

Impacto del cambio climático en la producción de café en Veracruz bajo un enfoque Ricardiano

Impact of climate change on coffee production in Veracruz under a Ricardian approach

Jesús Guerrero-Carrera^{1*} , José Alvaro Hernández-Flores¹ 

¹Centro de Estudios Demográficos, Urbanos y Ambientales. El Colegio de México A.C. CP. 14110. Carretera Picacho Ajusco 20, Col. Ampliación Fuentes del Pedregal. Tlalpan, Ciudad de México, México.

*Autor de correspondencia: jguerrero@colmex.mx

Artículo científico

Recibido: 18 de septiembre 2023

Aceptado: 02 de mayo 2024

RESUMEN. El fenómeno del cambio climático ha generado consecuencias adversas significativas en la productividad del café y en los ingresos de los productores en todo el mundo. El presente estudio tiene como objetivo evaluar las repercusiones potenciales del cambio climático en la producción de café en la región de Las Montañas, del estado de Veracruz. Para llevar a cabo este análisis, se recopiló datos socioeconómicos y ambientales durante los años 2022 y 2023, mediante una encuesta aplicada a una muestra de 91 unidades de producción especializadas en el cultivo del café. Estos datos se sometieron a un análisis de mínimos cuadrados ordinarios, empleando el enfoque Ricardiano. Los resultados obtenidos indican que el cambio climático tiene impacto significativo sobre el valor de la tierra y que dichas afectaciones son diferenciadas entre los distintos estratos de productores, afectando particularmente a los de menor escala. La heterogeneidad en la sensibilidad al clima destaca la importancia de considerar estrategias específicas para diferentes tipos de productores con el fin de reducir su dependencia respecto al cultivo de café y reducir su vulnerabilidad frente a los impactos del cambio climático.

Palabras clave: Valor de la tierra, ingresos, vulnerabilidad, variables climáticas, adaptación.

ABSTRACT. The phenomenon of climate change has generated significant adverse consequences on coffee productivity and the income of producers around the world. The present study aims to evaluate the potential repercussions of climate change on coffee production in the Las Montañas region, Veracruz. To carry out this analysis, socioeconomic and environmental data were collected during the years 2022 and 2023, through a survey applied to a sample of 91 production units specialized in coffee cultivation. These data were subjected to ordinary least squares analysis, using the Ricardian approach. The results obtained indicate that the climate change will have a significant impact on the value of the land and that these effects will be differentiated between the different strata of producers, particularly affecting the smaller scale ones. The heterogeneity in climate sensitivity highlights the importance of considering specific strategies for different types of producers in order to reduce their dependence on coffee cultivation and reduce their vulnerability to the increasingly evident impacts of climate change.

Keywords: Land value, income, vulnerability, climatic variables, adaptation.

Como citar: Guerrero-Carrera J, Hernández-Flores JA (2024) Impacto del cambio climático en la producción de café en Veracruz bajo un enfoque Ricardiano. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 11(2): e3896. DOI: 10.19136/era.a11n2.3896.

INTRODUCCIÓN

La actividad agrícola, como componente económico vital, es altamente susceptible a la variabilidad climática y el cambio climático (CC) (Semeraro *et al.* 2023). Modificaciones en las temperaturas, patrones de precipitación y eventos climáticos extremos, como inundaciones y sequías, ejercen un impacto directo en la producción de alimentos, lo que a su vez afecta a la seguridad alimentaria, en particular la de los productores de menor escala (Jawid 2020, Malhi *et al.* 2021). Para estos productores, la agricultura es su principal fuente de ingresos y sustento (Siles *et al.* 2022). Sin embargo, la mayoría carece de acceso a los recursos y tecnologías necesarios para adaptarse, lo que los hace vulnerables al CC (Falco *et al.* 2019, Nor *et al.* 2022). Por ello, es importante evaluar los impactos del CC en la agricultura para comprender los riesgos ambientales y económicos asociados y desarrollar estrategias y políticas de adaptación y mitigación (Raihan y Tuspekova 2022, Estrada *et al.* 2022).

La evaluación del impacto del CC en los agroecosistemas cafetaleros representa un caso relevante para abordar dicha problemática (Baca *et al.* 2014, Guerrero *et al.* 2020). Ya que la producción de café es una actividad agrícola vulnerable al CC (Craparo *et al.* 2015, Ruiz 2015). Algunos estudios sugieren un impacto progresivo del CC en la producción de café, con efectos que podrían afectar del 30 al 90% las áreas donde se cultiva (Läderach *et al.* 2017, Imbach *et al.* 2017, Rizzo *et al.* 2021). México ocupa una posición destacada como uno de los 10 principales países productores de café a nivel mundial. Sin embargo, en las últimas décadas, los productores de café en México han enfrentado desafíos (Avalos *et al.* 2023). Destacando la reducción de los ingresos debido a la volatilidad de los precios internacionales del café (Canet y Soto 2016), así como las afectaciones generadas por la roya (*Hemileia vastatrix*) (Jaramillo *et al.* 2022). En México, investigaciones agronómicas y de función de producción han documentado cómo el aumento de la temperatura y las alteraciones en los patrones de precipitación afectan la producción de café (Gay *et al.* 2006, Rivera *et al.* 2013). Sin embargo, es esencial comprender cómo estas variaciones climáticas impactan la producción, la rentabilidad y el valor de la tierra (VT), así como identificar las estrategias de adaptación que implementan los productores para reducir los efectos adversos del CC (Mora *et al.* 2010, Guerrero *et al.* 2020).

Entre los enfoques económicos que se utilizan para evaluar los impactos del CC en la agricultura sobresale el enfoque ricardiano (ER) (Jawid 2020). El ER examina cómo las variaciones climáticas pueden influir en las decisiones de producción y en la adaptación a largo plazo de los productores (Mendelsohn y Dinar 2009). Ello permite evaluar la viabilidad y sostenibilidad de esta actividad agrícola. El ER proyecta la productividad neta de la tierra agrícola utilizando el VT o el ingreso agrícola, mediante un modelo que se construye a partir de variables climáticas, socioeconómicas, edafológicas y otras variables de control (Mendelsohn *et al.* 1994). Con base en una muestra transversal de Unidades de Producción (UP), que abarca diversas condiciones agroclimáticas, este enfoque captura la sensibilidad del VT o del ingreso agrícola ante las variaciones potenciales del clima (Mendelsohn *et al.* 2009). El ER parte del supuesto de que los cambios en el clima pueden conducir a que una región adquiera condiciones climáticas y productivas similares a las de otra región con un rango diferente de temperaturas o precipitaciones (Lan *et al.* 2019). Este método requiere de información de por lo menos, un ciclo agrícola, de diversas regiones geográficas, para abarcar la diversidad de condiciones productivas,

socioeconómicas y agroclimáticas de las UP. De esta manera, el ER captura las respuestas adaptativas de los agricultores, asumiendo que diferentes muestras transversales representan distintos estados de equilibrio de producción (Mendelsohn y Dinar 2009).

En este estudio se analiza la región de las Montañas, en Veracruz, una región de gran importancia en la producción de café debido a su ubicación geográfica, características climáticas y relevancia socioeconómica (Monterroso *et al.* 2014). Por lo anterior, el objetivo fue determinar el impacto potencial del CC sobre el VT en las UP cafetaleras de la región de las Montañas en Veracruz utilizando el ER. Dado el alto nivel de vulnerabilidad de los productores, se considera que esta investigación proporcionará información de los efectos del CC para desarrollar estrategias, programas y políticas locales de adaptación y mitigación adecuadas (Craparo *et al.* 2015).

MATERIALES Y MÉTODOS

El método Ricardiano debe su nombre a David Ricardo, quien hizo la observación original de que el Valor de la Tierra o el Ingreso Neto Agrícola (π) reflejan la productividad neta de la tierra (Mendelsohn *et al.* 1994). Con este enfoque se asumió que los productores agrícolas maximizan su ingreso neto (π), el cual está dado por la siguiente ecuación:

$$\pi = \sum P_i Q_i(X, F, Z, G) - \sum W_x X$$

Donde: P_i = es el precio de mercado del cultivo i , Q_i = es la producción del cultivo i , X = es un vector de insumos comprados, F = es un vector de variables ambientales (climáticas), Z = es un vector de otras variables de control tales como suelo, distancia al mercado, y altitud. G = es un vector de variables sociodemográficas, W_x = es un vector de los precios de los insumos.

Se parte del supuesto de que el agricultor selecciona Q y X para maximizar el valor económico por hectárea (ha), dadas las características de las Unidades de Producción (UPs) (temperatura, precipitación y suelos) y los precios de mercado (Ajetomobi *et al.* 2011, Mendelsohn y Dinnar 2009). El modelo Ricardiano estándar es una formulación cuadrática del clima y una función lineal de todas las demás variables. Económicamente se puede representar como:

$$VT = \beta_0 + \beta_1 \cdot T + \beta_2 \cdot T^2 + \beta_3 \cdot P + \beta_4 \cdot P^2 + \beta_5 T \cdot P + \sum_j \delta_j z_j + e.$$

Dónde: VT es el valor de las tierras agrícolas por ha; T y P son la temperatura y precipitación. Con frecuencia es común distinguir las temperaturas y precipitaciones que se presentan a lo largo de las estaciones del año. Asimismo, Z representa el conjunto de variables socioeconómicas, características de la UP y suelos, β_k y δ_j son parámetros a ser estimados y e es el término de error (Mora *et al.* 2010).

La ecuación incluye los términos lineales y cuadráticos para la temperatura y precipitación con el propósito de capturar no linealidades en la respuesta de los cultivos al clima. Lo anterior, debido a que experimentos en laboratorio sugieren que los cultivos tienden a mostrar funciones de respuesta en forma de U invertida en función de la temperatura (Mendelsohn y Dinnar 2009). Por ejemplo, a niveles bajos de temperatura (temperaturas templadas), la decisión óptima del productor puede ser cultivar café arábica (*Coffea arabica*); no obstante, conforme aumenta la

temperatura, la rentabilidad marginal de dicho producto tiende a ser decreciente hasta alcanzar un punto en el que se vuelve negativa. Bajo este escenario el productor puede tomar la decisión de optimizar sus ganancias a través de un cultivo adaptado a temperaturas más cálidas, como el café robusta (*Coffea canephora*). Un razonamiento similar es aplicable a cultivos sensibles a la precipitación pluvial. Al seguir esta lógica, el modelo Ricardiano asume un comportamiento adaptativo de los productores a lo largo del ciclo productivo intertemporal (Mendelsohn *et al.* 1994). De manera explícita, la ecuación estimada se encuentra en la siguiente ecuación.

$$LV = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 T^2 + \beta_3 P + \beta_4 P^2 + \beta_5 T \cdot P + \beta_6 TS + \beta_7 TI + \beta_8 OA + \beta_9 ES + \beta_{10} GE + \beta_{11} TP + \beta_{12} TH + ei...$$

Donde: las variables climáticas son: T para temperatura (grados Celsius) y P para precipitación (mm). Las variables sociodemográficas incluyen: la educación del jefe del hogar (ES en años), la edad del jefe del hogar y el género del jefe del hogar (GE), tipo de propiedad (TP), tamaño del hogar (TH). Y otras variables son: el tipo de suelo (TS), el índice de tecnología (TI) y otras actividades agrícolas (OA).

Posteriormente, a través del conjunto de coeficientes de las variables climáticas en las especificaciones, el modelo estima los impactos marginales en las temperaturas y precipitaciones los cuales pueden reflejar efectos positivos o negativos en los valores de la tierra (Mendelsohn y Dinar 2009). El impacto marginal de una sola variable climática en los valores de la tierra se evaluó utilizando la ecuación siguiente. La misma lógica se aplicó a las variables de precipitación.

$$\frac{\partial VT_i}{\partial T} = \beta_1 + 2 \cdot \beta_2 \cdot T + \beta_5 \cdot P$$

De esta manera fue posible determinar diferentes niveles de sensibilidad al CC de las UP a partir de una caracterización de sus distintos perfiles. El efecto anual de un cambio marginal de la variable climática en cuestión se hizo a través de la suma de los efectos marginales de dicha variable (Mora *et al.* 2010).

Teóricamente, la formulación cuadrática no solo puede cambiar la magnitud del efecto marginal, sino también el signo (Mendelsohn *et al.* 2009). Cuando el término cuadrático es positivo, la función tiene forma de U y cuando el término cuadrático es negativo, la función tiene forma de colina. Para cada cultivo, hay una temperatura conocida a la cual ese cultivo crece mejor a través de las estaciones. En muchos cultivos, existe una relación más amplia y más plana en forma de colina. Sin embargo, la relación de las variables climáticas estacionales es compleja y puede incluir una mezcla de coeficientes cuadráticos positivos y negativos entre estaciones.

El cambio en el VT dado un escenario climático de C_0 a C_1 está dado por:

$$\Delta W = V(C_1) - V(C_0)$$

Los cambios que aumentan el VT son beneficiosos y los cambios que disminuyen el VT son perjudiciales. Por lo tanto, este es un análisis estático comparativo. En este sentido, el modelo Ricardiano no mide los efectos de los cambios anuales en el clima, sino más bien los cambios a largo plazo (Mendelsohn *et al.* 2009). Para calcular los óptimos y puntos de inflexión de las

variables climáticas significativas (temperatura y precipitación) se utilizó la ecuación (Mendelsohn y Dinar 2009).

$$\text{Punto de inflexión} = \frac{\beta \text{ Temperatura}}{2 \times \beta \text{ Temperatura}^2}$$

Región de estudio

La presente investigación se llevó a cabo en la región de las Montañas, Veracruz (Figura 1). Esta región se ubica en el Centro-Sur del estado de Veracruz, entre altitudes de 100 a 5 600 msnm. El clima en esta región es templado húmedo y frío, con precipitaciones que oscilan entre 600 y 3 000 mm y temperaturas promedio que van de 10 °C y 29 °C (Ballinas *et al.* 2015, García *et al.* 2018). La región se caracteriza por su alta dependencia de la cafecultura (Moguel y Toledo 1999) y su vulnerabilidad al fenómeno del CC (Monterroso *et al.* 2014).



Figura 1. Región de estudio (Las Montañas, Veracruz).

Municipios estudiados

El cuestionario se desarrolló a través de la operacionalización de hipótesis y con base a las variables del estudio (Ajetomobi *et al.* 2011, Waha *et al.* 2016). Los datos de VT, ingresos y características sociodemográficas del hogar se obtuvieron de una encuesta realizada a productores de café entre 2022 y 2023. El estudio se realizó en cuatro municipios representativos en la producción de café de la región de las Montañas (Tepatlaxco, Paso de Macho, Chocamán y Tomatlán) (Tabla 1). Estos municipios son reconocidos por su alta dependencia a la cafecultura y son representativos de las diversas condiciones climáticas y edafológicas que influyen en la producción de café (Moguel y Toledo 1999), características fundamentales para el desarrollo del

método ricardiano adoptado en este estudio. La elección de esta población es relevante debido a su vulnerabilidad al CC y su importancia económica en la agricultura local (Monterroso *et al.* 2014).

Tabla 1. Características productivas de los municipios estudiados

Municipio	Rango altitudinal del municipio	Rango altitudinal de la muestra	Especies	Sistema de producción
Paso del Macho	De 100 msnm a los 700 msnm.	De 513 msnm en Rancho Santa Rosa a 658 en la localidad de la Defensa.	Robusta	- Producción intensiva, sin sombra.
Tepatlxco	De 600 msnm a 1 700 msnm.	De 650 msnm en Palo Gach a 1 500 msnm en la localidad de El Triunfo.	Robusta y variedades de Arábica (typica, bourbon, garnica, colombiano, costa rica, catimor)	- Producción intensiva, sin sombra. - Producción intensiva con sombra. - Producción tradicional con policultivos.
Tomatlán	De 1 100 a 1 500 msnm.	De 1 195 a 1 500 msnm.	Variedades de arábica (typica, Colombia, costa rica, catimor, bourbon, caturra, garnica)	- Producción intensiva con sombra. - Producción tradicional con policultivos con sombra.
Chocamán	De 1 100 msnm a 1 800 msnm.	De 1 152 msnm en San José Neria, a 1 697 msnm en Tepexilotla.	Variedades de arábica (typica, Costa Rica, catimor, colombiano, marsellesa, oro azteca, bourbon, mundo novo, catimor, garnica, caturra).	- Producción intensiva con sombra. - Producción tradicional con policultivos.

Fuente: Elaboración propia con datos de campo.

El tamaño de muestra seleccionado fue de 91 unidades de producción (UPs) de café en la región, a partir de una población de 2 327 productores, con una confiabilidad de 95% y precisión de 10%. El tamaño de muestra se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$n = \frac{NZ_{\alpha/2}^2 (0.25)}{Nd^2 + NZ_{\alpha/2}^2 (0.25)} = 10$$

Donde: N = Tamaño de población (2 327), ($Z_{\alpha/2}$) = 95% confiabilidad = 1.96, d^2 = Precisión = 0.10.

Los estratos se definieron por la superficie de las UPs (Benítez *et al.* 2015): pequeñas (0-2 ha) y grandes (2.5-20 ha), resultando en 91 UPs: 60 pequeños y 31 grandes, distribuidos en los cuatros municipios cafetaleros. Este método permitió mayor representatividad de los diferentes tipos de productores y ubicaciones geográficas de la región. Los datos obtenidos fueron verificados por informantes clave de la región de estudio.

Variables climáticas

Los datos de clima se obtuvieron en la página de CONAGUA. Estos fueron extraídos de 18 estaciones meteorológicas ubicadas de la región de estudio. Las normales climatológicas utilizadas pertenecen al periodo de 1951 a 2010. Para asignar las condiciones climáticas correspondientes a nivel localidad y UP se utilizaron metodologías de interpolación *kriging* para la obtención de precipitación e *IDW* para la obtención de temperatura. El procesamiento de las interpolaciones se realizó en el software ArcGIS con técnicas explicadas por Mendelsohn *et al.* (2009) y Fries *et al.* (2012).

Las variables climáticas de precipitación y temperatura utilizadas en los modelos econométricos se estructuraron en periodos estacionales del año. Estos se clasificaron en:

primavera (marzo, abril, mayo), verano (junio, julio, agosto), otoño (septiembre, octubre, noviembre) e invierno (diciembre, enero, febrero). Se utilizaron los periodos de las estaciones del año porque representan los contrastes climáticos durante un ciclo anual y desempeñan un papel fundamental en los periodos de desarrollo fenológico de las plantas de café (Arcila 2007, Villers *et al.* 2009).

Variables de control

Suelos: La información de tipos de suelos se obtuvo del mapa de suelos dominantes de la República Mexicana, los metadatos se encuentran disponibles en la página oficial de la Comisión Nacional para la Biodiversidad (CONABIO). Para asignar el tipo de suelos correspondientes se realizaron interpolaciones a través del software ArcGIS.

Características de la UP: Se contemplaron las siguientes variables: Distancia a puntos de compra y venta de productos (minutos); superficie de café (ha); otras actividades agrícolas (número de actividades); ingresos por actividades no agrícolas (\$); superficie otros cultivos (ha); altitud (Msnm); nivel tecnológico o índice de nivel tecnológico, el cual se estructuró con base al número de buenas prácticas realizadas en sus UP (elaboración de almácigos, siembra de plántulas, acarreo de plantas, trasplante, resiembra, elaboración de compostas, aplicación de fertilizantes orgánicos, primera limpia del terreno, segunda limpia del terreno, tercera limpia del terreno, regulación de sombra, podas de árboles de café, corte (pizca), acarreo de parcela a casa, despulpe, lavado, secado) (Mendelsohn *et al.* 2009, Ajetomobi *et al.* 2011, Jaramillo *et al.* 2021).

Socioeconómicas: Género del jefe de hogar (hombre, mujer); edad del jefe de hogar (años); experiencia en café (años); escolaridad del jefe de hogar (años); computadora e internet en hogar (sí, no); pertenece a una organización del jefe de hogar (sí, no); y tamaño del hogar, para el cual se consideró la infraestructura y superficie partir de una escala de Likert (3 = grande, 2 = mediana, 1 = pequeña) (Mendelsohn *et al.* 2009, Mora *et al.* 2010).

Escenarios climáticos

Se utilizaron los modelos CNRMCM5 del repositorio institucional de datos científicos geoespaciales del Centro de Ciencias de la Atmosfera (CCA) de la UNAM (Fernández *et al.* 2023). Los escenarios de CC fueron los siguientes: Trayectoria de concentración representativa (RCP) 4.5 (emisiones bajas) y RCP 8.5 (emisiones altas). Los horizontes utilizados fueron: Futuro cercano (2015-2039), futuro medio (2045-2069), futuro lejano (2075-2099).

Análisis econométrico

Para ajustar los modelos se utilizaron procedimientos de estimación de mínimos cuadrados ordinarios (MCO) con apoyo del software STATA 15.1. Se construyeron modelos con diferentes combinaciones de variables. Se aplicaron pruebas diagnósticas para evaluar su calidad estadística. Estas pruebas incluyeron pruebas de variables omitidas para evaluar si las variables no incluidas en un modelo específico eran relevantes. Para superar los problemas de heterocedasticidad y multicolinealidad, se realizó una estimación robusta del error estándar y se identificaron variables correlacionadas en el modelo. Hay variables que fueron eliminadas del modelo sobre la base de un bajo nivel de significancia y bajo ajuste del modelo (Ajetomobi *et al.* 2011). Al final se estimó el impacto marginal de las variables climáticas estacionales para el modelo.

RESULTADOS

Se abordó el impacto del CC en la producción de café, diferenciando dos estratos de productores: pequeños productores (UP pequeñas) y grandes productores (UP grandes). Estos dos estratos (productores en general) también fueron analizados en conjunto. A través del análisis descriptivo se examinó el comportamiento de las variables en términos de sus medias y desviaciones estándar.

Características de las UP

El valor promedio por ha de café exhibe diferencias entre los dos grupos de productores. El valor por ha de café para grandes productores fue de \$182 258.00 pesos mexicanos, mientras que para pequeños fue de \$170 867.00. Respecto de los ingresos netos anuales por ha, los grandes productores registraron una media de \$30 256.00 pesos por ha, mientras que en los pequeños productores fue de \$17 748.00. Con respecto a los ingresos que no provienen de la producción de café, se aprecia una brecha entre ambos estratos. Los grandes productores obtienen \$222 257.00 pesos en promedio, mientras que los pequeños productores perciben \$99 237.00.

Para las características socioeconómicas como experiencia, edad, estudios, escolaridad y tamaño de hogar, las diferencias en las medias son menores. Los pequeños productores tienen una experiencia ligeramente menor, con promedio de 29.5 años, los grandes productores una experiencia mayor con un promedio de 33.6 años. Respecto a la edad, los pequeños productores tienen en promedio 59.3 años de edad y los grandes 57.8. En cuanto a la educación, los pequeños productores tienen 7.7 años de estudio, mientras que los grandes productores tienen en promedio 10 años de estudio. En cuanto al tamaño de hogar, los pequeños registran un tamaño de 2.5 y los grandes 2.9 en escala de likert.

Para los pequeños productores, la superficie dedicada a la producción de café, es de 1.12 ha en promedio, mientras que los grandes productores tienen en promedio 5 ha. La mayor parte de las UP (92.3%) son diversificadas, principalmente producen maíz con fines de autoconsumo y para la venta en el mercado: plátano, caña de azúcar y chayote. En términos de nivel tecnológico aplicado en la producción de café, no hay una diferencia significativa entre pequeños (6.19) y grandes productores (7.4), estos últimos muestran en promedio mayor nivel tecnológico. En relación a las condiciones de altitud (metros sobre el nivel del mar), los grandes productores tuvieron una altitud promedio más bajo (1 003 msnm) que los pequeños productores (1 172 msnm).

Factores ambientales que afectan el VT de la producción de café

En la (Tabla 2) se presentan tres especificaciones sobre el VT en la producción de café. Se prueba la sensibilidad de las UPs mediante el VT ante las variables climáticas y otras variables de control (socioeconómicas y características de las UPs). En las especificaciones de las UP de los productores en general, las temperaturas medias en primavera, verano y otoño, así como las precipitaciones en primavera, mostraron un impacto significativo sobre el VT, junto a otras características como el tipo de suelo, la altitud, el nivel tecnológico y el género del jefe de hogar. En el caso de las UP de los pequeños productores, fueron relevantes las temperaturas y precipitaciones en primavera, verano y otoño, el tipo de suelo, la altitud y el género del jefe de

hogar. Para las UP de los grandes productores, las temperaturas medias en primavera e invierno, y las precipitaciones en primavera, fueron significativos, además de la altitud, la edad y el tipo de propiedad del jefe de hogar, otras actividades productivas y el tamaño del hogar.

Tabla 2. Especificaciones del valor de la tierra por estrato (General, pequeños y grandes UP).

Valor por ha de café	General		Pequeños productores		Grandes productores	
	Coficiente	T	Coficiente	T	Coficiente	T
Temperatura media primavera (°C)	3 410 354	3.02	4 703 745	3.08	-5 757 075	-1.81
Temperatura primavera (Cuadrado)	-79 086	-3.23	-118 341	-3.56	126 493	1.85
Temperatura media verano (°C)	-8 764 067	-5.02	-9 455 163	-3.78	4 211 049	0.83
Temperatura verano (Cuadrado)	204 011	5.25	224 576	4.02	-81 615	-0.74
Temperatura media otoño (°C)	5 589 290	3.29	5 766 731	2.08	3 322 391	1.11
Temperatura otoño (Cuadrado)	-128 343	-3.28	-127 417	-2.00	-95 592	-1.37
Temperatura media invierno (°C)	280 988	0.24	-508 995	-0.26	-2 790 218	-2.49
Temperatura invierno (Cuadrado)	-24 284	-0.86	-3 415	-0.07	87 338	3.15
Precipitación primavera (mm)	-28 973	-1.73	-75 675	-3.21	133 413	3.63
Precipitación primavera (cuadrado)	61	1.82	151	3.28	-272	-3.61
Precipitación verano (mm)	21 562	1.19	48 687	1.76	41 860	1.14
Precipitación verano (cuadrado)	-11	-1.16	-24	-1.74	-21	-1.16
Precipitación otoño (mm)	-12 345	-0.87	-43 261	-2.16	-6 476	-0.28
Precipitación otoño (cuadrado)	9.5	0.82	35	2.10	6	0.32
Precipitación invierno (mm)	-12 378.8	-0.43	49 057	1.08	-128 546	-1.55
Precipitación invierno (cuadrado)	41.9	0.41	-159.9	-1.03	451	1.53
Andosol Húmica Pedregosa	30 419.1	4.07				
Andosol Húmica Lítica profunda			-34 742	-2.53		
Acrisol Ortico Lítica Profunda					-21 541	-1.45
Índice tecnológico	2 918.4	2.36	2 011	1.14		
Otras actividades agrícolas (núm)					10 697	1.87
Metros sobre el nivel del mar (m)	202.1	3.29			204	5.78
Escolaridad (años)	418.9	0.96				
Género (M, F)	-12 121.3	-2.01	-15 565	-1.85		
Edad (años)					527	1.86
Propiedad (privada, ejidal)					19 319	2.07
Tamaño del Hogar (Likert)			4 499	0.91		
Constante	-3 590 379	-0.77	-6 913 779	-0.87	-19 800 000	-1.96
R-Squared	0.843		0.769		0.981	

Para las variables climáticas se determinaron los óptimos y puntos de inflexión significativos. Para la temperaturas, se encontró que valores promedio en primavera superiores a 21.56 °C y 19.87 °C afectan el VT en UPs general y pequeñas, respectivamente; en UPs grandes, temperaturas promedio por encima de 22.8 °C benefician el VT. En verano, se identificó que temperaturas superiores a 21.48 °C y 21.05 °C benefician el VT en UPs general y pequeñas, respectivamente. En otoño, cuando son superiores a 21.8 °C y 22.6 °C en UPs afectan el VT en UPs

general y pequeñas, respectivamente. En invierno, cuando las temperaturas son superiores a 15.97 °C, son benéficas para el VT en UPs grandes.

En cuanto a precipitaciones, en primavera, una precipitación acumulada superior a 237.48 mm y 250.58 mm, beneficia en el VT, en UPs en general y pequeñas respectivamente; en UPs grandes una precipitación acumulada superior a 245 mm en primavera afecta el VT. En verano, se encontró que una precipitación acumulada, superior a 1 014, afecta el VT en las UPs de pequeños productores. En otoño una precipitación acumulada superior a 618 mm tendría beneficios en el VT en pequeñas UPs.

Otros factores que determinan el valor de la tierra en la producción de café

Respecto a las variables de control se encontró que el tipo de suelo andosol húmico pedregoso beneficia el VT en UPs en general. Sin embargo, para UPs pequeñas, los andosoles húmicos líticos profundos tuvieron un efecto negativo en el VT. La altitud tiene un impacto positivo en el VT para UPs en general y grandes. En UPs en general, un mayor nivel tecnológico resultó beneficioso para el VT. Respecto al número de actividades agrícolas benefició en el VT en UPs grandes (Tabla 2). Cuando el género de la cabeza de hogar es mujer, afecta el VT en UPs en general. Mientras que a mayor edad del jefe de hogar beneficia el valor. Por otro lado, cuando el tipo de propiedad es privada, beneficia el VT en las UPs grandes.

Efectos económicos marginales en el VT ante variables climáticas

Los resultados indican que, ante un aumento de 1 °C en la temperatura, los valores de la tierra se ven afectados de manera diferencial según el tamaño de las UP (Tabla 3). Para las UP en general, se observó que el VT disminuirá en \$69 315.00 pesos mexicanos, representando el 39.7% del valor original. Para las UP pequeñas, la reducción es más pronunciada, con una disminución de \$108 535.00 pesos, equivalente al 63.5% del VT. En contraste, las UP grandes experimentarán un incremento en el VT de \$89 214.20 pesos, correspondiente al 48.9% del valor original.

Tabla 3. Efectos marginales de temperaturas y precipitaciones sobre el VT por ha.

Factor	Estaciones	UP General		Pequeñas UP		Grandes UP	
		Impacto (\$)	%	Impacto (\$)	%	Impacto (\$)	%
Temperaturas	Primavera	10 664.4	6.1	-\$298 260.1	-174.6	-\$143 361.8	-78.6
	Verano	55 837.8	31.9	\$83 652.2	48.9	\$562 910.9	308.8
	Otoño	423 374.6	242.3	\$731 231.3	427.9	-\$660 581.5	-362.4
	Invierno	-559 192.0	-320.0	-\$625 159.2	-365.9	\$330 246.7	181.2
	∑ Total =	-69 315.2	-39.7	-\$108 535.8	-63.5	\$89 214.2	48.9
Precipitaciones	Primavera	775.3	0.44	-\$1 941.4	-1.14	\$1 873.9	1.03
	Verano	904.1	0.52	\$1 143.5	0.67	\$61.9	0.03
	Otoño	-1 225.1	-0.70	-\$2 900.4	-1.70	\$589.6	0.32
	Invierno	-530.4	-0.30	\$3 671.9	2.15	-\$2 001.4	-1.10
	∑ Total =	-76.1	-0.04	-\$26.4	-0.02	\$524.2	0.29

Impacto (\$) = impacto en el VT calculado en pesos mexicanos. % = impacto en el VT calculado en porcentaje. ∑ = suma total del impacto.

Respecto a las precipitaciones, un aumento de 1 mm conlleva a cambios en el VT. Para las UP en general, se observa una afectación de \$76.00 pesos mexicanos, correspondiente al 0.04% del valor original. En el caso de las UP pequeñas, la disminución es de \$26.00 pesos, lo que representa el 0.02% del VT. Sin embargo, en las UP grandes, el VT experimentará un aumento de \$524.00 pesos, equivalente al 0.29% del valor original.

Proyecciones del CC sobre el VT

Las proyecciones de efectos del CC sobre el VT revelan patrones significativos en la variación del VT en diferentes contextos del CC (Tabla 4). En el escenario de emisiones bajas (RCP 4.5), los resultados apuntan a cambios sustanciales en el VT en los tres horizontes temporales. En el horizonte cercano, se prevé disminución del VT en todas las categorías de la UP. No obstante, las UP pequeñas enfrentan la mayor pérdida en términos porcentuales, lo que refleja mayor vulnerabilidad ante los cambios climáticos. A medida que se proyecta hacia los horizontes medio y lejano, las tendencias de disminución en el VT continúan y se acentúan, destacando una disminución más pronunciada en las UP pequeñas.

Tabla 4. Proyecciones del impacto del CC sobre las UP.

RCP	Horizonte	Δ (°C) y (mm)	UP General		Pequeñas UP		Grandes UP	
			Δ (\$)	Δ (%)	Δ (\$)	Δ (%)	Δ (\$)	Δ (%)
4.5	Cercano (2015-2039)	0.78 °C	-\$53 987.7	-30.9	-\$84 535.6	-49.5	\$69 486.6	38.1
		-36.45 mm	\$7 584.8	4.3	\$2 629.6	1.5	-\$52 263.0	-28.7
		Σ	-\$46 402.9	-26.6	-\$81 906.0	-47.9	\$17 223.6	9.45
	Medio (2045-2069)	1.88 °C	-\$100 322.9	-57.4	-\$157 088.6	-91.9	\$129 123.7	70.8
		-20.44 mm	\$6 342.2	3.6	\$2 198.8	1.3	-\$43 700.4	-24.0
		Σ	-\$93 980.7	-53.8	-\$154 889.8	-90.6	\$85 423.3	46.8
	Lejano (2075-2099)	1.78 °C	-\$120 127.2	-68.7	-\$188 098.9	-110.1	\$154 613.5	84.8
		6.00 mm	\$2 565.0	1.5	\$889.2	0.5	-\$17 674.5	-9.7
		Σ	-\$117 562.2	-67.3	-\$187 209.6	-109.5	\$136 939.2	75.1
8.5	Cercano (2015-2039)	0.83 °C	-\$55 083.9	-31.5	-\$86 252.2	-50.5	\$70 897.5	38.9
		15.84 mm	-\$4 597.9	-2.6	-\$1 594.1	-0.9	\$31 681.7	17.4
		Σ	-\$59 681.9	-34.2	-\$87 846.2	-51.4	\$102 579.3	56.2
	Medio (2045-2069)	2.56 °C	-\$135 672.4	-77.6	-\$212 439.9	-124.3	\$174 621.3	95.8
		-19.12 mm	\$4 075.9	2.3	\$1 413.1	0.8	-\$28 085.3	-15.4
		Σ	-\$131 596.4	-75.3	-\$211 026.8	-123.5	\$146 536.0	80.4
	Lejano (2075-2099)	3.29 °C	-\$228 619.5	-130.8	-\$86.9	-0.1	\$294 251.7	161.4
		-32.67 mm	\$6 501.1	3.7	\$2 253.9	1.3	-\$44 795.3	-24.6
		Σ	-\$222 118.4	-127.1	\$2 166.9	1.2	\$249 456.3	136.8

RCP 4.5: Bajas emisiones. RCP 8.5: Altas emisiones. Δ (°C) y (mm) = Cambio en las variables climáticas de acuerdo al escenario y al horizonte. Δ (\$) = Diferencia en el VT, calculado en pesos mexicanos. Δ (%) = Diferencia en el VT, calculado en porcentaje. Σ = Suma de los impactos económicos sobre el VT.

En el escenario de emisiones altas (RCP 8.5), se observan resultados preocupantes en términos de la disminución del VT. En todos los horizontes temporales, las tres categorías de UP

enfrentan reducciones en el VT, siendo particularmente notables las pérdidas en las UP pequeñas en los horizontes medio y lejano. En el caso de las UP grandes, se prevé un aumento en el VT en algunos horizontes, aunque este aumento se ve contrarrestado por las drásticas disminuciones en otros escenarios y horizontes.

DISCUSIÓN

Características de las UP

Los resultados evidencian brechas importantes en las características de las UP de pequeños y grandes productores de café en la región de las Montañas, Veracruz. Estas se manifiestan de manera diferenciada y significativa en los ingresos provenientes del café como de otras actividades productivas. Ello refleja la notable heterogeneidad estructural que representa a los sistemas productivos cafetaleros de esta región (Venegas *et al.* 2021, Nor *et al.* 2022). Estas características denotan una mayor vulnerabilidad en las UP de los pequeños cafecultores ante los efectos del CC, y por otro lado, indican una mayor capacidad adaptativa para los grandes productores (Abanega y Mohammed 2021).

Las diferencias en el tamaño de las UP reflejan desventaja en el acceso a la tierra que enfrentan los pequeños productores, estos se identifican por el minifundio, es decir, por la posesión de pequeñas parcelas agrícolas menores de 2 ha (Cardeña *et al.* 2019). El minifundio en la producción de café es un factor clave que limita sus posibilidades de mejorar sus rendimientos, la eficiencia productiva y su competitividad en el mercado (Benítez *et al.* 2015). El tamaño de sus UP condiciona sus niveles de productividad y rentabilidad, perpetuando las brechas respecto de los grandes productores (Jaramillo *et al.* 2021). Incluso cuando los pequeños productores de la región de las Montañas se ubican a altitudes más óptimas, con condiciones climáticas más favorables para la producción de café arábica, sus restricciones de recursos y capacidades de adaptación contrarrestan este aparente beneficio (Rizzo *et al.* 2021, Bracken *et al.* 2023).

Factores ambientales que determinan el VL en la producción de café

Los resultados arrojaron que las precipitaciones y temperaturas influyen de manera determinante sobre el VT. Las alteraciones climáticas afectan el desarrollo fisiológico del fruto y de la planta del café (Guerrero *et al.* 2020). Respecto a las temperaturas, los rangos óptimos son esenciales para garantizar el rendimiento y calidad de la producción de café (Rivera *et al.* 2013). Además, cuando las condiciones climáticas son extremas, aumenta la vulnerabilidad a plagas y enfermedades, afectando la productividad (Jaramillo *et al.* 2022) y, por lo tanto, el VT a largo plazo. En este estudio se reafirmó que las variaciones de la temperatura por encima y debajo de ciertos umbrales tienen efectos perjudiciales sobre el VT.

Con respecto a las precipitaciones, se observa que una disponibilidad hídrica adecuada durante las etapas clave del ciclo de cultivo tiende a beneficiar el VT. Precipitaciones moderadas y dentro de umbrales óptimos en los momentos críticos, como la floración y desarrollo de los frutos en primavera, o la recuperación de las plantas después de la cosecha en otoño, son fundamentales para el éxito productivo (Villers *et al.* 2009). Por el contrario, excesos o déficits hídricos importantes pueden afectar la productividad a corto y largo plazo (Guerrero *et al.* 2020), y, por lo

tanto, el valor asignado a esas tierras. Las alteraciones en las variables climáticas fueron más perjudiciales para el VT de las UP de los pequeños productores, estos efectos son comparables con los resultados de otros estudios (Rivera *et al.* 2013, Bunn *et al.* 2015, Jaramillo *et al.* 2022).

Otros factores determinantes en el VT

Se identificaron otros elementos relevantes que inciden en el VT de las UP cafetaleras, como el tipo de suelo, nivel tecnológico y características socioeconómicas de los productores. Los resultados indicaron que el tipo de suelos, puede determinar el VT en la UP de café. Este resultado sugiere la importancia de considerar las particularidades edáficas al evaluar los impactos del CC en la caficultura (Läderach *et al.* 2017). Estudios recientes han destacado la importancia del manejo sostenible de los suelos como estrategia de adaptación al CC en sistemas agrícolas, ya que este tipo de práctica puede mejorar la resiliencia frente a eventos climáticos extremos y mantener la productividad en el largo plazo (Estrada *et al.* 2022).

Por otro lado, la influencia del nivel tecnológico en la UP resalta la relevancia de la adopción de prácticas agrícolas avanzadas para mejorar la eficiencia productiva y la capacidad de adaptación al CC (Jaramillo *et al.* 2021, Siles *et al.* 2022). Sin embargo, la heterogeneidad encontrada en el nivel tecnológico entre pequeños y grandes productores, indica la necesidad de implementar estrategias de asistencia técnica diferenciadas (Nor *et al.* 2022, Ávalos *et al.* 2023). Se ha demostrado que la tecnificación de los sistemas productivos, a través de mejoras en el manejo agronómico, el uso eficiente de insumos y la implementación de prácticas sostenibles, puede contribuir significativamente a la adaptación de la caficultura al CC (Jaramillo *et al.* 2021, Venegas *et al.* 2021). No obstante, el acceso y la adopción de estas tecnologías suelen ser limitados para los pequeños productores, quienes requieren de mayor apoyo y capacitación por parte de las instituciones públicas y privadas (Campbell 2021).

Efectos económicos marginales en el VT ante variables climáticas

Los resultados indican disminuciones e incrementos sustanciales en el VT debido a las alteraciones de la temperatura y precipitaciones, afectado de manera diferenciada el VT de los distintos estratos de productores. Se prevé que el aumento de la temperatura afectará económicamente a los pequeños caficultores y beneficiará a los grandes. De igual forma, el aumento de las precipitaciones tendrá un efecto positivo en el VT de las UP de los grandes productores, mientras que afectará negativamente a las de los pequeños. Diversos estudios que han utilizado el enfoque ricardiano han reportado resultados similares, donde los aumentos de temperatura tienden a tener un impacto negativo más severo sobre el VT en las regiones y sistemas productivos más vulnerables (Mora *et al.* 2010, Lan *et al.* 2019). Esta divergencia se debe a las distintas capacidades de adaptación que poseen ambos grupos. Los grandes productores cuentan con mayores recursos tecnológicos y de infraestructura que les permiten aprovechar mejor el aumento de precipitaciones, potenciando la productividad de sus tierras (Nor *et al.* 2022). Por el contrario, los pequeños productores carecen de los medios necesarios para adaptarse a dichos cambios (Abanega y Mohammed 2021). De esta manera, se confirma que el VT es una variable que se encuentra mediada por las brechas estructurales entre grandes y pequeños productores (Palagi *et al.* 2022).

Proyecciones del CC sobre el VT en la producción de café

Las proyecciones con altas y bajas emisiones, así como en los diferentes horizontes temporales indican impactos drásticos sobre el VT de las pequeñas UP de la región de las Montañas, Veracruz. Estos hallazgos coinciden con estudios que advierten sobre los efectos devastadores del CC en la producción de café a nivel global (Imbach *et al.* 2017, Rizzo *et al.* 2021), particularmente en la reducción de áreas idóneas para la cafecultura, como sería el caso para esta región. Bunn *et al.* (2014) y Magrach y Ghazoul (2015) proyectan que, para el año 2050, las áreas climáticamente apropiadas para el café arábica podrían disminuir entre 49 y 56% a nivel mundial.

En el contexto regional, las investigaciones también han señalado tendencias alarmantes. Por ejemplo, en Mesoamérica se estima que para 2050 el área adecuada para el cultivo de café arábica disminuirá en promedio un 30%, con mayores pérdidas en países como México (29%) y menores en Guatemala (19%) (Ovalle *et al.* 2015). En Nicaragua, se proyecta que, para el mismo horizonte temporal, la idoneidad para el café de alta calidad se reducirá en más del 90% de las áreas de cultivo actuales (Läderach *et al.* 2017). Estos resultados sugieren que el CC podría llevar a los productores a sustituir gradualmente los cultivos de café arábica por variedades más resistentes al calor, como el café robusta (Yamane *et al.* 2022). Estos resultados son similares a los impactos esperados del CC sobre el VT de las UP cafetaleras de la región de las Montañas, en Veracruz.

Los cambios en la aptitud agroecológica previstos se reflejarán directamente en el VT de las UP, tal como lo evidencian los hallazgos de los artículos analizados. En un escenario de bajas emisiones (RCP 4.5), se prevén disminuciones sustanciales en el VT, con pérdidas más pronunciadas para las UP pequeñas. Incluso en el escenario de altas emisiones (RCP 8.5), las reducciones en el VT se acentúan aún más, siendo particularmente dramáticas para los pequeños productores en los horizontes medio y lejano. En general, las proyecciones muestran un panorama desafiante para la sostenibilidad de la producción cafetalera, especialmente para los pequeños productores. Las reducciones drásticas en la aptitud agroecológica, aunadas a los incrementos en la incidencia de plagas y enfermedades, ponen en riesgo la viabilidad a largo plazo de este importante cultivo tropical (Imbach *et al.* 2017, Rizzo *et al.* 2021).

CONCLUSIONES

El CC tiene efectos diferenciados sobre el VT de las UPs cafetaleras, afectando a los pequeños productores de la región de Las Montañas en Veracruz. Las UP de los pequeños productores disminuirán entre 39.7 y 63.5% el VT, mientras que los grandes productores incrementarán alrededor del 49% la VT. Se observó interdependencia entre los factores ambientales y la economía agrícola de las UP, lo que indica la sensibilidad de la producción de café a las variaciones de temperatura y precipitación. La heterogeneidad en la sensibilidad al clima destaca la importancia de considerar estrategias diferenciadas para los distintos tipos de productores. La altitud y el nivel tecnológico son elementos clave a considerar en el diseño de acciones orientadas a mitigar los impactos adversos del CC en la producción de café. Se requiere, asimismo, promover estrategias diferenciadas de asistencia técnica y acceso a tecnologías que

permitan, a los pequeños productores fortalecer su capacidad de adaptación, mientras que los grandes productores podrían verse beneficiados por inversiones en infraestructura y tecnificación.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo de campo del presente estudio fue posible gracias a la colaboración de los técnicos extensionistas de SEDARPA, M.C. Juan Carlos García González e Ing. Mario Alejandro Peralta, así como a los directores de fomento agropecuario de los municipios estudiados: Ing. Saúl Prado Sánchez (Chocamán), Ing. José Luis Salinas Contreras (Tomatlán), Ing. Cristian Antonio Ameca Morales (Tepatlxaco) e Ing. Juan Carlos Morales García (Paso del Macho). Asimismo, agradecemos al señor Jesús Díaz Marín, productor campesino e informante clave, por su importante contribución.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

- Abanega A, Mohammed A (2021) Impact of small-scale irrigation schemes on smallholders household income and food security in Ethiopia: Review. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare* 11(1): 40-45.
- Ajetomobi J, Abiodun A, Hassan R (2011) Impacts of climate change on rice agriculture in Nigeria. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 14: 613-622.
- Arcila J (2007) Crecimiento y desarrollo de la planta de café. *Sistemas de producción de café en Colombia*. Cenicafé. Caldas, Colombia: 310p.
- Avalos A, Marcelleño S, Nájera O, Flores F (2023) Potential coffee distribution in a Central-Western region of Mexico. *Ecologies* 4: 269-287. <https://doi.org/10.3390/ecologies4020018>
- Baca M, Läderach P, Haggard J, Schroth G, Ovalle O (2014) An integrated framework for assessing vulnerability to climate change and developing adaptation strategies for coffee growing families in Mesoamerica. *Open One* 9(2): 1-11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088463>
- Ballinas M, Esperón M, Barradas V (2015) Estimating evapotranspiration in the central mountain region of Veracruz, México. *Bosque* 36(3): 445-455. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002015000300011>
- Benítez E, Jaramillo J, Escobedo Garrido, Mora S (2015) Caracterización de la producción y del comercio de café en el Municipio de Cuetzalan, Puebla. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo* 12(2): 181-198.
- Bracken P, Burgess P, Girkin N (2023) Opportunities for enhancing the climate resilience of coffee production through improved crop, soil and water management. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 47(8): 1125-1157. <https://doi.org/10.1080/21683565.2023.2225438>
- Bunn C, Läderach P, Ovalle Rivera O, Kirschke D (2015) A bitter cup: Climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. *Climatic Change* 129: 89-101. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1306-x>
- Campbell D (2021) Environmental change and the livelihood resilience of coffee farmers in Jamaica: A case study of the Cedar Valley farming region. *Journal of Rural Studies* 81: 220-234. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2020.10.027>
- Canet G, Soto C (2016) Panorama general de la caficultura en Latinoamérica. En: Canet G, Soto C, Viquez P, Ocampo J, Rivera A, Navarro G, Guatemala M, Villanueva S (eds) *La situación y tendencias de la producción de café en América Latina y el Caribe*. IICA/CIATEJ. Costa Rica. pp: 1-20.

- Cardeña I, Ramírez B, Sánchez J, Huerta A, Cruz A (2019) Campesinos y sistema de producción de café ante el problema de la roya en el municipio de Hueytamalco, Puebla, México. *Espacio Abierto* 28(2): 57-70.
- Craparo A, Van Asten P, Läderach P, Jassogne L, Grab S (2015) *Coffea arabica* yields decline in Tanzania due to climate change: Global implications. *Agricultural and Forest Meteorology* 207: 1-10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.03.005>
- Estrada F, Mendoza A, Calderón O, Botzen W (2022) Impacts and economic costs of climate change on Mexican agriculture. *Regional Environmental Change* 22(126): 1-16. <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01986-0>
- Falco C, Galeotti M, Olper A (2019) Climate change and migration: Is agriculture the main channel? *Global Environmental Change* 59: 1-26. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.101995>
- Fernández EA, Castelán Hernández C, Minero Cruz V, Elizarrarás Ríos L, Bautista Duran Á (2023) Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. <https://atlasclimatico.unam.mx/cmip5/visualizador>. Fecha de consulta: 21 de abril de 2023.
- Fries A, Rollenbeck R, Nauß T, Peters T, Bendix J (2012) Near surface air humidity in a megadiverse Andean mountain ecosystem of southern Ecuador and its regionalization. *Agricultural and Forest Meteorology* 152: 17-30. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.08.004>
- García C, Gómez F, Bruno A, Rosas A, Servin R, Muños R (2018) Identificación de elementos identitarios en la región de las altas montañas de Veracruz. *Agroproductividad* 11(8): 95-100. <https://doi.org/10.32854/agrop.v11i8.1103>
- 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. *Climate Change* 79: 259–288. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9066-x>
- Guerrero J, Jaramillo JL, Mora J, Bustamante A, Vargas S, Chulim N (2020) Impacto del cambio climático sobre la producción de café. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 23(71): 1-18. <https://doi.org/10.56369/tsaes.3288>
- Imbach P, Fung E, Hannah L, Navarro C, Roubik D, Ricketts T, Roahrdanz P (2017) Coupling of pollination services and coffee suitability under climate change. *PNAS* 114(39): 10438-10442. <https://doi.org/10.1073/pnas.1617940114>
- Jaramillo JL, Guerrero J, Vargas S, Bustamante A (2021) Use of agricultural technology, yields and economic profitability of small-scale producers (*Coffea arabica* L.). *Agro-Productividad*: 1-8. <https://doi.org/10.32854/agrop.v14i11.1995>
- Jaramillo JL, J Guerrero, J Vargas, Bustamante A (2022) Percepción y adaptación de productores de café al cambio climático en Puebla y Oaxaca, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 9(1): 1-13. <https://doi.org/10.32854/agrop.v14i11.1995>
- Jawid A (2020) A Ricardian analysis of the economic impact of climate change on agriculture: Evidence from the farms in the Central Highlands of Afghanistan. *Journal of Asian Economics* 67: 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.asieco.2020.101177>
- Läderach P, Ramírez-Villegas J, Navarro-Racines C, Zelaya C, Martínez-Valle A, Jarvis A (2017) Climate change adaptation of coffee production in space and time. *Climate Change* 141: 47-62. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1788-9>
- Lan HN, Shun Y, Fahad S (2019). Economic impact of climate change on agriculture using Ricardian approach: A case of northwest Vietnam. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 18, 449-457. <https://doi.org/10.3390/land12061117>
- Magrach A, Ghazoul J (2015) Climate and pest-driven geographic shifts in global coffee production: Implications for forest cover, biodiversity and carbon storage. *PloS One* 10(7): 1-15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133071>
- Malhi G, Kaur M, Kaushik P (2021) Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. *Sustainability* 13(1318): 1-21. <https://doi.org/10.3390/su13031318>
- Mendelsohn R (2009) The Impact of climate change on agriculture in developing countries. *Journal of Natural Resources Policy Research* 1(1): 5-19. <https://doi.org/10.1080/19390450802495882>
- Mendelsohn R, Dinar A (2009) Climate Change and agriculture. An economic analysis of global impacts, adaptation and distributional effects. World Bank. Massachusetts, USA. 225p.

- Mendelsohn R, Arellano-Gonzalez J, Christensen P (2009) A Ricardian analysis of Mexican farms. *Environment and Development Economics* 15: 153-171. <https://doi.org/10.1017/S1355770X09990143>
- Mendelsohn R, Nordhaus W, Shaw D (1994) The impact of global warming on agriculture: A Ricardian analysis. *The American Economic Review* 84(4): 753-771. <https://doi.org/10.1257/aer.89.4.1053>
- Moguel P, Toledo V (1999) Café, luchas indígenas y sostenibilidad. *El caso de México*. Primer Seminario Internacional de Caficultura Orgánica 18: 23-36.
- Monterroso A, Fernández A, Trejo R, Conde A, Escandon J, Villers L, Gay C (2014) Vulnerabilidad y adaptación a los efectos del cambio climático en México. Primera Edición. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México. 664p.
- Mora J, Ramírez D, Ordaz J, Acosta A, Serna B (2010) Efectos del cambio climático sobre la agricultura. CEPAL. México. 74p.
- Nor DM, Zulkepli N, Siwar C, Zainol M (2022) Farmers' adaptation strategies to climate change in Southeast Asia: A systematic literature review. *Sustainability* 14(3639): 1-15. <https://doi.org/10.3390/su14063639>
- Ovalle O, Länderach 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. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124155>
- Palagi E, Coronese M, Roventini A (2022) Climate change and the nonlinear impact of precipitation anomalies on income inequality. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119(43): 1-8. <https://doi.org/10.1073/pnas.2203595119>
- Raihan A, Tuspekova A (2022) Towards sustainability: Dynamic nexus between carbon emission and its determining factors in Mexico. *Energy Nexus* 8: 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100148>
- Rivera M, Nikolskii I, Castillo M, Ordaz V, Díaz G, Guajardo R (2013) Vulnerabilidad de la producción del café (*Coffea arabica* L.) al cambio climático global. *Terra Latinoamericana* 31(4): 305-313.
- Rizzo MT, Ferreira da Silva S, Bruno da Silva N, Dino G, Rosa dos Santos A (2021) Global warming and the effects of climate change on coffee production. En: Louzada-Pereira L, Rizzo-Moreira T (eds) *Quality determinants in coffee production*. Cham, Switzerland: Springer. pp: 65-100. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54437-9_2
- Ruiz LE (2015) Adaptive capacity of small-scale coffee farmers to climate change impacts in the Soconusco region of Chiapas, Mexico. *Climate and Development* 7(2): 100-109. <http://dx.doi.org/10.1080/17565529.2014.900472>
- Siles P, Cerdán C, Staver C (2022) Smallholder coffee in the global economy - A Framework to explore transformation alternatives of traditional agroforestry for greater economic, ecological, and livelihood viability. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 6(808207): 1-23. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.808207>
- Semeraro T, Scarano A, Leggieri A, Calisi A, De Caroli M (2023) Impact of climate change on agroecosystems and potential adaptation strategies. *Land* 12(1117): 1-21. <https://doi.org/10.3390/land12061117>
- Venegas SA, Soto PL, Álvarez GG, Alayón GA, Díaz NE (2021) La diversificación de estrategias socioambientales en la familia campesina: mecanismo de resiliencia ante la crisis del café en Chiapas. *Revista Pueblos y fronteras digital* 16: 1-31. <https://doi.org/10.22201/cimsur.18704115e.2021.v16.510>
- Villers L, Arizpe N, Orellana R, Conde C, Hernández J (2009) Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, México. *Interciencia* 34(5): 322-330. <https://doi.org/0378-1844/09/05/322-08>
- Waha K, Zipf B, Kurukulasuriya P, Hassan R (2016) An agricultural survey for more than 9,500 African households. *Scientific Data* 3(160020): 1-8. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.20>
- Yamane K, Nishikawa M, Hirooka Y, Narita Y, Kobayashi T, Kakiuchi M, Iijima M (2022) Temperature tolerance threshold and mechanism of oxidative damage in the leaf of *Coffea arabica* 'Typica' under heat stress. *Plant Production Science* 25(3): 337-349. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2022.2064309>