Días)
<i>TXx</i>	Temperatura máxima extrema	(°C)	*FD0	Días con helada	(Días)
<i>TXn</i>	Temperatura máxima más baja	(°C)	<i>PRCPTOT</i>	Precipitación total anual	(mm)
<i>TNx</i>	Temperatura mínima más alta	(°C)	<i>RX1day</i>	Precipitación máxima en 1 día	(mm)
<i>TNn</i>	Temperatura mínima extrema	(°C)	<i>RX5day</i>	Precipitación máxima en 5 días	(mm)
<i>TX90P</i>	Días calurosos	(%)	SDII	Índice simple de intensidad diaria	(mm/día)
<i>TN90P</i>	Noches cálidas	(%)	R95p	Días muy húmedos	(mm)
<i>TX10P</i>	Días frescos	(%)	R99p	Días extremadamente húmedos	(mm)
<i>TN10P</i>	Noches frías	(%)	R10mm	Días con lluvia mayor a 10 mm	(Días)
SU25	Días de verano	(Días)	R20mm	Días con lluvia mayor a 20 mm	(Días)
*TR20	Noches tropicales	(Días)	Rnmm	Días con lluvia mayor a nn	(Días)
*WSDI	Duración de los períodos cálidos	(Días)	*CDD	Días secos consecutivos	(Días)
*CSDI	Duración de los períodos fríos	(Días)	*CWD	Días húmedos consecutivos	(Días)
*ID	Días con hielo	(Días)			

Fuente: Zhang & Yang (2004). Todos los índices se calcularon anualmente; en cursiva índices calculados estacionalmente; con asterisco índices descartados del análisis.

b) Índices de cambio climático y tendencias: Se calcularon, para cada estación, los 27 índices de extremos climáticos propuestos por el Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI) (Zhang & Yang, 2004) (Tabla 2). Los índices se derivan de la temperatura máxima y mínima diaria y la precipitación diaria mediante el programa RCLimDex v. 1.0 (Alexandersson, 1986).

Para comparar el presente estudio con otras referencias se tomaron temporadas climáticas de tres meses: dos secas, diciembre-febrero (DEF) y marzo-mayo (MAM); dos húmedas junio-agosto (JJA) y septiembre-noviembre (SON) (Aguilar et al., 2005), ya que las diferencias climáticas temporales desempeñan un papel importante en el desarrollo fenológico del café (Camargo, 2010; Villers et al., 2009). RCLimDex permite calcular índices relacionados con el número de días con temperaturas umbrales definidos por el usuario. Por lo que adicionalmente, se determinaron índices tomando como referencia los umbrales del café (Barva, 2011; Granados-Ramírez et al., 2014; Ruiz et al., 2013): SU27 y SU23 (máximas mayores a 27 y 23 °C); FD14 y FD10 (mínimas menores a 14 y 10 °C). Los índices WSDI, CSDI, TR20, ID, GLS y FD0 no mostraron un comportamiento temporal relevante, por lo que fueron descartados del análisis.

Se construyeron series de anomalías simples de los índices anuales y temporales de cada estación (Jones & Hulme, 1996). Para identificar tendencias estadísticamente significativas, estas series fueron sometidas al test no paramétrico de Mann-Kendall (τ) y se empleó el estimador de pendiente de Sen para determinar la magnitud de dichas tendencias (Serrano-Barrios et al., 2016). Los análisis se realizaron con el software XLSTAT. La significación estadística de las tendencias se evaluó a un nivel de confianza del 5% para todos los casos. Además, se compararon con índices de cambio climático reportados en otras regiones cafetaleras del mundo. Para ello, se realizó una revisión bibliográfica de trabajos realizados en áreas cafetaleras y que hubieran empleado la prueba Mann-Kendall y el estimador de pendiente de Sen. Se encontraron seis trabajos con esas características realizados para el Sureste de Brasil, América Central y norte de Sudamérica,

Indochina, Indonesia, Etiopía y uno realizado a escala global. Los índices previamente reportados se analizaron de manera comparativa a los obtenidos en este estudio.

2.4 Sistema agroforestal y su efecto en la temperatura ambiente

Se realizaron mediciones de temperatura ambiente en el estrato arbustivo (entre las plantas de café a 2 m de altura) de junio de 2017 hasta mayo de 2019 en un sistema agroforestal (SAF) dominado por la especie arbórea *Acrocarpus fraxinifolius* (Cedro rosado). Este se ubica a 19° 30' 55,9", -96° 56' 30,5" y 1320 m s.n.m. La misma variable fue monitoreada en las mismas fechas en un área sin árboles de sombra (sitio abierto), ubicada a menos de 400 m de distancia. Las lecturas tanto de los cafetos bajo sombra, como del área sin árboles se encuentran, en línea recta, a menos de 500 m de las estaciones meteorológicas con las que se construyeron los 27 índices. Las mediciones se realizaron cada 15 minutos con sensores HOBO U23 Pro-v2. De este conjunto de datos, se calculó el promedio horario de la temperatura. Posteriormente se seleccionaron las temperaturas máximas y mínimas diarias, a partir de las cuales se determinaron los promedios mensuales de cada variable.

Se realizó la prueba de t para identificar diferencias entre las temperaturas al interior del SAF y en el sitio abierto.

3. Resultados y discusión

3.1 Cambios en los extremos climáticos anuales

La temperatura máxima (T_{max}), mínima (T_{min}) y media anual en Coatepec y Briones se encuentran dentro de los requerimientos térmicos óptimos del café (Tabla 1). La T_{min} muestra un incremento significativo en ambas estaciones con valores medios de 13,5 °C ($sd= 0,62$) y 11,5 °C ($sd= 0,58$) respectivamente (Figura 2). Durante el periodo evaluado, el rango diario de la temperatura (DTR) se ha reducido significativamente ($p < 0,01$) a escala anual en ambas temporadas (Tabla 3), presentando temperaturas menos extremas en la actualidad.

Tabla 3

Tendencia de anomalías anuales de temperaturas máxima y mínima e índices de cambio climático (unidades-año⁻¹), relacionados con la temperatura, para la estación Coatepec (periodo 1961-2016) y Briones (periodo 1985-2016)

Índices	Coatepec			Briones		
	Tendencia	τ	valor-p	Tendencia	τ	valor-p
Tmax (°C)	0,009 (0,00 a 0,02)	0,18	0,051	0,015 (-0,01 a 0,04)	0,14	0,249
Tmin (°C)	0,024 (0,01 a 0,03)	0,44	0,000	0,046 (0,03 a 0,06)	0,57	<0,001
Tmedia (°C)	0,016 (0,01 a 0,02)	0,36	0,000	0,030 (0,01 a 0,05)	0,40	0,001
Índices relacionados con la temperatura						
DTR (°C)	-0,016 (-0,03 a -0,01)	-0,25	0,006	-0,033 (-0,05 a -0,01)	-0,33	0,008
TXx (°C)	-0,014 (-0,04 a 0,01)	-0,10	0,301	0,004 (-0,06 a 0,06)	0,02	0,897
TXn (°C)	0,039 (0,01 a 0,07)	0,25	0,007	0,100 (0,03 a 0,17)	0,34	0,007
TNx (°C)	-0,023 (-0,04 a 0,00)	-0,22	0,016	0,000 (-0,03 a 0,02)	-0,03	0,794
TNn (°C)	0,069 (0,04 a 0,10)	0,37	0,000	0,079 (0,00 a 0,15)	0,25	0,048
TX90P (%)	0,018 (-0,07 a 0,10)	0,05	0,616	0,209 (0,10 a 0,36)	0,40	0,001
TN90P (%)	0,120 (0,06 a 0,18)	0,31	0,001	0,347 (0,24 a 0,47)	0,59	<0,001
TX10P (%)	-0,095 (-0,14 a -0,05)	-0,33	0,000	-0,083 (-0,22 a 0,03)	-0,19	0,133
TN10P (%)	-0,240 (-0,31 a -0,17)	-0,52	0,000	-0,187 (-0,31 a -0,09)	-0,41	0,001
SU25 (Días)	0,525 (0,22 a 0,78)	0,30	0,001	-0,200 (-1,13 a 0,73)	-0,04	0,721

La significancia estadística se probó utilizando la τ de Kendall a un nivel alfa de 0,05. Negritas denotan tendencias significativas ($p < 0,05$).

La temperatura mínima más baja en Coatepec (TNn = 4,5 °C; sd = 2,08), y Briones (TNn = 3,7 °C; sd = 1,99) ha aumentado significativamente; la temperatura máxima más baja (TXn) también se ha incrementado, aunque en menor magnitud. Además, la frecuencia de días y noches cálidas (TX90p y TN90p) a escala anual ha aumentado; por el contrario, el porcentaje de noches y días fríos (TX10p y TN10p) ha disminuido (Tabla 3).

La temperatura mínima más baja (TNn < 5 °C) se encuentran actualmente fuera de los requerimientos térmicos óptimos de *C. arabica*; sin embargo, tiende a incrementarse siendo cada vez menos desfavorable para el desarrollo del café. Tendencias similares se han reportado para otras regiones productoras de café, siendo significativas las tendencias de TNn en Indochina, Indonesia, América Central y norte de Sudamérica; también, la disminución de las noches y días fríos y el aumento de las noches y días cálidos evidencian la ocurrencia de un ambiente más cálido, reportado en diversas regiones cafetaleras del mundo (Tabla 4).

La precipitación total anual (PRCPTOT), con valores medios de 1699,8 mm (sd = 219,4) y 1665,5 mm (sd = 319,1) para Briones y Coatepec, respectivamente, no ha cambiado significativamente; sin embargo, los eventos de lluvia intensos sí (Tabla 5). Se evidencia tendencias positivas significativas en la intensidad de la precipitación diaria (SDII). Los días húmedos (R95p), muy húmedos (R99p) y los días con lluvias mayores a 20 mm (R20mm) se incrementan, aunque son significativos sólo en Coatepec.

3.2 Cambios en los extremos climáticos temporales

Temporalmente, las tendencias de los índices variaron en significancia estadística (Tabla 6). La Tmin es mayor a 10 °C temporalmente, excepto en DEF en ambas estaciones, donde oscila entre 8,1 y 9,4 °C, siendo una limitante para el desarrollo de *C. arabica*. Esta variable presenta tendencias de incremento significativas de mayor magnitud que la Tmax. La Tmedia también se ha incrementado significativamente en la mayoría de las temporadas analizadas. El DTR se ha reducido significativamente durante DEF y SON en Coatepec. Para Briones, reducciones de mayor magnitud se presenta en las cuatro temporadas evaluadas. La TNn, que presenta valores más bajos durante DEF (3,5 a 6 °C), presentó tendencias positivas significativas ($p < 0,01$) en la mayoría de las temporadas evaluadas; TXn también se ha incrementado, aunque no de manera significativa en todas las temporadas. Similar a las tendencias anuales, a escala temporal también se incrementa TN90p y se reduce TN10p considerablemente en el área de estudio.

La temperatura mínima promedio anual se ha incrementado, en el área de estudio, siendo más favorable para *C. arabica*. Ferreira et al. (2019) reportan resultados similares, donde la Tmin media anual es la variable más importante para la producción de café, no obstante, la implementación de insumos tecnológicos representa el factor principal para incrementar la productividad y producción de este cultivo en Brasil. Sin embargo, los incrementos Tmedia y Tmin a escala temporal tendrían efectos negativos en fases de desarrollo prioritarias como floración y la cosecha (Figura 3), además de favorecer las condiciones para la proliferación de plagas (Constantino et al., 2021; Hinnah et al., 2018; Yirga, 2020).

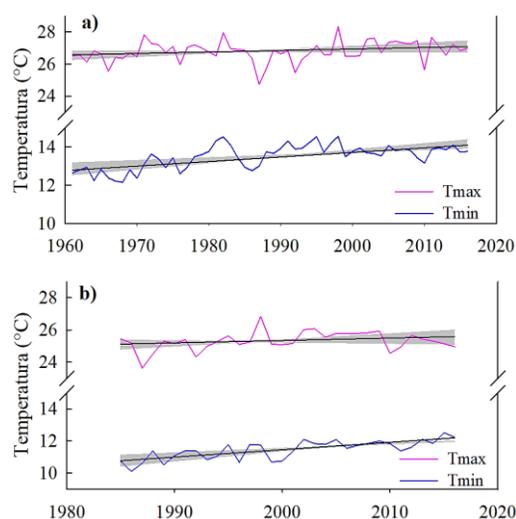


Figura 2. Series anuales de Temperatura máxima y mínima (Tmin y Tmax) para a) Coatepec (1961-2016) y b) Briones (1985-2016). La recta representa la tendencia lineal de la serie y el área sombreada el intervalo de confianza al 95%.

Tabla 4

Tendencia de índices de cambio climático (unidad:década⁻¹) para distintas regiones productoras de *C. arabica* en el mundo y globales

Índices	Sureste de Brasil	América Central y norte de Sudamérica	Indochina	Indonesia	Etiopía	Global
Índices relacionados con la temperatura						
TXx	-0,14	0,30	-0,06	0,24	0,11	0,29
TXn	0,20	0,30	0,34	0,17	0,10	-0,02
TNx	0,13	0,20	0,11	0,33	0,33	0,33
TNn	0,13	0,30	1,06	0,31	0,32	0,25
DTR	-0,03	0,10	0,15	-0,07	0,61	-0,08
TX90P	0,44	2,50	1,54	3,09	0,65	1,64
TX10P	-0,52	-2,20	-1,22	-1,69	-1,0	-0,95
TN90P	1,30	1,70	2,73	4,46	2,14	2,95
TN10P	-1,43	-2,40	-2,65	-4,41	-1,23	-1,42
Índices relacionados con la precipitación						
PRCPTOT	26,41	8,7	21,61	-4,3	-2,92	5,91
RX1day	1,04	2,6	-4,77	1,65	0,48	0,26
RX5day	2,4	3,5	-0,97	3,26	0,67	0,73
SDII	0,19	0,3	0,17	0,21	-0,81	0,05
R95p	14,49	18,1	9,84	11,59	12,90	4,68
R99p	5,66	10,3	0,35	11,17	51,10	3,38
R10mm	-	-0,1	-0,29	0,49	-0,29	0,03
R20mm	-	0,1	0,39	0,09	-0,01	0,06
CDD	0,41	0,4	0,1	4,21	0,37	-1,19
CWD	0,05	-0,1	0,13	0,13	-0,05	-0,07

Elaborado a partir de los resultados reportados por Skansi et al. (2013) (Sureste de Brasil, 1950-2010); Caesar et al. (2011) (Indochina, 1971-2012); Supari et al. (2017) (Indonesia, 1970-2012); Aguilar et al. (2005) (América Central y norte de Sudamérica, 1961-2003); Omondi et al. (2014) (Etiopía, 1961-2010); Alexander et al. (2006) (Global, 1971-2003). Negritas denotan tendencias significativas (p < 0,05).

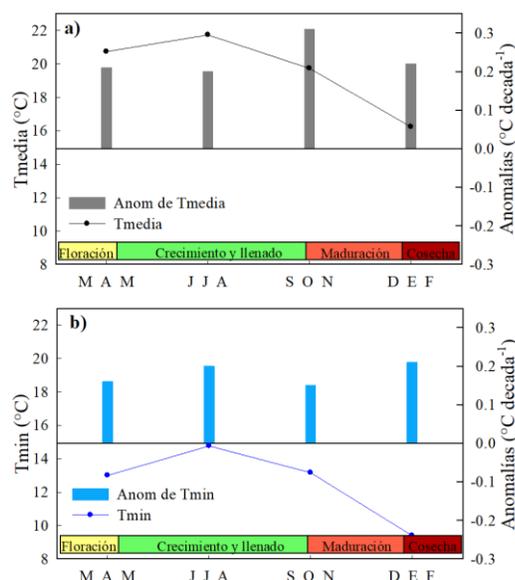


Figura 3. Variación temporal de: a) Temperatura media y anomalías; b) Temperatura mínima y anomalías para la estación Coatepec (periodo 1961-2016), asociadas a las fases fenológicas del café.

Las temperaturas mínimas extremas también son una limitante para el cultivo de café en el área de estudio. Ante esto, se estaría presentando en la zona daños por enfriamiento en frutos, follaje y flores de plantas de café, principalmente en Briones, ya que por debajo de 10 °C se presentan problemas de clorosis y paralización del crecimiento de la planta (Barva, 2011), impactando negativamente en la productividad y rendimiento (Craparo et al., 2015; Villers et al., 2009). Por otro lado, los días con temperaturas superiores a 27 °C tienden a aumentar en el área de estudio, principalmente entre

marzo a agosto. Debido a las etapas fenológicas del café en esos meses, se incrementa el riesgo de aborto floral y de una mayor producción de frutos vanos. Además, estas temperaturas limitan el desarrollo y maduración de frutos (DaMatta & Ramalho, 2006; Ruiz et al., 2013).

En cuanto a los extremos de precipitación, se observan tendencias de incremento significativo de PRCPTOT durante MAM en Coatepec y SON en Briones. Tendencias del mismo signo se presentan para precipitación máxima en uno y cinco días (RX1day y RX5day), siendo significativas (p < 0,01) sólo para Coatepec en MAM y JJA. A pesar de las tendencias de aumento no significativas de índices relacionados con la precipitación, tanto a escala anual como temporal, se hace evidente un incremento en cantidad e intensidad de la lluvia; la falta de significancia podría estar relacionada al periodo de datos limitado, particularmente en Briones (1981-2010). Nuestros resultados indican que en el área de estudio la PRCPTOT sigue estando dentro de los requerimientos para el desarrollo óptimo de *C. arabica* (DaMatta et al., 2007; Ruiz et al., 2013). Caso contrario ha sido reportado para Etiopía (Omondi et al., 2014), Indonesia (Supari et al., 2017) y países centroamericanos (Aguilar et al., 2005) donde, a nivel nacional, las áreas cafetaleras tendrían menos precipitación en los próximos años.

Las diferencias climáticas temporales desempeñan un papel importante en el desarrollo fenológico del café (Camargo, 2010; Villers et al., 2009) y en su calidad (de Souza et al., 2020). Al segmentar la precipitación por temporadas se encuentran aspectos a los que los productores deberán adaptarse. Por un lado, la precipitación invernal (DEF) rebasa los 50 mm mensuales que las plantas requieren para romper la latencia e iniciar la floración, generando floraciones anticipadas (Gay et al., 2006; Lin et al., 2008). Por el otro, en los meses de MAM, el incremento significativo en cantidad de precipitación

podría afectar tanto la fase de floración (floración incompleta y/o dispersa) como desacelerar el crecimiento del grano (Camargo, 2010). Además, puede ocasionar la caída de flores y frutos de los cafetos (Läderach et al., 2013). Algunas tendencias de precipitación similares han sido reportadas para el sureste de Brasil, América Central e Indonesia (Tabla 4).

También las lluvias se han intensificado, representando una mayor cantidad de agua en menos tiempo; tendencias similares se han reportado para regiones productoras de café en el Sureste de Brasil, América Central y norte de Sudamérica e Indonesia. Además de Indochina, aunque con tendencias no significativas (Tabla 3). Por ello, otro desafío a enfrentar por los productores es el potencial de la lluvia para erosionar suelos, en caso de no realizar prácticas de conservación, pero al mismo tiempo repercutirá generando periodos secos más largos que incrementarán el estrés hídrico en las plantas de café.

3.3 SAF y su efecto en los extremos de temperatura

Tanto la temperatura máxima (Tmax) y mínima (Tmin) en los cafetos dentro del SAF y los que se encontraban en un sitio abierto, a plena exposición solar, mostraron tendencia similar, pero con magnitudes diferentes. De

manera atípica, Tmax se presentó en febrero 2019 (35,2 °C) (Figura 4). Tmax fue significativamente mayor (p<0,01) en el sitio sin cobertura arbórea a lo largo del año (promedio 1,9 °C). Durante los meses de invierno, no se encontraron diferencias significativas en la Tmin entre SAF y fuera de él. Esto muy probablemente es debido a su arquitectura arbórea, con una copa columnar, así como por ser una especie caducifolia (Bote & Struik, 2011).

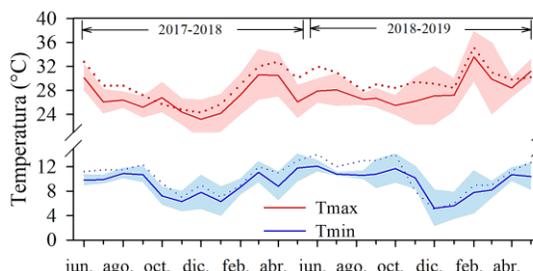


Figura 4. Variación anual de temperatura máxima (en rojo) y temperatura mínima (en azul) en el interior del SAF (líneas continuas) y en un sitio abierto (líneas punteadas) durante el periodo junio 2017 a mayo 2019. El área sombreada representa un error estándar de la media (SE).

Tabla 5

Tendencia de anomalías anuales de índices de cambio climático (unidades año⁻¹), relacionados con la precipitación, para la estación Coatepec (periodo 1961-2016) y Briones (periodo 1985-2016)

Índices	Coatepec				Briones			
	Tendencia	τ	valor-p	Tendencia	τ	valor-p		
PRCPTOT (mm)	4,411 (-0,84 a 9,40)	0,16	0,087	7,333 (-1,97 a 16,30)	0,21	0,095		
RX1day (mm)	0,448 (0,14 a 0,73)	0,26	0,005	0,726 (-0,32 a 2,35)	0,16	0,214		
RX5day (mm)	0,967 (0,26 a 1,69)	0,24	0,008	1,396 (-0,31 a 3,57)	0,19	0,133		
SDII (mm)	0,065 (0,04 a 0,09)	0,38	0,000	0,055 (-0,01 a 0,11)	0,22	0,049		
R95p (mm)	4,284 (1,21 a 7,50)	0,25	0,007	5,477 (-2,28 a 12,34)	0,18	0,150		
R99p (mm)	2,196 (0,29 a 3,89)	0,27	0,004	2,161 (-0,83 a 9,63)	0,15	0,252		
R10mm (Días)	0,073 (-0,11 a 0,22)	0,08	0,408	0,108 (-0,10 a 0,36)	0,12	0,328		
R20mm (Días)	0,104 (0,00 a 0,21)	0,18	0,048	0,040 (-0,16 a 0,29)	0,06	0,649		
CDD (Días)	0,043 (-0,03 a 0,17)	0,11	0,239	0,000 (-0,22 a 0,21)	0,03	0,807		
CWD (Días)	0,000 (-0,06 a 0,03)	-0,03	0,716	0,000 (-0,06 a 0,11)	0,06	0,669		

La significancia estadística se probó utilizando la τ de Kendall a un nivel alfa de 0,05. Negritas denotan tendencias significativas (p < 0,05).

Tabla 6

Tendencia de anomalías estacionales de temperaturas máxima y mínima e índices de cambio climático (unidades-década⁻¹) para la estación Coatepec (periodo 1961-2016) y Briones (periodo 1985-2016)

Índices	Coatepec				Briones			
	DEF	MAM	JJA	SON	DEF	MAM	JJA	SON
Tmax (°C)	0,11	0,04	0,16*	0,10	0,26	0,65	0,44	0,18
Tmin (°C)	0,21*	0,16	0,20**	0,15	0,25	0,71**	0,58**	0,37
Tmedia (°C)	0,31	0,22	0,21	0,20*	0,18	0,60*	0,63**	0,60
DTR (°C)	-0,26*	-0,18	-0,10	-0,17*	-1,01*	-0,73	-0,92*	-1,21**
TXx (°C)	0,01	0,12	0,08	-0,10	-0,82*	0,13	-0,11	-0,33
TXn (°C)	0,36*	0,14	0,18	0,03	1,27	1,19	0,73	0,56
TNx (°C)	0,12	-0,09	-0,04	-0,03	0,16	0,16	0,12	0,21
TNn (°C)	0,54**	0,45**	0,42**	0,42**	0,77*	0,87*	0,71**	0,47
TX90P (%)	-0,62	0,13	2,09*	0,00	-0,29	3,23	3,90	1,78
TN90P (%)	2,56**	1,26	0,97	0,97	1,64	4,60**	2,67**	3,95**
TX10P (%)	-1,1	-0,93	-1,25*	-0,57	-3,99**	-1,68	-1,68	-1,61
TN10P (%)	-1,82**	-2,00**	-2,33**	-2,12**	0,36	-1,98	-2,58**	-2,63*
PRCPTOT (mm)	-4,20	25,12*	23,45	22,04	-2,47	11,15	44,81	43,71
RX1day (mm)	-0,11	3,67*	3,02	1,66	-0,20	2,70	2,78	1,00
RX5day (mm)	0,21	6,83**	3,34	2,17	-0,55	3,25	6,67	4,93

La significancia estadística se probó utilizando la τ de Kendall a un nivel alfa de 0,05. Tendencias significativas en negritas (p < 0,05), con * (p > 0,01); con ** (p < 0,001).

Otros SAF permiten mitigar los extremos de temperatura, reduciendo los máximos (hasta 7 °C) e incrementando los mínimos, en su interior (Barradas & Fanjul, 1984; de Souza et al., 2012).

Si bien la erosividad de la precipitación no fue medida en este estudio, si suponemos que los sistemas agroforestales en café han sido útiles para reducir los impactos de la intensidad de la precipitación reduciendo la fuerza de la caída (Van Kanten & Vaast, 2006), regulando el escurrimiento superficial de agua (Lin, 2010), protegiéndolo de la erosión, además de aportar materia orgánica (Ramachandran et al., 2009; Shibu, 2009). Sin embargo, la eficiencia de la agroforestería dependerá de las especies de árboles, su manejo, densidad de siembra y las características topográficas de cada plantación.

Ante el contexto del cambio global y la variabilidad climática la adopción de estrategias de adaptación les permitirá a los productores superar los desafíos que enfrentan y enfrentarán (DaMatta et al., 2019). Existe una diversidad de prácticas encaminadas a la adaptación de los efectos del clima cambiante sobre el cultivo de café, que van desde prácticas puntuales, como mantenimiento de arvenses en el suelo para mantener la humedad (chapear menos) (Bellamy, 2011) hasta cambios permanentes como la sustitución por especies y variedades de café más resistentes a los cambios del clima (Davis et al., 2021a; Davis et al., 2021b). Sin embargo, para definir cuáles serían las más convenientes es imprescindible considerar las características particulares para cada zona, el sistema de producción actual, recursos económicos y humanos disponibles para adoptar nuevas prácticas, así como el acceso a la información y del conocimiento de las opciones de adaptación (Holland et al., 2017).

3.4 Diferencias de escalas: modelos de circulación global y estudios locales

Contrario a las proyecciones realizadas con modelos de circulación global, el presente estudio encontró que, de mantenerse las tendencias climáticas, el área de estudio continuará siendo apta para el cultivo de café. Sin embargo, a escala temporal se han experimentado incrementos de temperatura y aumentos en la cantidad e intensidad de la precipitación, similar a lo reportado por Wagner et al. (2021) para Monte Kilimanjaro (Tanzania), presentándose periodos de sequía o exceso de lluvia cada vez más frecuentes debido a cambios en los patrones de la precipitación estacional, impactando principalmente durante la floración, maduración y cosecha.

En diversas áreas cafetaleras del mundo se han encontrado diferencias entre los modelos de información global y las proyecciones locales (Da Silva et al., 2018; Esperón-Rodríguez et al., 2016; Läderach et al., 2017). Globalmente también se han proyectado cambios en los patrones de precipitación y aumento de las temperaturas para las principales regiones productoras de café del mundo (Gay et al., 2006; Kutuywayo et al., 2013; Ovalle-Rivera et al., 2015), sin embargo, cuando se analiza información observacional, a una escala espacial menor, los resultados varían. A nivel mundial, con modelos de circulación globales, se ha proyectado que la superficie

idónea para el cultivo del café disminuirá un 50% para mediados del siglo XXI (Bunn et al., 2015; Ovalle-Rivera et al., 2015), desplazándose hacia una mayor altitud sobre el nivel del mar (Bunn et al., 2015; Zullo et al., 2011).

Para México, Ovalle-Rivera et al. (2015) proyectó que, por el aumento de 2 °C en la temperatura, las áreas cafetaleras se desplazarán a altitudes de 1500 a 2500 m s.n.m.; para Kenia, Hagggar & Schepp (2012) reportan que, debido a cambios en los patrones de precipitación en la época más seca y el incremento de la temperatura mínima del mes más frío, también se desplazarían a mayores altitudes. Además, en países como Nicaragua, El Salvador, Costa Rica, Honduras, Guatemala, Brasil, Tanzania, Vietnam e Indonesia se prevé la disminución del área adecuada para café y también su movimiento a mayores elevaciones (Läderach et al., 2013, 2017). Estos desplazamientos de áreas hacia zonas de más altitud son completamente hipotéticos. En primer lugar, podría haber menos superficie, ya que por el relieve orográfico a mayor altitud hay menos superficie, pero también, porque aun cuando la zona se vuelva idónea para el cultivo del café, esto no significa que este cultivo se vaya a implementar. En términos prácticos es difícil pensar que los cafetales que se pierden en la parte baja se compensarán sembrando en la parte alta.

Las diferencias entre proyecciones globales y locales se vuelven trascendentales para la toma de decisiones, sobre todo para el diseño de estrategias de adaptación ante las variaciones climáticas que los productores deben realizar. En este sentido, los estudios a escala espacial local son muy necesarios, sin embargo, la disponibilidad de la información es limitada, demostrando la importancia de ampliar y/o mantener la red de estaciones meteorológicas para el monitoreo en zonas agrícolas.

4. Conclusiones

Contrario de lo reportado en estudios realizados con modelos de circulación global, las condiciones climáticas en el área de estudio seguirán siendo aptas para el cultivo de *C. arabica* ya que las condiciones térmicas son menos extremas y más húmedas. Sin embargo, las variaciones temporales, en cantidad e intensidad de precipitación impactarán negativamente el desarrollo del café, particularmente durante la floración y maduración del fruto. Si no se realizan las prácticas de adaptación adecuadas se afectará la producción de los sistemas cafetaleros. Estos resultados son extrapolables a áreas productoras de *C. arabica* con características similares (lejanas al Ecuador y con patrones climáticos temporales similares). La especie arbórea *Acrocarpus fraxinifolius* es útil para minimizar los efectos del cambio climático cuando se presentan los máximos de temperaturas, sin embargo, sus efectos son nulos en los mínimos de temperatura, por lo que los riesgos de heladas persisten. Se recomienda buscar estrategias que minimicen los riesgos de heladas, como la evaluación de especies arbóreas con otro tipo de copa.

Agradecimientos

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

ORCID

P. C. Parada-Molina  <https://orcid.org/0000-0001-9567-7142>

V. L. Barradas-Miranda  <https://orcid.org/0000-0001-8622-7190>

G. Ortiz Ceballos  <https://orcid.org/0000-0002-4979-0520>

J. Cervantes-Pérez  <https://orcid.org/0000-0002-1429-3348>

C. R. Cerdán Cabrera  <https://orcid.org/0000-0002-0498-2617>

Referencias bibliográficas

- Aguilar, E., Peterson, T. C., Rami, P., Frutos, R., Retana, J. A., et al. (2005). Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961–2003. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 110, 1–15.
- Alègre, C. (1959). Climates et caféiers d'Arabie. *Agronomie Tropicale*, 14, 23–58.
- Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 111(5), 1–22.
- Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, 6(6), 661–675.
- Barradas, M. V., & Fanjul, F. (1984). La importancia de la cobertura arbórea en la temperatura del agroecosistema cafetalero. *Biótica*, 9(4), 415–421.
- Barva, H. (2011). Guía técnica para el cultivo del café. *Instituto del Café de Costa Rica, Centro de Investigaciones en Café CICAPE*, 72.
- Bellamy, A. S. (2011). Weed control practices on Costa Rican coffee farms: is herbicide use necessary for small-scale producers? *Agriculture and Human Values*, 28(2), 167–177.
- Bote, A. D., & Struik, P. C. (2011). Effects of shade on growth, production and quality of coffee (*Coffea arabica*) in Ethiopia. *Journal of Horticulture and Forestry*, 3(11), 336–341.
- Bunn, C., Läderach, P., Rivera, O., & Kirschke, D. (2015). A bitter cup: climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. *Climatic Change*, 129(1–2), 89–101.
- Caesar, J., Alexander, L. V., Trewin, B., Tse-ring, K., Sorany, L., et al. (2011). Changes in temperature and precipitation extremes over the Indo-Pacific region from 1971 to 2005. *International Journal of Climatology*, 31(6), 791–801.
- Camargo, M. B. (2010). The impact of climatic variability and climate change on arabic coffee crop in Brazil. *Bragantia*, 69, 239–247.
- Constantino, L. M., Gil, Z. N., Montoya, E. C., & Benavides, P. (2021). Coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) emergence from ground fruits across varying altitudes and climate cycles, and the effect on coffee tree infestation. *Neotropical Entomology*, 50(3), 374–387.
- Craparo, A. C. W., Van Asten, P. J. A., Läderach, P., Jassogne, L. T. P., & Grab, S. W. (2015). *Coffea arabica* yields decline in Tanzania due to climate change: Global implications. *Agricultural and Forest Meteorology*, 207, 1–10.
- Da Silva, P., Giarolla, A., Chou, S. C., Silva, A. J. de P., & Lyra, A. de A. (2018). Climate change impact on the potential yield of Arabica coffee in southeast Brazil. *Regional Environmental Change*, 18(3), 873–883.
- DaMatta, F., Rahn, E., Läderach, P., Ghini, R., & Ramalho, J. C. (2019). Why could the coffee crop endure climate change and global warming to a greater extent than previously estimated? *Climatic Change*, 152(1), 167–178.
- DaMatta, F., & Ramalho, C. J. D. (2006). Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: A review. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 18(1), 55–81.
- DaMatta, F., Ronchi, C., Maestri, M., & Barros, R. (2007). Ecophysiology of coffee growth and production. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19, 485–510.
- Davis, A. P., Gargiulo, R., Almeida, I. N. das M., Caravela, M. I., Denison, C., & Moat, J. (2021). Hot coffee: The identity, climate profiles, agronomy, and beverage characteristics of *Coffea racemosa* and *C. zanguebariae*. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 740137.
- Davis, A. P., Mieulet, D., Moat, J., Sarmu, D., & Haggard, J. (2021). Arabica-like flavour in a heat-tolerant wild coffee species. *Nature Plants*, 7(4), 413–418.
- de Souza, H. N., de Goede, R. G. M., Brussaard, L., Cardoso, I. M., Duarte, E. M. G., Fernandes, R. B. A., Gomes, L. C., & Pulleman, M. M. (2012). Protective shade, tree diversity and soil properties in coffee agroforestry systems in the Atlantic Rainforest biome. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 146, 179–196.
- de Souza, R. G., de Oliveira Aparecido, L. E., de Souza, P. S., Lamparelli, R. A. C., & dos Santos, É. R. (2020). Climate and natural quality of *Coffea arabica* L. drink. *Theoretical and Applied Climatology*, 141(1), 87–98.
- Dufour, B. P., Kerana, I. W., & Ribeyre, F. (2021). Population dynamics of *Hypothenemus hampei* (Ferrari) according to the phenology of *Coffea arabica* L. in equatorial conditions of North Sumatra. *Crop Protection*, 146, 105639.
- Esperón-Rodríguez, M., Bonifacio-Bautista, M., & Barradas, V. L. (2016). Socio-economic vulnerability to climate change in the central mountainous region of eastern Mexico. *Ambio*, 45(2), 146–160.
- FAOSTAT. (2021). *Database Collections. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*. <https://www.fao.org/faostat/es/#home>
- Ferreira, W. P. M., Ribeiro Júnior, J. I., & de Fátima Souza, C. (2019). Climate change does not impact on *Coffea arabica* yield in Brazil. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(12), 5270–5282.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación köppen*. Instituto de Geografía-UNAM.
- Gay, C., Estrada, F., Conde, C., Eakin, H., & Villers, L. (2006). Potential impacts of climate change on agriculture: A case of study of coffee production in Veracruz, Mexico. *Climatic Change*, 79(3–4), 259–288.
- Giannini, T. C., Costa, W. F., Cordeiro, G. D., Imperatriz-Fonseca, V. L., Saraiva, A. M., Biesmeijer, J., & Garibaldi, L. A. (2017). Projected climate change threatens pollinators and crop production in Brazil. *PLoS ONE*, 12(8), 1–13.
- Granados-Ramírez, R., Medina, B. M. de la P., & Peña, M. V. (2014). Change and climate change in the slope of the Gulf of Mexico. Impacts on coffee production. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(3), 473–485.
- Gujarro, J. A. (2018). *Homogenization of climatic series with Climatology*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27020.41604>
- Gujarro, J. A. (2019). *Package climatology*. Available in: <http://ftp5.gwdg.de/pub/misc/cran/web/packages/climatology/climatology.pdf>
- Haggard, J., & Schepp, K. (2012). Coffee and climate change. Impacts and options for adaptation in Brazil, Guatemala, Tanzania and Vietnam. In *Climatic Change, Agriculture and Natural Resource*. (Issue 4).
- Hao, Z., AghaKouchak, A., Nakhjiri, N., & Farahmand, A. (2014). Global integrated drought monitoring and prediction system. *Scientific Data*, 1, 51–66.
- Hinnah, F. D., Sentelhas, P. C., Meira, C. A. A., & Paiva, R. N. (2018). Weather-based coffee leaf rust apparent infection rate modeling. *International Journal of Biometeorology*, 62(10), 1847–1860.
- Holland, M. B., Shamer, S. Z., Imbach, P., Zamora, J. C., Moreno, C. M., et al. (2017). Mapping adaptive capacity and smallholder agriculture: applying expert knowledge at the landscape scale. *Climatic Change*, 141(1), 139–153.
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Priani, S. L. Connors, C. Péan, & S. Berger (eds.)). Cambridge University Press.
- Jassogne, L., Läderach, P., & Van Asten, P. (2013). The impact of climate change on coffee in Uganda: Lessons from a case study in the Rwenzori Mountains. *Oxfam Policy and Practice: Climate Change and Resilience*, 9(1), 51–66.

- Jones, P. D., & Hulme, M. (1996). Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations. *International Journal of Climatology*, 16(4), 361–377.
- Kutywayo, D., Chemura, A., Kusena, W., Chidoko, P., & Mahoya, C. (2013). The impact of climate change on the potential distribution of agricultural pests: the case of the coffee white stem borer (*Monochamus leuconotus* P.) in Zimbabwe. *PLoS One*, 8(8), 1–11.
- Läderach, P., Hagggar, J., Lau, C., Eitzinger, A., Ovalle, O., Baca, M., Jarvis, A., & Lundy, M. (2013). Mesoamerican coffee: building a climate change adaptation strategy. *International Center for Tropical Agriculture*, 1(2), 1–4.
- 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(1), 47–62.
- Libert, A. A., Ituarte-Lima, C., & Elmqvist, T. (2020). Learning from social-ecological crisis for legal resilience building: multi-scale dynamics in the coffee rust epidemic. *Sustainability Science*, 15(2), 485–501.
- Lin, B. B. (2010). The role of agroforestry in reducing water loss through soil evaporation and crop transpiration in coffee agroecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(4), 510–518.
- Lin, B. B., Perfecto, I., & Vandermeer, J. (2008). Synergies between agricultural intensification and climate change could create surprising vulnerabilities for crops. *BioScience*, 58(9), 847–854.
- Moguele, P., & Toledo, V. (1999). Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico. *Conservation Biology*, 13, 11–21.
- Moreira, S. L. S., Pires, C. V., Marcatti, G. E., Santos, R. H. S., Imbuzeiro, H. M. A., & Fernandes, R. B. A. (2018). Intercropping of coffee with the palm tree, macauba, can mitigate climate change effects. *Agricultural and Forest Meteorology*, 256–257, 379–390.
- Ochieng, J., Kirimi, L., & Mathenge, M. (2016). Effects of climate variability and change on agricultural production: The case of small scale farmers in Kenya. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 77(2016), 71–78.
- Omondi, P. A., Awange, J. L., Forootan, E., Ogallo, L. A., Barakiza, R., et al. (2014). Changes in temperature and precipitation extremes over the Greater Horn of Africa region from 1961 to 2010. *International Journal of Climatology*, 34(4), 1262–1277.
- 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(4), 1–13.
- Ramachandran, P. K., Mohan, K. B., & Nair, V. D. (2009). Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172(1), 10–23.
- Ruiz, J. A., Garcia, G., González, I. J., Flores, H. E., Ramírez, G., Ortiz, C., Byerly, K. F., & Martínez, R. A. (2013). *Requerimientos agroecológicos de cultivos* (2a Ed.). Libro Técnico Núm. 3. INIFAP. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias-CIRPAC-Campo Experimental Centro Altos de Jalisco.
- Serrano-Barrios, L., Vicente-Serrano, S. M., Flores-Magdaleno, H., Tijerina-Chávez, L., & Vázquez-Soto, D. (2016). Variabilidad espacio-temporal de las sequías en la cuenca pacífico norte de México (1961-2010). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 42(1), 185–204.
- Shibu, J. (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: An overview. *Agroforestry Systems*, 76(1), 1–10.
- Skansi, M. de los M., Brunet, M., Sigró, J., Aguilar, E., Arevalo Groening, J. A., et al. (2013). Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. *Global and Planetary Change*, 100, 295–307.
- SMN. (2019). *Normales climatológicas por estación. Estado de Veracruz: Servicio Meteorológico Nacional, CONAGUA*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=ver>
- Stevanović, M., Popp, A., Lotze-Campen, H., Dietrich, J. P., Müller, C., et al (2016). The impact of high-end climate change on agricultural welfare. *Science Advances*, 2(8), 1–10.
- Supari, Tangang, F., Juneng, L., & Aldrian, E. (2017). Observed changes in extreme temperature and precipitation over Indonesia. *International Journal of Climatology*, 37(4), 1979–1997.
- Valencia, V., García-Barrios, L., Sterling, E. J., West, P., Meza-Jiménez, A., & Naeem, S. (2018). Smallholder response to environmental change: Impacts of coffee leaf rust in a forest frontier in Mexico. *Land Use Policy*, 79, 463–474.
- Van Kanten, R., & Vaast, P. (2006). Transpiration of arabica coffee and associated shade tree species in sub-optimal, low-altitude conditions of Costa Rica. *Agroforestry Systems*, 67(2), 187–202.
- Villers, L., Arizpe, N., Orellana, R., Conde, C., & Hernandez, J. (2009). Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, Mexico. *Interciencia*, 34(5), 322–329.
- Wagner, S., Jassogne, L., Price, E., Jones, M., & Preziosi, R. (2021). Impact of climate change on the production of *Coffea arabica* at Mt. Kilimanjaro, Tanzania. *Agriculture*, 11(1), 53.
- Yirga, M. (2020). Potential Effects, Biology and Management options of coffee leaf rust (*Hemileia Vastatrix*): A review. *International Journal of Forestry and Horticulture*, 6(1), 19–31.
- Zhang, X., & Yang, F. (2004). RCLimDex (1.0) user guide. *Climate Research Branch Environment Canada, Downsview, Ontario, Canada*, 22.
- Zullo, J., Pinto, H. S., Assad, E. D., & de Ávila, A. M. H. (2011). Potential for growing Arabica coffee in the extreme south of Brazil in a warmer world. *Climatic Change*, 109(3–4), 535–548.