

IMPACTO POTENCIAL DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ BAJO UN ENFOQUE RICARDIANO

Jesús Guerrero-Carrera¹, José Luis Jaramillo-Villanueva^{*2}, Samuel Vargas-López^{2*}

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

²Colegio de Postgraduados, Campus Puebla. Boulevard Forjadores de Puebla, Núm. 205, Santiago Momoxpan, Municipio de San Pedro Cholula. 72760. Puebla México.2

*Autor de correspondencia: jaramillo@colpos.mx

RESUMEN

El cambio climático (CC) ha afectado adversamente la producción de café y el ingreso de los productores. Las regiones Mazateca y de Cuetzalan en México, son altamente dependientes económicamente en la producción de café y vulnerables al CC. Este estudio, evalúa el impacto potencial del CC en la producción de café en estas regiones. En 2019, se recolectaron datos de una muestra de 180 granjas y se analizaron usando el enfoque ricardiano, basado en el análisis del valor de la tierra (VT), para estimar el impacto en la rentabilidad de la producción de café bajo distintos escenarios de CC. Los resultados mostraron que el CC, tendrá un impacto considerable en el VT de las zonas productoras de café, especialmente para los pequeños productores de café en la región de Cuetzalan. Con base en proyecciones, el CC podría tener un impacto positivo en el VT en la región mazateca en la mayoría de los escenarios, pero en todos los escenarios el impacto en la región de Cuetzalan será muy perjudicial, con más de 40% de pérdida en VT. Además, el impacto negativo del CC se exacerbará para los pequeños productores, dada su vulnerabilidad socioeconómica preexistente y una capacidad adaptativa limitada. En conclusión, el CC tendrá un impacto importante en la VT, variado de región a región, lo cual podría ser irreversible para la producción de café. Con base en estos hallazgos, se deberían desarrollar estrategias de diversificación de producción agrícola y no agrícola para reemplazar la alta dependencia de los productores en la producción de café, mejorando así su ingreso y reduciendo su vulnerabilidad.

Palabras clave: ingreso, productores de café, regiones, valor de la tierra.

INTRODUCCIÓN

La agricultura, es una actividad económica altamente susceptible a la variabilidad del clima y el cambio climático (CC) (Jawid, 2020). Los cambios en temperatura, los patrones de precipitación y los eventos climáticos extremos, como las inundaciones y las sequías, están teniendo efectos negativos sobre la producción de alimentos y la seguridad alimentaria, siendo los pequeños productores los más afectados (Jawid, 2020; Malhi *et al.*, 2021). Cualquier impacto en el sustento de estos productores para producir alimentos, afectaría significativamente la economía rural y la seguridad alimentaria de la población (Estrada *et al.*, 2022).

Los pequeños productores, dependen fundamentalmente de la agricultura como su principal fuente de ingreso y subsistencia (Toledo y Barrera-Bassols,

Citation: Guerrero-Carrera J, Jaramillo-Villanueva JL, Vargas-López S. 2025. Impacto potencial del cambio climático en la producción de café bajo un enfoque ricardiano. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*. <https://doi.org/10.22231/asyd.v22i2.1680>

Editor in Chief:
Dr. Benito Ramírez Valverde

Received: January 31, 2024.
Approved: June 5, 2024.

Estimated publication date:
March 20, 2025.

This work is licensed
under a Creative Commons
Attribution-Non-Commercial
4.0 International license.



2017). Frecuentemente, no tienen acceso a los resultados y las tecnologías necesarias para adaptarse a las condiciones de cambio climático, haciéndolos particularmente vulnerables a los efectos del CC (Nor Diana *et al.*, 2022).

En México, predomina este tipo de agricultura y constituye 81.3% de las unidades rurales económicas en el país (Ramírez-Juárez, 2022). Este sector, juega un papel esencial en el bienestar de la población rural, donde la mayoría de los pequeños productores, dependen de esta actividad (Estrada *et al.*, 2022).

Por ende, es necesario abordar el potencial impacto del CC en las actividades de los pequeños productores, para dimensionar los riesgos ambientales y económicos que el CC representa en los agroecosistemas vulnerables, con el fin de generar estrategias y políticas públicas para el desarrollo sustentable enfocado en la adaptación y la mitigación (Guerrero-Carrera *et al.*, 2020; Raihan y Tuspekova 2022).

La producción de café es un buen estudio de caso, porque representa un ejemplo que incluye los problemas mencionados antes (Guerrero-Carrera *et al.*, 2020). La producción de café, es una de las actividades agrícolas más amenazadas por el CC (Campbell, 2021). México, es uno de los diez países principales en producción de café en el mundo y más de medio millón de productores de café, dependen de esta actividad en el país (Gumencindo-Alejo *et al.*, 2021). Sin embargo, en décadas recientes, los cafeticultores han enfrentado varios problemas en México, como por ejemplo un bajo ingreso, debido a la baja rentabilidad del café causada por las fluctuaciones de precios internacionales, que frecuentemente, resulta en un descenso de los precios (Avalos *et al.*, 2023). Además, en 2012, la roya del café dañó extensas franjas de plantaciones mexicanas, obligando a replantar (Henderson, 2020).

Globalmente, los estudios sugieren un impacto del CC progresivo en la producción de café, lo cual afectará de 30 a 90% de todas las áreas productoras de café (Läderach *et al.*, 2017; Imbach *et al.*, 2017). Además, el CC facilita la propagación de plagas y enfermedades del café (Avalos *et al.*, 2023).

Por lo tanto, es necesario comprender cómo las variaciones del clima, están afectando la producción, la rentabilidad y el valor de la tierra (VT) en la producción de café, así como identificar las medidas de adaptación que están siendo instrumentadas para reducir los impactos negativos del CC (Mora *et al.*, 2010; Guerrero-Carrera *et al.*, 2020). Debido a la vulnerabilidad de los cafeticultores, este estudio es necesario, para proporcionarles información para anticipar los efectos del CC y para diseñar estrategias, programas y políticas locales acordes para la adaptación y la mitigación ante el CC (IPCC 2007; Craparo *et al.*, 2015). Similarmente, los estudios con un enfoque económico (como el modelo ricardiano), son particularmente relevantes para evaluar el impacto potencial del CC en la agricultura (Mora *et al.*, 2010; Jawid, 2020)

MARCO TEÓRICO

Durante las últimas dos décadas, se ha expresado un gran interés en analizar y medir los efectos del CC en la agricultura. En estos esfuerzos, varios modelos se reportan en la literatura, incluyendo enfoques agronómicos, agroclimáticos y económicos (López y Hernández, 2016). Entre los últimos, existen aquellos que usan un modelo general de equilibrio, el modelo de producción función y el enfoque ricardiano (Mora *et al.*, 2010).

El enfoque agronómico, simula el crecimiento del cultivo durante el ciclo de vida de la planta y mide el efecto de las condiciones climáticas modificadas en el rendimiento del cultivo y los requisitos de aporte (Schlenker *et al.*, 2006). Los modelos agronómicos, proporcionan evidencia de que las soluciones tecnológicas, podrían incrementar los rendimientos pero se quedan cortos para justificar si los productores en realidad elegirían estas técnicas o incluso si estas estrategias, serían respuestas económicamente beneficiosas (Reilly, 1999). Una desventaja importante, es que los aspectos económicos del problema no se consideran (Schlenker *et al.*, 2006).

Los modelos agroclimáticos, usan escenarios base y proyecciones climáticas para estimar los efectos del CC en la producción del cultivo. Según Candelaria *et al.* (2011), estos modelos se usan para simular la sustentabilidad, bajo una visión holística y sistemática. Otra evolución importante ha sido considerar al productor, como un sujeto que participa en el modelado. Adams *et al.* (1990), realizaron el primer estudio para analizar los efectos del CC en la agricultura en Estados Unidos desde un punto de vista económico. Los resultados mostraron que, el CC lleva a una ligera reducción en el área total cultivada en los Estados Unidos. El enfoque de Equilibrio General Computable (EGC), modela a la agricultura en relación con otros sectores importantes de la economía y permite a los recursos, moverse entre sectores en respuesta a los incentivos económicos.

En suma, los modelos agronómicos no capturan completamente, las estrategias de adaptación y mitigación de los productores para enfrentar el CC y, por otra parte, los modelos de EGC, solamente son apropiados para los sectores altamente agregados de la economía (Schlenker *et al.*, 2006).

El enfoque de la función de producción, estima los impactos del CC en la agricultura al variar una o algunas variables de entrada, como temperatura, precipitación y niveles de dióxido de carbono (Gay *et al.*, 2006). Numerosos estudios que usan esta metodología, han predicho graves reducciones del rendimiento en varios cultivos en las distintas regiones, como consecuencia del calentamiento global (Lobell *et al.*, 2011). Sin embargo, estos estudios, no consideran las medidas adaptativas que los productores pueden instrumentar en respuesta a las condiciones ambientales cambiantes. Al no tomar en cuenta estas adaptaciones potenciales, los estudios previos, pueden haber sobrestimado el grado del daño causado por cambios ambientales (Mendelsohn y Dinar, 2009).

Mendelsohn *et al.* (1994) desarrolló el innovador enfoque ricardiano, que corrige el sesgo en la técnica de la producción función, al usar datos económicos transversales en el VT. Este enfoque, examina cómo el clima, afecta el ingreso neto, permitiendo un análisis más comprehensivo del efecto de las variables climáticas y no climáticas en el VT y el ingreso de la unidad productiva. A pesar de la emergencia de nuevos modelos y técnicas en los años después de su introducción, el enfoque ricardiano, sigue siendo una herramienta valiosa y de amplio uso en la investigación del CC y la agricultura, debido a su habilidad para capturar la adaptación de los productores y proporcionar estimaciones más realistas de los impactos económicos a largo plazo.

El enfoque ricardiano permite la sustitución en usos de suelo. Por lo tanto, con el CC, una parcela de tierra se vuelve inadecuada para el uso agrícola típico, pero todavía es adecuada para otros usos valiosos, como los no agrícolas, lo cual se reflejará en el precio de la tierra y debe detectarse en la regresión hedonista, que puede estimarse usando mínimos cuadrados ordinarios (MCO) (Schlenker y Roberts, 2009). En este caso, un análisis agronómico enfocado que analiza cercanamente los usos agrícolas, podría exagerar la pérdida de valor inducida por el CC, mientras que el enfoque ricardiano, podría identificar correctamente que la sustitución con usos no agrícolas apropiados, reduce la pérdida de valor. Por lo tanto, el modelo reduce los sesgos de estimación; sin embargo, no toma en cuenta las implicaciones sociales, económicas y ambientales de un cambio como ese en el uso de la tierra (Schlenker *et al.*, 2006).

Un aspecto que hace el modelo ricardiano muy atractivo, es que considera la adaptación, aunque los demás no. Sabemos teóricamente que la adaptación reduce daños. El enfoque ricardiano encuentra menos daño a la agricultura estadounidense que los otros enfoques. Esto es evidencia empírica de su poder de adaptación (Schlenker *et al.*, 2006).

El enfoque ricardiano, se ha aplicado ampliamente en varias regiones del mundo, para evaluar el impacto del cambio climático en la agricultura. Por ejemplo, Kurukulasuriya y Mendelsohn (2007), aplicaron este método en varios países africanos y encontraron que las unidades de producción de las tierras bajas, son más sensibles al cambio climático que las unidades de producción de tierras altas. En Asia, Jawid (2020) usó el enfoque en Afganistán, revelando impactos significativos en la agricultura de temporal. Estos estudios, demuestran la versatilidad del método ricardiano en distintos contextos geográficos y agrícolas.

Aunque el enfoque ricardiano tiene desventajas y debilidades como otros enfoques que evalúan el impacto del CC en la producción agrícola, este modelo tiene características de facilidad en la estimación y mayores posibilidades de obtener los datos requeridos, tomando en cuenta que este modelo puede capturar las potenciales medidas de adaptación que los productores podrían incorporar en sus unidades de producción, debido a las condiciones climáticas que podrían estar sucediendo.

Entre las mejoras metodológicas del presente estudio, se incluyeron los siguientes aspectos: a) se construyó un índice de nivel tecnológico de las unidades de producción y se incorporó como variable de control en las especificaciones, b) este modelo integró conjuntamente los ingresos agrícolas y no agrícolas de las unidades de producción y su influencia en el VT. Además, c) se utilizaron técnicas de georeferenciación de las unidades de producción, para obtener ubicaciones más precisas y lograr valores climáticos más exactos en las interpolaciones geoespaciales desarrolladas. Estas contribuciones mejoran la comprensión del impacto potencial del CC en la producción de café. El estudio pone a prueba dos hipótesis:

Hipótesis (H1): El CC tiene un impacto económico negativo en la producción de café en Cuetzalan y la región mazateca en México.

Hipótesis (H2): Los pequeños productores de café, son más vulnerables al CC que las grandes unidades agrícolas comerciales de café, al comparar la sensibilidad climática de las unidades agrícolas pequeñas y grandes en México.

MÉTODOS

Esta sección, aborda las especificaciones del modelo ricardiano, la zona de estudio, los datos sociodemográficos, las variables de clima y suelo, así como los escenarios climáticos y los análisis estadísticos.

Especificaciones del modelo

El método ricardiano recibe su nombre de David Ricardo, quien notó por primera vez que el VT o la Renta Neta del Campo (π), refleja la productividad neta del campo (Mendelsohn *et al.*, 1994). En este estudio, las unidades de análisis son las unidades de producción (UP); según Malagón y Prager (2001) and Stamberg 2015), las UP se pueden definir como una entidad familiar involucrada en actividades productivas, donde las interacciones y la retroalimentación ocurre entre varios componentes internos. Estos componentes, incluyen los recursos naturales, las entradas, el equipamiento tecnológico, los procesos de producción y los resultados o productos generados. Además, la influencia de los factores externos como el clima, las condiciones del suelo y los mercados se deben tomar en cuenta, ya que ejercen un impacto significativo en la producción agrícola y la rentabilidad. Las granjas y las haciendas son ejemplos claros de unidades de producción.

El enfoque ricardiano asume que los productores maximizan su ingreso neto (π) dada la siguiente ecuación:

$$\pi = \sum P_i Q_i(X, F, Z, G) - \sum W_x X \quad (1)$$

donde P_i : precio de mercado del cultivo i ; Q_i : salida del cultivo i ; X : vector de entradas adquiridas; F : vector de variables del clima; Z : vector de otras variables de control, como suelo, acceso al mercado y altitud; G : vector de variables sociodemográficas; W_x : vector de precios de entrada.

Por suposición, el productor selecciona Q y X para maximizar el VT por hectárea dadas las características de (temperatura, precipitación y suelos) y los precios de mercado (Ajetomobi *et al.*, 2011; Mendelsohn y Dinar, 2009). La función óptima se expresa como en la ecuación (2):

$$\pi = f(P_i, F, Z, W_x) \quad (2)$$

Se usó la ecuación (2) para determinar cómo los cambios en las variables exógenas contenidas en F y Z , afectan la productividad neta del campo. Por ende, el VT representa el valor presente del flujo de ganancia neta, cuya notación es:

$$VT = \int_n^{\infty} \pi_i^* \cdot e^{-rt} dt \quad (3)$$

En la Ecuación (3), r es la tasa de interés del mercado. El modelo estándar ricardiano, es una formulación cuadrática del clima y una función lineal de todas las otras variables y puede expresarse econométricamente como en la Ecuación (4):

$$VT = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 T^2 + \beta_3 P + \beta_4 P^2 + \beta_5 TP + \sum \delta_j z_j + e \quad (4)$$

donde VT es el valor de la tierra por hectárea; T y P son la temperatura y la precipitación, respectivamente. La temperatura y la precipitación comúnmente, se diferencian por temporada del año; Z representa el conjunto de variables socioeconómicas de la UP indexadas de $i=1...n$ a n ; β_k y δ_j son parámetros estimados; e es un término de error (Mora *et al.*, 2010).

Explícitamente, la ecuación estimada está en la Ecuación (5):

$$VT = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 T^2 + \beta_3 P + \beta_4 P^2 + \beta_5 TP + \beta_6 TS + \beta_7 TI + \beta_8 DM + \beta_9 EX + \beta_{10} ES + \beta_{11} INC + \beta_{12} GE + \beta_{13} HC + e_i \quad (5)$$

donde T es temperatura ($^{\circ}C$); P es precipitación (mm). EX : experiencia del productor (en años); ES : educación del jefe del hogar (en años); INC : ingreso *per cápita* (en miles de pesos MX); HC : computadora del hogar (variable dummy);

GE: edad y género del jefe del hogar; *LA*: área de la tierra; *TS*: tipo de suelo; *TI*: índice tecnológico; *DM*: acceso al mercado (en minutos).

Los términos cuadráticos y lineales de temperatura y precipitación, se incorporan en la Ecuación (4) para capturar las respuestas no lineales del cultivo al clima. Los experimentos de laboratorio, sugieren que los cultivos tienden a mostrar una respuesta con forma de U invertida, como función de la temperatura (Mendelsohn y Dinar, 2009). Además, a bajas temperaturas (templado), la decisión óptima del productor puede ser cultivar café arábica (*Coffea arabica*). Sin embargo, conforme aumenta la temperatura, la ganancia marginal de este producto, disminuye hasta que se vuelve negativa. Entonces, el productor debería tomar la decisión de optimizar las ganancias al seleccionar un cultivo adaptable a temperaturas mayores (temperaturas cálidas). En este contexto, este cultivo podría ser café robusta (*Coffea canephora*). Se puede aplicar un razonamiento similar a los cultivos sensibles a la lluvia. En algún rango, la interacción de la temperatura y la lluvia podría reforzar sus efectos en el rendimiento del cultivo (Mendelsohn y Dinar, 2009). Al seguir esta lógica, el modelo ricardiano, supone que los productores adaptan su comportamiento a lo largo del ciclo de producción intertemporal (Mendelsohn *et al.*, 1994; Ordaz *et al.*, 2010). Las variables explicativas consistentes de cada una de las regresiones, fueron tal como las propuestas en la literatura (Kurukulasuriya y Mendelsohn, 2007; Mora *et al.*, 2010; Mendelsohn y Dinar, 2009) y después se pusieron a prueba un par de variables adicionales con base en su significancia estadística.

El modelo ricardiano, estima los efectos futuros potenciales del CC en el VT. A través del conjunto de coeficientes de las variables climáticas de las especificaciones, se estiman los impactos marginales en las temperaturas y las precipitaciones, los resultados pueden reflejar efectos positivos o efectos negativos en el VT (Mendelsohn y Dinar, 2009). Subsecuentemente, el modelo incorpora escenarios con distintos niveles de emisiones de gases de invernadero y los cambios estimados en temperaturas y precipitación. El modelo entonces usa estas proyecciones para estimar cómo el CC puede afectar el VT futuro y el ingreso (Mendelsohn *et al.*, 2010).

El impacto marginal de las variables climáticas en el VT, se evaluó usando la Ecuación (6):

$$\frac{\partial VT_i}{\partial T} = \beta_{ii} + 2\beta_{2i}T + \beta_{5i}P \quad (6)$$

Por lo tanto, los distintos niveles de sensibilidad al CC de cada UP *i*, se determinaron por la caracterización de su perfil específico. El efecto anual de un cambio marginal en la variable climática en cuestión, se calculó al añadir los efectos marginales de esta variable (Mora *et al.*, 2010).

En teoría, la formulación cuadrática puede cambiar no sólo la magnitud, sino también el signo del efecto marginal (Mendelsohn *et al.*, 2010). Cuando el término cuadrático es positivo, la función tiene forma de U, y cuando el término cuadrático es negativo, la función tiene forma de U invertida (Mendelsohn *et al.*, 2010). Para cada cultivo, el crecimiento es óptimo a una temperatura conocida a lo largo de las estaciones. Muchos cultivos tienen una curva con forma de U más amplia y plana. Sin embargo, las variables climáticas estacionales muestran una relación más compleja, que puede incluir una mezcla de coeficientes cuadrados positivos y negativos entre estaciones (Mendelsohn *et al.*, 2010).

El cambio en bienestar anual (ΔW), que resulta de un CC de C_0 a C_1 (medido como la diferencia en VT en dos periodos) está dado por:

$$\Delta W = W(C_1) - W(C_0) \quad (7)$$

Los cambios que incrementan el VT son benéficos y los cambios que disminuyen el VT son dañinos. Por lo tanto, este enfoque, es un análisis estático comparativo, no un modelo dinámico. El modelo ricardiano, no mide los efectos del CC anual sino aquellos del CC a largo plazo (Mendelsohn *et al.*, 2010).

Los valores óptimos de las variables climáticas significativas (temperatura y precipitación), se calcularon usando la Ecuación (8) (Mendelsohn y Dinar, 2009).

$$\text{Inflection point} = \frac{\beta \text{ Temperature}}{2 \times \beta \text{ Temperature}^2} \quad (8)$$

Zona de estudio

El estudio se realizó en la región mazateca de Oaxaca y en la región de Cuetzalan, Puebla (Figura 1). Estas regiones dependen fuertemente de la producción de café, porque son dos de las regiones cafecultoras principales en México (Moguel y Toledo, 1999), y son altamente vulnerables al CC (Monterroso *et al.*, 2014).

Datos

El VT, el ingreso y los datos sociodemográficos se recolectaron de las Unidades de Producción (UP), que son las unidades de análisis definidas como unidad de producción que toma decisiones y vende café. La muestra de UP se tomó de una encuesta de cafecultores y se verificó con informantes clave de la región mazateca de Oaxaca y de la región de Cuetzalan, Puebla, en 2019, siendo un total de 180 dueños de UP de café en 16 municipios cafecultores. Las variables principales del estudio se basaron en Waha *et al.* (2016). Por lo tanto, el cuestionario se dividió en 8 secciones: 1) hogar, 2) empleo, 3) Unidad



Figura 1. Ubicación de la región mazateca de Oaxaca y de Cuetzalan, Puebla.

de Producción, 4) actividades agrícolas, 5) actividades ganaderas, 7) acceso a información, 8) ingreso (Cuadro 1).

Variables del clima

Se recolectaron datos del clima de la página web de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (CONAGUA, 2019). Estos datos se extrajeron de 25 estaciones meteorológicas localizadas en dos regiones de la zona de estudio. Los normales climatológicos usados para este propósito, abarcan de 1951 a 2010. Las condiciones climáticas de cada sitio y UP se asignaron usando el método de interpolación Kriging, para la precipitación y el método de interpolación para temperatura de Distancia Inversa Ponderada (IDW) (Oliver y Webster, 1990). Las interpolaciones se procesaron con el programa ArcGIS (Mendelsohn *et al.*, 2010; Fries *et al.*, 2012). Para este fin, las comunidades y las UP se georeferenciaron usando datos de latitud, longitud y altitud.

Cuadro 1. Variables utilizadas en el cuestionario.

Secciones	Variables
I. Hogar	1. Miembros del hogar (sexo, edad y educación)
II. Empleo	1. Empleo del jefe del hogar (actividades agrícolas y no agrícolas)
III. Unidad de Producción	1. Actividades agrícolas
	2. Tamaño de la UP (ha), desglosado por actividad
	3. Tenencia de la tierra
	4. Valor de la UP
IV. Actividades Agrícolas	1. Cultivo, fecha de siembra, fecha de cosecha, proporción de área de tierra cultivada, cantidad cosechada y rendimiento
	2. Cantidad de cultivos consumidos, vendidos y perdidos, y valor de cultivos vendidos
	3. Semillas, fertilizantes y pesticidas, y costos
	4. Maquinaria agrícola, equipamiento y construcciones
	5. Acceso al mercado para proveer de ventas y compras, y modo de transporte al mercado
	6. Costos totales del transporte, comercialización, almacenamiento, y pérdidas post-cosecha
V. Acceso a la Información	1. Acceso a la información de los productores, asesoría sobre las actividades agrícolas y sobre las fuentes y costos de esta información
VI. Ingreso	1. Estimación del ingreso total del hogar agrícola (para actividades agrícolas y no agrícolas)

Nota: la media y la desviación estándar de las variables usadas en el análisis se calcularon para toda la muestra y por región.

Fuente: elaboración propia.

El análisis se realizó durante un año. Debido a que el café es un cultivo perenne, es necesario incluir la variación de temperatura y precipitación. Las variables climáticas, se incorporaron en el modelo econométrico como variables, cada una representando una estación del año, es decir primavera (marzo, abril y mayo), verano (junio, julio y agosto), otoño (septiembre, octubre y noviembre), e invierno (diciembre, enero y febrero). Estas estaciones se eligieron porque representan contrastes climáticos, durante un ciclo anual y juegan un papel clave en los periodos de desarrollo fenológico de las plantas de café (Villers *et al.*, 2009). Por ejemplo, las condiciones del clima como lluvia, humedad, radiación solar y temperatura, son fundamentales para regular la floración y el desarrollo de frutos (Craparo *et al.*, 2015; Descroix and Snoeck, 2009). De forma similar, las prácticas de manejo agrícola y de cosecha del café están relacionadas estrechamente al clima y al ambiente (Villers *et al.*, 2009).

Los productores están de acuerdo en que la primavera, el verano y el invierno son las temporadas más importantes para la producción de café. La primavera coincide con el periodo de floración, que es el más importante para la producción de café (Villers *et al.*, 2009; Arcila, 2007). Durante el periodo de floración, la temperatura máxima se relaciona con el volumen de cosecha; las temperaturas muy altas afectan negativamente los rendimientos, mientras que temperaturas

máximas moderadas llevan a cosechas satisfactorias (Fournier y Di Stefano, 2004). Similarmente, las lluvias extremas durante este periodo afectan notablemente la floración (Villers *et al.*, 2009; Arcila, 2007). El verano coincide con los periodos de crecimiento de las hojas y el desarrollo de los frutos (Villers *et al.*, 2009). A su vez, en el invierno, las condiciones climáticas afectan directamente el proceso de maduración del fruto y la cosecha (Villers *et al.*, 2009).

Gay *et al.* (2006) utilizaron las mismas ecuaciones en un estudio económico sobre el impacto del CC en la producción de café. El número de estaciones que se usaron en estos estudios varían con el objetivo de investigación. En otros estudios, que involucran el método ricardiano, se han usado dos y tres estaciones (Gbetibouo y Hassan, 2005; Kabubo-Mariara y Karanja, 2007).

VARIABLES DE CONTROL

Suelos: Así como el clima es crucial para el rendimiento de un cultivo agrícola, los suelos son esenciales para determinar las salidas y el VT (Kabubo-Mariara y Karanja, 2007). La información sobre los tipos de suelo, se obtuvo a partir del mapa de suelos dominantes en la República Mexicana, cuyos metadatos están disponibles en la página web de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Se utilizó interpolación para estimar los tipos de suelo a una escala local para cada unidad de producción (UP) dentro de las regiones de estudio, usando el programa ArcGIS. Este proceso, permitió capturar las variaciones del suelo dentro de las regiones mazateca y de Cuetzalan, considerando la heterogeneidad espacial. La región mazateca contiene alisol y leptosol, mientras que en la región de Cuetzalan se encuentran vertisol éútrico y cambisol éútrico.

Características de las UP: Distancia desde la ciudad (minutos); Área de tierra con café (ha); Área de tierra con café (Cuadrado); Actividades no agrícolas (Sí, No); Área de tierra de otros cultivos (ha); Altitud (metros sobre nivel del mar [msnm]); Altitud2 (Cuadrado); Pendiente del terreno (3=inclinado, 2=moderado, 1=plano) (Ajetomobi *et al.*, 2011; Mendelsohn *et al.*, 2010; Kurukulasuriya and Mendelsohn, 2007). Los datos para estas variables se obtuvieron a través de encuestas con los productores y visitas al campo.

Variables socioeconómicas: Sexo del jefe del hogar (Hombre, Mujer); Edad del jefe del hogar (Años); Experiencia en la producción de café (Años); Educación del jefe del hogar (Años); Promedio educativo del hogar (Años); Computadora en el hogar (Sí, No); Miembros del hogar (Número); Jefe del hogar (Sí, No); Tamaño del hogar (3, 2, 1) (Ordaz *et al.*, 2010; Mora *et al.*, 2010; Mendelsohn, 2009; Mendelsohn *et al.*, 2010). El índice tecnológico se formó con el promedio de los componentes del paquete tecnológico recomendado en las regiones de estudio; densidad de siembra, dosis de fertilización, control de plagas, control de enfermedades, podas y variedades usadas en la plantación (Jaramillo-Villanueva *et al.*, 2022).

Escenarios climáticos

Los escenarios de CC se tomaron Centro Nacional para Investigación Meteorológica (Centre National de Recherches Météorologiques – CNRMCM5), modelos climáticos del repositorio institucional de datos científicos geoespaciales, el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA), la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (Fernández *et al.*, 2015). Se usaron los siguientes horizontes de CC: Trayectorias de Concentración Representativa (RCP) 4.5 (emisiones bajas) y RCP 8.5 (emisiones altas). Los horizontes son: Futuro cercano (2015-2039) y Futuro mediano (2045-2069).

Para hacer las simulaciones de los escenarios climáticos, las capas correspondientes se obtuvieron del repositorio CCA. Subsecuentemente, se realizaron interpolaciones utilizando el programa ArcGIS, para obtener valores más precisos para las ubicaciones específicas de las UP dentro de las regiones de estudio. Este proceso garantizó que las proyecciones del clima se ajustaran a la escala local relevante para el análisis, lo cual permitió una evaluación más exacta del impacto del CC en la producción de café. De esta forma, fue posible determinar el aumento o la disminución en las temperaturas y la precipitación para cada UP en las regiones de estudio.

Para obtener los resultados del impacto potencial del CC en el VT bajo escenarios climáticos, se utilizan los resultados de los efectos marginales, que se estiman usando la Ecuación 6, como se explicó con anterioridad. Estos efectos marginales, que capturan la sensibilidad del VT a los cambios en las variables climáticas, se usan para proyectar los cambios en el VT bajo distintos escenarios climáticos.

Los resultados de estos escenarios climáticos indican la magnitud y la dirección de los impactos potenciales del CC en la producción de café, reflejados a través de cambios en el VT. Dada la sensibilidad del cultivo del café a las condiciones climáticas, incluso los pequeños cambios en temperatura o precipitación pueden tener efectos significativos en su producción y, consecuentemente, en el VT.

Análisis econométrico

Los modelos se estimaron usando los procedimientos de estimación de mínimos cuadrados ordinarios (regresión lineal) en el programa STATA 15.1. Se aplicaron pruebas diagnósticas para evaluar las suposiciones del MCO, incluyendo pruebas para variables omitidas para evaluar si eran relevantes en un modelo específico. Para vencer los problemas de heteroscedasticidad y multicolinealidad, se estimaron los errores estándar.

Se realizaron las presunciones de las pruebas de MCO: prueba Shapiro-Wilk para normalidad, prueba de Cook y Weisberg para heteroscedasticidad, prueba de factor de inflación de varianza (VIF) para Multicolinealidad, y la prueba de error de especificación de la regresión (RESET) para las variables omitidas.

RESULTADOS

El VT promedio por hectárea de área de producción de café, fue de \$42,557 para la región mazateca y \$83,874 para la región de Cuetzalan. La temperatura media anual fue 19.1 °C para todas las UP, 17.5 °C para la región mazateca y 20.81 °C para la región de Cuetzalan. La precipitación media anual fue de 2,993 mm para la muestra entera, 3,301 mm para la región mazateca y 2,633 mm para la región de Cuetzalan. El tamaño de la parcela también fue distinta entre las regiones, con un promedio de 1.07 ha en la región mazateca y 1.46 ha en la región de Cuetzalan.

En cuanto a los tipos de suelo, se observaron diferencias entre las regiones de estudio. En la región mazateca predominan los suelos Alisol (18%) y Leptosol (82%), mientras que en la región de Cuetzalan, el tipo de suelo dominante es el vertisol éutrico (88%). En la muestra general, que incluye ambas regiones, las medias para Alisol, Leptosol y Vertisol_e son 0.09, 0.44 y 0.41, respectivamente; estas reflejan la contribución de cada región a la distribución total de los tipos de suelo.

La media general de altitud en las parcelas fue 1,066 msnm, con 1,324 msnm para la región mazateca y 764 msnm para la región de Cuetzalan. La edad promedio de los productores fue de 57 años para todas las UP, 54 años para la región mazateca y 60 años para la región de Cuetzalan. La media de educación del jefe del hogar fue de 5 años para la muestra en general, 4.8 años para la región mazateca y 5.3 para la región de Cuetzalan. La experiencia en caficultura de los productores fueron 25.9 años en general, 23.9 años en la región mazateca y 28.2 años en la región de Cuetzalan.

Los resultados de especificaciones para la región mazateca, mostraron que las variables de temperatura en primavera y otoño, así como las variables de precipitación en primavera e invierno, tienen un impacto significativo en el VT de café (Cuadro 2). Además, se encontró que otras variables, como tipo de suelo, la edad y la experiencia del jefe del hogar, su nivel educativo, la presencia de una computadora en el hogar y el índice tecnológico, también influyen significativamente en el valor de la tierra en esta región.

Por otra parte, en la región de Cuetzalan, los resultados de especificaciones indicaron que las variables de precipitación en verano y otoño no tienen un efecto diferente significativo en el VT de café. Sin embargo, se encontró que otras variables, sí tienen una influencia significativa en el valor de la tierra, como altitud (msnm), área de la tierra, edad y género del jefe del hogar, e ingreso del hogar.

La ausencia de valores para algunas variables en las especificaciones se debe al uso de técnicas de selección del modelo, como la regresión stepwise y la selección del mejor subconjunto. Estas técnicas, identifican las variables más relevantes y significativas que explican la variación en el VT de café a la vez

Cuadro 2. Estadísticas generales de variables incluidas en el modelo económico.

Variable	General		Mazateca		Cuetzalan	
	Media	Desviación Est.	Media	Desviación Est.	Media	Desviación Est.
Valor del café por Ha (\$)	61,609.00	27,808.00	42,557.00	12,036.00	83,874.00	24,236.00
Temperatura media en primavera (°C)	20.39	3.20	19.18	3.82	21.81	1.25
Temperatura media en verano (°C)	20.77	4.60	18.18	4.67	23.79	1.86
Temperatura media en otoño (°C)	18.70	3.74	16.88	4.19	20.81	1.25
Temperatura media en invierno (°C)	16.23	2.16	15.71	2.64	16.85	1.14
Precipitación de primavera (mm)	309.6	80.5	287.2	79.2	335.9	74.3
Precipitación de verano (mm)	1,399.0	391.0	1,695.0	275	1,054.0	152.0
Precipitación de otoño (mm)	1,006.0	162.0	1,041.0	172	966.0	140.0
Precipitación de invierno (mm)	276.0	67.0	277.0	72	276.0	61.0
Alisol	0.09	0.29	0.18	0.38	-	-
Leptosol	0.44	0.50	0.82	0.38	-	-
Vertisol_e	0.41	0.49	-	-	0.88	0.33
Altitud (msnm)	1,066.0	514.0	1,324.0	556.0	764.0	210.0
Área de la parcela (ha)	1.25	1.00	1.07	0.82	1.46	1.16
Edad del jefe del hogar (años)	57.08	13.71	54.39	14.76	60.22	11.69
Experiencia en la caficultura (años)	25.88	14.81	23.88	13.10	28.23	16.36
Educación (años)	5.04	3.87	4.81	3.94	5.31	3.80
Índice tecnológico	4.09	1.71	3.58	1.69	4.69	1.53
Ingreso per cápita	1.82	0.64	1.59	0.61	2.10	0.55
Computadora en el hogar	0.05	0.22	0.02	0.14	0.08	0.28
Observaciones	180		97		83	

Fuente: elaboración propia con datos de la encuesta.

que minimizan la multicolinealidad y mejoran la parsimonia del modelo. Las variables que no cumplen con los criterios estadísticos predeterminados se omiten en la especificación final, garantizando que solamente se incluyan las variables esenciales y significativas. La evaluación del modelo muestra normalidad del término del error, sin heteroscedasticidad, sin colinealidad y sin variables omitidas.

Al usar la ecuación 8, se determinaron los valores óptimos para las variables climáticas significativas (temperatura y precipitación). Se encontró que una temperatura media en la primavera menor de 19.9 °C, es perjudicial al VT en la región mazateca, indicando que las temperaturas arriba de este rango son benéficas para la rentabilidad (Cuadro 3).

En la región de Cuetzalan, se observó un patrón distinto. Una temperatura media en primavera menor de 22.2 °C fue benéfica para el VT. De manera similar, para el verano, una temperatura media mayor de 25.4 °C impactó negativamente el VT, indicando que las temperaturas altas en primavera y verano podrían tener consecuencias desfavorables para el cultivo del café.

En cuanto a la precipitación, en la región mazateca, se encontró que en la primavera una precipitación mayor de 297 mm benefició el VT. Esto indica que

Cuadro 3. Influencia de las variables climáticas en el VT. Especificaciones por región.

Valor por ha de café	Mazateca Oaxaca		Cuetzalan Puebla	
	Coefficiente	valor-t	Coefficiente	valor-t
Temperatura media en primavera (°C)	-173,615	-1.98*	3,246,814	2.10*
Temperatura en primavera (Al cuadrado)	4,352	1.97*	-73,243	-2.08*
Temperatura media en verano (°C)	75,206	1.14	841,656	1.63
Temperatura en verano (Al cuadrado)	-1,916	-1.11	-16,574	-1.7**
Temperatura media en otoño (°C)	67,691	1.80	-2,756,455	-2.27*
Temperatura en otoño (Al cuadrado)	-2,062	-1.75	65,100	2.22*
Temperatura media en invierno (°C)	-28,443	-0.98	-1,012,346	-2.02*
Temperatura en invierno (al cuadrado)	1,042	1.35	26,982	1.91**
Precipitación acumulativa de primavera (mm)	-7,111	-2.67*	2,004	2.03*
Precipitación de primavera (Al cuadrado)	11.9	2.60*	-2.48	-1.9**
Precipitación acumulativa de verano (mm)	1,596	1.14	3,559	1.21
Precipitación de verano (Al cuadrado)	-0.5	-1.26	-2.6	-1.46
Precipitación acumulativa de otoño (mm)	-173	-0.13	-52.4	-0.02
Precipitación de otoño (Al cuadrado)	0.2	0.35	0.91	0.52
Precipitación acumulativa de invierno (mm)	2,597	2.09*	-12,075	-1.80**
Precipitación de invierno (Al cuadrado)	-4.8	-2.19*	23.0	1.80**
Alisol	-49,897	-2.48*		
msnm			-449.8	-1.63
msnm_2			0.2	1.43
Área de tierra (ha)			-3,862	-1.90**
Edad del jefe del hogar	-221	-2.04*	617	3.37*
Experiencia del productor en caicultura	252	2.31*		
Educación del jefe del hogar	-3,322	-1.70**	-1,391	-0.62
Sexo del jefe del hogar			10,748	1.62
Computadora en el hogar	13,361	1.71**	10,525	1.36
Índice tecnológico	3,984	3.00*		
Ingreso per capita	78.9	0.04	22,056	5.33*
Acceso al mercado			582.1	1.47
Constante	83,137	0.15	-83,431	-3.08*
R-cuadrada	0.59		0.67	
Shapiro-Wilk (Prob > z)	.088		0.128	
Breusch-Pagan (Prob > chi²)	.721		.608	
Factor de varianza de inflación (VIF)	2.55		1.98	
Prueba Ramsey (Prob > F)	1.29		2.12	

*Significativo a 95% ($p \leq 0.05$); **Significativo a 90% ($p \leq 0.1$).

Fuente: elaboración propia con datos de la encuesta.

el nivel de agua óptimo durante esta estación, es favorable para la producción de café. Por otra parte, una precipitación mayor de 266 mm en el invierno tuvo un impacto negativo en el VT.

En la región de Cuetzalan, se encontró que una precipitación mayor de 404 mm en la primavera afectó negativamente el VT. Mientras tanto, en el invierno una precipitación mayor de 262 mm fue benéfica para el VT en esta región, ya

que el déficit de agua durante este periodo, podría afectar el crecimiento del café y el desarrollo oportuno de las flores.

Estos resultados, demuestran que los requerimientos climáticos en la producción de café, pueden impactar significativamente la rentabilidad de la tierra de acuerdo a cada región. Esto se relaciona con el tipo de cultivo y las características climáticas locales para cada región productiva.

En la región de Cuetzalan, se observó que las unidades de producción (UP) ubicadas a una altitud mayor de 937 metros sobre el nivel del mar, experimentaron un aumento en el VT.

El acceso a la tecnología tuvo un efecto positivo en el VT de café en la región mazateca. La edad del productor, mostró un efecto diferenciado entre las regiones: mientras que en la región de Cuetzalan, los productores mayores se asociaron a un VT mayor, sugiriendo una mejor adaptación a las condiciones locales, en la región mazateca una mayor edad del productor tuvo un impacto negativo en el VT. Finalmente, un ingreso *per cápita* mayor, mostró un efecto positivo en el VT de café en ambas regiones, aunque solamente fue estadísticamente significativo en la región de Cuetzalan.

Los impactos marginales del CC, fueron notables en la región de Cuetzalan, aunque bajos en la región mazateca. Los márgenes de temperatura fueron de -45,000 pesos (-54%) por grado centígrado para las UP en la región de Cuetzalan. Por otra parte, en la región mazateca, los efectos de la temperatura aumentan el VT en 1,203 pesos (2.83%) por grado centígrado. Las pérdidas de VT en la región de Cuetzalan están asociadas con las temperaturas de otoño e invierno. Con una menor precipitación, el VT disminuirá 0.91% por mm de precipitación en la región de Cuetzalan, y aumentará 0.52% por mm de precipitación en la región mazateca (Cuadro 4).

Proyecciones de los escenarios

Según los escenarios climáticos de CNTMCM5 (emisiones bajas y altas) (Cuadro 5), los resultados sugieren que el aumento en temperatura y la disminución en precipitación, afectarán el VT de las áreas cafecultoras.

Para la región mazateca, los escenarios indican aumentos en temperatura de 0.78 a 2.31 °C con emisiones bajas y de 0.84 a 3.31 °C con emisiones altas. En términos de precipitación, en el escenario de emisiones bajas, se espera la mayor disminución principalmente en el horizonte cercano, con -44.5 mm; de manera similar, en el escenario de emisiones altas, se espera que la precipitación disminuya principalmente en el horizonte cercano. Para la región de Cuetzalan, los escenarios indican aumentos en temperatura de 0.77 a 1.78 °C con emisiones bajas y de 0.82 a 3.26 °C con emisiones altas. En términos de precipitación, la mayor disminución debería ocurrir principalmente en el horizonte mediano, en el escenario de emisiones bajas, con -34.7 mm. Para la región mazateca, las proyecciones con emisiones bajas muestran aumentos de

Cuadro 4. Impacto marginal de las variables climáticas en el VT por región.

Variable	Mazateca Oaxaca			Cuetzalan Puebla		
	Coefficiente	Impacto (m)	Porcentaje	Coefficiente	Impacto (m)	Porcentaje
Temperatura						
T Primavera	-173,615.70	-\$ 6,654.83	-15.64 %	3,246,814	\$ 51,442.92	61.3%
T Verano	75,206.30	\$ 5,511.54	12.95 %	841,656.6	\$ 53,125.07	63.3%
T Otoño	67,691.34	-\$ 1,942.19	-4.56 %	-2,756,455.0	-\$ 46,685.71	-55.7%
T Invierno	-28,443.79	\$ 4,288.63	10.08 %	-1,012,346.0	-\$ 103,194.48	-123.0%
Anual		\$ 1,203.16	2.83 %		-\$ 45,312.20	-54.0%
Precipitación						
P Primavera	-7,111.25	-\$ 244.61	-0.57 %	2,004.85	\$ 341.44	0.41%
P Verano	1,596.85	-\$ 119.03	-0.28 %	3,559.06	-\$ 1,926.96	-2.30%
P Otoño	-173.12	\$ 260.64	0.61 %	-52.49	\$ 1,704.17	2.03%
P Invierno	2,597.49	-\$ 118.43	-0.28 %	-12,075.35	\$ 647.31	0.77%
Anual		-221.43	-0.52 %		\$ 765.96	0.91%

Fuente: elaboración propia con datos de la encuesta.

25 y 9.8% en VT para los horizontes cercano y mediano, respectivamente. Las proyecciones con emisiones altas, muestran un aumento de 11.9% de VT en el horizonte cercano y, por su parte, una pérdida de 12.9% del VT. Para la región de Cuetzalan, las proyecciones con emisiones bajas, muestran pérdidas drásticas de VT, que oscilan de 67.5 a más de 100%. Para proyecciones con emisiones altas, las pérdidas de VT oscilan de 40.4 a más de 100%.

Cuadro 5. Proyecciones del impacto del CC en el VT por región.

	Modelo Mazateca			Modelo Cuetzalan		
	Δ (C) y (mm)	Δ (\$)	Δ (%)	Δ (C) y (mm)	Δ (\$)	Δ (%)
Emisiones bajas						
CNRMCM5 4.5						
Horizonte Cercano (2015-2039)	0.78	\$938.46	2.21%	0.77	-\$34,890.39	-41.60%
	-44.55	\$9,864.71	23.18%	-28.34	-\$21,707.31	-25.88%
		\$10,803.17	25.38%		-\$56,597.70	-67.48%
Horizonte Mediano (2045-2069)	2.31	\$2,781.97	6.54%	1.44	-\$65,249.57	-77.79%
	-6.19	\$1,370.65	3.22%	-34.68	-\$26,563.49	-31.67%
		\$4,152.62	9.76%		-\$91,813.06	-109.47%
Emisiones altas						
CNRMCM5 8.5						
Horizonte Cercano (2015-2039)	0.84	\$1,014.66	2.38%	0.82	-\$37,055.31	-44.18%
	27.50	-\$6,089.33	-14.31%	4.18	\$3,201.71	3.82%
		-\$5,074.66	-11.92%		-\$33,853.60	-40.36%
Horizonte Mediano (2045-2069)	3.20	\$3,851.45	9.05%	1.92	-\$86,848.38	-103.55%
	-7.37	\$1,631.94	3.83%	-30.86	-\$23,637.53	-28.18%
		\$5,483.39	12.88%		-\$110,485.91	-131.73%

Fuente: elaboración propia con datos de la encuesta.

De manera similar, el efecto del CC en el VT se estimó con base en el tamaño de las UP, haciendo una distinción entre las pequeñas (0.8 ha en promedio), las grandes (2.6 ha en promedio), y la muestra general que incluye ambos estratos. Los impactos marginales, indican que los efectos de la temperatura son más fuertes para las UP pequeñas, que para la muestra general. Para la muestra general, cuando la temperatura aumenta en 1 °C, el VT disminuye en 3,900 pesos, mientras que para los pequeños productores, disminuye en 6,500 pesos. En cambio, para las unidades de producción grandes, un aumento de 1 °C en temperatura, aumenta el VT en 5,700 pesos.

Sobre los impactos esperados bajo los escenarios climáticos, el impacto en el VT de las unidades de producción grandes, inicialmente será negativo (-7.37% en el horizonte cercano con emisiones bajas), pero se volverá positivo en los horizontes mediano y a largo plazo (9% a 18.6%). Este cambio se explica por la influencia de la precipitación en el VT; en el corto plazo, la precipitación disminuirá, afectando el VT negativamente; sin embargo, se espera un aumento en precipitación en los horizontes a mediano y largo plazo, lo cual contribuirá a un aumento en VT para las unidades de producción grandes. En cuanto a las UP pequeñas, el impacto del CC generará, pérdidas en el VT de 8.84% a 20.5% en el escenario de emisiones bajas, y entre 8.7% y 35.8% con las emisiones altas.

DISCUSIÓN

Los contrastes regionales reflejados en indicadores socioeconómicos, son un resultado de las condiciones ambientales, las trayectorias históricas, las dinámicas de comunicación y los contextos específicos en cada región (Rahn *et al.*, 2018; Donatti *et al.*, 2019). Estas diferencias, determinan en gran medida, el impacto diferenciado del CC en el VT en las regiones mazateca y de Cuetzalan. Estos hallazgos, son consistentes con estudios previos que han analizado los impactos del CC en la agricultura mexicana usando el enfoque ricardiano. Similar a lo expuesto por Galindo *et al.* (2015) y Mendelsohn *et al.* (2010), se encuentran impactos diferenciados en las distintas regiones y tipos de unidades de producción (UP), siendo las regiones del sur y los pequeños productores, los más afectados. Las magnitudes de los impactos proyectados, son comparables con aquellas reportadas por Mendelsohn *et al.* (2010), quienes estiman pérdidas de entre 42 y 54% del VT para el año 2100. Sin embargo, Arellano (2018) señala que, el uso de valores de mercado para la tierra en el contexto de mercados incompletos, puede subestimar la relación entre el clima y la productividad agrícola, sugiriendo que los impactos podrían ser incluso mayores. La temperatura afecta el VT más que la precipitación, debido a los estrechos rangos óptimos para procesos fisiológicos clave como la floración, el desarrollo del fruto y el impacto de plagas y enfermedades (Camargo, 2010; Guerrero-Carrera *et al.*, 2020). Es probable que Cuetzalan, enfrente temperaturas por encima de estos umbrales máximos más frecuentemente, exacerbados por el

déficit de agua asociado, lo cual impactará negativamente el VT de la plantación de café incluso en el corto plazo (Thioune *et al.*, 2020).

La reducción severa y hasta total del VT en Cuetzalan en el mediano y largo plazo, es consistente con proyecciones anteriores de daño extremo en áreas no aptas para el café bajo escenarios de calentamiento en Latinoamérica (Läderach *et al.*, 2017; Imbach *et al.*, 2017). Considerando los estrechos umbrales ecofisiológicos documentados para el desarrollo óptimo del café arábica, es altamente probable que los límites irreversibles se sobrepasarán, más allá de lo cual la adaptación incremental no será suficiente, poniendo en riesgo la sustentabilidad de las formas de vida basadas en el café en esta región (Villers *et al.*, 2009; Harvey *et al.*, 2018).

Nuestros resultados sobre el impacto del cambio climático en la producción de café en México, son consistentes con estudios realizados en otras regiones de producción. Por ejemplo, Ovalle-Rivera *et al.* (2015), proyectaron una disminución significativa en las áreas aptas para el cultivo de café en Tanzania y Vietnam. Similarmente, Bunn *et al.* (2015), encontraron que el cambio climático, podría reducir el área apta para el cultivo de café en Etiopía a la mitad. Estos estudios, como el nuestro, subrayan la vulnerabilidad de los pequeños productores y la necesidad de estrategias de adaptación específicas a las regiones.

Además, López-Feldman y Mora-Rivera (2019), destacan las implicaciones distributivas del CC, encontrando aumentos significativos en pobreza y desigualdad, particularmente en el sureste. Esto es relevante, dado el contexto de marginalización de muchos productores de café y sugiere que los impactos estimados, podrían exacerbar las vulnerabilidades socioeconómicas preexistentes, como en el caso de la región mazateca. Además, se espera que los impactos sean más agudos en las UP pequeñas, con el potencial de agravarse debido a las desigualdades, los precios, las condiciones de mercado, la alta dependencia productiva y la falta de políticas específicas (Rahn *et al.*, 2018; Campbell, 2021). Por ende, la capacidad adaptativa de los pequeños productores, podría estar en grave riesgo debido al potencial deterioro del VT, las dificultades en el acceso al financiamiento, la falta de tecnologías adecuadas, la escasez de educación técnica, las limitaciones de recursos y el débil apoyo institucional en el manejo del riesgo climático por las políticas públicas (Donatti *et al.*, 2019; Avelino *et al.*, 2015).

Cuando se diseñan estrategias de adaptación, es crucial considerar la relación entre la adaptación y la resiliencia. Aunque la transición a otras actividades productivas podría ser una opción, en casos extremos en los que el cultivo de café se vuelve inviable, este cambio puede tener implicaciones profundas para la resiliencia de los hogares y las comunidades que dependen del café, erosionando el capital social, el conocimiento tradicional y la identidad cultural asociada con esta actividad (Bacon *et al.*, 2014; Campbell, 2021). Por lo tanto, las políticas de adaptación deberían buscar el fortalecimiento de la resiliencia de los sistemas de café, promoviendo estrategias que permitan a las formas de

vida basadas en el café, mantenerse lo más posible, incluyendo las prácticas agrícolas resilientes al clima, la diversificación productiva y la reducción de las vulnerabilidades estructurales que limitan la capacidad adaptativa de los hogares (Campbell, 2021). Un enfoque holístico que integre la adaptación y la resiliencia, será clave para enfrentar los desafíos del CC en el sector cafecultor, particularmente, para pequeños productores en regiones altamente vulnerables como la región mazateca y la región de Cuetzalan.

CONCLUSIONES

Este estudio, proporcionó una evaluación rigurosa de los impactos potenciales del cambio climático en la producción de café, en las regiones mazateca y de Cuetzalan en México, usando el enfoque ricardiano. El estudio integra variables climáticas, geográficas y socioeconómicas en un análisis estadístico robusto, para evaluar su interacción con el valor de la tierra. La investigación contribuye a la literatura existente, al demostrar los efectos diferenciales del cambio climático en el valor de la tierra, de acuerdo con la región y el tamaño de la unidad de producción, resaltando la vulnerabilidad de los pequeños productores de café, especialmente en la región de Cuetzalan. Los resultados advierten que, cambios en la temperatura y la precipitación, pueden tener impactos significativos y potencialmente irreversibles en la producción de café, con daños que alcanzan 100% del valor de la tierra en algunos escenarios.

Un importante aspecto a considerar, son las medidas adaptativas que los productores de café podrían adoptar, para enfrentar los impactos del cambio climático. Algunos productores, pueden elegir abandonar completamente la caficultura y cambiar a otras actividades productivas, mientras que otros, pueden decidir cambiar a variedades de café más resistentes o diversificar sus cultivos. La elección de medidas adaptativas, dependerá de la resiliencia económica, social y ecológica de los hogares productores de café, así como la implementación de políticas públicas efectivas y oportunas que apoyen esta actividad. Este estudio, abre avenidas para la investigación futura, como la exploración de bases de datos que integran variables climáticas adicionales, que son importantes para la producción de café y la expansión del alcance geográfico del estudio. Los resultados, tienen implicaciones significativas para la política pública, sugiriendo un enfoque sistémico, que reduzca la vulnerabilidad de los productores y que promueva las prácticas de manejo sustentables.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo de campo para este estudio, fue posible gracias a la valiosa colaboración de diversos individuos e instituciones. Primero, agradecemos a la cooperativa Tosepan Totataniske de Cuetzalan del Progreso, Puebla. También expresamos nuestro agradecimiento al Profesor Jesús Carrera García del municipio de Santa María Chilchotla y al Profesor Bernardo Cayetano Porras del municipio de San Juan Coatzóspam, Oaxaca, por su valioso apoyo.

REFERENCIAS

- Adams R, Rosenzweig C, Peart R. 1990. Global climate change and US agriculture. *Nature*. 345. 219–224. <https://doi.org/10.1038/345219a0>.
- Ajetomobi J, Abiodun A, Hassan R. 2011. Impacts of climate change on rice agriculture in Nigeria. *Tropical and subtropical agroecosystems*. 14(2). 613-622. <https://www.revista.ccca.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/689>.
- Arcila J, Farfán FF, Moreno AM, Salazar LF, Hincapié E. 2007. Crecimiento y Desarrollo de la planta de café. *Sistemas de producción de café en Colombia*. Caldas, Colombia: Cenicafe 21-60. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/720>.
- Arellano J. 2018. Estimating climate change damages in data scarce and non-competitive settings: a novel version of the Ricardian approach with an application to Mexico. *Research Agricultural & Applied Economics*. <http://dx.doi.org/10.22004/ag.econ.274010>. pp: 1-45.
- Avalos J, Marcelaño SML, Nájera O, Flores F. 2023. Potential Coffee Distribution in a Central-Western Region of Mexico. *Ecologies*. 4(2). 269-287. <https://doi.org/10.3390/ecologies4020018>.
- Avelino J, Cristancho M, Georgiou S, Imbach P, Aguilar L, Bornemann G., Läderach P, Anzueto F, Hruska AJ, Morales C. 2015. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008–2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Security*. 7. 303-321. <https://doi.org/10.1007/s12571-015-0446-9>.
- Bacon CM, Sundstrom WA, Flores ME, Méndez VE, Santos R, Goldoftas B, Dougherty I. 2014. Explaining the ‘hungry farmer paradox’: Smallholders and fair trade cooperatives navigate seasonality and change in Nicaragua’s corn and coffee markets. *Global Environmental Change*. 25. 133-149. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.02.005>.
- Bunn C, Läderach P, Ovalle O, Kirschke D. 2015. A bitter cup: climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. *Climate Change*. 129. 89-101. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1306-x>.
- Camargo MBP de. 2010. The impact of climatic variability and climate change on arabic coffee crop in Brazil. *Agrometeorologia*. 69(1). 239-247. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052010000100030>.
- 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>.
- Candelaria B, Ruiz O, Gallardo F, Pérez P, Martínez Á, Vargas L. 2011. Aplicación de modelos de simulación en el estudio y planificación de la agricultura, una revisión. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 14(3). 999-1010. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000300004&lng=es&nrm=iso.
- CONAGUA (Servicio Meteorológico Nacional). 2019. Normales Climatológicas por Estado. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado>
- Craparo ACW, Van Asten PJA, Läderach P, Jassogne LTP, Grab SW. 2015. Coffea arabica yields decline in Tanzania due to climate change: Global implications. *Agricultural and Forest Meteorology*. 207. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.03.005>.
- Descroix F, Snoeck J. 2004. Environmental factors suitable for coffee cultivation. *In: Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production: A Guidebook for Growers, Processors, Traders and Researchers*. Wintgens JN. Ed. Wiley-VCH: Weinheim, Germany. <https://doi.org/10.1002/9783527619627.ch6>. pp: 168–181.
- Donnatti CI, Harvey CA, Martínez-Rodríguez MR, Vignola R, Rodríguez CM. 2019. Vulnerability of smallholder farmers to climate change in Central America and Mexico: current knowledge and research gaps. *Climate and Development*. 11(3). 264-286. <https://doi.org/10.1080/17565529.2018.1442796>.
- Estrada F, Mendoza-Ponce A, Calderon-Bustamante 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>.
- Fernández A, Zavala J, Romero R, Conde AC, Trejo RI. 2015. Actualización de los escenarios

- de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica. UNIATMOS, UNAM, INECC. <https://www.researchgate.net/publication/356109909>.
- Fournier LA, Di Stéfano J F. 2004. Variaciones climáticas entre 1988 y 2001, y sus posibles efectos sobre la fenología de varias especies leñosas y el manejo de un cafetal con sombra en Ciudad Colón de Mora, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. 28(1). 101-120. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43628110>.
- 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>.
- Galindo LM, Reyes O, Alatorre JE 2015. Climate change, irrigation and agricultural activities in Mexico: A Ricardian analysis with panel data. *Journal of Development and Agricultural Economics*. 7(7). 262-273. <https://doi.org/10.5897/JDAE2015.0650>.
- 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>.
- Gbetibouo GA, Hassan RM. 2005. Measuring the economic impact of climate change on major South African field crops: a Ricardian approach. *Global and Planetary Change*. 47(2-4). 143-152. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.10.009>.
- Guerrero-Carrera J, Jaramillo-Villanueva JL, Mora-Rivera J, Bustamante-González A, Vargas-López S, Estrella-Chulim N. 2020. Impacto del cambio climático sobre la producción de café. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 23(3). 1-18. <https://dx.doi.org/10.56369/tsaes.3288>.
- Gumencindo-Alejo AL, Sánchez-Landero LA, Ortiz-Ceballos GC, Cerdán CR, Alvarado-Castillo G. 2021. Factors related to coffee quality, based on the “Cup of Excellence” contest in Mexico. *Coffee Science*. 16. e161887. <https://doi.org/10.25186/v16i.1887>.
- Harvey CA, Saborio-Rodríguez M, Martínez-Rodríguez MR, Viguera B, Chain-Guadarrama A, Vignola R, Alpizar F. 2018. Climate change impacts and adaptation among smallholder farmers in Central America. *Agriculture & Food Security*. 7(57). 1-20. <https://doi.org/10.1186/s40066-018-0209-x>.
- Henderson TP. 2020. Elite-led development and Mexico’s independent coffee organisations in the wake of the rust epidemic. *Third World Quarterly*. 41(6). 1012-1029. <https://doi.org/10.1080/01436597.2020.1729726>.
- Imbach P, Fung E, Hannah L, Navarro-Racines CE, Roubik DW, Ricketts TH, Harvey CA, Donatti CI, Läderach P, Locatelli B, Roehrdanz PR. 2017. Coupling of pollination services and coffee suitability under climate change. *PNAS*. 114(39). 10438–10442. <https://doi.org/10.1073/pnas.1617940114>.
- IPCC. (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Cambio climático [Climate change] (Informe de Síntesis ed.) [(Synthesis Report)]. Geneva, Switzerland: IPCC. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_sp.pdf
- Jaramillo-Villanueva JL, Guerrero-Carrera J, Vargas-López S, Bustamante-González A. 2022. Percepción y adaptación de productores de café al cambio climático en Puebla y Oaxaca, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 9(1).e3170. <https://doi.org/10.19136/era.a9n1.3170>.
- 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. 101177. <https://doi.org/10.1016/j.asieco.2020.101177>.
- Kabubo-Mariara J, Karanja FK. 2007. The Economic Impact of Climate Change on Kenyan Crop Agriculture: A Ricardian Approach. *Global and Planetary Change*. 57(3-4). 319-330. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.01.002>.
- Kurukulasuriya P, Mendelsohn R. 2007. A Ricardian analysis of the impact of climate change on African cropland. *Policy Research Working Paper*; No. 4305. © World Bank, Washington, DC. <https://hdl.handle.net/10986/7508>.
- Läderach P, Ramirez-Villegas J, Navarro-Racines C, Zelaya C, Martínez-Valle A, Jarvis A. 2017. Climate change adaptation of coffee production in space and time. *Climatic Change*. 141. 47-62. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1788-9>.

- Lobell DB, Schlenker W, Costa-Roberts J. 2011. Climate Trends and Global Crop Production Since 1980. *Science*. 333(6042). 616-620. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1204531>.
- López AJ, Hernández D. 2016. Cambio climático y agricultura: una revisión de la literatura con énfasis en América Latina. *El Trimestre Económico*. 83(332). 459-496. <http://dx.doi.org/10.20430/ete.v83i332.231>.
- López-Feldman A, Mora JJ. 2019. The Effects of Climate Change on Poverty and Income Distribution: A Case Study for Rural Mexico. *In: Economic Tools and Methods for the Analysis of Global Change Impacts on Agriculture and Food Security*. Quiroga, S. (eds), Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99462-8_3.
- Malagón R, Prager M. 2001. El enfoque de sistemas: Una opción para el análisis de las unidades de producción agrícola. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/20313>.
- Malhi GS, Kaur M, Kaushik P. 2021. Impact of Climate Change on Agriculture and Its Mitigation Strategies: A Review. *Sustainability*. 13(3). 1318. <https://doi.org/10.3390/su13031318>.
- Mendelsohn R, Arellano-Gonzalez J, Christensen P. 2010. A Ricardian analysis of Mexican farms. *Environment and Development Economics*. 15(2). 153-171. <https://doi.org/10.1017/S1355770X09990143>.
- Mendelsohn R, Dinar A. 2009. Climate Change and Agriculture. An economic analysis of global impacts, adaptation and distributional effects. World Bank: Massachusetts, USA. <https://doi.org/10.1093/erae/jbq027>.
- Mendelsohn R, Nordhaus WD, Shaw D. 1994. The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis. *The American Economic Review*. 84(4). 753-771. <https://www.jstor.org/stable/2118029>.
- 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>.
- Moguel P, Toledo VM. 1999. Café, luchas indígenas y sostenibilidad; el caso de México. *Ecología Política*. (18). 23-36. <https://www.jstor.org/stable/20743031>.
- Monterroso A, Fernández A, Trejo RI, Conde AC, Escandón J, Villers L, Gay C. 2014. Vulnerabilidad y adaptación a los efectos del cambio climático en México (Primera Edición ed.) Universidad Nacional Autónoma de México: México. <https://atlasclimatico.unam.mx/VyA/#1>.
- Mora J, Ramírez D, Ordaz JL, Acosta A, Serna B. 2010. Guatemala: Efectos del cambio climático sobre la agricultura. CEPAL. Subse de México: México. <https://hdl.handle.net/11362/25917>.
- Nor Diana MI, Zulkepli NA, Siwar C, Zainol MR. 2022. Farmers' Adaptation Strategies to Climate Change in Southeast Asia: A Systematic Literature Review. *Sustainability*. 14(6). 3639. <https://doi.org/10.3390/su14063639>.
- Oliver MA, Webster R. 1990. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems*. 4(3). 313-332. <https://doi.org/10.1080/02693799008941549>.
- Ordaz JL, Ramírez D, Mora J, Acosta A, Serna B. 2010. Costa Rica: Efectos del Cambio Climático sobre la Agricultura. CEPAL: México, D.F. <https://hdl.handle.net/11362/25921>.
- Ovalle-Rivera O, Läderach P, Bunn C, Obersteiner M, Schroth G. 2015. Projected Shifts in Coffee arabica Suitability among Major Global Producing Regions Due to Climate Change. *PLoS ONE*. 10(4). e0124155. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124155>.
- Rahn E, Vaast P, Läderach P, van Astenc P, Jassogne L, Ghazoul J. 2018. Exploring adaptation strategies of coffee production to climate change using a process-based mode. *Ecological Modelling*. 371. 76-89. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.01.009>.
- Raihan A, Tuspekova A. 2022. Towards sustainability: Dynamic nexus between carbon emission and its determining factors in Mexico. *Energy Nexus*. 8. 100148. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100148>.
- Ramírez-Juárez J. 2022. Seguridad alimentaria y la agricultura familiar en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 13(3). 553-565. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i3.2854>.
- Reilly J. 1999. What Does Climate Change Mean for Agriculture in Developing Countries? A Comment on Mendelsohn and Dinar. *The World Bank Research Observer*. 14(2). 295-305. <https://doi.org/10.1093/wbro/14.2.295>.

- Schlenker W, Hanemann WM, Fisher AC. 2006. The impact of global warming on U.S. agriculture: An econometric Analysis of Optimal Growing Conditions. *The Review of Economics and Statistics*. 88(1). 113-125. <https://doi.org/10.1162/rest.2006.88.1.113>.
- Schlenker W, Roberts MJ. 2009. Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change. *PNAS*. 106(37). 15594 –15598. <https://doi.org/10.1073/pnas.0906865106>.
- Stamberg ARP. 2015. Enfoque sistémico en administración rural: Estudio de la unidad de producción familiar. *Ciencias Administrativas*, (5). <https://revistas.unlp.edu.ar/CADM/article/view/1160/2100>.
- Thioune EH, Strickler S, Gallagher T, Charpagne A, Decombes, Osborne B, McCarthy J. 2020. Temperature Impacts the Response of *Coffea canephora* to Decreasing Soil Water Availability. *Tropical Plant Biology*. 13. 236-250. <https://doi.org/10.1007/s12042-020-09254-3>.
- Toledo VM, Barrera-Bassols N. 2017. Political Agroecology in Mexico: A Path toward Sustainability. *Sustainability*. 9(2). 268. <https://doi.org/10.3390/su9020268>.
- 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). 322-329. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442009000500006&lng=es&nrm=iso.
- Waha K, Zipf B, Kurukulasuriya P, Hassan RM. 2016. An agricultural survey for more than 9,500 African households. *Scientific Data*. 3. 160020. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.20>.