



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN ECONOMÍA

FACULTAD DE ECONOMÍA

## **Análisis de la gestión del riesgo climático en el sector agrícola de la Cuenca Laguna de Bustillos**

### **TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

Doctor en Economía

PRESENTA:

**Guillermo Alvarado Hernández**

TUTOR:

Dra. Rosario Haydee Pérez Espejo

Instituto de Investigaciones Económicas, UNAM

Cd. de México, Agosto, 2022



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

MIEMBROS DEL JURADO

Dr. Ángel de la Vega Navarro

Facultad de Economía, UNAM

Dr. Javier Galán Figueroa

Facultad de Estudios Superiores Acatlán, UNAM

Dr. Luis Gómez Oliver

Facultad de Economía, UNAM

Dra. Cintya Berenice Molina Rodríguez

Centro de Estudios Demográficos Urbanos y Ambientales, COLMEX

## Dedicatoria

A mi esposa Brenda, que aún en los momentos más difíciles está ahí para brindarme su apoyo.

A mi hijo Rodrigo, que llegó para motivarme a concluir mis proyectos y ser un ejemplo para él.

A mi madre, que cada día eleva una oración a Dios para que sus hijos sean bendecidos.

A mi hermana Maggie, que en cada llamada me recuerda que hay que terminar la tesis.

A la Dra. Rosario Pérez, por su paciencia y confianza en la culminación de este proyecto. No ha sido un camino fácil.

Al Dr. Javier Galán, por su acompañamiento incondicional, nada hubiese sido posible sin su ayuda.

Al Dr. Ángel de la Vega, por sus recomendaciones en la investigación y palabras de aliento en lo personal.

Al Dr. Luis Gómez y Dra. Cintya Molina, por aceptar ser parte de este proyecto.

Al personal del Laboratorio de Microdatos del INEGI. Aunque la pandemia fue un gran obstáculo para la fluidez de la información, la atención siempre estuvo presente por parte de la Dra. Natalia y Lourdes.

## Índice

Dedicatoria.....	3
Índice.....	4
Lista de Abreviaturas, acrónimos y siglas .....	6
Introducción .....	8
Capítulo I. Análisis epistemológico de la adaptación como medio de gestión del riesgo climático en la agricultura.....	14
Introducción .....	14
1.1 El Cambio Climático como problema de Investigación.....	14
1.2 Fundamentos de la adaptación como medio de gestión del riesgo climático en la agricultura .....	29
1.3 Métodos y validez de la adaptación al cambio climático en la agricultura .....	39
Capítulo II. Perspectiva teórica: modelo ricardiano .....	43
Introducción .....	43
2.1 Análisis bibliométrico.....	44
2.2 El modelo ricardiano.....	49
Especificación del modelo .....	53
2.3 Marco de referencia del modelo econométrico.....	57
2.4 Impactos del cambio climático en la agricultura desde el enfoque ricardiano .....	59
2.5 Adaptación al cambio climático bajo el enfoque ricardiano.....	63

2.6 Problemas empíricos .....	65
Capítulo III. Caracterización de la Cuenca Laguna de Bustillos .....	68
Introducción .....	68
3.1 Características físicas .....	69
3.2 Clima.....	72
3.3 Aspectos socioeconómicos .....	76
3.4 Sector agrícola .....	78
3.4 Política Climática.....	84
Capítulo IV. Análisis empírico .....	88
4.1 Método y estimación econométrica .....	89
4.2 Descripción de las variables de estudio .....	97
4.3 Resultados .....	100
4.3.1 Modelo sin adaptación .....	102
4.3.2 Modelo con adaptación: ricardiano.....	104
4.3.3 Modelos con adaptación en función de la modalidad: riego y temporal .....	109
4.4 Escenarios para la Cuenca Laguna de Bustillos .....	113
4.5 Impactos .....	117
4.5 Adaptación .....	119
Conclusiones.....	126
Bibliografía .....	132

*Lista de Abreviaturas, acrónimos y siglas*

AR	Reporte de Evaluación del IPCC
CC	Cambio climático
$CH_4$	Metano
$CO_2$	Dióxido de carbono
COP23	23ª Conferencia de las partes de la Convención Marco de la ONU sobre CC
COTAS	Comité Técnico de Aguas Subterráneas
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
GEI	Gases de efecto invernadero
GFDL-CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory – Coupled Model
IN	Ingreso neto agrícola
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
INIFAP	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias
IPCC	Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático
MEGC	Modelo de equilibrio general computable
MEP	Modelos de equilibrio parcial
MCG	Modelos de circulación general
MPI-ESM-LR	Max Plank Institute – Earth System Model – Low Resolution
$N_2O$	Óxido nitroso
OMM	Organización Meteorológica Mundial
PEA	Población económicamente activa
PIB	Producto Interno Bruto

PPM	Partículas por millón
REPDA	Registro Público de Derechos del Agua
RCP	Trayectorias de concentración representativas
SIAP	Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera
SIAT-CT	Sistema de alerta temprana contra ciclones tropicales
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
UF	Unidades de frío



## Introducción

El Cambio Climático, entendido como lo define el IPCC, plantea un sinnúmero de retos para los sistemas naturales y humanos de cara a un incremento en la temperatura en el mediano y largo plazo. Impactos recientes de fenómenos meteorológicos extremos como olas de calor, sequías, inundaciones, huracanes, incendios forestales, etc., han puesto en evidencia el alto grado de vulnerabilidad de muchos de estos sistemas, principalmente los humanos, que han sido afectados físicamente y en su patrimonio. De esta manera, el cambio climático *per se*, se identifica como una fuente importante de riesgo para los sistemas humanos y las actividades que ahí se desarrollan.

Una de las actividades con mayor vulnerabilidad frente al cambio climático, es la agricultura, por su alta dependencia de variables climáticas como temperatura y precipitación. Los impactos en el incremento de la temperatura se materializan en caída en los rendimientos de los cultivos dada una mayor evapotranspiración, necesidades no cubiertas de agua, pérdida de nutrientes del suelo y mayor presencia de plagas; también el incremento en la radiación solar afecta los tejidos de muchos cultivos antes de su maduración.

Al mismo tiempo que la agricultura cumple una función productiva, desempeña una función social. Además de la técnica, existe una cultura alrededor de dicha actividad, que se ha visto impactada por la rapidez con la que las condiciones climáticas van cambiando. La adaptación de los agricultores a la variabilidad climática resulta cada vez más compleja. Los cambios presentados desde la segunda mitad del siglo XX han excedido el rango de las experiencias y conocimientos, llevando la incertidumbre a un nivel que ocasiona incluso el abandono total de la actividad.

En este contexto, los agricultores para hacer frente a los riesgos implementan una serie de estrategias, tanto inerciales como inducidas, que coadyuven a minimizar las pérdidas económicas y maximizar los beneficios. Una de estas estrategias, presente tanto de manera inercial como inducida, es la adaptación. Esto es, en la medida que las condiciones climáticas van cambiando, los agricultores van modificando sus elecciones, en un esfuerzo por mantener su nivel de bienestar.

El éxito o fracaso de un proceso de adaptación está determinado por la construcción de capacidades. Las comunidades agrícolas que están aisladas y con recursos limitados son más vulnerables a los impactos. Aunque la construcción de capacidades comienza dentro de las unidades de producción, tiene un componente muy importante generado desde afuera; gobierno, organizaciones no gubernamentales y mercado tienen el potencial para incidir en la minimización de daños.

En la agricultura, las estrategias usualmente utilizadas para adaptarse al cambio climático son: mayor participación de métodos de riego en lugar de agricultura de temporal, rotación de cultivos, cambios a cultivos con mayor resistencia a altas temperaturas y falta de agua, uso intensivo de tecnología agrícola, mejoramiento de semilla, uso de seguros y otros instrumentos financieros de cobertura, cambio de actividad, entre otros.

El interés de esta investigación surge de la preocupación de los agricultores de la Cuenca Laguna de Bustillos, ubicada al norte de México, en el Estado de Chihuahua, ante la caída en sus ingresos por actividades agrícolas en los últimos 20 años. Existe la percepción, que la productividad por hectárea ha disminuido, sobre todo en maíz grano en temporal y cultivos de uso forrajero.

Esta idea se sustenta estadísticamente en la información agrícola del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) para la Cuenca, donde los ingresos brutos por hectárea para 2003 se estimaban en \$ 35,825, mientras que en 2019 cayeron a \$ 30,862, a precios del 2019. Aunque parte de estos ingresos perdidos se recuperan con la agregación de más terrenos habilitados para producción, hay una limitante en la disponibilidad de agua subterránea. La presencia de temperaturas más altas y disminución en la precipitación ocasionan recargas cada vez menores de los mantos freáticos.

Por lo anterior, el presente proyecto de investigación tiene como objetivo general analizar las capacidades adaptativas a la variabilidad climática, así como los impactos en el mediano y largo plazo en los ingresos netos de los agricultores de la Cuenca Laguna de Bustillos. Para ello, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1.- Revisar de manera intensiva las aportaciones teóricas y modelos que explican la adaptación de los agricultores al cambio climático. Asimismo, determinar las variables objetivo y explicativas.

2.- Caracterizar el estudio de caso, obteniendo los datos necesarios para modelar el comportamiento del fenómeno de estudio.

3.- Modelar los impactos del cambio climático en el sector agrícola de la Cuenca Laguna de Bustillos, así como su correspondiente adaptación actual y proyectada.

Se parte de la siguiente hipótesis:

*Los agricultores de la Cuenca Laguna de Bustillos no se están adaptando de manera endógena al cambio climático, lo que deriva en la disminución actual y futura de sus ingresos netos por hectárea.*

Para probar la hipótesis de investigación, se estiman los efectos marginales de la temperatura y precipitación en los ingresos netos agrícolas. Posteriormente, se proyectan los impactos en los horizontes de tiempo cercano, medio y lejano, de los cambios en las variables climáticas, de acuerdo con los modelos climáticos GFDL-CM3 y MPI-ESM-RL, con forzamientos radiativos de 4.5 y  $8.5 \frac{W}{m^2}$ . Una vez realizado esto, se describe la capacidad adaptativa de los agricultores de la Cuenca.

La relevancia de este estudio abarca tres ámbitos: social, profesional y académico. Dentro del ámbito social, se persigue generar algún tipo de conclusión que sea útil para la formulación de políticas públicas en la Cuenca Laguna de Bustillos y el Estado de Chihuahua en términos de capacidades adaptativas en la agricultura, así como generar recomendaciones a organizaciones de la sociedad civil.

En el ámbito profesional, se busca obtener un alto nivel de especialización en el tratamiento de los problemas que aquejan al sector agrícola, siendo el cambio climático uno de los más relevantes. Dentro del ámbito académico, contrastar y enriquecer un modelo teórico previamente formulado, denominado: modelo ricardiano, para contribuir a la generación de conocimiento en temas de economía agrícola.

La culminación de esta investigación ofrecerá una de las primeras visiones a escala regional en México de la importancia de dotar de capacidades adaptativas a las comunidades agrícolas,

tanto aquellas con abundantes recursos económicos como aquellas con limitaciones económicas importantes. La Cuenca de interés de esta investigación presenta ambos escenarios, por un lado, es el productor más relevante de manzana en el país, acaparando 45 % del ingreso nacional, y por el otro, tiene una zona marginada con agricultura de subsistencia.

Este proyecto se enfrenta a algunas limitaciones, tanto teóricas como empíricas. Dentro de las limitaciones teóricas, el modelo aplicado a este caso de estudio continúa con debilidades, sobre todo en el supuesto de que los precios son constantes y no tienen efectos en los ingresos netos. Dentro de las limitaciones empíricas, destaca la disponibilidad de información. Para este proyecto, se ha utilizado el Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007 a nivel microdatos; por temas de confidencialidad de parte del INEGI hay observaciones de algunas variables que no se pueden proporcionar, ocasionando un sesgo en los resultados.

La investigación se presentará en cuatro capítulos. En el primer capítulo, titulado *Análisis epistemológico de la adaptación como medio de gestión del riesgo climático en la agricultura*, se argumenta la razón por la cual el cambio climático representa un importante tema de análisis, los conceptos sobre los que se edifica, la institucionalización en políticas públicas y la dinámica de sus componentes; esto es, una descripción de cómo interactúan los componentes del sistema climático a través de sus procesos físicos y químicos. También se definen los escenarios de cambio climático.

La segunda parte del primer capítulo fundamenta los procesos adaptativos como mecanismos para reducir el riesgo climático en el sector agrícola, además de categorizar la adaptación y describir los modelos empíricos utilizados por diferentes disciplinas de las ciencias naturales y sociales para su aplicación.

El segundo capítulo, titulado *Perspectiva teórica: modelo ricardiano*, se enfoca en explicar la metodología de contraste: el Modelo Ricardiano. Parte de un análisis bibliométrico con la intención de conocer el estado actual del tema, sus autores, colaboraciones, instituciones involucradas, etc. Además, se plantea teóricamente el modelo ricardiano, partiendo de sus bases, supuestos y representación matemática. También, se describe la metodología usada para medir los impactos y categorizar las adaptaciones.

En el tercer capítulo, titulado *Caracterización de la Cuenca Laguna de Bustillos*, se describe el comportamiento de las principales variables climáticas: temperatura y precipitación, mediante las normales climáticas de 1980 al 2010. Además, se definen las variables agrícolas más importantes tanto en riego como en temporal para cada uno de los cultivos que aportan mayor valor económico a las unidades de producción.

Adicionalmente, se mapean la cobertura forestal, usos de suelo, cuerpos de agua y tenencia de la tierra, en el entendido que son aspectos que influyen en las decisiones de producción de los agricultores. Se cierra el capítulo, abordando las generalidades de la política climática en México y en la región de la Cuenca.

Finalmente, se presenta un cuarto capítulo, *Análisis empírico* que describe la naturaleza de los datos, así como el enfoque econométrico aplicado. En este capítulo se estiman los efectos marginales de la temperatura y la precipitación, sobre los ingresos netos por hectárea. Se proyectan los impactos a mediano y largo plazo del cambio climático en la cuenca, para concluir con la simulación de las adaptaciones.

## **Capítulo I. Análisis epistemológico de la adaptación como medio de gestión del riesgo climático en la agricultura**

### **Introducción**

El cambio climático antropogénico se presenta como uno de los grandes riesgos que enfrenta la humanidad del siglo XXI, por lo que resulta indispensable el papel de la ciencia para buscar alternativas que ayuden a disminuir sus efectos negativos. Entre las respuestas que el conocimiento científico ofrece con niveles de confianza altos, está el funcionamiento del clima global y las emisiones de GEI por actividades antropogénicas.

En este capítulo, se presenta las certezas e incertidumbres de la ciencia respecto al cambio climático antropogénico, así como las herramientas para medirlo. También se describe el proceso a adaptación, desde la perspectiva del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC). Para el efecto de este estudio, la adaptación se considera como una estrategia de gestión del riesgo climático para el sector agrícola. Esto implica, abordar su definición y el estado de debate actual.

Finalmente, se describen algunas de las metodologías existentes para valorar la adaptación al cambio climático en el sector agrícola, tanto desde el punto de vista biológico como desde la perspectiva de las ciencias sociales. Este apartado es importante, pues demarca el contexto del cual surge el modelo que se usará para probar la hipótesis de esta investigación.

### **1.1 El Cambio Climático como problema de Investigación**

Durante siglos, la humanidad ha intentado entender el clima. Desde el hombre del Paleolítico Inferior hasta el hombre moderno, la variabilidad climática ha sido motivo de grandes

incertidumbres, siendo la experiencia y el razonamiento sistematizado los encargados de ir ofreciendo respuestas. Hoy en día, estas respuestas se expresan en hechos probados y reproducibles con niveles de confianza altos a los que denominaremos certezas y situaciones epistémicas de las cuales hay información limitada, no probada y difícilmente reproducible a lo que denominaremos incertidumbres. Pero ¿Cuáles son esas certezas e incertidumbres?

Para hablar de certezas e incertidumbres, conviene mencionar el estado actual del consenso científico sobre el cambio climático (Lloyd & Winsberg, 2018), materializado en *el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC)*, en cuyo *Quinto Informe de Evaluación* declaró que:

El calentamiento en el sistema climático es inequívoco y, desde la década de 1950, muchos de los cambios observados no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios. La atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido, el nivel del mar se ha elevado y las concentraciones de gases de efecto invernadero han aumentado (IPCC, 2013).

Las certezas de las que disponemos se pueden caracterizar de la siguiente manera: consenso sobre el cambio climático antropogénico, funcionamiento del clima global, calentamiento de la temperatura promedio global y concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. En tanto, las principales incertidumbres las podemos encontrar en la siguiente clasificación: impactos, emisiones futuras de gases de efecto invernadero y adaptación.

Existe un consenso científico<sup>1</sup> respecto al significado del cambio climático antropogénico, legitimado de manera colectiva por el IPCC y denominado para efectos prácticos como *cambio climático*. Es decir, al cambio climático resultante de la inferencia humana en el sistema climático

---

<sup>1</sup> El consenso científico es en sí mismo un hecho epistémico único.



(Mach et al., 2016) al emitir gases de efecto invernadero (Islam & Khan, 2019), derivado de un modelo de producción basado en el uso de combustibles fósiles (Bauer & Bhan, 2018).

Estos niveles de confianza provienen de muchas líneas de evidencia basadas en observaciones de la dinámica climática de la superficie de la tierra, atmósfera, océanos, glaciares, de reconstrucciones geológicas de climas históricos, dos siglos de teoría física (Hsiang & Kopp, 2018; Islam & Khan, 2019) y de las interacciones de los sistemas humanos con el medio físico.

El *Quinto Reporte de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático* (AR5) usa la siguiente definición:

El cambio climático se refiere a un cambio en el estado del clima que puede identificarse mediante cambios en la media o variabilidad de sus propiedades y que persiste durante un periodo prolongado, generalmente décadas o más. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o forzamientos externos como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas y cambios antropogénicos persistentes en la composición de la atmósfera y el suelo (IPCC, 2013).

Los primeros estudios de cambio climático bajo la lógica actual se remontan al trabajo de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), en cuya Conferencia en Geneva en febrero de 1979, sostenía:

El cambio climático define la diferencia entre los valores medios a largo plazo de los parámetros climáticos, donde la media es tomada durante un intervalo de tiempo específico, generalmente varias décadas (WMO, 1979).

Esto es importante, bajo el argumento de que se habla de clima para referirse a periodos largos de tiempo (30 años), mientras que para periodos cortos se utiliza el término estado del

tiempo (Armstrong et al., 2018). El estado del tiempo cambia minuto a minuto, mientras que el clima lo hace en décadas.

Para los noventa, el Comité ejecutivo de la OMM ya evaluaba la posibilidad de la influencia humana en el clima. Para el primer reporte del IPCC (AR1), la preocupación aumenta y se consolidan evidencias de la influencia antropogénica en el sistema climático:

Existe la preocupación de que las actividades humanas puedan estar cambiando inadvertidamente el clima del mundo a través del efecto invernadero, por las emisiones pasadas y continuas de dióxido de carbono y otros gases que causarán un aumento de temperatura en la superficie (IPCC, 1990).

En 1994, entra en vigor la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático con el propósito de generar un mecanismo para generar políticas y conciencia pública respecto al cambio climático (o calentamiento global, término más usado en esa época). En el artículo primero del Convenio se menciona:

Por cambio climático se entiende un cambio en el clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables (UNFCCC, 1994).

Para el *Cuarto Reporte del IPCC (AR4)* aumentó el nivel de confianza respecto a la influencia de las actividades humanas en el clima, de modo que en el informe de evaluación se señaló:

La comprensión de la influencia antropogénica en el calentamiento y enfriamiento en el clima ha mejorado desde AR3, lo que lleva a un nivel de confianza muy alto de que el efecto neto promedio

global de las actividades humanas desde 1750 ha sido un forzamiento<sup>2</sup> positivo de +1.6 (+0.6 a +2.4)  $W m^{-2}$  (IPCC, 2007).

Finalmente, en AR5, el IPCC tiene más elementos para asegurar que las actividades humanas tienen una fuerte relación con los cambios en el clima:

Es extremadamente probable que más de la mitad del aumento observado de la temperatura promedio mundial de la superficie de 1951 a 2010 haya sido causado por el aumento antropogénico de gases de efecto invernadero y otros forzamientos antropogénicos juntos (IPCC, 2013).

El segundo elemento del que se tiene información con niveles altos de confianza es el funcionamiento del clima global. La Tierra obtiene energía de la radiación solar que viaja por el espacio en forma de luz visible y rayos ultravioleta y la pierde (para poder mantener el equilibrio térmico) por reflexión, emisión y radiación terrestre (Farmer & Cook, 2013; Möller, 2019); la temperatura de la atmósfera y la tierra, corresponden al presupuesto térmico.

En este proceso, la atmósfera juega dos papeles; por un lado, deja pasar rayos del Sol<sup>3</sup>, excepto los más peligrosos como los ultravioleta, que son retenidos en parte por la capa de ozono (Andrews, 2010) y por el otro, gracias a los gases de efecto invernadero (Farmer & Cook, 2013), retiene parte del calor que la tierra irradia al exterior en forma de rayos infrarrojos (Comellas, 2011). La radiación solar que logra penetrar la troposfera<sup>4</sup> y que no es reflejada (cerca del 20%), da lugar a la presencia de procesos fotoquímicos (Möller, 2019), condición para la vida en la tierra.

---

<sup>2</sup> El forzamiento radiativo es una medida de influencia de que un factor ha alterado el equilibrio entre la energía entrante y la saliente en el sistema tierra-atmósfera y es un índice de la importancia del factor como un mecanismo de cambio climático potencial. El forzamiento positivo tiende a calentar la superficie, mientras que el negativo tiende a enfriarla. Se expresan en vatios por metro cuadrado.

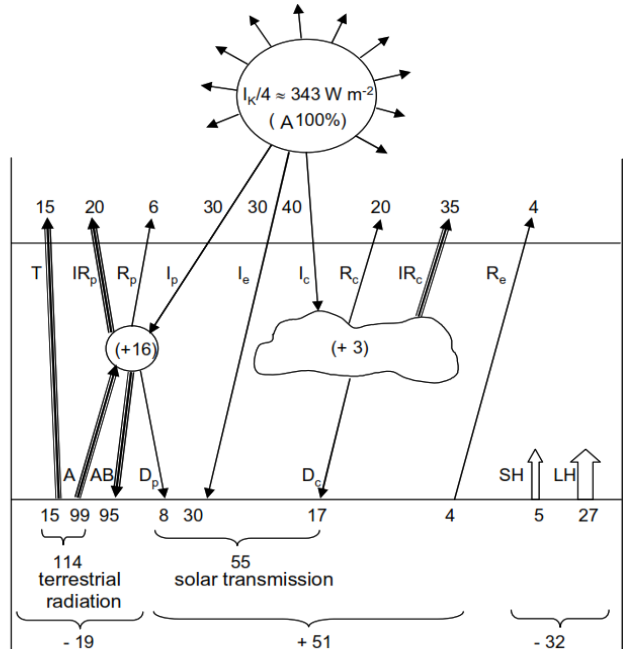
<sup>3</sup> Radiación con longitudes de onda superiores a 290-300 nm.

<sup>4</sup> Es una capa de la atmósfera donde se forman la mayor parte de las nubes y donde los fenómenos meteorológicos ocurren.

Una parte de la radiación solar absorbida por la tierra se transfiere en calor a través del agua, evaporándose al absorber la entalpía necesaria (Möller, 2019), lo que da lugar a la formación de nubes. El papel de las nubes en este proceso va más allá del ciclo del agua; las nubes tienen una gran capacidad de absorción y emisión de radiación de onda larga (Farmer & Cook, 2013), además de reflejar también la radiación solar de onda corta (Islam & Khan, 2019).

**Figura 1.1**

*Radiación y Balance de Calor del Sistema Tierra-Atmósfera*



Fuente: extraído de Möller (2019)

En la figura 1.1 se aprecian los porcentajes que se dan en relación con la radiación solar entrante ( $100\% \hat{=} 343 \text{ W m}^{-2}$ ), donde I es la interceptación de la radiación solar por partículas (p), nubes (c) y la superficie de la Tierra (e), D es la radiación difusa, R es la reflexión (albedo), IR es la disipación infrarroja al espacio, T es la radiación terrestre de regreso al espacio (sin absorción), A la absorción de radiación terrestre por moléculas, AB la radiación atmosférica posterior, SH el calor sensible y LH el calor latente (Möller, 2019).

De este modo, el clima se vuelve un sistema dinámico con múltiples interacciones compensatorias, que busca mantener su equilibrio térmico. La presencia de mayores cantidades de GEI en la atmósfera, propicia mayor retención de energía, lo que da como resultado un incremento en la temperatura. Mayor temperatura da lugar a mayor evaporación, mayor formación de nubes, que a su vez absorben y reflejan más radiación de onda larga, que no llegará a la superficie de la tierra.

La cubierta vegetal y los océanos cumplen una función importante en el ciclo del carbono y consecuentemente en el clima. Las plantas absorben CO<sub>2</sub> por medio de la fotosíntesis (Lorenz & Rattan, 2018) para nutrirse del carbono que necesitan y devuelven oxígeno puro (Comellas, 2011). Mayores concentraciones de carbono, daría lugar a mayores procesos fotosintéticos.

Asimismo, los océanos son grandes sumideros de carbono, que también emiten y absorben CO<sub>2</sub> (Tkemaladze & Makhashvili, 2016). Pero, en la medida que se siga calentando, de ser un absorbente neto de carbono, puede convertirse en un emisor neto.

Cuando abunda el gas carbónico, la temperatura aumenta, se forman más nubes, que ocultan el sol, crece una vegetación más exuberante al contar con más recursos para los procesos fotosintéticos (Dolman, 2019) y los mares atrapan una cantidad más cuantiosa de carbono (Ferrera, 2017). Se llega así a una forma de equilibrio, en que las tendencias se compensan, a base de oscilaciones que son las responsables de los cambios climáticos. Jamás hubo un tiempo en el que el clima fuera constante a largo, ni siquiera a corto plazo (Comellas, 2011).

Nuestra tercera certeza es la temperatura media global. La temperatura de la superficie es el principal componente del sistema climático (Hulley & Ghent, 2019) y está íntimamente ligada a

la física del equilibrio de energía (Hsiang & Kopp, 2018). Los determinantes principales de la temperatura global son (Robertson et al., 2018): la intensidad de la radiación solar, la composición y densidad de la atmósfera de la tierra y la capacidad de la atmósfera para absorber y retener la energía del sol.

La temperatura media global ha estado creciendo en los últimos años, con periodos cortos de temperaturas más frías o más cálidas (Robertson et al., 2018). La tasa actual de calentamiento es aproximadamente diez veces más rápido que la tasa promedio de calentamiento después de las glaciaciones de los últimos millones de años (Armstrong et al., 2018). La Organización Meteorológica Mundial (OMM), declaró que para 2017 superó  $1.1 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  en relación con los niveles preindustriales.

No obstante, el calentamiento global ha sido más rápido en la tierra que en el océano (Hsiang & Kopp, 2018) y no se ha distribuido de manera homogénea. Por ejemplo, en el hemisferio norte de 1983 a 2012 se ha tenido el periodo de 30 años más cálido de los últimos 1400 años, lo que coincide con el informe de la OMM al señalar que para 2016 se tenía registro de un incremento en  $1.32 \text{ }^{\circ}\text{C}$  en América del Norte respecto a la era preindustrial.

Es prácticamente seguro que la capa superior del océano (0-700 metros) se haya calentado entre 1971 y 2010, y es probable que se haya calentado entre la década de 1870 y 1971. El hielo, tiene un efecto de retroalimentación del sistema climático, pues refleja la luz solar. En los dos últimos decenios, los mantos de hielo de Groenlandia y la Antártida han ido perdiendo masa, los glaciares han continuado menguando en casi todo el mundo y el hielo del Ártico y el manto de nieve en primavera en el hemisferio norte han seguido reduciéndose en extensión (IPCC, 2013).

En el océano, el calentamiento se hace evidente observando la evolución de las masas de hielo dentro o en los límites del océano y el incremento en la acidificación (Ferrera, 2017). La temperatura ha afectado de manera tal a la criósfera, que a 2016 las masas de hielo del Océano Ártico se han reducido a 5,607 millones de millas cuadradas, el tamaño más pequeño registrado desde 1978 (Lloyd & Winsberg, 2018).

Las proyecciones de la temperatura media global son alarmantes en la mayoría de los escenarios y los modelos climáticos.

Es probable que, para fines del siglo XXI, la temperatura global en superficie sea superior en 1,5 °C a la del período entre 1850 y 1900 para todos los escenarios considerados de trayectorias de concentración representativas (RCP), excepto para el escenario RCP2,6. Es probable que esa temperatura sea superior en 2 °C para los escenarios RCP6,0 y RCP8,5, y más probable que improbable que sea superior en 2 °C para el escenario RCP4,5. El calentamiento continuará después de 2100 en todos los escenarios RCP, excepto para el RCP2,6. El calentamiento continuará mostrando una variabilidad entre interanual y decenal, y no será uniforme entre las regiones (IPCC, 2013).

La gran preocupación para la comunidad científica no ha sido en incremento en la temperatura media, pues eso pasa en períodos interglaciares (Brovkin et al., 2016), la alarma se enciende cuanto en los últimos 200 años las emisiones de  $CO_2$  han llegado a superar 400 ppm, 150% más que en el período preindustrial (Bauer & Bhan, 2018). La concentración  $CO_2$  en la atmósfera para 2016 alcanzaron valores máximos de  $403.3 \pm 0.1$  ppm (WMO, 2018), siendo esta nuestra cuarta certeza.

La presencia de gases de efecto invernadero en la atmósfera, principalmente  $CO_2$ , ayuda a mantener el calor en la tierra, aunque en altas concentraciones altera de manera crítica el equilibrio térmico.

Los gases de efecto invernadero contribuyeron a un calentamiento global medio de la superficie que probablemente se encuentre en el rango de 0.5 °C a 1.3 °C durante el periodo de 1951 a 2010, con las contribuciones de otros forzamientos antropogénicos. Es probable que la contribución de forzamientos naturales esté en el rango de -0.1 °C a 0.1 °C y la variabilidad interna natural entre -0.1 °C y 0.1 °C (IPCC, 2013).

Los GEI generan un forzamiento radiativo, el cual consiste en la absorción de radiación de onda larga reemitida desde la tierra y las capas inferiores de la atmósfera (Dolman, 2019), para luego emitirla en todas direcciones, incluyendo una parte de regreso a la tierra (Möller, 2019). Aunque cada gas tiene su propio forzamiento radiativo, el  $CO_2$  y el vapor de agua son los mayores contribuyentes de total (Farmer & Cook, 2013; Harde, 2017). Otros GEI potenciales son metano ( $CH_4$ ) y óxido nitroso ( $N_2O$ ).

Del  $CO_2$  emitido, aproximadamente 45 % permanece en la atmósfera, mientras que 30 % es absorbido las plantas y por los océanos (Islam & Khan, 2019), donde al reaccionar con el agua de mar para formar ácido carbónico, lo que aumenta la acidez del océano. La tasa actual de aumento en la acidez de las aguas superficiales del océano es aproximadamente cincuenta veces más rápida que el cambio histórico conocido (Armstrong et al., 2018).

Respecto al tiempo de vida del  $CO_2$  en la atmósfera, cerca de la mitad se elimina de manera natural en dentro de los primeros 100 años (Romanov, 2018), otro 30 % en algunos siglos y el restante 20% puede tardar unos miles de años (Farmer & Cook, 2013; Islam & Khan, 2019).

El  $CO_2$  se ha generado principalmente por el uso de combustibles fósiles (Islam & Khan, 2019), comenzando con el carbón del siglo XVIII, seguido del petróleo y el gas. Diversas estimaciones de emisiones de  $CO_2$  antropogénicas por la quema de combustibles fósiles, consideran la



producción de 5 a 7 billones anuales de  $CO_2$  y 1.4 a 1.9 billones de toneladas de carbono puro (Robertson et al., 2018). Otra forma de emisores de  $CO_2$  antropogénicos corresponde a cambios de uso de suelo (Islam & Khan, 2019), tales como deforestación para fines agrícolas y ganaderos.

El  $CH_4$  también tiene una alta capacidad para absorber radiación infrarroja o de onda larga. Su potencial de calentamiento es incluso mayor que el  $CO_2$  a largo plazo (100 años), puesto que una vez en la atmósfera reacciona con el ozono y produce agua y  $CO_2$ . Para 2016 alcanzo valores de  $1853 \pm 2$  ppm, que representa 257 % más comparado con los niveles preindustriales (WMO, 2018). Las actividades agrícolas, gestión de residuos uso de energías y quema de biomasa, contribuyen en las emisiones de  $CH_4$ .

Por su parte, el  $N_2O$  tiene incluso más potencial de calentamiento que el  $CH_4$  (Farmer & Cook, 2013), debido a su larga vida en la atmósfera (120 años). Para 2016 alcanzó concentraciones de  $328.9 \pm 0.1$  ppm, 122 % mayor a la era preindustrial. Las emisiones de  $N_2O$  se ven influenciadas por las actividades agrícolas, como el uso de fertilizantes nitrogenados; también los combustibles fósiles generan este gas (Islam & Khan, 2019).

Ahora bien, las incertidumbres más importantes que genera el cambio climático tienen todo que ver con los impactos esperados, las emisiones de GEI y los procesos adaptativos. Respecto a los impactos, aún existen grandes retos para tener certeza respecto a: la magnitud, la temporalidad y la localización. Hablamos de impactos cuando nos referimos a:

Los efectos en los sistemas naturales y humanos de fenómenos climáticos y climáticos extremos y del cambio climático. Los impactos generalmente se refieren a los efectos sobre la vida, los medios de vida, la salud, los ecosistemas, las economías, las sociedades, las culturas, los servicios y la infraestructura debido a la interacción de los cambios climáticos o eventos climáticos peligrosos que

ocurren dentro de un período de tiempo específico y la vulnerabilidad de una sociedad o sistema expuesto (IPCC, 2014a).

Para conocer la magnitud de impacto, podemos comenzar por determinar su grado de vulnerabilidad, entendido como un factor socioeconómico que caracteriza el daño previsible cuando ocurre un fenómeno, sin ninguna presunción sobre la probabilidad de ocurrencia del fenómeno (Torquebiau, 2016), dada una capacidad de resiliencia.

Para tener una aproximación del horizonte de ocurrencia y la localización del impacto, recurrimos a las proyecciones de los modelos climáticos. Existe una gama amplia de modelos que proyectan el clima en diferentes puntos del tiempo, principalmente a 2050 y 2100. Estos modelos pueden ser aplicados a regiones específicas, bajo determinados supuestos o condicionantes, que traen consigo un importante margen de error.

Hablamos de un modelo climático global para referirnos a una representación numérica de diversos procesos que tienen lugar en la atmósfera, el océano, la criósfera y la superficie terrestre de la Tierra. Estos modelos se basan en leyes físicas bien establecidas y observaciones de procesos físicos (Leal Filho, 2015). Los modelos climáticos que se utilizan con frecuencia son los modelos de circulación general o global (MCG).

Los MCG simulan el clima pasado y generan datos proyectados para el futuro (Nashwan & Shahid, 2020) de temperatura y precipitación (Surinder et al., 2018), utilizando como insumo parcial la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera (Surinder et al., 2018), que a su vez se vincula a escenarios futuros de población mundial, canasta energética y políticas de mitigación. Esos datos son la herramienta principal para estimar patrones en el clima futuro y estudiar los posibles cambios (Kaini et al., 2019).

**Tabla 1.1***Modelos de Circulación General*

No	Centro de modelística	Modelo de Circulación General	Versiones	Resolución (Lon/Lat en grados)
1	Beijing Climate Center, China	Beijing Climate Center- Coupled General Circulation Model	BCC-CGCM1.0	1.86° x 1.86°
		Beijing Climate Center-Climate System Model	BCC-CSM1.1(m)	2.81° x 2.81°
2	National Center for Atmospheric Research, USA	Community Climate System Model	CCSM4	1.25° x 0.94°
		Community Earth System Model	CESM1, CESM2	1.25° x 0.94°
3	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO)/ Queensland Climate Change Centre of Excellence, Australia	Australian Community Climate and Earth System Simulator	ACCESS 1.0, ACCESS 1.3	1.9° x 1.2°
4	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	Canadian earth system model	CanESM2	2.8° x 2.8°
		Atmospheric general circulation model	AGCM4/CanAM4	1.41° x 0.94°
		Current coupled global climate model	CGCM4/CanCM4	1.41° x 0.94°
5	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory-Coupled Physical Model	GFDL-CM3, GFDL-CM4	2.5° x 2.0°
		Geophysical Fluid Dynamics Laboratory-Earth System Models	GFDL-ESM2G, GFDL-ESM2M	2.5° x 2.0°
6	Max Planck Institute for Meteorology, Germany	Max Planck Institute-Earth System Model-Low Resolution	MPI-ESM-LR, MR	1.88° x 1.88°
7	National Institute of	Hadley Global Environment	HadGEM2-AO	1.875° x 1.25°
8	Met Office Hadley Centre, UK	Hadley Global Environment Model-Earth System	HadGEM2-ES	1.875° x 1.25°
		Hadley Centre Coupled Model	HadCM3	3.75° x 2.5°
9	Institut Pierre Simon Laplace, France	Institut Pierre Simon Laplace-Coupled Model-Low Resolution	IPSL-CM5A-LR	3.75° x 1.89°
		Institut Pierre Simon Laplace-Coupled Model-Mid Resolution	IPSL-CM5A-MR	2.5° x 1.27°
10	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan	Model for Interdisciplinary Research on Climate-Earth System Model	MIROC-ESM	2.81° x 2.81°
		Model for Interdisciplinary Research on Climate-Earth System Model-Chemistry Coupled	MIROC-ESM-CHEM	2.81° x 2.81°
		Model for Interdisciplinary Research on Climate	MIROC5	1.4° x 1.4°

Fuente: elaboración propia

Nota. Se citan solamente algunos centros de modelística. Se toma como referencia algunos de los modelos citados en AR5.

En la tabla 1.1 se presenta una muestra de modelos de circulación general, que a menudo se emplean en los estudios de cambio climático para proyectar los impactos. En AR5 se estiman los impactos bajo diferentes escenarios, con las proyecciones de los modelos climáticos HadCM3, IPSL-CM4, HadGEM1, HadGEM2-ES, MICROC, CanESM2, GFDL-ESM2G, GISS-E2-R, entre otros.

Uno de los centros de modelística que ha contribuido de manera importante en el conocimiento para las proyecciones del clima es el *Met Office Hadley Centre for Climate Science and Services*, ubicado en UK, cuyos modelos climáticos global y acoplado, *HadGEM* y *HadCM* respectivamente, se han utilizado ampliamente. En AR4, este modelo simula mejor las variables climáticas que los otros (Abubakari et al., 2019).

Otro de los Centros de desarrollo de modelística es el *National Center for Atmospheric Research*, en Estados Unidos. Dentro de sus modelos destacan la familia de modelos *Community Climate System Model* y *Community Earth System Model*. Los centros de desarrollo de modelos climáticos señalados en la tabla 1.8, representan una parte de las entidades que integran el *Coupled Model Intercomparison Project 5* (CMIP5). El CMIP5 contribuyó al Quinto Informe de Evaluación del IPCC (Wang et al., 2020).

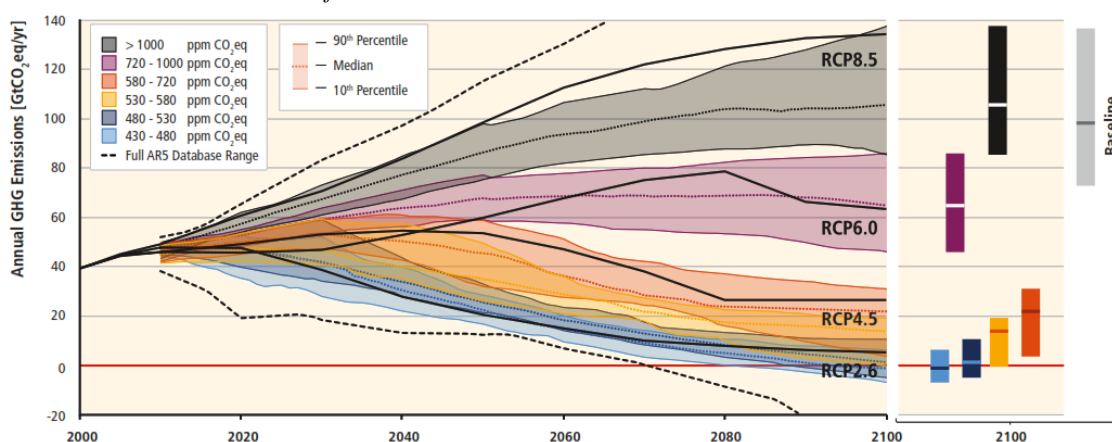
El modelo CMIP5 coordinado por el *World Climate Research Programme*, se estableció como un protocolo experimental estándar para estudiar la producción de modelos de circulación general acoplados atmósfera-océano. Los modelos de circulación general atmósfera-océano acoplados permiten que el clima simulado se ajuste a los cambios en el forzamiento climático, como el aumento del dióxido de carbono atmosférico (Barthel et al., 2020).

Ahora bien, los modelos climáticos realizan las proyecciones teniendo como insumo principal los escenarios de concentración que se derivan de los escenarios de emisiones de GEI, siendo nuestra segunda incertidumbre. Estos agrupan el forzamiento radiativo completo que incluye los gases de efecto invernadero, el ozono troposférico, aerosoles y cambio de albedo. Respecto a las emisiones de GEI, se parte de la definición del IPCC en AR5:

Un escenario de emisión es una representación plausible del desarrollo futuro de emisiones de sustancias que son potencialmente radiactivas, basadas en un conjunto de suposiciones coherentes e internamente consistentes sobre las fuerzas impulsoras (como el desarrollo demográfico y socioeconómico, el cambio tecnológico, energía y uso de la tierra) y sus relaciones clave (IPCC, 2014b).

**Figura 1.2**

*Escenarios de Emisión de Gases de Efecto Invernadero 2000-2100 en AR5*



Fuente: extraída de IPCC (2014)

En AR5 se presentan 4 escenarios, denominados RCP por sus siglas en inglés (representative concentration pathways). Estos RCP alcanzan niveles de forzamiento radiativo de 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5 vatios por metro cuadrado ( $W/m^2$ ), que a su vez corresponden a concentraciones de 450, 650, 850 y 1370 ppm de CO<sub>2</sub>eq., hacia un horizonte del 2100 (IPCC, 2014b).

El escenario más optimista RCP2.6, representa un futuro con mitigación efectiva, tasas aceptables de crecimiento de la población y una canasta energética basada en energías renovables. En este escenario, se alcanza un pico de forzamiento en 2035 de aproximadamente  $3\text{W}/\text{m}^2$  y cambia su trayectoria hacia la baja para 2100, quedando en  $2.6\text{W}/\text{m}^2$ . El caso más extremo RCP8.5, estima un escenario sin mitigación y consecuentemente con altas emisiones de GEI. El forzamiento presenta incrementos graduales hasta llegar a  $8.5\text{W}/\text{m}^2$  para 2100.

La 23<sup>a</sup> Conferencia de las Partes (COP23) de la Convención Marco sobre Cambio Climático de la ONU, que tuvo lugar en 2017 en Bonn, Alemania, marcó un hito en las negociaciones sobre agricultura (Vaitkeviciute et al., 2019). Dentro de los principales acuerdos destacan el establecimiento de metodologías para planificar y evaluar la adaptación, mejorar la salud de los suelos, mejoramiento de nutrientes, gestión del agua y seguridad alimentaria.

## **1.2 Fundamentos de la adaptación como medio de gestión del riesgo climático en la agricultura**

El cambio climático, por sí mismo representa una fuente importante de riesgo para los sistemas naturales y humanos de cara hacia el futuro. Eventos como sequías, inundaciones, tormentas, derretimiento de glaciares, erosión del suelo, cambio del paisaje, cambios en el hábitat de vida silvestre (Alves et al., 2010), actúan como estresores con efectos en el mediano y largo plazo.

El IPCC aborda el tema de riesgo en el contexto de cambio climático, partiendo de la siguiente definición:

Es el potencial de consecuencias cuando algo de valor está en juego y donde el resultado es incierto, reconociendo la diversidad de valores. El riesgo a menudo se representa como la probabilidad de ocurrencia de eventos peligrosos o tendencias multiplicadas por los impactos si ocurren estos eventos o tendencias. El riesgo resulta de la interacción de vulnerabilidad, exposición y peligro (IPCC, 2014a).

Gestionar el riesgo climático en un sistema natural o humano, implica tener claridad sobre el grado de vulnerabilidad, definido según la ubicación (Rurinda et al., 2014) y disponibilidad de recursos para adaptarse y hacer frente a los impactos. La construcción de estrategias se da en diferentes escalas y bajo diferentes enfoques. Desde la óptica del IPCC, para reducir el riesgo podemos pensar primordialmente en dos estrategias: mitigar los peligros y adaptarse.

Gestionar el riesgo mediante la adaptación (Araya et al., 2020; Kassie et al., 2015; Mulwa et al., 2017; Nadin et al., 2015) es un reto de la nueva política climática para hacer frente a los impactos, debiendo además tratarlos de manera integral y no aislada (Leal Filho, 2015), entendiendo la adaptación real y actuando dentro de las estructuras de gestión existentes.

La gestión de los riesgos del cambio climático implica decisiones de adaptación y mitigación con implicaciones para las futuras generaciones, economías y entornos (IPCC, 2014a).

La adaptación consiste en tomar medidas en el mundo real, reducir amenazas y aprovechar las oportunidades que presenta el cambio climático (Leal, 2015), a través de cambios en los procesos productivos y de organización e implementación de políticas locales, nacionales y globales (Bryant et al., 2016).

Para el IPCC, la adaptación toma el siguiente significado:

Se concibe como el proceso de ajuste al clima real o esperado y sus efectos. En los sistemas humanos, la adaptación busca moderar o evitar daños o explotar oportunidades beneficiosas. En algunos sistemas naturales, la intervención humana puede facilitar el ajuste al clima esperado y sus efectos (IPCC, 2014a).

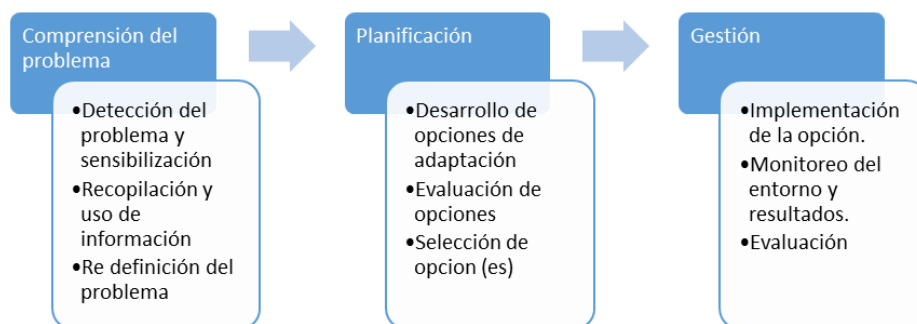
Las sociedades se han adaptado por siglos con cierto grado de éxito a la variabilidad climática, y muchos lo han hecho dinámicamente con el tiempo a medida que los parámetros del clima han cambiado o el conocimiento de ellos ha mejorado (Palutikof et al., 2013). Sin embargo, en las últimas décadas la dinámica de los cambios ha rebasado el entendimiento de las sociedades, llevándolos a un incremento en el grado de incertidumbre, poca o nula gestión del riesgo e inadaptación.

Una de las limitantes más importantes del cambio climático es la proyección de sus impactos a escala local, por lo que la mayoría de las adaptaciones en lugar de ser proactivas (ex - ante) serán reactivas (ex - post) (Dinar & Mendelsohn, 2011; Schmidt-Thomé & Klein, 2013), esto aunado al hecho de que no hay una planeación efectiva o aún peor no hay planeación.

Una adaptación proactiva es de vital importancia para hacer frente a muchos de los impactos en las próximas décadas (Palutikof et al., 2013). Ésta se puede desarrollar en tres etapas: comprensión del problema, planificación y gestión de la opción de adaptación (Leal Filho, 2015). Para entender el problema es necesario detectarlo y tener un primer acercamiento, para reunir información que posteriormente permita redefinirlo con todas sus aristas.

La planificación de la adaptación consiste en un ejercicio de análisis respecto al desarrollo de la o las opciones de adaptación, mismas que se evalúan y se selecciona la más adecuada. Finalmente, se monitorea y por medio de indicadores se evalúa su efectividad y eficacia.



**Figura 1.3***Etapas de una Adaptación Proactiva*

Fuente: elaboración propia con información de Schmidt-Thomé & Klein (2013)

El éxito de la adaptación se determina en última instancia al evaluar si reduce o no la cantidad de pérdida o daño por el cambio climático (Palutikof et al., 2013). Una adaptación proactiva puede no tener éxito, debido a barreras que intervienen en el proceso (Schmidt-Thomé & Klein, 2013). Dentro de las más importantes podemos citar las barreras de conocimiento, financieras (Ober & Sakdapolrak, 2020), políticas (Simonet & Leseur, 2019), tecnológicas y psicológicas.

Una de las razones por las que no se toman medidas para abordar el cambio climático, es porque se carece de conocimientos suficientes sobre el funcionamiento del sistema climático y las proyecciones a futuro, tendencias socioeconómicas, desarrollos tecnológicos (Palutikof et al., 2013) y métodos de adaptación (Khanal & Wilson, 2019). Esto, aunado al hecho de que en muchas latitudes existe un gran escepticismo sobre el cambio climático, justamente en las poblaciones potencialmente vulnerables.

En el ámbito de gobierno se pueden identificar barreras cognitivas, que pueden derivar tanto en negación como en pánico. En este contexto, los resultados observados pueden ser la implementación de medidas demasiado temprano, que suelen ser muy costosas y con pocos beneficios, o en otros se hacen demasiado tarde con pérdidas potenciales (Dinar & Mendelsohn, 2011).

Las barreras financieras para la adaptación se manifiestan en todas las escalas, desde la internacional hasta la individual y desde pública hasta privada. A escala internacional, ha existido una falta de financiamiento para la adaptación en países menos desarrollados y con alto grado de vulnerabilidad (Palutikof et al., 2013). A nivel individual, la falta de recursos económicos suele ir acompañada de medidas a corto plazo, que son más de supervivencia o adaptación reactiva que de una adaptación planeada. La pobreza es la barrera que mayor reto representa (Leal, 2018).

Las barreras financieras públicas consisten en las dificultades existentes para que los gobiernos prioricen el gasto a través de transferencias en políticas de adaptación al cambio climático, siendo más común las facilidades fiscales por la vía de impuestos para estas actividades (Simonet & Leseur, 2019). En el ámbito privado, difícilmente se considera la existencia de rentabilidad en proyectos con estos propósitos.

Las barreras políticas tienen que ver con los marcos legislativos y regulatorios, que a menudo usan incentivos para persuadir a otras fuerzas de cambio a hacer cumplir el cambio de políticas y ayudar a los cambios en el comportamiento social (Palutikof et al., 2013). No obstante, la limitada experiencia y rigidez burocrática, limitan la efectividad de las políticas de adaptación (Ober & Sakdapolrak, 2020).

**Figura 1.4***Barreras para una Adaptación Efectiva*

Fuente: elaboración propia con información de Simonet & Leseur (2019), Palutikof et al. (2013) y Ober & Sakdapolrak (2020)

Las barreras tecnológicas tienen que ver principalmente con la falta de acceso a infraestructura física que los proteja ante los impactos, aunque también la tecnología es útil para diseminar la información en tiempo real y ayudar a prevenir daños. En tanto, las barreras psicológicas, tienen que ver con la percepción de la sociedad respecto a la naturaleza del cambio climático y los alcances de los impactos.

Hoy en día, la adaptación al cambio climático se encuentra en la etapa de acciones a escala local, no solo motivada por políticas y leyes climáticas, sino también impulsada por la aceleración de consecuencias observadas de los problemas climáticos (Simonet & Leseur, 2019). La política de adaptación al cambio climático hoy, cambiará los ingresos y riqueza esperados, las elecciones de los consumidores y, por lo tanto, la inversión y el crecimiento económico (Catalano et al., 2020).

Respecto al alcance y escala de la adaptación, la planeación debe pensarse con medidas a corto plazo y resultados a largo plazo. Si no existe sincronía entre las temporalidades, la adaptación a corto plazo puede sesgar las potencialidades de la adaptación a largo plazo. La evaluación del éxito de la adaptación en el mediano y largo plazo puede medirse en términos de la transformación del sistema.

Uno de los sectores económicos que más ha padecido los efectos del cambio climático, es la agricultura. La alta dependencia que tiene este sector con el clima implica que las actividades y personas que ahí se desarrollan, están expuestas a los efectos de la variabilidad climática y la presencia de fenómenos meteorológicos extremos, tanto físicamente como en sus ingresos (Fleischer et al., 2008; Mendelsohn et al., 1994a; Selvaraju, 2010).

Desde sus inicios, los agricultores se habían adaptado al clima gracias a su experiencia y conocimientos adquiridos; sin embargo, en las últimas décadas se han observado cambios bruscos sin precedentes, que plantean nuevos desafíos que exceden el rango de las experiencias y requieren intervención externa (Magrin, 2015); en otras palabras, los mecanismos endógenos<sup>5</sup> de adaptación, generados en el seno de las unidades de producción, requieren potencializarse con mecanismos exógenos<sup>6</sup> que se originen en las instituciones públicas o el mercado.

Para facilitar la adaptación a las nuevas dinámicas climáticas, es indispensable desarrollar herramientas para gestionar el riesgo climático. Esto implica diseñar, evaluar y aplicar estrategias,

---

<sup>5</sup> También se le conoce como adaptación autónoma.

<sup>6</sup> A este tipo de adaptación, se le conoce también como adaptación planeada.

políticas y medidas, con acciones como los sistemas de respuesta temprana<sup>7</sup>, la diversificación estratégica, reglas de asignación de recursos, instrumentos financieros, diseño de la infraestructura y la capacidad de reconstrucción (Selvaraju, 2010).

La adaptación requiere de estrategias que garanticen pérdidas mínimas e incluso beneficios a corto y largo plazo, dado el conocimiento actual y el futuro proyectado (Leal, 2018). La decisión de adoptar una estrategia depende del conocimiento y confianza del agricultor en sus beneficios, sus escalas de operación y su riesgo (Liverpool-Tasie et al., 2019). Las estrategias de adaptación que se adoptan con mayor frecuencia en el sector agrícola se pueden clasificar en dos grupos de acuerdo con su origen: endógenas y exógenas.

Las estrategias endógenas tienen que ver con la organización de las unidades de producción y la socialización de conocimientos y experiencias. Los agricultores en el espacio se comunican entre sí para aprender sobre las prácticas de gestión de las unidades de producción agrícola (Kumar, 2011), lo que con los procesos de corrección correspondientes, resultan en beneficios individuales y colectivos.

Dentro del grupo de estrategias endógenas podemos encontrar la diversificación y modificación de cultivos, modificación de insumos, incremento del riego, gestión de mano de obra, cambio en las fechas de siembra, uso de fertilizantes, entre otras (Bryant et al., 2016; Diallo et al.; Hossain, Arshad, et al., 2019).

---

<sup>7</sup> Los sistemas de alerta temprana ayudan a la movilización oportuna de los recursos necesarios para preparar, y responder a las emergencias con el fin de salvar vidas y proteger los sistemas de subsistencia.

Las estrategias exógenas se identifican como aquellas que tienen su origen al exterior de las unidades de producción agrícola y suelen medirse en función de la capacidad de los gobiernos y la economía. La intervención del gobierno, organizaciones no gubernamentales y de mercado son importantes para materializar estos mecanismos.

Dentro de este grupo podemos encontrar el acceso al crédito (Diallo et al., 2020) y seguros (Mushtaq et al., 2020), subvenciones gubernamentales, incentivos fiscales (Catalano et al., 2020), transferencia tecnológica, acceso a información meteorológica, acceso a mercados de futuros, derechos sobre la tierra, entre otras. Ahora bien, los agricultores adoptan o no alguna de las estrategias planteadas siempre y cuando esta prometa mayores retornos a las inversiones de sus esfuerzos (Abegunde et al., 2019).

Estudiar la adaptación en el sector agrícola implica también pensar en dos escalas de análisis: el espacio y el tiempo. La escala espacial tiene que ver con factores administrativos y geográficos, siendo los más relevantes, país, región y cuenca (Hamamcioglu & Yenen, 2018). Cuanto más amplia sea la escala geográfica involucrada, mayor será la probabilidad de tener que lidiar con diferencias territoriales significativas en los sistemas de producción agrícola, las características del ecosistema y las estrategias de adaptación pertinentes (Bryant et al., 2016).

Respecto a la temporalidad, generalmente se estudia la adaptación en el largo plazo, pues cuando no hay planificación el proceso se da de manera natural y puede ser medible; aun cuando existe planificación, las acciones se van ajustando a medida que los impactos se van materializando. Asimismo, ese largo plazo se compone de acciones a corto plazo, que más que adaptación son medidas de protección a los problemas actuales (Lopez-Doriga et al., 2020), pues

los agricultores a menudo están más preocupados por su sobrevivencia y la de su familia (Bryant et al., 2016) que por el futuro distante.

La capacidad de adaptación depende del contexto y varía de un país a otro, de una comunidad a otra, entre grupos sociales e individuos, y con el tiempo (Smit & Wandel, 2006). Los determinantes más importantes para construir capacidades adaptativas en la agricultura son: el conocimiento, tecnología, recursos financieros e instituciones. Cabe destacar que estos determinantes no son independientes entre sí.

Respecto al conocimiento, una adecuada capacidad para identificar con cierto grado de precisión las manifestaciones de los cambios en el clima, la respuesta de los cultivos, mejoramiento de los suelos, gestión del agua, etc., así como el desarrollo de habilidades (Islam & Nursey-Bray, 2017), favorece la adaptación. De acuerdo a sus conocimientos, los agricultores podrán agudizar su percepción (Abera & Tesema, 2019) y tomar decisiones que los ayuden a adaptarse.

En tanto, los avances tecnológicos y de ingeniería permiten a los agricultores emplear métodos de gestión con alto grado de precisión, como telemetría en el riego, monitoreo de las propiedades físicas del suelo como la fertilidad y humedad mediante satélites, etc. (Bryant et al., 2016). La tecnología y el conocimiento van de la mano con la disponibilidad de recursos financieros, tanto por transferencias gubernamentales como del sector privado (bancario).

Las capacidades adaptativas más importantes de las instituciones es la generación de una planificación integral de adaptación al cambio climático, que incluya información agroclimática en tiempo real a los agricultores, técnica agrícola, gestión y regulación de buenas prácticas, transferencias de recursos financieros, intermediación en mercados, etc.

### 1.3 Métodos y validez de la adaptación al cambio climático en la agricultura

La tierra como insumo para la producción agrícola es uno de los vínculos más importantes entre la economía y la biosfera (Palatnik & Roson, 2012), de modo que la variabilidad climática tiene importantes efectos en su productividad y en consecuencia en su valor. En los últimos años, se ha avanzado consistentemente tanto en el desarrollo de modelos biofísicos como en modelos econométricos para analizar la adaptación de la agricultura al cambio climático.

Los modelos biofísicos se pueden clasificar en tres categorías (FAO, 2015): a) modelos de nicho, b) modelos empíricos o estadísticos, y; modelos de cultivos basados en procesos (mecánicos- fisiológicos). Los modelos biofísicos pueden incluir algunos mecanismos de adaptación como el cambio de fechas de cultivos, mejoramiento del suelo, uso de fertilizantes, etc., sin embargo, no se pueden ver otras medidas de adaptación como los estímulos económicos o relaciones productivas de los agricultores.

Los modelos de nicho analizan el comportamiento de los cultivos en condiciones específicas y en contextos espaciales concretos. Los más importantes son: EcoCrop y MaxEnt. El modelo EcoCrop, sustentado en la base de datos FAO EcoCrop, utiliza dos rangos ambientales (absoluto y óptimo) como entrada para determinar el nicho principal de un cultivo y luego produce un índice de idoneidad como salida.

Los rangos ambientales a su vez emplean dos parámetros (máximo y mínimo) por temperatura y precipitación y un parámetro de temperatura adicional. El índice se calcula durante el crecimiento del cultivo y si las variables están fuera de los umbrales absolutos, no hay condiciones para el cultivo (Ramirez-Villegas et al., 2013).



MaxEnt es un modelo de entropía máxima para estimar la distribución de especies o variedades (Jose & Nameer, 2020). El algoritmo calcula la distribución geográfica potencial más probable de una especie (Li et al., 2020), a través del software gratuito V3.3.3 k (<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/>), en función los registros de presencia y genera aleatoriamente puntos de fondo al encontrar la distribución máxima de entropía (Wei et al., 2018).

Los modelos empíricos o estadísticos son enfoques basados en una función de producción, donde se lleva a cabo una regresión usando variables explicativas para definir los efectos de las variaciones climáticas. Uno de los modelos empíricos más utilizados es Aquacrop (FAO, 2015) desarrollado por la FAO. Este modelo evalúa la productividad de la biomasa producida por unidad de agua. Las variables de entrada incluyen datos meteorológicos, que consisten en la temperatura máxima y mínima diaria, la evapotranspiración y la precipitación, así como las propiedades del suelo y la información de gestión agronómica (Silvestro et al., 2017).

Los modelos de cultivo basados en procesos replican el proceso de crecimiento y rendimiento de un cultivo con base en mecanismos físicos, químicos y fisiológicos que caracterizan el proceso evolutivo. Entre los principales modelos destacan DSSAT, GLAM, APSIM, entre otros (FAO, 2015).

El modelo DSSAT (sistema de soporte de decisión para la transferencia de tecnología agrícola) se emplea para predecir el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos bajo determinadas condiciones climáticas (Arshad et al., 2017; Mehrabi & Sepaskhah, 2019), la genética, el manejo del cultivo, el agua del suelo, carbono y nitrógeno (Hasan & Rahman, 2019). El modelo permite predecir los impactos ante cambios en las variables de entrada, para decidir las medidas de adaptación.

El modelo GLAM es un sistema que simula el desarrollo de un cultivo desde su nacimiento hasta su madurez (Matthew et al., 2015) y el impacto de la variabilidad climática en su rendimiento. El modelo se construye por medio de un submodelo de desarrollo de cultivos y un submodelo hídrico del suelo. El modelo APSIM se basa en procesos que combina módulos biofísicos y de gestión para simular diversos sistemas de cultivo (Gunarathna et al., 2019).

Los enfoques que estudian los efectos económicos del cambio climático en la agricultura son de dos tipos, principalmente: de equilibrio general y de equilibrio parcial (Mishra et al., 2016). Los primeros, suponen un equilibrio simultáneo en todos los sectores interconectados de la economía, siendo el más desarrollado el Modelo de Equilibrio General Computable (MEGC).

Los MEGC analizan como los cambios en las variables climáticas clave, temperatura y precipitación, generan impactos dinámicos en la totalidad de la economía, con efectos directos en los ingresos y el consumo (Lee et al., 2018; Trinh, 2018).

El bienestar en un MEGC se calcula directamente en términos de la utilidad del hogar y no mediante una suma abstracta de los excedentes de los productores, consumidores y contribuyentes (Palatnik & Roson, 2012). Los MEGC calibran el sistema de ecuaciones de los datos de transacciones económicas observadas y las elasticidades observadas empíricamente, proporcionando así una estimación numérica de la magnitud del efecto que se está considerando (Bernard & Vielle, 2003).

Para el caso de los modelos de equilibrio parcial (MEP), generalmente analizan una parte de la economía, ya sea un mercado o un sector. Los MEP se clasifican en dos tipos: de simulación de

crecimiento de cultivo y Ricardianos (Closset et al., 2015; Fernandez & Blanco, 2015; Tibesigwa et al., 2017).

El enfoque de simulación de crecimiento de cultivos, utiliza procesos fisiológicos dinámicos controlados de un cultivo específico, como una función de producción compleja, para simular el manejo (Capa-Morocho et al., 2016) y rendimiento dado el clima exógeno, los nutrientes y otros requisitos de entrada (Trinh, 2018).

Los modelos de enfoque ricardiano, inspirados en la obra de David Ricardo y su teoría de la renta económica (Gadedjisso-Tossou et al., 2016) sostienen que el valor de la tierra refleja el valor presente de los ingresos netos futuros y por lo tanto, está estrechamente relacionado con la productividad de la tierra (Bleakley & Chul, 2017; Galindo et al., 2015).

El modelo supone que el clima modifica la función de producción para los cultivos. Los agricultores toman como dadas variables ambientales como el clima y ajustan sus insumos y productos (Wang et al., 2014). También se asume competencia perfecta en mercados de insumos y productos (Mendelsohn et al., 1994a).

El enfoque Ricardiano, estima estadísticamente por regresión la diferencia en el ingreso de las granjas (o el valor de la tierra) que se asocia actualmente a cada grado Celsius adicional de temperatura, o a cada milímetro adicional de lluvia, controlando otros factores relevantes (Fezzi & Bateman, 2015). Una de las bondades más importantes del enfoque Ricardiano, es que es considerado como el único modelo que captura la adaptación real de los agricultores a los cambios en las variables climáticas (Chatzopoulos & Lippert, 2015; Chen et al., 2013; De Salvo et al., 2015; Maria De Salvo et al., 2013; Esteve et al., 2015).

## Capítulo II. Perspectiva teórica: modelo ricardiano

### Introducción

La importancia crucial de la economía del cambio climático es ampliamente reconocida. Los agentes económicos afectan su entorno con base en las decisiones que toman en el día a día, basados en sus motivaciones psicológicas y materiales de necesidades elementales. En este capítulo, se describe uno de los modelos más representativos de la vinculación entre economía, cambio climático y agricultura: el modelo ricardiano.

Comienza con un análisis bibliométrico, con la finalidad de conocer el estado del arte del enfoque, sus principales autores, la cooperación entre ellos, las instituciones que intervienen para que dichos estudios se conviertan en conocimiento público, los países donde se están originando estas ideas, las revistas donde se están publicando, etc.

Posteriormente, se describe el modelo desde su base conceptual, los supuestos, su representación matemática y econométrica. También se presenta un análisis de los principales hallazgos, en forma de estudios de caso, que problemas ha resuelto y cuáles han quedado en búsqueda de respuestas.

Finalmente, se presentan algunos problemas empíricos que en los primeros trabajos se generaron y posteriormente se resolvieron, y; algunos otros, que hasta la fecha no se han podido resolver, tal es el caso de los precios fijos, fertilización por carbono, correlación entre las variables climáticas, entre otros.

## 2.1 Análisis bibliométrico

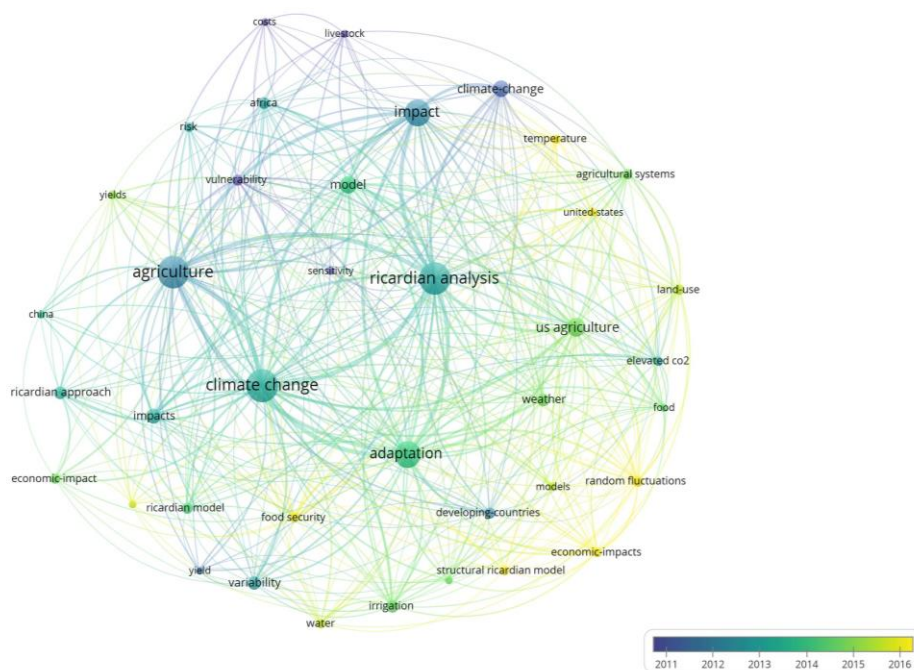
El objetivo de un análisis bibliométrico es utilizar las matemáticas y métodos estadísticos para evaluar el estado del conocimiento científico, características y tendencias (Huang et al., 2020) de un tema determinado, expresado en publicaciones (Yu et al., 2019) accesibles en las bases de datos consolidadas en internet (Lima & Bonetti, 2020). Elementos bibliográficos como el título, autores, revista de publicación, instituciones, año, países de colaboración, entre otros datos, son la materia prima para el análisis estadístico.

Los datos para este apartado provienen de dos motores de búsqueda ampliamente utilizados dentro de la comunidad científica: *The web of Science* y *Scopus*. *The Web Of Science* es un motor de búsqueda suministrado por Thomson Reuters integrado en ISI Web of knowledge, Wok. En tanto, *Scopus* es editada por la empresa Elsevier. Ambos ofrecen perfiles de autor que incluye afiliaciones, publicaciones, datos bibliográficos, referencias y detalles de número de citas.

En este ejercicio, la búsqueda se realizó por palabras clave: “*Ricardian climate change*” durante el periodo 1990 a 2020. La muestra obtenida fue de 141 artículos arbitrados. Para construir las redes bibliométricas se utilizó el software *VOSviewer* (La Scalia et al., 2019), un programa de acceso gratuito que permite visualizar los mapas a detalle (van Eck & Waltman, 2010).

**Figura 2.1**

*Co-ocurrencia de las palabras clave en la muestra*



Fuente: elaboración propia con información de *Web of Science*

El primer indicador bibliométrico corresponde a la co-ocurrencia de palabras, que nos permite identificar las tendencias de investigación. Como se aprecia en la figura 2.1, las palabras que más se repiten en la muestra de artículos son: climate change, adaptation, agriculture y Ricardian Analysis. Por lo que se estima una buena representatividad del tema que ocupa a esta investigación: adaptación del sector agrícola al cambio climático bajo el enfoque ricardiano.

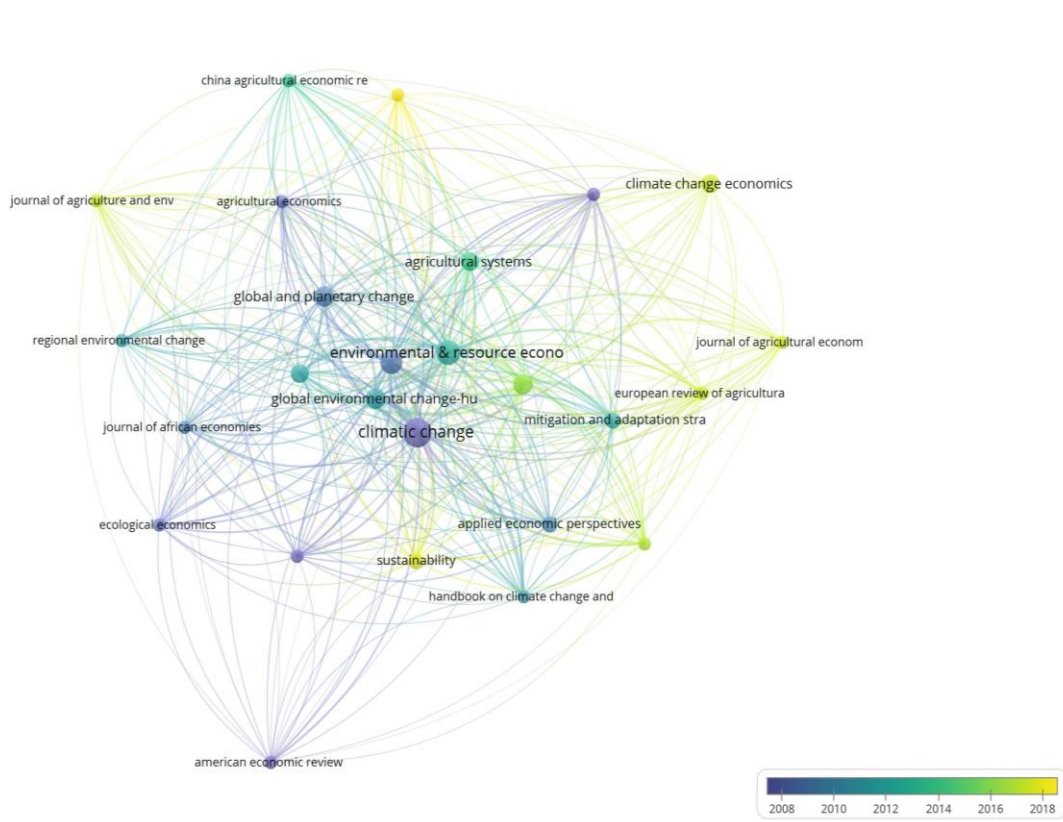
Asimismo, el mapa presenta hacia dónde va la tendencia a partir de los temas clave de investigación. Los tópicos de impactos y adaptación ocupan los núcleos más importantes de los análisis ricardianos, con nuevos estudios de caso enfocados tanto en la agricultura como ganadería, profundizando en temas como la seguridad alimentaria, gestión del riego, etc.



El impacto de los trabajos de los autores con mayor productividad en el análisis ricardiano, en otras investigaciones desarrolladas en diferentes latitudes se muestran en la figura 2.2. Podemos apreciar una relación directa entre número de artículos publicados y número de citas.

**Figura 2.3**

*Revistas en las que aparecen los artículos de la muestra*



Fuente: elaboración propia con información de *Web of Science*

El indicador de acoplamiento bibliográfico, nos indica la relación entre dos revistas en función de las referencias que comparten. En la figura 2.3 se observa que la revista en la que se publican una cantidad mayor de artículos es Climatic Change, seguida de Environmental & Resources Economics, Global and Planetary Change, Agricultural Systems, Agricultural

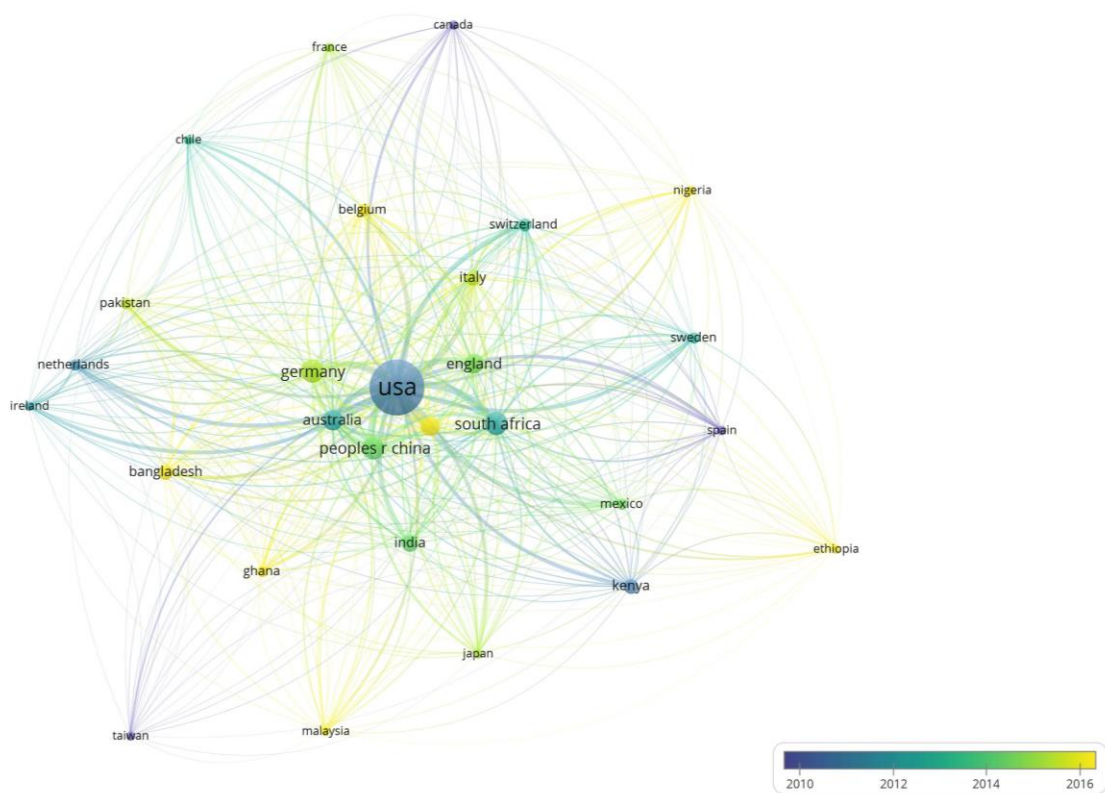


Economics, etc. Las revistas que aparecen conectadas con las líneas amarillas, son aquellas de más reciente publicación

Otro indicador importante dentro de este análisis, es el acoplamiento bibliográfico entre países. Estados Unidos ha sido el mayor promotor de los modelos ricardianos, seguido de China, Alemania, Inglaterra, Sudáfrica, Italia y Australia. La influencia del trabajo de Mendelsohn ha llegado a países asiáticos, orientales, del norte de Europa e incluso Latinoamérica, dando lugar a la publicación de una cantidad relevante de estudios empíricos.

**Figura 2.4**

*Acoplamiento bibliográfico entre países*



Fuente: elaboración propia con información de *Web of Science*

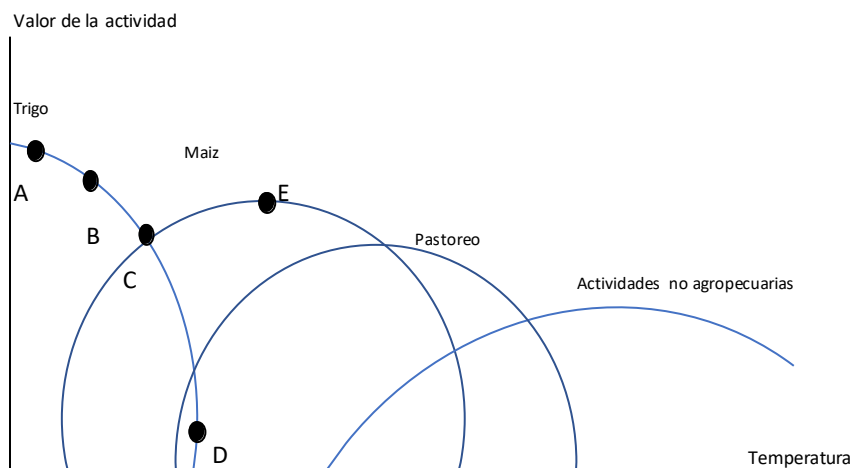


originado en la variabilidad climática, en sectores tan importantes como la agricultura. En un ambiente incierto, los agricultores cambian ligeramente sus preferencias, respecto a condiciones con certezas, al momento de maximizar sus beneficios. En este punto, el enfoque ricardiano ofrece una alternativa para entender ese comportamiento frente a los riesgos climáticos en procesos de elección y construcción de capacidades adaptativas.

El enfoque ricardiano basado en estimaciones estático comparativas (Nyuur et al., 2016), subyace en la idea de David Ricardo en su obra *On the principles of political economy and taxation* de 1817, que la renta de la tierra está determinada por los rendimientos netos de su mejor uso. En estos términos, el valor de la granja es el valor presente de las rentas futuras, por lo que si la tasa de interés, la tasa de ganancia del capital y el capital por acre son iguales para todas las parcelas, el valor de la granja será proporcional a la renta de la tierra (Gadedjisso-Tossou et al., 2016; Mendelsohn et al., 1994a).

**Figura 2.6**

*Función de Producción del Modelo Ricardiano*



Fuente: extraído de Mendelsohn, et al. (1994)

Ahora bien, uno de los factores asociados a los insumos para producción agrícola, es el clima. Lo que da pie a la hipótesis del enfoque ricardiano: el clima cambia la función de producción de los cultivos (Mendelsohn et al., 1994a). Cabe señalar que los estudios que anteceden a este enfoque, son primordialmente funciones de producción empíricas, cuyas variables dependientes son los niveles de producto en función de variables climáticas como la temperatura y precipitación.

La metodología de la función de producción, si bien introduce un punto de referencia para el análisis, tienen un sesgo inherente que tiende a sobreestimar los daños, denominado *dumbfarmer scenario* (Mendelsohn et al., 1994a). Este sesgo (Maria De Salvo et al., 2013), resulta de la omisión de una variedad de adaptaciones que los agricultores suelen hacer en respuesta a las modificaciones en las condiciones climáticas y económicas.

La crítica de Mendelsohn (1994) a sus predecesores, como se aprecia en la figura 2.6, descansa en el argumento que en las funciones de producción el valor de la actividad agrícola o pecuaria disminuye en la medida que la temperatura media se incrementa. Nótese que los puntos A, B, C y D siguen la trayectoria de la curva de la función, hasta un valor cercano a cero. Este sesgo en el enfoque de la función de producción clásica no permite la sustitución económica a medida que cambian las condiciones (R. Mendelsohn et al., 1994b). El modelo ricardiano corrige ese sesgo (Closset et al., 2015).

Lo que sugiere el enfoque ricardiano es, que en la medida que los rendimientos de cultivar trigo disminuyen (figura 2.6), los agricultores optan seleccionar otra especie más tolerante al nuevo clima que maximice sus beneficios, como el caso del maíz (salto a punto E). Una vez que observa una caída en el rendimiento del cultivo de maíz, modifica el uso del suelo a pastoreo y finalmente a actividades no agrícolas.

Este ejemplo ilustra la forma básica de incorporar la adaptación en un modelo a largo plazo, siendo la virtud más relevante del enfoque. Los modelos que contabilizan el proceso de adaptación al cambio climático, pueden proyectar más impactos económicos positivos que los modelos que la omiten (Polsky, 2004).

De este modo, el enfoque ricardiano describe lo que sucederá una vez que el agricultor haya tenido tiempo para reoptimizar sus elecciones en respuesta directa al cambio climático local (Mendelsohn & Massetti, 2017; Polsky & Easterling, 2001; Seo & Mendelsohn, 2008b).

El análisis ricardiano se construye con base en información de sección cruzada, principalmente. Esto, debido a que la adaptación se realiza a través del espacio, de la interacción entre las unidades de producción que están sujetos a la influencia de diferentes climas y cuyos ingresos netos o valores de mercado son similares o diferentes entre sí (Mendelsohn & Massetti, 2017).

El enfoque ricardiano, se construye bajo los siguientes supuestos (R. Mendelsohn et al., 1994a):

- a. El agricultor toma las variables climáticas como dadas y ajusta sus insumos y productos;
- b. Existe competencia perfecta en mercados de insumos y productos<sup>8</sup>, y;
- c. La economía se ha adaptado completamente al clima dado, de modo que los precios de la tierra han alcanzado el equilibrio a largo plazo asociado con el clima local.

---

<sup>8</sup> Cabe señalar, que en el caso de estudio difícilmente se cumple este supuesto, en el entendido de que tanto en el maíz de grano como en la manzana tiene un alto grado de concentración; en cuestión de precios, además de la presencia de eventos climatológicos extremos, la especulación juega un papel importante.

Además, al medir directamente los precios agrícolas o los ingresos, se contabilizan los impactos directos del clima en los rendimientos de diferentes cultivos, así como la sustitución indirecta de diferentes insumos y productos, la introducción de diferentes actividades y otras posibles adaptaciones a diferentes climas (T. Chatzopoulos & Lippert, 2015; R. Mendelsohn et al., 1994b).

### *Especificación del modelo*

Partimos del supuesto que cada agricultor maximiza sus ingresos por hectárea, sujetos a las condiciones exógenas de su granja. Elige el mejor uso de la tierra y los insumos para cada unidad que maximiza los ingresos netos (Gadedjisso-Tossou et al., 2016; Massetti & Mendelsohn, 2011; Seo, 2008)

$$Max\pi_i = \sum_{j \in J} P_{ij} R_{ij}(X_{ij} | W_i, S_i) - \sum_{j \in J} P_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

donde  $\pi_i$  es el ingreso neto de la granja  $i$ ,  $P_{ij}$  es un vector de los precios de entrada y salida  $R_{ij}$  es la función de producción para cada cultivo o ganado  $j$ ,  $X_{ij}$  es un vector de elecciones de insumos endógenos como semillas, fertilizantes, riego, pesticidas, mano de obra contratada y capital,  $C_i$  es un vector de variables climáticas,  $W_i$  es un vector de variables de control económico (ingreso per cápita, densidad de la población, transferencias del gobierno, etc.), y  $S_i$  es un vector de características del suelo. Tenga en cuenta que  $j$  denota un conjunto de resultados que incluye cualquier combinación de cultivos y ganado.

La diferenciación (1) con respecto a cada entrada identifica el conjunto de entradas que maximizan los ingresos netos. El locus resultante de los ingresos netos para cada conjunto de

variables exógenas es la función ricardiana. Describe cómo los ingresos netos cambiarán a medida que cambien las variables exógenas:

$$\pi^*_i = \pi(C, S|P_{ij}) \quad (2)$$

Suponiendo una competencia perfecta por la tierra (Gadedjisso-Tossou et al., 2016), su valor neto actual es una función de los ingresos futuros de cada granja:

$$V_{land} = \int_0^{\infty} \pi^*_t * e^{-rt} dt \quad (3)$$

donde  $r$  es la tasa de interés del mercado.

La literatura sugiere una relación cuadrática (en forma de colina, si es negativa) entre el valor de la tierra y las variables climáticas (Onyekuru & Marchant, 2016). En consecuencia, uno esperaría una relación cóncava entre la temperatura anual y los ingresos netos. Con el cambio de cultivos y ganado, los agricultores pueden hacer que su elección sea menos cóncava al pasar a combinaciones más ventajosas de resultados e insumos como cambios climáticos (Masseti & Mendelsohn, 2011).

Se deduce que cuanto más limitado el conjunto de opciones disponibles para un agricultor, más cóncava es la función de respuesta climática. Por supuesto, la concavidad de la función de respuesta puede ser bastante diferente dependiendo del conjunto de opciones a las que se limita un agricultor (Masseti & Mendelsohn, 2011).

Estimamos dos formas funcionales: la forma lineal y la log-lineal. La primera se expresa de la siguiente forma:

$$V_i = a + b_1T + b_2T^2 + b_3P + b_4P^2 + mG + \varepsilon_i \quad (4)$$

donde la variable dependiente,  $V_i$ , es el valor de la tierra por hectárea de tierra,  $T$  y  $P$  representan un vector de temperatura estacional y variables de precipitación,  $G$  representa un vector de variables de control relevantes (ingreso per cápita, densidad de la población, transferencias del gobierno, etc),  $\varepsilon$  es un término de error y los otros parámetros son coeficientes. En este análisis, confiamos en las variables de temperatura y precipitación estacional de invierno y verano (Fezzi & Bateman, 2015).

Y la forma log lineal:

$$\ln V_i = a + b_1 \ln T + b_2 2 \ln T + b_3 \ln P + b_4 2 \ln P + m \ln G + \varepsilon_i \quad (5)$$

La estimación del coeficiente climático puede ser usada para computar el efecto marginal del cambio climático. Con la forma lineal, el efecto del clima es aditivo (Masseti & Mendelsohn, 2011). Por ejemplo, el efecto marginal de un aumento en la temperatura, evaluado en la temperatura  $T$  es:

$$dV/dT = b_1 + b_2T \quad (6)$$

Y para la precipitación:

$$dV/dP = b_1 + b_2P \quad (7)$$

Con la forma log lineal el efecto del cambio climático es proporcional. Por ejemplo, el efecto marginal de un cambio de la temperatura es:



$$dv/dT = (b_1 + b_2T) \quad (8)$$

Y para la precipitación:

$$dv/dP = (b_1 + b_2P) \quad (9)$$

De nuevo, el efecto en una unidad de producción depende de la temperatura local y la precipitación, de modo que los impactos variarán en todo el país. Con la forma funcional log-lineal, los coeficientes determinan un cambio porcentual en el valor de la tierra.

Para estimar las funciones ricardianas, se utilizan series de tiempo, datos transversales o panel (T. Chatzopoulos & Lippert, 2015). Esto dará lugar a  $n$  ecuaciones para cada forma funcional. En cada caso, se estima una regresión de mínimos cuadrados ponderados usando la raíz cuadrada de las tierras de cultivo en un condado como el peso.

Siguiendo a Masseti y Mendelsohn (2011) se comparan los impactos marginales del clima y los impactos predichos de los escenarios climáticos seleccionados. Para estas comparaciones marginales y de bienestar, se usa la cantidad esperada  $E[F_i]$  de tierras de cultivo.

Los impactos del cambio climático se miden por la diferencia en el valor de la tierra antes y después del cambio climático o de una región a otra con diferentes condiciones climáticas. El cambio en el valor de la tierra por hectárea,  $\Delta V$ , resultante de un cambio climático de  $C_0$  a  $C_1$  se puede medir de la siguiente manera (Masseti & Mendelsohn, 2011):

$$\Delta V_{land} = V_{land}(C_1) - V_{land}(C_0) \quad (10)$$

El bienestar cambia,  $\Delta W_i$ , en consecuencia, para un país, tenemos:

$$\Delta W_i = \Delta V_i * F_i \quad (11)$$

Donde  $F_i$  es las hectáreas de tierra de cultivo en la región  $i$ . Al sumar el cambio de bienestar entre regiones, se produce el cambio de bienestar en un estado, región o país.

### 2.3 Marco de referencia del modelo econométrico

El enfoque ricardiano emplea principalmente información de corte transversal para probar sus hipótesis. En una muestra de 100 casos de estudio donde se usa este enfoque, se encontró que 80.9 % de estos estudios son de sección cruzada, 13.48 % datos de panel, 3.4 % series de tiempo y 2.22 % de alguna metodología espacial. Asimismo, 60.67 % de los estudios se basan en encuestas agrícolas de los gobiernos o encuestas aplicadas para los propósitos de los estudios a una muestra de la población objetivo; 30.34 % corresponden a Censos Agrícolas, y; 8.99 % corresponden a datos económicos de bases estadísticas. Esto respecto a la parte de los ingresos agrícolas y las adaptaciones.

La fortaleza de los datos panel respecto a sección cruzada en este tipo de estudios tiene que ver con evaluar la estabilidad de los coeficientes en el tiempo, permiten verificar si son o no consistentes (Mendelsohn & Massetti, 2017). Asimismo, resuelve el problema de variables omitidas presente en los análisis de sección cruzada y es útil para identificar las medidas adaptativas a corto plazo (Auffhammer, 2018).

Respecto a los datos climáticos, los estudios ricardianos toman periodos de tiempo relativamente grandes (de 30 a 50 años) y sacan las temperaturas promedio anuales, mensuales o

estacionales. Para 47.19 % de los estudios revisados se usan datos estacionales (promedio por estación); 22.47% datos promedio anuales; 13.48 % datos promedio de los meses octubre, enero, abril y julio, y; el resto de los estudios utiliza solo los datos promedio para dos temporadas: húmeda y seca, así como grados día. La variable de la precipitación sigue la temporalidad de la temperatura, a diferencia que no es promedio sino la suma por periodo.

Respecto a la forma funcional del modelo, los primeros estudios fueron lineales, por lo que se observa un efecto aditivo en el valor de la tierra. Estudios posteriores han encontrado en la forma funcional logarítmica lineal (log-lin) efectos proporcionales en el valor de la tierra (Fezzi & Bateman, 2015; Mendelsohn & Massetti, 2017), que se aproxima más a la realidad.

Con datos de sección transversal, las regresiones convencionales (MCO) pueden encontrarse con problemas de varianza, multicolinealidad, endogeneidad, heterocedasticidad, efectos del valor intrínseco, autocorrelación (Huong et al., 2019), entre otros.

Aunque se observa una multicolinealidad potencial en las variables climáticas y sus términos al cuadrado (Hanif et al., 2010), característica inherente al modelo, por lo que no se puede eliminar. En tanto, la multicolinealidad presentada en otras variables de control, se reduce omitiendo las variables correlacionadas.

La endogeneidad presentada en estos modelos se contrarresta con el uso de una forma reducida del modelo en lugar de una estructural (Hossain, Arshad, et al., 2019), para posteriormente aplicar mínimos cuadrados ordinarios (Fonta et al., 2018). En tanto, para minimizar la heterocedasticidad se aplica una estimación robusta para estimar los estadísticos  $t$  y las observaciones atípicas se

excluyen del análisis (Hossain, Arshad, et al., 2019). Observaciones con outliers también se excluyen.

Otros aspecto que se observa en los modelos ricardianos, es una ocurrencia natural de correlación espacial entre ubicaciones adyacentes, cuyo fundamento tiene que ver con la comunicación entre los agricultores, lo que a su vez conduce al aprendizaje de prácticas y estrategias de manejo agrícola de manera intencional o no, de tal forma que el conocimiento trasciende las fronteras y afecta los ingresos (Sadiq et al., 2019); las variables climáticas de ubicaciones vecinas también están correlacionadas.

#### **2.4 Impactos del cambio climático en la agricultura desde el enfoque ricardiano**

Los estudios generados a partir del enfoque ricardiano, han logrado colocarse en un sitio importante respecto a la literatura de impactos del cambio climático en el sector agrícola en el mediano y largo plazo, 2050 y 2100. China, África y Estados Unidos, son las regiones más estudiadas en la literatura empírica (Huang & Sim, 2018).

Los ingresos agrícolas proyectados para cada caso se basan principalmente en las proyecciones de los modelos climáticos de circulación general: *Hadley Centre (HadCM)*, *Parallel Climate Model (PCM)*, *Canadian Climate Center (CCC)* y *The Centre for de Climate System Research (CCSR)*.

Los impactos en los ingresos agrícolas desde el enfoque ricardiano varían dependiendo de la influencia de la variabilidad climática en los cultivos y la capacidad adaptativa de los agricultores. Para Norteamérica (Canadá, Estados Unidos y México), de acuerdo con los MCGs, habrá regiones que se vean beneficiadas. Se espera que para Canadá, el incremento en la temperatura (+2.68 en

2050 y +7.47 en 2100), se vea acompañada de incrementos en la precipitación y en las condiciones del suelo, lo que deriva en impactos positivos en el ingreso de hasta 200% (Weber & Hauer, 2003).

Para Estados Unidos con su vasto territorio se proyectan en general pérdidas importantes en los ingresos agrícolas (hasta -33 % en 2050 y -31.61 % en 2100) (Hendricks, 2018; Mendelsohn et al., 1994a; Mendelsohn & Reinsborough, 2007; Schlenker et al., 2006), a excepción del modelo PCM que proyecta posibles pequeños beneficios a futuro para los agricultores (Masseti & Mendelsohn, 2011) a lo largo de Estados Unidos. Las regiones más afectadas se localizan al sureste de Estados Unidos (Quaye et al., 2018), siendo estas Apalache y Rocky Mountains (Mendelsohn et al., 1994a).

Para el caso de México, el estudio más sobresaliente indica que para el 2100 se proyecta un incremento en la temperatura de +5.1°C, acompañado de un incremento de la precipitación de +1.5 %. Ante este escenario, se esperan pérdidas en los ingresos agrícolas de cerca de -54 % (Mendelsohn et al., 2009). Asimismo, los cultivos de riego son más sensibles al incremento de temperatura y disminución de precipitaciones que los de temporal.

Otra de las regiones estudiada ampliamente es China. Se estima que en el país asiático incrementarán al 2050 las temperaturas entre +1.8 °C y +2.5 °C y para 2100 entre +3.8 °C y +4.7 °C. Asimismo, se estiman variaciones en las precipitaciones para 2050 entre -3.9 % y +23.92 % y para 2100 entre +7.69 % y +18.6 %. En tanto, los impactos en los ingresos agrícolas se estiman para 2050 entre -3.90 % y +23.62 % y para 2100 entre -36.49 % y -18.86 % (Cao et al., 2018; Chen et al., 2013; Liu et al., 2004; Wang et al., 2009; Xin et al., 2013). La región que se puede beneficiar en el mediano plazo corresponde al norte de China, mientras que el sur absorberá mayores impactos negativos.

**Tabla 2.1**  
Estrategias de adaptación bajo la metalogía del enfoque recurrente (1994-2019)

País	Proyecciones Temperatura °C		Proyecciones precipitación %		Impactos en Ingresos Agrícolas %		Modelo climático	Referencia
	2040-50	2080-100	2040-50	2080-100	2040-50	2080-100		
Canadá	↗ +2.68	↗ +7.47	↗ +7.6	↗ +17.63%	↗ +200%		GCM3M1	(Weber & Hauer, 2003)
Estados Unidos	↗ +2.4	↗ +4.4	↘ -1.22	↗ +1.02	↘ -33%	↘ -10.46	ACCESS1-0, MRI-CGCM3, HadCM3, PCM, ECHO-G	(Hendricks, 2018; Massetti & Mendelsohn, 2011; Mendelsohn, Nordhaus, & Shaw, 1994b; Mendelsohn & Reinsborough, 2007; Quayle, Nadejnyak, & Hortsjko, 2018; Schlenker, Homann, & Fisher, 2006)
México	↗ +2.4	↗ +5.98	↘ -1.22	↗ +1.11	↘ -33%	↘ -10.46	MIAPR, HadCM3, PCM	(Mendelsohn, Avelino, & Christensen, 2009)
Argentina	↗ +2.4	↗ +2.5	↘ -5.4		↘ -10.0		CCC, CCSR, PCM, HadCM3, GISS ER	(Seo, 2016; Seo & Mendelsohn, 2008)
Brasil	+2.0	+3.5	+8.0		↘ -8.4	↘ -14	CCSM1C, ProyeccionesIPCC 2007	(Sanghi & Mendelsohn, 2008; Timmins, 2006)
Chile	↗ +2.4	↗ +2.5	↘ -10.4	↗ +1.0	↘ -10.4	↗ +1.0	HadCM3, GISS ER	(Gonzalez & Velasco, 2008; Seo, 2016; Seo & Mendelsohn, 2008)
Colombia	↗ +2.4	↗ +2.5	↘ -5.4		↘ -10.0		CCC, CCSR, PCM, HadCM3, GISS ER	(Seo, 2016; Seo & Mendelsohn, 2008)
Ecuador	↗ +2.4	↗ +2.5	↘ -5.4		↘ -10.0		HadCM3, GISS ER	(Seo, 2016; Seo & Mendelsohn, 2008)
Perú		↗ +3.95			↘ -8.45	↘ -13.0	ACCESS, CNRM-CM5	(Reyes, Galindo & Alatorre, 2015)
Venezuela	↗ +2.4	↗ +2.5	↘ -5.4		↘ -10.0		CCC, CCSR, PCM, HadCM3, GISS ER	(Seo, 2016; Seo & Mendelsohn, 2008)
Bangladesh	↗ +1.40	↗ +2.04	↘ -4.80	↗ +19.97	↘ -5.9	↗ +10.79	MIROC5, MRI-CGCM3	(Cao, Wong, Zhu, & Fei, 2018; Chen et al., 2013; Liu, Li, Fischer, & Sun, 2004; Wong, Huang, Zhang, & Li, 2014; Wang et al., 2009; Xin, Liu, Wu, & Zhang, 2013)
Israel	↗ +1.6	↗ +3.9	↘ -23.4	↘ -2	↗ +10.4	↗ +14.4	PCM, HadCM3, CCC	(Abidoye, Kurukulsuriya, & Mendelsohn, 2017; Hossain, Arshad, et al., 2019; Hossain, Qian, et al., 2019; Sarkar, Alam, & Gow, 2012)
Pakistan	↗ +2.95	↗ +3.14	↘ -15.47	↗ 17.20	↘ -32.66	↗ 18.86	CMCC, CCSR, CCC	(Fleischer, Lichtman, & Mendelsohn, 2008)
Sri Lanka	+1.5	↗ +1.58	↗ +4.02		+0.02	+0.18	JFM, AMJ, JAS, OND	(Ahmed & Schmitz, 2015)
Vietnam	↗ +1.30	↗ +2.6	↗ +3.4		↘ -5.0	↘ -1.19	CSIRO, PCM, CCSR	(Kurukulsuriya & Aljoudi, 2007; S. N. N. Seo, Mendelsohn, & Munasinghe, 2005)
Resto de países	+1.50	↗ +3			↘ -14.76	↗ +72	ISPN0E, BNU-ESM, CbESM, CMCC	(Abidoye, Kurukulsuriya, & Mendelsohn, 2017; Mendelsohn, 2014)
Etiopia	↗ +2.25	↗ +3.82	↘ -15.65	↗ +8.80	↘ -12.84	↘ -0.2	BNU-ESM, Can ESM, CMCC	(Abidoye, Kurukulsuriya, & Mendelsohn, 2017; Mendelsohn, 2014)
Ghana	↗ +0.5	↗ +2.0	↘ -10.4	↗ +15			CGM2, HadCM3, PCM	(Deressa & Hassan, 2009; Habtemariam, Kassa, & Gandofer, 2017)
Kenia	↗ +2.25	↗ +3.26	↘ -12.0	↘ -4.06	↘ -40.46	↗ +17.76	CGM2, HadCM3, PCM	(Etwire, Fielding, & Kohli, 2019)
Nigeria	↗ +2.0	↗ +3.9	↘ -20.0	↘ -2.0	↘ -69.00	↗ +0.03	CGM2, HadCM3, PCM	(Kabubo-Mariara & Karanja, 2007)
Sudáfrica	↗ +2.0	↗ +3.9	↘ -20.0	↘ -2.0	↘ -25.19	↗ +6.97	CGM2, HadCM3, PCM	(Fronto et al., 2018; Ouykura & Marchant, 2016)
Resto de África	↗ +1.6	↗ +3.6	↘ -9.9	↗ +1.1	↘ -44.1	↗ +17.3	CGM2, HadCM3, PCM	(Benhin, 2008; Goetliwano & Hassan, 2005; Tibesigwa, Visser, & Turpie, 2015, 2017)
	↗ +2.5	↗ +6.7	↘ -30.02	↗ +16.9	↘ -150.7	↘ -9.82	CGM2, HadCM3, PCM	(Hasson, 2010; Kurukulsuriya et al., 2006; S. N. Seo, 2010; S. N. Seo, Mendelsohn, Dinar, Hassan, & Kurukulsuriya, 2009; Zinyengere, Crespo, & Hochgartner, 2013)

Fuente: elaboración propia

En el caso de Asia (exceptuando a China), los modelos climáticos proyectan incrementos de temperatura entre +1.3 °C y +3.9 °C para 2050 y entre +2.6 °C y +5.8 °C para 2100. A su vez, las precipitaciones pueden alcanzar decrementos de hasta -23 % en algunas regiones para 2050 y -28.1 % para 2100; aunque hay modelos que predicen incremento en la precipitación en algunas regiones.

Respecto a los impactos, se esperan resultados mixtos; para Bangladesh se proyectan impactos en los ingresos agrícolas entre -5.9 % y +10.79 % para 2050 y entre -19.21 % y +22.86 % para 2100 (Abidoye, Kurukulasuriya, et al., 2017; Hossain, Qian, et al., 2019; Sarker et al., 2012). Israel, entre +1 % y +14.4 % para 2050 y +10.9 % y 73.4 % para 2100. Paquistán +0.02 % para 2050 y +0.18 % para 2100 (Fleischer et al., 2008).

Para Sri Lanka se proyectan impactos entre -6.2 % y -4 % para 2050 y -14.76 % y +72 % para 2100 (Abidoye, Kurukulasuriya, et al., 2017; Kurukulasuriya & Ajwad, 2007; Seo et al., 2005). Vietnam impactos entre -5 % y -1.19 % para 2050 y entre -12.84 % y -0.2 % para 2100. Para el resto de los países de Asia se esperan impactos a 2050 entre -13.3 % y +2.7 % y para 2100 entre -28.1 % y -8 % (Abidoye, Kurukulasuriya, et al., 2017; Mendelsohn, 2014).

África, es la región con mayor número de estudios de caso bajo el enfoque ricardiano. Para África, se esperan incrementos en la temperatura para 2050 entre +0.5 °C y +3.9 °C y hasta +9.6 °C para fin de siglo. Respecto a la precipitación, los modelos climáticos aportar resultados mixtos, entre -20 % y +15 % para 2050 y para 2100 entre -34.51 % y +21.74 %. El país que probablemente se vea más afectado es Etiopía, con pérdidas en los ingresos agrícolas de hasta -303.27 % para 2050 y -418.01 % para el 2100. En general, se identifican pérdidas potenciales en todo el

continente africano, que pueden derivar en migraciones masivas de personas, pues no hay actividades conexas a la agricultura que mitiguen los impactos.

## 2.5 Adaptación al cambio climático bajo el enfoque ricardiano

Los estudios ricardianos analizados sugieren diferentes adaptaciones que están implícitos en los modelos. Las más importantes son la diversificación y cambio de cultivo, irrigación y tecnología agrícola. Previamente, ya se habló de que las estrategias de adaptación a largo plazo, dependen de la manera en la que se aborden los problemas acorto plazo.

**Figura 2.7**

*Principales Adaptaciones al Cambio Climático en el Sector Agrícola*



Fuente: elaboración propia

A más de 20 años de la aplicación de modelos ricardianos para analizar los efectos del cambio climático en la agricultura, se han presentado una serie de hallazgos que conviene mencionar. Todos los estudios muestran que el impacto marginal del clima sobre los ingresos netos o el valor



de las tierras agrícolas depende del clima subyacente (valores de referencia). Un aumento marginal de la temperatura es beneficioso en climas frío siempre y cuando estén en altas latitudes o grandes altitudes, neutro en climas templados y nocivo en climas tropicales de latitudes bajas (R. O. Mendelsohn & Massetti, 2017).

Cuando se realiza el análisis por tipo de cultivos, se encuentra que los cultivos de temporal son más sensibles a los cambios en las precipitaciones que los cultivos de riego (Fleischer et al., 2008; Galindo, Reyes, & Alatorre, 2015a; R. O. Mendelsohn & Massetti, 2017; Ouedraogo, Leopold, & Dembele, 2006). No obstante, los cultivos de riego serán más importantes en los escenarios futuros que las de temporal.

Otro hallazgo relevante es la variabilidad de la temperatura y los patrones de precipitación intraestacional. Las lluvias en verano son beneficiosas, mientras que en invierno son dañinas (R. Mendelsohn et al., 1994a) para algunas regiones. En tanto, el aumento de las temperaturas en invierno incrementa los ingresos netos, mientras que las altas temperaturas de verano tienen un impacto negativo en los ingresos de los cultivos (Kabubo-Mariara & Karanja, 2007).

Se capturó una amplia gama de estrategias endógenas de adaptación. La selección de los cultivos es la medida de adaptación más común (Kabubo-Mariara & Karanja, 2007; R. O. Mendelsohn & Massetti, 2017; Seo & Mendelsohn, 2008) y se complementa con una gestión eficaz del agua (Fleischer et al., 2008; Kabubo-Mariara & Karanja, 2007), transición a esquemas de riego (Nhemachena & Mano, 2007), adopción de tecnología (Closset et al., 2015; Van Passel, Massetti, & Mendelsohn, 2012) y adopción de razas de cultivos más resistentes.

También se encontraron estrategias de adaptación generadas desde afuera, como es el acceso a mercados (Fleischer et al., 2008), asignación de derechos de propiedad tanto del agua como la tierra, créditos bancarios y gubernamentales (R. Mendelsohn & Dinar, 2003), adquisición de seguros, etc.

Bajo escenarios más cálidos, los agricultores de los trópicos se alejaran más de los cultivos hacia el ganado, pues las proyecciones parecieran indicar mayores rendimientos (Mendelsohn & Massetti, 2017). Las tierras de riego son más tolerantes a las bajas precipitaciones y altas temperaturas que las de temporal (Bozzola et al., 2018).

## **2.6 Problemas empíricos**

El enfoque ricardiano ha sido sometido a prueba en numerosas ocasiones, con resultados que difieren entre sí, tanto en la magnitud como dirección de los impactos. Esto obedece tanto a cuestiones metodológicas, disponibilidad de información y capacidades adaptativas de cada región. Aunque las variables climáticas puedan comportarse de manera similar, sus capacidades adaptativas difieren (Huang & Sim, 2018).

Los problemas empíricos más relevantes de este enfoque son: variables omitidas, precios, efectos de fertilización de carbono, gestión del agua, medición del clima, el uso de valores de tierras agrícolas versus ingreso neto anual, datos de panel versus un una sola sección transversal, forma funcional y correlación espacial (Fezzi & Bateman, 2015; R. O. Mendelsohn & Massetti, 2017).

La omisión de variables (climáticas e ingresos netos) lleva a sesgar los resultados (Fezzi & Bateman, 2015). Los estudios ricardianos deben tener cuidado de incluir variables espaciales

invariantes en el tiempo (R. O. Mendelsohn & Massetti, 2017), como la latitud, la altitud, el terreno y los suelos, así como variables en el tiempo, como el valor de la vivienda, la densidad de población, los invernaderos, los ingresos, las transferencias gubernamentales y otras variables climáticas.

Otro problema de los modelos ricardianos es la suposición implícita de precios fijos (Fezzi & Bateman, 2015). El argumento es que, dentro de una sección transversal, la mayoría de las unidades de producción se enfrentan a los mismos precios, lo que dificulta que un estudio ricardiano no detecte los efectos en los precios.

Los estudios ricardianos de corte transversal tampoco logran medir la fertilización con  $CO_2$  porque las concentraciones de  $CO_2$  son efectivamente las mismas en la mayoría de las muestras. Solo los experimentos controlados en invernaderos o en los campos pueden medir los impactos de la fertilización con  $CO_2$  (R. O. Mendelsohn & Massetti, 2017).

Otro desafío para los enfoques ricardianos es incorporar la irrigación en el modelo (Darwin, 1999; Schlenker, Hanemann, & Fisher, 2006). Los mercados de agua son escasos por lo que difícilmente se puede asignar un precio a este recurso y la mayoría de los agricultores simplemente tienen derecho a una cantidad fija de agua superficial. El agua subterránea está disponible para muchos agricultores a un costo de bombeo, no obstante, rara vez se mide (Massetti & Mendelsohn, 2011).

La medición del clima implica otro reto para los modelos ricardianos; la mayoría de los estudios captura la temperatura media y la precipitación para cada una de las cuatro estaciones, utilizando tanto términos lineales como cuadráticos (R. Mendelsohn et al., 1994a). Adicionalmente, se han

incorporado a los estudios temperaturas máximas (Schlenker et al., 2006), varianza interanual y diurna (R. Mendelsohn & Dinar, 1999) y los grados días durante la temporada de crecimiento (R. O. Mendelsohn & Massetti, 2017) del cultivo. Cabe señalar que los estudios que utilizan la temperatura media anual reportan menos efectos negativos que los que utilizan la temperatura media estacional (Huang & Sim, 2018).

Usar valores de tierras de cultivo puede generar un sesgo, debido a que no siempre refleja el valor de desarrollo de una granja en otro uso de la tierra. Aunque el uso sea agrícola, puede contar con otros atributos como la cercanía a una ciudad. En estos casos, los valores de las tierras de cultivo superarían el valor de producción de los alimentos en esa tierra (R. O. Mendelsohn & Massetti, 2017). Por el contrario, las medidas anuales de ingresos netos no reflejan el desarrollo valor de la granja, aunque están influenciados por el clima real en el año de observación.

Finalmente, encontramos una diversidad de estudios que corte transversal que estiman un modelo ricardiano utilizando datos por uno o dos años. Sin embargo, los datos del panel pueden permitir probar la estabilidad de los coeficientes a lo largo del tiempo y distinguir entre los efectos a largo plazo, que son consistentes en el tiempo, y los efectos a corto plazo, que pueden variar con el clima o el tiempo (R. O. Mendelsohn & Massetti, 2017; Schlenker et al., 2006).

### **Capítulo III. Caracterización de la Cuenca Laguna de Bustillos**

#### **Introducción**

Desde una visión del territorio, este estudio de caso se delimita al análisis de una cuenca hidrológica, cuyos límites naturales y políticos permiten abordar sus componentes como una unidad homogénea. La cuenca, como unidad de gestión, se ha vuelto cada vez más importante para enfrentar los desafíos que implican el crecimiento de la población, su creciente demanda de recursos naturales (Squires et al., 2015) y la degradación del medio ambiente. En temas de adaptación cambio climático, el enfoque en esta escala nos ayuda a estudiar con mayor precisión los posibles impactos económicos (Hamamcioglu & Yenen, 2018).

Ahora bien, en esta unidad de territorio, además de producirse una interrelación e interdependencia entre los sistemas físicos (recursos naturales) y bióticos (flora y fauna), se amplía a los sistemas socioeconómicos formados por los usuarios de las cuencas e interventores externos (Dourojeanni et al., 2002). La pretensión de este capítulo es abordar los mecanismos propios de cada uno de estos sistemas y sus interrelaciones.

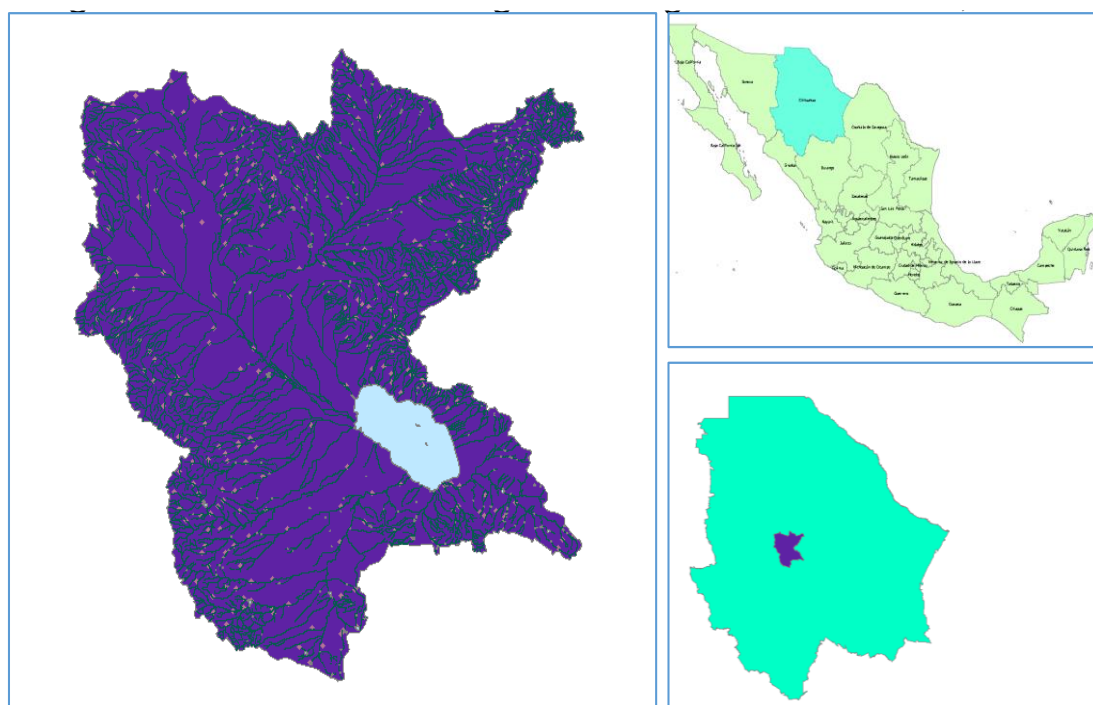
Para tal fin, la exposición se presenta en cuatro apartados. En el primero se menciona la situación geográfica, geológica y de uso de suelo de la cuenca. En el segundo, la evolución en los últimos 30 años de las principales variables climáticas: temperatura y precipitación. En el tercer apartado, se presenta la situación socioeconómica de la Cuenca, así como los actores más influyentes en las decisiones políticas y económicas. Finalmente, se presenta la evolución y situación actual del sector agrícola a nivel cuenca.

### 3.1 Características físicas

La Cuenca Hidrológica *Laguna de Bustillos* o *Lago de Bustillos*<sup>9</sup> se ubica en el Estado de Chihuahua, entre las coordenadas 28°13'19'' y 28°59'35'' de latitud norte y 106°34'39'' y 107°10'33'' de longitud oeste. Comprende la superficie de 3,227 km<sup>2</sup> y su punto más alto desde donde comienzan los caudales de drenaje de los escurrimientos está a 2,835 m.s.n.m. se sitúa dentro de la Región Hidrológica No. 34, conocida como *Cuencas Cerradas del Norte*. Territorialmente, el municipio de Cuauhtémoc cubre 83% de la Cuenca, Riva Palacio el 10%, Bachiniva el 5% y Cusihuirachi el resto.

**Figura 3.1**

*Localización de la Cuenca Hidrográfica Laguna de Bustillos*



Fuente: elaboración propia

<sup>9</sup> De acuerdo a la clasificación de CONAGUA es la cuenca 3421.

Es una cuenca cerrada delimitada hacia el oeste y noroeste por el parteaguas que forman las sierras Pedernales, San Juan, Salitreña Chuchupate; al sur por los cerros la Bufa y Chichihuite; al oriente por la sierra Azul, los cerros El Venado y Los Gavilanes y al nororiente por los cerros Blanco, Los Hidalgos y Rebote.

La estructura de su relieve da lugar a una gran Cuenca de drenaje endorreico, cuyas escorrentías en pequeños arroyos<sup>10</sup> alimentan la Laguna de Bustillos, ubicada en cuenca baja, tal como se aprecia en la figura 3.2. Mientras en cuenca alta se originan las escorrentías, en la parte baja se desarrollan las actividades antropogénicas más importantes de la cuenca, tal como la agricultura de riesgo y la industria. En cuenca media, suelen encontrarse tierras agrícolas de temporal y actividades ganaderas.

En la zona de las sierras la infiltración se realiza a través de las fallas, fracturas y diaclasas; en los valles ocurre a través de los espacios abiertos entre granulometría que los constituyen (Conagua, 2015; García Cortés, 2014). Asimismo, las zonas norte y occidental presentan de baja a media permeabilidad, por lo que los escurrimientos adquieren velocidad para conducir al caudal a las partes del valle.

La Laguna de Bustillos almacena la mayor parte de la disponibilidad de aguas superficiales, aunado a los bordos, presas, arroyos y otras pequeñas corrientes a lo largo de la Cuenca, sumando una disponibilidad anual estimada de 64.95 millones de metros cúbicos de agua (Conagua, 2016). Sin embargo, las aguas superficiales se encuentran en una fase crítica de contaminación, originada

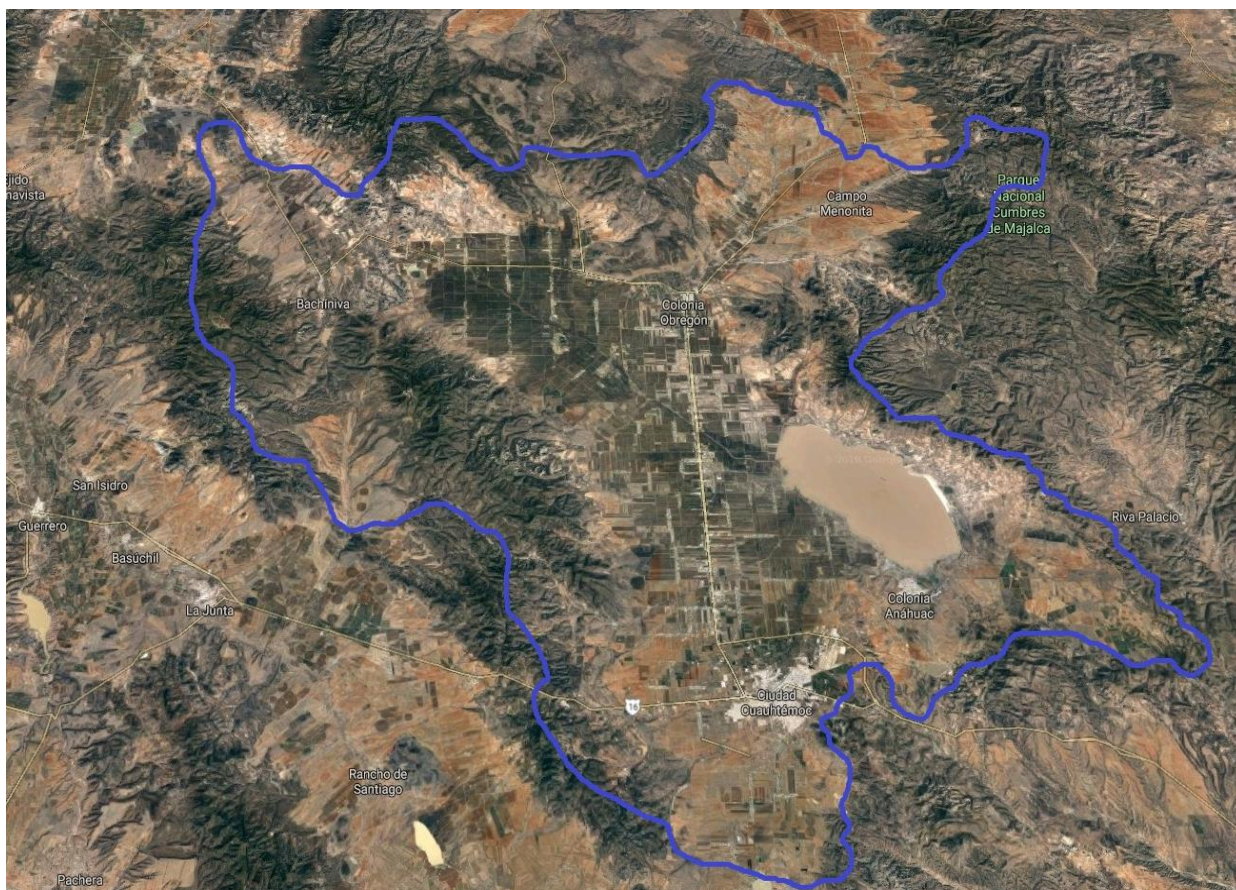
---

<sup>10</sup> Principalmente los arroyos Santa Elena y Ojo Caliente.

por el vertedero de desechos industriales, residuos urbanos y las practicas agropecuarias (Amado Alvarez et al., 2016).

### Figura 3.2

*Parteaguas de la Cuenca Hidrográfica Laguna de Bustillos*



Fuente: elaboración propia

Respecto a las aguas subterráneas, se define un sistema acuífero heterogéneo de tipo libre y los materiales en los cuales tiene lugar el movimiento del agua subterránea es medio granular y medio fracturado (Conagua, 2015). La recarga del acuífero proviene de la precipitación pluvial, la cual se infiltra y alimenta por flujo subterráneo horizontal y por los retornos provenientes del riego.



En tanto, la descarga se da por medio del bombeo en los pozos, salidas a la Laguna de Bustillos y por evapotranspiración.

Conviene destacar que este acuífero actualmente se enfrenta a un problema de sobreexplotación. Oficialmente, se estima una recarga de 115.2 millones de metros cúbicos al año y una descarga de 293.16 millones, ocasionando un déficit de 177.96 millones (Conagua, 2015). Sin embargo, otros estudios señalan que esta cifra está subestimada, pues se carece de una gestión adecuada de las extracciones y el déficit del orden de 420 millones de metros cúbicos anuales (Cera Campos, 2015).

El uso de suelo de la Cuenca es predominantemente agrícola (41.3 %), mientras que el bosque ocupa el 34.2% y pastizales 17%; el resto corresponde a la zona urbana y suelo desnudo (Inegi, 2010). Respecto a la vegetación contenida en la zona de bosque predomina el pino y encino, en tanto al sur del área de estudio predomina el táscate, acompañado de algunas especies de pastos. En la parte del valle, gran parte de la flora nativa ha sido desplazada por la conversión agrícola y urbanización, aunque en algunas zonas se observa la presencia de pastizales, cactáceas, agaváceas, herbáceas, etc. (Alatorre et al., 2014; Inegi, 2010).

### **3.2 Clima**

La temperatura y la precipitación son las variables fundamentales que se utilizan como indicadores de cambios en el clima (Prabnakorn et al., 2018). Para este estudio se emplean las normales climatológicas desde 1981 a 2010. Para la temperatura se toma el promedio por estación y para precipitación el agregado por estación del año. Respecto a la escala, se hace el análisis tanto a nivel Estado de Chihuahua como a nivel cuenca.

En el Estado de Chihuahua 40% de su territorio presenta un clima muy seco, localizado en las sierras y llanuras del norte; 33% es seco y semiseco, ubicado en las partes bajas de la Sierra Madre Occidental; 24% templado subhúmedo en las zonas altas de la Sierra Madre Occidental, y; 3% cálido subhúmedo. La temperatura media anual es de 17 °C y la precipitación media anual 500 mm (INEGI, 2013).

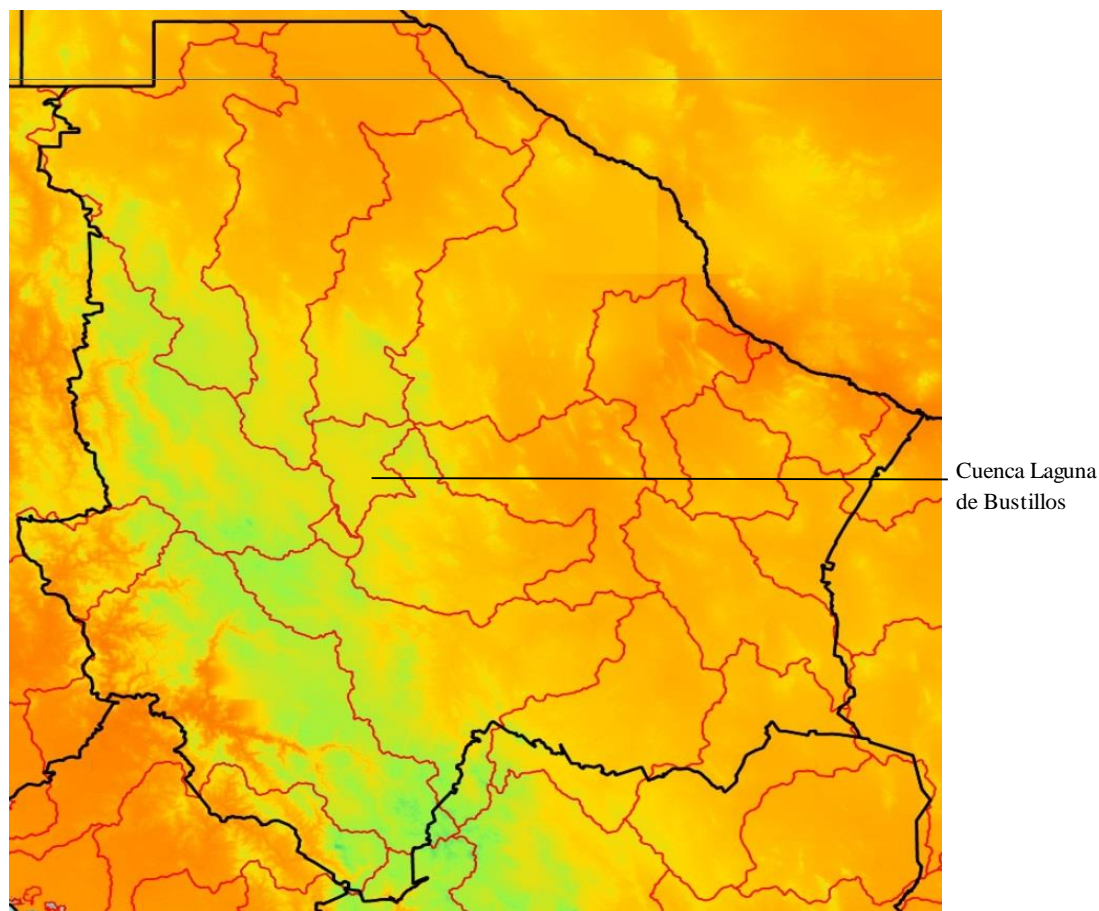
En tanto, el clima de la Cuenca Laguna de Bustillos es predominantemente seco, de los tipos secos, secos áridos y semiáridos. En gran parte de la zona el clima corresponde al subtipo semisecos-templados y en algunas partes del oriente y sur, en el área de la Ciudad de Cuauhtémoc, el clima corresponde al subtipo semisecos-templados; en la zona suroeste es del tipo subhúmedo-semifríos (Conagua, 2015).

De acuerdo con la figura 3.3 podemos dividir el Estado de Chihuahua en 5 zonas climáticas. Centro, noreste, noroeste, sureste y suroeste. La zona centro, que comprende la Cuenca Laguna de Bustillos, es del tipo semiseco-templado, con lluvias y temperaturas moderadas. La zona noroeste es del tipo seco, mientras que la zona noreste y sureste son del tipo muy seco, con temperaturas elevadas y precipitaciones escasas. La región suroeste del Estado es del tipo cálido subhúmedo, con precipitaciones más abundantes.

En este estudio se emplean normales climatológicas de 1981 a 2010. Las normales climatológicas comprenden un periodo largo y relativamente uniforme de tiempo, generalmente 30 años. En el caso de la temperatura se tomó el valor medio mensual, tanto por Estado como por Cuenca. En la figura 3.4 se puede observar una diferencia significativa entre la temperatura media del Estado y la de la Cuenca, para todo el año.

**Figura 3.3**

*Tipos de Clima en el Estado de Chihuahua por Cuenca Hidrográfica*

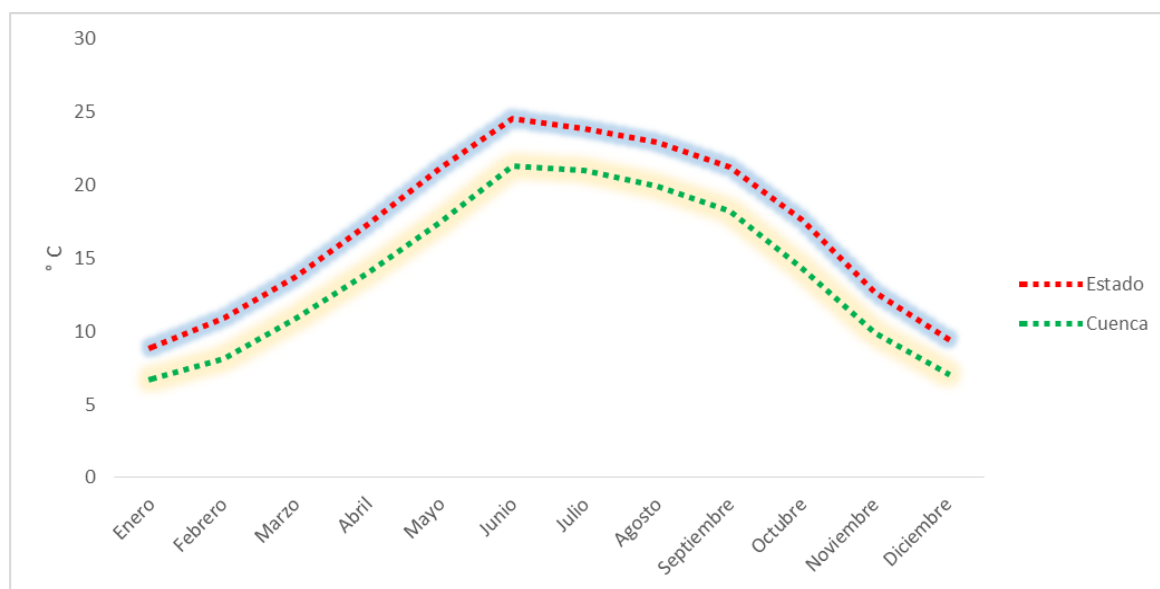


Nota. Las partes cercanas al verde indican temperaturas más bajas y mayor presencia de precipitaciones en verano, mientras que las zonas más cercanas al rojo indican temperaturas más altas y menores precipitaciones.

Esta variable resulta de especial importancia para la Cuenca, pues al ser una región manzanera, las bajas temperaturas invernales permiten la acumulación de frío para el óptimo desarrollo de los productos frutales. Para el caso de otros cultivos como el maíz grano y el frijol, temperaturas más altas afectan su productividad.

**Figura 3.4**

*Temperaturas promedio mensual de 1981 a 2010*



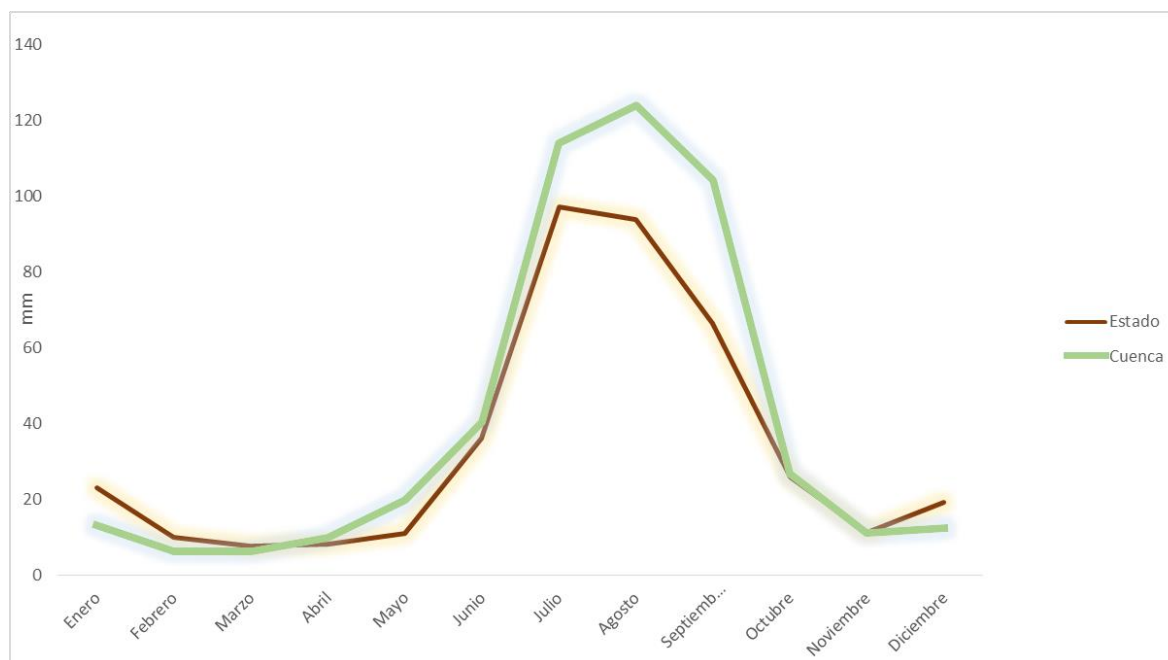
Nota. La línea roja corresponde al Estado de Chihuahua, mientras que la verde a la Cuenca Laguna de Bustillos, con información del SMN.

En la figura 3.5 se observa que las precipitaciones se concentran en los meses de junio a septiembre, alcanzando el pico a final de julio en la Cuenca y a inicio de julio en el Estado. Nótese que la precipitación de la Cuenca está por encima de la media estatal, sobre todo en los meses de mayo a septiembre, que es cuando los cultivos tienen mayores necesidades. La brecha más amplia entre ambas líneas se presenta en los meses de julio y agosto, donde las lluvias son mayores.

No obstante, a pesar de tener una mayor cantidad de lluvias en la Cuenca que en el Estado, se hace uso intensivo de las aguas subterráneas, por la alta demanda para uso agrícola y por las características geomorfológicas de la zona y de falta de infraestructura, que limitan el almacenamiento superficial de las lluvias.

**Figura 3.5**

*Precipitación media mensual de 1981 a 2010*



Nota: la línea café corresponde al Estado de Chihuahua y la verde a la Cuenca Laguna de Bustillos, con información del SMN.

La precipitación aunada a la temperatura, son los ingredientes más importantes para el éxito de un cultivo. Para el caso que nos ocupa, tenemos un sector agrícola que depende, casi en su totalidad (en términos de producción), de las aguas subterráneas. Los niveles del acuífero dependen en una medida importante de la precipitación, pues debido a la geomorfología del subsuelo, en el valle se infiltra una cantidad relevante de los escurrimientos.

### 3.3 Aspectos socioeconómicos

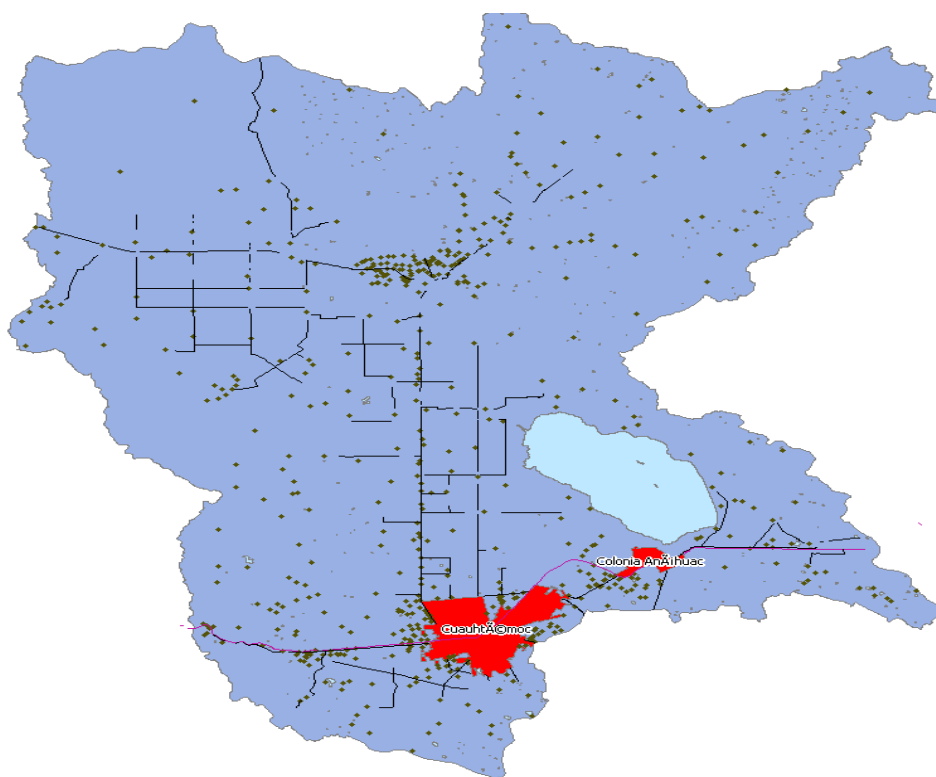
De acuerdo con la Encuesta Intercensal del INEGI 2015, el Estado de Chihuahua cuenta con una población de 3,556,574 habitantes, de los cuales 49.3 % corresponde a hombres y 50.7 % a mujeres. Su territorio corresponde a una superficie de 247,460 km<sup>2</sup> dividido en 67 municipios. En

tanto, tiene una densidad de población de 17.37 habitantes/ $km^2$ . Los municipios más poblados son: Juárez, Chihuahua, Cuauhtémoc, Delicias e Hidalgo del Parral, juntos representan 76 % del total estatal.

Por otro lado, se tiene estimado para la Cuenca Laguna de Bustillos una población de 161,262 habitantes y una densidad de 50 habitantes/ $km^2$ . El 80% de la población se encuentra en los dos principales asentamientos urbanos: Cd. Cuauhtémoc (73 %) y Colonia Anáhuac (7 %), ambas pertenecientes al municipio de Cuauhtémoc. Del total de la población, el INEGI estima que cerca de 17,000 pertenecen a la comunidad menonita y 7,500 a la etnia Raramurí o Tarahumara.

### Figura 3.6

*Asentamiento Humanos en la Cuenca Laguna de Bustillos*



Fuente: elaboración propia con datos de INEGI y CONABIO

Respecto a la economía de Estado, el sector terciario aporta 49.6 % del PIB, mientras que el secundario 43.7 % y el primario 6.7 %. A nivel nacional, el Estado de Chihuahua aporta 3.4 % del PIB. Respecto al empleo formal, en la entidad se censaron a las 2014 803,175 personas, de los cuales 61 % son hombres.

De acuerdo con la Encuesta Intercensal (2015) del INEGI, la PEA corresponde al 51.2 % de la población de la Cuenca; la tasa de desocupación es del orden del 2.2 %. El índice de marginación propuesto por CONAPO es de -1.6945, muy bajo. El índice de desarrollo humano<sup>11</sup> es de 0.722, alto. De acuerdo con CONEVAL, 5.1 % de la población vive en pobreza extrema al 2010.

### **3.4 Sector agrícola**

La agricultura en Chihuahua descansa en la producción de 1'033,924 hectáreas sembradas para 2007, con una siniestralidad de 69,020 hectáreas, de acuerdo al Servicio de Información Agroalimentaria y pesquera. Asimismo, se estima un valor de producción para 2007 de 13,240.16 millones de pesos. Los cultivos que generaron más ingresos a los productores son: manzana, maíz grano, chile verde, nuez, algodón hueso, avena forrajera y frijol.

Los municipios más importantes en la producción de manzana son: Cuauhtémoc, Cusiuhiriachi, Guerrero y Namiquipa; en maíz grano: Cuauhtémoc, Cusiuhiriachi, Guerrero y Namiquipa; en Chile verde: Ascensión, Buenaventura, Delicias y Meoqui; en nuez: Camargo, Jiménez y Saucillo; en algodón hueso: Janos, Ojinaga, Aldama, Ascensión y Buenaventura; en avena forrajera: Namiquipa y Cuauhtémoc, y; en frijol: Namiquipa, Rivapalacio y Ahumada.

---

<sup>11</sup> Elaborado por el PNUD mide los logros medios obtenidos en las dimensiones fundamentales de desarrollo humano: salud, educación e ingreso.

Respecto al valor de la producción Estatal en función del ciclo agrícola, 33.9 % corresponde a perennes, 62.16 % al ciclo primavera-verano y 3.94 % a otoño-invierno, y; en función de la modalidad, 84.7% corresponde a riego y 15.3% a temporal. Respecto a la superficie sembrada, 40.66 % corresponde a riego y 59.34 % a temporal.

La producción bajo la modalidad de riego cuenta con las siguientes características: para transportar el agua entre las parcelas, 28% utiliza canales recubiertos con cemento y 56% con canales recubiertos de tierra, el resto otros métodos. Para el regadío, 9% utiliza aspersión, 4% microaspersión, 2% goteo y el resto métodos tradicionales como inundación. El origen del agua corresponde, 45% de pozos profundos, 29% de presa, 21% de río y el resto de otras fuentes.

A nivel Cuenca la agricultura tiene sus peculiaridades. Las actividades agrícolas se desarrollan en cuenca media y cuenca baja. En la cuenca media predomina la agricultura de temporal, mientras que, en cuenca baja, es en su mayor parte riego. Se estima una superficie sembrada de 111,227 hectáreas para 2007. Asimismo, 39% de la superficie sembrada en la Cuenca de estudio corresponde a riego y 61% a temporal.

Respecto al valor de los cultivos de la cuenca, se estiman en 2,850 millones de pesos para 2007. El municipio con mayores ingresos agrícolas a nivel Cuenca y a nivel Estado es Cuauhtémoc (ver figura 3.7), con un aporte de 1,926 millones de pesos, de los cuales 1,029 millones corresponden a ingresos por cultivo de manzana.

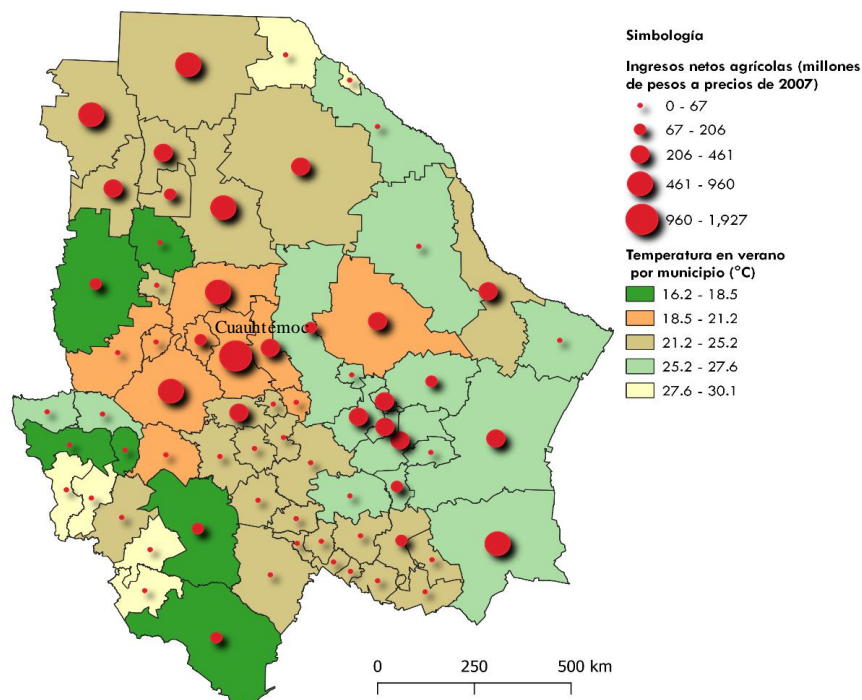
En la figura 3.7 se muestra los ingresos agrícolas por municipio. Los colores de los municipios representan sus temperaturas medias en verano, siendo el color verde las más bajas y amarillo las



más altas. A simple vista, no se aprecia alguna relación concreta entre temperatura y nivel de ingresos, tal que, los municipios mas prósperos se encuentran en los colores naranja y café.

**Figura 3.7**

*Ingresos Netos por Municipio*



Fuente: elaboración propia con datos de SIAP y SMN

Bajo la clasificación de ciclo agrícola en la Cuenca, 53.3% corresponde a cultivos perennes, 46.3% a cultivos del ciclo primavera-verano y 0.4% a otoño-invierno. Respecto a la modalidad, 88.5% corresponde a riego y 11.5% a temporal.

Los cultivos de mayor valor económico en la Entidad son: maíz grano (16%), nuez (14%), manzana (13%) y chile verde (10%). Respecto a la manzana se producen principalmente dos variedades: Golden delicious y red delicious. Se estima un requerimiento de agua de hasta  $1.6 m^3$

por kg de manzana producida (Parra et al., 2009), condicionado a precipitaciones mayores a 600 mm anuales o fuertes extracciones de aguas subterráneas.

El árbol de manzano prospera en climas templados y fríos. En la etapa de dormancia tolera hasta  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  y en crecimiento  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , dado que debe acumular cuando menos 300 unidades de frío (UF) (INIFAP, 2013b) aunque el óptimo oscila entre 700 y 800 para Red Delicious y entre 800 y 1000 para Golden Delicious (Medina et al., 2011). Es poco tolerante al aire seco y las altas temperaturas. Arriba de  $38\text{ }^{\circ}\text{C}$  los frutos pueden resultar dañados, sobre todo si se combina con estrés hídrico.

Fenológicamente, empieza con la acumulación de frío en el periodo invernal hasta el mes de febrero, renovando en marzo su actividad vegetativa, en abril empieza la floración, primeras hojas y amarre del fruto; de mayo a septiembre se desarrollan los frutos, mismos que se empiezan a cosechar a partir de mediados de agosto (Pérez, 2005).

En los últimos años, la cantidad de frío invernal ha disminuido y se estima que continuará esta tendencia. Los meses de marzo y noviembre presentan una mayor disminución en la cantidad acumulada de frío, de tal manera que para el escenario 2051-2060 prácticamente solo en los meses de diciembre, enero y febrero habrá acumulación de frío (Medina et al., 2011).

Los costos de producción promedio de la manzana para 2007 oscilaron en \$ 42,600.00, de los cuales 25 % se destinó a labores de cosecha, 24 % a insumos, 20% a preparación del cultivo, 17 % a siembra, 6 % postsiembra y el restante a otros conceptos (Chihuahua, 2010b). El rendimiento promedio en la Cuenca es de 18.36 ton/ha, mayor que el estatal de 16.58 ton/ha.

El maíz grano que se produce en la cuenca puede ser de dos variedades, principalmente: blanco y amarillo. Aunque la planta del maíz crece en casi todas las latitudes, su potencial de rendimiento es bajo ambientes tropicales típicos (INIFAP, 2013b). La temperatura óptima para la germinación está entre 18 y 21°C y para el crecimiento entre 25 y 30 °C.

Respecto a los requerimientos hídricos, el maíz requiere de una precipitación de 500 a 800 mm, de la siembra a la madurez (INIFAP, 2013b). Asimismo, se utiliza en promedio 0.175 m<sup>3</sup> de agua por kg de maíz, aunque el maíz amarillo tiene una demanda menos de agua que el blanco.

La fenología para el cultivo del maíz, comienza con la preparación del terreno, que comprende el subsoleo, barbecho, rastreo, trazo de riego y surcado; La segunda etapa del cultivo es la siembra, generalmente realizada del 15 de abril al 15 de mayo para el ciclo primavera-verano (INIFAP, 2013a) y del 15 de octubre al 15 de noviembre para otoño-invierno y; la tercera etapa, es la cosecha, realizada en octubre y noviembre, aunque se puede prolongar hasta enero (SIAP, 2007), dependiendo de la ampliación de fecha de siembra.

Los costos asociados a la producción de una tonelada de maíz oscilan entre \$ 1,988 y \$ 10,824, dependiendo del paquete tecnológico y la modalidad. Para 2007, 29% se destinó a insumos, 21% labores de postsiembra, 17% preparación de cultivo, 6% cosecha, 3% siembra y el resto corresponde a otros costos (Chihuahua, 2010a). Los costos más importantes fueron fertilizantes y energía eléctrica. El rendimiento promedio del maíz fue 6.17 ton/ha para la Cuenca; esto, influido por el rendimiento en el maíz de riego 9.95 ton/ha y el de temporal 0.85 ton/ha.

Respecto a la nuez, para la producción de un kilogramo se requiere de 7,500 a 10,899 litros de agua (Martínez et al., 2020). Diversos estudios indican que la demanda de frío del nogal para

romper la dormancia va de 300 UF hasta más de 1000 (Grageda et al., 2016), dependiendo de las latitudes y otras características de los árboles. La falta de frío retrasa la floración, aumenta la caída de frutos y reduce el rendimiento.

Las unidades de producción bajo el esquema de riego que no cuentan con suficientes precipitaciones en algunas regiones, para satisfacer la demanda hídrica de los cultivos, recurren al uso intensivo de aguas subterráneas. Por ejemplo, el acuífero Cuauhtémoc, mismo que actualmente se encuentra en categoría de sobreexplotado de acuerdo al criterio de la Comisión Nacional del Agua.

En 2014, el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS<sup>12</sup>) inventarió 5,297 pozos, de los cuales 3,417 de esos aprovechamientos son para uso agrícola, con un volumen de extracción de 272  $hm^3$  al año, 87 % del total de la extracción. De acuerdo con el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), para 2015 se tienen registrados 2,234 concesiones de uso agrícola. Conviene señalar que la falta de medidores en los aprovechamientos da lugar a que las extracciones sean mayores a las concesionadas; se estima una extracción de cerca de 450  $hm^3$  (Díaz C. et al., 2014).

Respecto a la tenencia de la tierra en la cuenca Laguna de Bustillos, el 28% de la cuenca corresponde a ejidos, 36% a colonias menonitas, 28% a propiedad privada y el resto a comunidades agrícolas (Chávez B. & Corral A., 2013). Los ejidos se encuentran en cuenca alta en su mayoría, mientras que las comunidades menonitas en la cuenca baja.

Las técnicas de riego que se encuentran en las zonas de estudio, son principalmente cuatro: inundación, goteo, microaspersión y goteo con acolchado (Enríquez V., 2013). Para la mayor parte

---

<sup>12</sup> Organismo auxiliar del Consejo de Cuenca, que define la Comisión Nacional del Agua.

de los cultivos de riego se usa la técnica de inundación, a excepción de las manzanas donde se goteo y microaspersión. A nivel de cuenca, el nivel de tecnificación es muy bajo y no rebasa el 20% de las unidades de producción, por lo que el dispendio de agua por las técnicas ancestrales es muy alto.

Del Censo Nacional Agrícola, Ganadero y Forestal 2007 aplicado por el INEGI, se estima el levantamiento censal de 6,807 unidades de producción, de las cuales 84 % tiene de uno a dos terrenos y el resto más de tres terrenos. Para el ciclo primavera-verano, 1,715 unidades de producción cultivaron avena forrajera y 1,408 maíz grano. Para otoño-invierno, 396 cultivaron avena forrajera y 78 maíz grano. Asimismo, se censaron 422 unidades de producción de manzana.

1,066 unidades de producción son de la modalidad riego. Respecto a la fuente de agua, 89 % de las unidades de producción se abastecen de pozo profundo, 8 % de presa, 3 % de bordo y el resto de otras fuentes. Respecto a la tecnología en las labores agrícolas, al 70 % de la superficie sembrada, se le aplica fertilizantes, 26 % usa semilla mejorada, 48 % herbicidas y 32 % insecticidas. Respecto a la tecnología para siembra, 91 % utiliza tracción mecánica mientras que el restante utiliza animales de trabajo.

### **3.4 Política Climática**

La política de cambio climático en México data de finales del siglo pasado con la *Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Este informe, incorpora un análisis de la vulnerabilidad por sectores económicos y a nivel regional, así como el inventario de emisiones de GEI. La información ha sido actualizada en las comunicaciones que le preceden, siendo la última la Sexta Comunicación en 2018.

Dentro de la estructura política de México, cada orden de gobierno (municipio, entidad federativa y federación) tienen la responsabilidad de desarrollar sus programas de cambio climático, alineados a la estrategia nacional y en coordinación con los otros dos niveles. Estos programas tienen como metas la adaptación de los sistemas humanos, ecosistemas, infraestructura estratégica y sistemas productivos.

A nivel institucional, en 2005 se creó la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, integrado por 14 entidades de la Administración Pública Federal y cuyo fin es el diseño e implementación de políticas de mitigación y adaptación al cambio climático. En 2007 se aprobó la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC) y en 2009 el Programa Especial de Cambio Climático (PECC). La Ley General de Cambio Climático (LGCC) entró en vigor en 2012, con modificaciones sustanciales en 2018 como resultado de los compromisos adquiridos en el Acuerdo de París.

En estas políticas, México se comprometió de manera no condicionada a proteger a la población de los efectos de cambio climático y de manera paralela aumentar la infraestructura estratégica del país (INECC, 2016). Para ello, se pone como meta fortalecer la resiliencia del 50 % de los municipios más vulnerables, establecer sistemas de prevención y alerta temprana y gestión del riesgo en todos los órdenes de gobierno.

Dentro de los sistemas de alerta temprana destacan: Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales (SIAT-CT), Sistema de Alerta Temprana de Incendios en México y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Otras acciones consideradas son: impulsar la adquisición, adecuación e innovación tecnológica de apoyo a la adaptación en aspectos como protección de la infraestructura, agua, transporte y recuperación de suelos.

Respecto al sector agrícola en México, uno de los cultivos más expuestos es el maíz (también frijol, trigo, soya, sorgo y cebada), dado que es la base alimentaria de la población. Para estos productos, las estimaciones indican que para la década de 2050 la productividad disminuirá, dada la pérdida de fertilidad de los suelos y la escasez de agua. Este contexto se prevé ante un incremento de +2.5 °C y +4.5 °C y una disminución en las precipitaciones del orden de -5 % a 10 % (INEEC, 2018).

Dentro de la Cuenca Laguna de Bustillos, las políticas de adaptación más puntuales competen a los municipios Cuauhtémoc, Riva Palacio, Cusiuhiriachi y Bachiniva, así como al gobierno del Estado. Uno de los retos principales que plantean es aumentar la eficiencia y productividad en el uso del agua, sobre todo porque el Acuífero Cuauhtémoc se encuentra en calidad de sobreexplotación. También se plantea el desarrollo de la agricultura sostenible, para mantener la salud de los suelos (Chihuahua, 2019).

En el Programa Estatal de Cambio Climático del gobierno de Chihuahua, se plantea las siguientes acciones de adaptación: zonificación agroecológica, introducción de variedades altamente productivas, instalación de sistemas de irrigación, sistemas de control de plagas y enfermedades, manejo integral de suelos, utilización de modelos simulados de cultivos y prácticas agroforestales.

En el Plan municipal de Desarrollo del municipio Cuauhtémoc<sup>13</sup> 2018-2021, aunque se contemplan de manera concreta acciones en la lucha contra el cambio climático, se hace especial énfasis en la gestión eficiente del agua. El objetivo primordial es la disminución de consumo de

---

<sup>13</sup> Recordemos que este municipio ocupa la mayor parte del territorio de la Cuenca.

agua para uso agrícola, mediante la reconversión agro-productiva, diseño de sistemas de riego con tecnología local, reutilización de aguas tratadas para cultivos, incorporación de tecnologías para disminuir costos por extracción de agua e instauración de sistemas para recarga del acuífero.



## Capítulo IV. Análisis empírico

### Introducción

El propósito de este capítulo es estimar los impactos del cambio climático en la Cuenca Laguna de Bustillos e identificar su capacidad de adaptación, a través de un modelo ricardiano a escala del Estado de Chihuahua. Se parte de dos supuestos: en primer lugar, los agricultores se comunican entre ellos y las decisiones de unos influyen en las de otros, y; segundo, ante la presencia de cambios relevantes en temperatura y precipitación, ajustan sus elecciones de producción para maximizar su ingreso.

La modelación de elecciones en el modelo ricardiano, se formula mediante una cesta de variables climáticas y socioeconómicas. Económicamente, se modela el ingreso neto por hectárea, en función de la temperatura, precipitación, nivel tecnológico de las unidades de producción, derechos de propiedad sobre la tierra, acceso a riego, nivel de educación, tipo de suelo, entre otras variables.

Se construyen dos modelos. El primero estima los cambios en el ingreso neto por hectárea ante cambios en temperatura y precipitación, mientras que el segundo, incluye variables socioeconómicas y de características del suelo. Ambos modelos se estiman mediante la metodología de mínimos cuadrados ordinarios.

Una vez que se obtienen los efectos marginales de temperatura y precipitación en el ingreso, se evalúan los impactos futuros por medio de las proyecciones de los modelos climáticos acoplados GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR, en escenarios de trayectorias de concentraciones representativas de 4.5 y 8.5. Esto nos permite calcular las pérdidas porcentuales del ingreso por hectárea.

Finalmente, se evalúa la adaptación de los agricultores de la Cuenca Laguna de Bustillos. Las variables socioeconómicas que resulten estadísticamente significativas en el modelo, definen las capacidades adaptativas. Aquellas variables que *a priori* se consideran como estrategias de adaptación al cambio climático, se proponen en la planeación de la política de adaptación.

#### **4.1 Método y estimación econométrica**

Para estimar los impactos del cambio climático en los ingresos agrícolas, los estudios empíricos basados en el modelo ricardiano han utilizado diferentes técnicas econométricas, dependiendo de las características de los datos y las pretensiones del investigador. Existen muchos métodos para estimar los parámetros de la ecuación de regresión poblacional (Andren, 2007), siendo los más comunes máxima verosimilitud (MV), método generalizado de momentos (MGM) y mínimos cuadrados ordinarios (MCO).

Los estudios que han empleado la estimación por MV, generalmente argumentan pérdida de información con MCO y algunos de ellos aplican ambas técnicas, estableciendo comparaciones en los resultados. Polsky & Easterling (2001) construyen un modelo multinivel basado en MV, bajo la premisa de que con datos anidados los coeficientes de regresión pueden exhibir asociaciones espaciales sistémicas, que con MCO solo se suponen. Seo & Mendelsohn (2008b) aplican MV usando una técnica de optimización no lineal iterativa como Newton-Raphson.

Seo (2010), Islam et al. (2017), Mulwa et al. (2017), también estiman el modelo ricardiano mediante MV. Seo (2016) emplea la variante de Log-Verosimilitud; De Salvo et al. (2013) y Chen et al. (2013) realizan estimaciones con MV, haciendo un comparativo con los resultados de la

estimación por MCO; en ambos casos los resultados tienen los mismos signos, aunque con MV se tiende a ajustar mejor; respecto a los impactos, se proyectan mayores daños con MCO.

La estimación por MGM es utilizada por Schlenker et al. (2006) en su análisis ricardiano. Usando simulaciones Montecarlo, los estimadores de MGM les producen resultados similares a MV, pero más estables. Cabe destacar, que tanto MGM como MV coinciden en el caso de la esperanza y varianza en las distribuciones normales, pero generalmente difieren en la amplitud del intervalo de una variable aleatoria uniforme (Muruzabal, 2014).

La estimación por MCO ha sido utilizada en la mayor parte de estudios con el enfoque ricardiano. No obstante, algunos estudios como Mendelsohn & Dinar (2003), Kurukulasuriya et al. (2007), Kurukulasuriya & Ajwad (2007), Mendelsohn & Reinsborough (2007), Fleischer et al. (2008), Mendelsohn et al. (2010), Di Falco et al. (2012), Wood et al. (2014), Chatzopoulos & Lippert (2016), Bozzola et al. (2018), Elum et al. (2018) Fonta et al. (2018), Vaitkeviciute et al. (2019), utilizan como contraste la metodología de variables instrumentales.

El método de MCO, atribuido a Carl Friedrich Gauss, consiste en la estimación de parámetros de una población a partir de una muestra, en una regresión lineal (Andren, 2007; Baltagi, 2011; Balzer & Haendler, 1989; Spanos, 1986; Wooldridge, 2009).

Para obtener las estimaciones de MCO, se buscan los valores de los parámetros  $\beta_0$  y  $\beta_1$  de una muestra aleatoria de tamaño  $n$  de la población. Se formula la ecuación de regresión muestral (ERM) de la siguiente manera (Wooldridge, 2009):

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + u_i \quad i=1,2,\dots,n \quad (4.7)$$

Donde  $y_i$  es  $i$ -ésima observación de la variable dependiente  $Y$ ,  $x_i$  la  $i$ -ésima observación de la variable independiente o explicativa  $X$  y  $u_i$  es el término de error de la observación  $i$  de la muestra poblacional.  $\beta_0$  es el intercepto y  $\beta_1$  el parámetro la pendiente de la relación entre  $X$  y  $Y$ . la diferencia entre la ecuación de regresión poblacional (ERP) y ERM tiene que ver con los parámetros y el término de error. En ERP los parámetros son fijos y constantes, mientras que en ERM son variables aleatorias con alguna distribución. El término de error es también un estimado y corresponde al término de error poblacional.

En la población  $u$  no está correlacionada con  $x$ , por lo que el valor esperado de  $u$  es cero y también su covarianza.

$$E(u) = 0 \quad (4.8)$$

$$E[x(y - \beta_0 - \beta_1 x)] = 0 \quad (4.9)$$

Las ecuaciones (4.8) y (4.9) se usan para estimar los parámetros  $\beta_0$  y  $\beta_1$ . De este modo, se eligen las estimaciones  $\widehat{\beta}_0$  y  $\widehat{\beta}_1$ , que resuelvan las contrapartes muestrales:

$$n^{-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \widehat{\beta}_0 - \widehat{\beta}_1 x_i) = 0 \quad (4.10)$$

$$n^{-1} \sum_{i=1}^n x_i (y_i - \widehat{\beta}_0 - \widehat{\beta}_1 x_i) = 0 \quad (4.11)$$

Reescribimos (4.10) de la siguiente manera:

$$\bar{y} = \widehat{\beta}_0 - \widehat{\beta}_1 \bar{x} \quad (4.12)$$

Donde  $\bar{y} = n^{-1} \sum_{i=1}^n y_i$  es el promedio muestral de las  $y_i$  y lo mismo ocurre con  $\bar{x}$ .

Escribimos  $\widehat{\beta}_0$  en términos de  $\widehat{\beta}_1$ ,  $\bar{y}$  y  $\bar{x}$ :

$$\widehat{\beta}_0 = \bar{y} - \widehat{\beta}_1 \bar{x} \quad (4.13)$$

Eliminando  $n^{-1}$  de (4.10) y empleando (4.13) tenemos:

$$\sum_{i=1}^n x_i [y_i - (\bar{y} - \widehat{\beta}_1 \bar{x}) - \widehat{\beta}_1 x_i] = 0$$

Reordenando

$$\sum_{i=1}^n x_i (y_i - \bar{y}) = \widehat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_i (x_i - \bar{x})$$

Aplicando propiedades básicas de la sumatoria:

$$\sum_{i=1}^n x_i (x_i - \bar{x}) = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \text{ y } \sum_{i=1}^n x_i (y_i - \bar{y}) = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y})$$

Por lo tanto

$$\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 > 0 \quad (4.14)$$

Y la pendiente estimada

$$\widehat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.15)$$

La ecuación (4.15) es la covarianza muestral entre  $x$  y  $y$  dividida entre la varianza muestral de  $x$ .

El valor ajustado para  $y$  cuando  $x=x_i$ , se expresa:

$$\hat{y}_i = \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_i \quad (4.16)$$

Para cada observación de la muestra hay un valor ajustado. El residual de la observación  $i$  es la diferencia entre el verdadero valor  $y_i$  y su valor ajustado:

$$\hat{u}_i = y_i - \hat{y}_i = y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_i \quad (4.17)$$

Una vez estimados los parámetros, que corresponden a las variables de control socioeconómico y de características del suelo, podremos proyectar y (ingreso agrícola por hectárea) frente a los cambios en las variables de temperatura y precipitación. Esto nos permitirá contrastar las siguientes hipótesis:

$H_0$ : Los agricultores de la Cuenca Laguna de Bustillos, no se están adaptando de manera endógena al cambio climático, de modo que, de no existir intervención exógena, sus ingresos netos tenderán a reducirse.

$H_1$ : Los agricultores de la Cuenca Laguna de Bustillos, se están adaptando de manera endógena al cambio climático, por lo que en el futuro cercano y lejano sus ingresos netos no se verán afectados.

Para probar dicha hipótesis, el enfoque teórico bajo el cual subyace el presente modelo econométrico es el modelo ricardiano, que mide básicamente dos procesos dentro de los sistemas de producción agrícola: el impacto del cambio climático en los ingresos y la adaptación en las unidades de producción. El primero se cuantifica estimando los vínculos de la precipitación y la

temperatura con los ingresos netos de los agricultores, y; el segundo, se da de manera implícita al interactuar el sistema productivo con las variables climáticas.

De acuerdo con el modelo ricardiano (Mendelsohn et al., 1994a) el valor de la tierra es igual al valor presente de sus rendimientos futuros esperados, tal que obedece a una estimación a largo plazo de su productividad (Mendelsohn & Massetti, 2017). El valor de la tierra dentro de este enfoque está dado por los ingresos agrícolas netos en función de variables climáticas básicas y variables de control económico.

De este modo, partimos del supuesto que cada agricultor de la Cuenca maximiza sus ingresos, sujeto a las condiciones exógenas de la unidad de producción. Asumiendo competencia perfecta, se elige el mejor uso de la tierra y los insumos para cada unidad que maximiza los ingresos netos (Gadedjisso-Tossou et al., 2016; Massetti & Mendelsohn, 2011):

$$MaxIN_i = \sum_{j \in J} P_{ij} R_{ij}(X_{ij} | C_i, W_i, S_i) - \sum_{j \in J} P_{ij} X_{ij} \quad (4.1)$$

donde  $IN_i$  es el ingreso neto de la unidad de producción  $i$ ,  $P_{ij}$  es un vector de los precios de entrada y salida,  $R_{ij}$  es la función de producción para cada cultivo  $j$ ,  $X_{ij}$  es un vector de elecciones de insumos endógenos como semillas, fertilizantes, riego, pesticidas, mano de obra contratada y capital,  $C_i$  es un vector de variables climáticas,  $W_i$  es un vector de variables de control económico (densidad de la población, apoyos gubernamentales, etc.), y  $S_i$  es un vector de características del suelo.

La diferenciación de 4.1 con respecto a cada entrada identifica el conjunto de entradas que maximizan los ingresos netos. El locus resultante de los ingresos netos para cada conjunto de

variables exógenas es la función ricardiana. Describe cómo los ingresos netos cambiarán a medida que cambien las variables exógenas:

$$IN^*_i = IN(C, W, |P_{ij}) \quad (4.2)$$

Suponiendo una competencia perfecta por la tierra, su valor neto actual (ingreso neto) es una función de los ingresos futuros de cada granja:

$$IN = \int_0^{\infty} \pi^*_t * e^{-rt} dt \quad (4.3)$$

donde  $r$  es la tasa de interés del mercado.

La literatura sugiere una relación cuadrática entre el valor de la tierra y las variables climáticas (Mendelsohn & Dinar, 2003; Onyekuru & Marchant, 2016). Cuando más limitado es el conjunto de opciones disponibles para un agricultor, más cóncava es la función de respuesta climática. Por supuesto, la concavidad de la función de respuesta puede ser bastante diferente dependiendo del conjunto de opciones a las que se limita un agricultor (Masseti & Mendelsohn, 2011).

Estimamos una forma funcional log-lineal, pues los modelos lineales tienden a tener un efecto aditivo sobre el ingreso neto. La forma funcional logarítmica lineal se ajusta más a los valores reales, pues su efecto es proporcional. De este modo, la forma funcional se expresa de la siguiente manera:

$$\ln INh_i = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 T^2 + \beta_3 P + \beta_4 P^2 + \beta_5 G + \varepsilon_i \quad (4.4)$$



Donde la variable dependiente,  $INh$ , es el ingreso neto por hectárea,  $T$  y  $P$  representan un vector de temperatura y precipitación, con sus respectivos valores al cuadrado,  $G$  representa un vector de variables de control relevantes (características de la unidad de producción, variables económicas, características del suelo, etc.),  $\varepsilon$  es un término de error y los parámetros  $\beta$  son coeficientes.

La estimación del coeficiente climático puede ser usada para computar el efecto marginal del cambio climático. Con la forma log lineal, el efecto del clima es proporcional (Masseti & Mendelsohn, 2011). De modo que, el efecto marginal de un aumento en la temperatura, evaluado en la temperatura  $T$  es:

$$dV/dT = INh(\beta_1 + \beta_2 T) \quad (4.5)$$

Y para la precipitación:

$$dV/dP = INh(\beta_1 + \beta_2 P) \quad (4.6)$$

De nuevo, el efecto en una unidad de producción depende de la temperatura local y la precipitación, de modo que los impactos variarán en todo el país. Con la forma funcional log-lineal, los coeficientes determinan un cambio porcentual en el ingreso neto por unidad de producción.

Para estimar las funciones ricardianas en este estudio, se utilizan datos transversales (T. Chatzopoulos & Lippert, 2015), siendo los más comunes en modelos ricardianos (Lippert et al., 2009; Mendelsohn et al., 2009; Van Passel et al., 2017).

Las ventajas de los modelos de sección cruzada tiene que ver con la facilidad para capturar la adaptación a largo plazo (Masseti & Mendelsohn, 2018), así como información de las

decisiones de los individuos. No obstante, tiene como desventaja la no incorporación del efecto de los precios ni la fertilización por dióxido de carbono.

#### 4.2 Descripción de las variables de estudio

El análisis se basa en las observaciones de 43,084 unidades de producción agrícola a lo largo de los 67 municipios del Estado de Chihuahua, de acuerdo con el Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007 (CAGF2007) aplicado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), del 1/o. de octubre al 30 de noviembre del 2007.

La muestra utilizada en este estudio corresponde a 31.5% del Censo total y su tamaño se determinó eliminando las unidades de producción forestal y aquellas agropecuarias que carecían de la totalidad de información o que estaba incompleta; una vez integrada la muestra se verificó la representatividad por municipio.

El propósito de realizar la modelación a escala Estatal obedece al hecho de que los agricultores de la Cuenca hidrográfica de estudio no están aislados y tienen comunicación con otros individuos dentro de su mismo radio de influencia. Esto, sin lugar a duda, afecta las decisiones de la Cuenca, tal y como lo establece el marco analítico de referencia.

El modelo econométrico aplicado define como variable dependiente el ingreso neto agrícola (IN) (Abidoye, Kurukulasuriya, et al., 2017; M. De Salvo et al., 2013; Mendelsohn et al., 1994b; Migliore et al., 2019) anual por hectárea, que con base en la ecuación 4.1 se obtiene restando al ingreso bruto los costos asociados a la producción (Ver Anexo 1).

$$INH = \sum_{j \in J} P_{ij} R_{ij} - \sum_{j \in J} P_{ij} X_{ij} \quad (4.7)$$

Las variables independientes asociadas al clima son temperatura y precipitación. A la vez se utilizan variables socioeconómicas y de características del suelo. Las variables climáticas se tomaron de las estaciones meteorológicas localizadas a lo largo del Estado de Chihuahua, a cargo del Sistema meteorológico nacional (SMN), la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y la Unión Agrícola Regional de Fruticultores del Estado de Chihuahua. En la mayoría de los casos se tomaron las normales meteorológicas desde 1981 a 2010 (Ver Anexo 1), como lo establece la metodología ricardiana.

En el caso de temperatura se determinó emplear temperaturas máximas promedio estacionales, toda vez que tanto en invierno como verano son las que afectan más el rendimiento de los cultivos. Para precipitación, se realizó la agregación por estación del año. Primavera corresponde a marzo, abril y mayo; verano a junio, julio y agosto; otoño a septiembre, octubre y noviembre, e; invierno a diciembre, enero y febrero.

Las variables de las características del suelo fueron extraídas de los prontuarios de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, editado por el INEGI para cada municipio, y el estrés hídrico se obtuvo de los estudios de disponibilidad de agua subterránea por acuífero, de la Comisión Nacional del Agua (CNA).

Las variables económicas y de características de las unidades de producción corresponden al CAGF2007. Para tener acceso a los microdatos del censo, se efectuó una solicitud ante el INEGI, habiendo proporcionado todas las facilidades para trabajar los datos en su laboratorio de microdatos en la Ciudad de México y de manera remota mediante solicitudes por correo electrónico durante el periodo de la pandemia COVID-19.

Tabla 4.1

*Variables del modelo ricardiano*

Variable dependiente	Descripción	Unidad de medida	Fuente
<b>IN</b>	Ingreso neto por unidad de producción		
<b>IN<sub>riego</sub></b>	Ingreso Neto de cultivos de riego por unidad de producción		
<b>IN<sub>temporal</sub></b>	Ingreso Neto de cultivos de Temporal por unidad de producción		
<b>IN<sub>manzana</sub></b>	Ingreso Neto de cultivo de manzana	Pesos mexicanos	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera y Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007
<b>IN<sub>maíz</sub></b>	Ingreso Neto de cultivo de maíz		
<b>IN<sub>avena</sub></b>	Ingreso Neto de cultivo de avena		
<b>IN<sub>algodón</sub></b>	Ingreso Neto de cultivo de algodón		
<b>Variables climáticas</b>			
<b>T<sub>max_prim</sub></b>	Temperatura máxima promedio mensual en primavera		
<b>T<sub>max_ver</sub></b>	Temperatura máxima promedio mensual en verano	°C	
<b>T<sub>max_oto</sub></b>	Temperatura máxima promedio mensual en otoño		
<b>T<sub>max_inv</sub></b>	Temperatura máxima promedio mensual en invierno		Estaciones meteorológicas Alvaro Obregón y La Capilla. Otras estaciones del SMN y CFE
<b>P<sub>prim</sub></b>	Precipitación en primavera		
<b>P<sub>ver</sub></b>	Precipitación en verano	mm	
<b>P<sub>oto</sub></b>	Precipitación en otoño		
<b>P<sub>inv</sub></b>	Precipitación en invierno		
<b>Variables características del suelo</b>			
<b>%fluvisol</b>	porcentaje de suelo tipo fluvisol		Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos (INEGI)
<b>%phaeozem</b>	porcentaje de suelo tipo phaeozem	%	
<b>Variables económicas</b>			
<b>rotacion</b>	Rotación de cultivos	Si=1, No=0	
<b>semilla</b>	Semilla mejorada	Si=1, No=0	
<b>gobierno</b>	Acceso a apoyos económicos del gobierno	Si=1, No=0	
<b>credito</b>	Acceso a algún crédito para la producción	Si=1, No=0	
<b>trac</b>	Tractor	Si=1, No=0	Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007
<b>maq_agr</b>	Maquinaria agrícola	Si=1, No=0	
<b>ferquim</b>	Fertilizantes químicos	Si=1, No=0	
<b>animales</b>	Animales para la siembra	Si=1, No=0	
<b>Variables características de la unidad de producción</b>			
<b>edad</b>	Edad del jefe de la unidad de producción	Años	
<b>educación</b>	Algún grado de escolaridad el jefe de la unidad de producción	Si=1, No=0	
<b>Supriv</b>	Superficie privada	hectareas	
<b>aguapot</b>	servicio de agua potable	Si=1, No=0	
<b>riego</b>	Cultivos de riego	Si=1, No=0	
<b>temporal</b>	Cultivos de temporal	Si=1, No=0	
<b>electricidad</b>	Servicio de energía eléctrica	Si=1, No=0	Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007
<b>canti</b>	Canales de tierra	Si=1, No=0	
<b>sisasper</b>	Sistema de aspersión para el riego	Si=1, No=0	
<b>fupoprof</b>	El agua proviene de pozo profundo	Si=1, No=0	
<b>furio</b>	El agua proviene de un río	Si=1, No=0	
<b>altitud</b>	Altitud de la unidad de producción	msnm	
<b>latitud</b>	Latitud de la unidad de producción	° , ' "	
<b>Otras variables</b>			
<b>aridez</b>	Índice de aridez		
<b>estacionalidad</b>	Factor de estacionalidad		
<b>estres_h</b>	Estrés hídrico		Atlas de vulnerabilidad al cambio climático

Fuente: elaboración propia

Las variables de vulnerabilidad se obtuvieron del *Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático*. La condición de Aridez se calcula mediante el índice de Lang, el cual resulta de dividir la precipitación entre la temperatura; valores muy bajos implican condiciones desérticas y los más altos condiciones muy húmedas (INECC, 2019). La variable estacionalidad se refiere al índice de estacionalidad de la precipitación y se calcula sumando el valor absoluto de las diferencias entre la lluvia mensual de cada mes y la lluvia media mensual del año, dividida por la lluvia anual del año. El rango de valores varía de 0 (todos los meses registran la misma cantidad de lluvia) a 1.83 (toda la lluvia ocurre en un solo mes).

El estrés hídrico es otra variable de vulnerabilidad que atañe a este estudio y se relaciona con el índice de aridez. A mayor factor de Lang, mayor exposición ante el estrés hídrico (INECC, 2019). Adicionalmente, se efectuó el cálculo de disponibilidad de agua subterránea de los principales acuíferos de los municipios.

### **4.3 Resultados**

La tabla 4.2 muestra la estadística descriptiva de las variables más importantes usadas en este modelo. Los ingresos netos por hectárea muestran una media de \$ 13,962 mientras que su desviación estándar es de \$ 9,035. Estos datos son el promedio de los 6 productos agrícolas con mayor valor en la entidad: maíz, avena forrajera, manzana, nuez, algodón hueso y chile verde.

Se utilizó la temperatura máxima promedio, para cada una de las estaciones del año. El valor medio más alto se ubica en verano, mientras el más bajo está en invierno; las desviaciones estándar más altas están en primavera e invierno. Las precipitaciones más abundantes se localizan en verano y las más escasas en otoño; nótese en esta variable un margen muy amplio entre las temperaturas máximas y mínimas, tal que hay municipios que solamente tienen lluvias en verano.

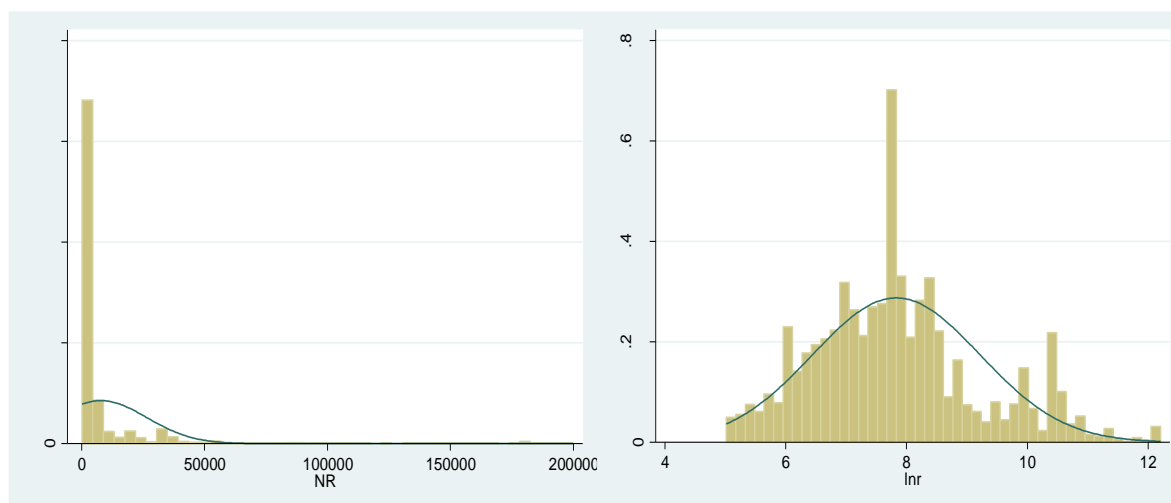
**Tabla 4.2***Estadística descriptiva*

<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación estandar</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>
<b>Inh</b>	Ingreso Neto por hectárea	\$ 13,962.27	\$ 9,035.27	\$ 48,034.11	\$ 711.09
<b>Variabes climáticas</b>					
<b>T<sub>max_prim</sub></b>	°C	28.08	4.32	38.37	20.33
<b>T<sub>max_ver</sub></b>	°C	31.91	3.86	38.88	22.37
<b>T<sub>max_oto</sub></b>	°C	27.12	3.93	36.45	19.24
<b>T<sub>max_inv</sub></b>	°C	18.50	4.01	28.52	10.92
<b>P<sub>prim</sub></b>	mm	20.36	18.14	73.00	0.00
<b>P<sub>ver</sub></b>	mm	260.04	125.30	621.00	45.50
<b>P<sub>oto</sub></b>	mm	95.94	54.42	290.80	0.00
<b>P<sub>inv</sub></b>	mm	64.70	57.83	215.00	0.00

Fuente: elaboración propia

Para evaluar los impactos y adaptación al cambio climático en el Estado de Chihuahua y posteriormente la Cuenca Laguna de Bustillos, se estimará un modelo sin adaptación y otro con adaptación (ricardiano); en el primer modelo el ingreso neto por hectárea está en función de las variables climáticas, mientras que el segundo está en función de variables socioeconómicas y características del suelo, además de las climáticas.

Se utiliza la forma log-lineal, por lo que se hace una transformación de la variable dependiente a logaritmos. Esto sucede por la gran variación de los valores de la tierra, explicados por el ingreso. En la figura 4.1 se observa que la variable INh no se distribuye como una normal hasta que se le aplica logaritmo natural.

**Figura 4.1***Transformación logarítmica del Ingreso Neto por Hectárea*

Fuente: elaboración propia

### 4.3.1 Modelo sin adaptación

El modelo sin adaptación constituye la base de este análisis, de modo que se pueda establecer un parámetro de comparación entre la valoración de los efectos de las variables climáticas por sí solas y los efectos de las variables climáticas en conjunto del comportamiento de los agricultores. Estudios precedentes han encontrado que en los modelos sin adaptación sobreestiman los daños en los ingresos agrícolas (Abidoye, Mendelsohn, et al., 2017; Ahmed & Schmitz, 2015; Seo, 2013).

Los resultados del modelo sin adaptación, es decir, únicamente con variables climáticas, se muestran en la tabla 4.3. Asimismo, las variables climáticas utilizadas en este modelo se elevan al cuadrado, con el propósito de mostrar como el efecto marginal cambia en la medida que el valor de la observación se aleja de la media. Tanto la temperatura como la precipitación, muestran un punto máximo o mínimo en los efectos sobre los ingresos netos por hectárea.

Al modelar los efectos de las variables climáticas sobre INh, observamos  $p > |t|$  mayor al 95 % de confianza. En tanto R cuadrada ajustada de 0.3369, lo que es aceptable desde el punto de vista estadístico y desde la experiencia de la modelación bajo el enfoque ricardiano. Inicialmente, se puede argumentar que el ingreso depende en alguna medida de los atributos climáticos.

**Tabla 4.3**

*Modelo sin adaptación*

In Ingresos Netos por unidad de producción	Coefficiente	P >   t
Temperatura en invierno	-0.9907	0
temperatura en invierno al cuadrado	0.0189	0
Temperatura en primavera	0.7384	0
Temperatura en primavera al cuadrado	-0.0081	0
Temperatura en verano	-2.3066	0
Temperatura en verano al cuadrado	0.0342	0
Temperatura en otoño	1.7689	0
Temperatura en otoño al cuadrado	-0.0306	0
Precipitación en invierno	-0.008	0
Precipitación en invierno al cuadrado	-0.0001	0
Precipitación en primavera	0.0393	0
Precipitación en primavera al cuadrado	-0.0001	0
Precipitación en verano	0.0079	0
Precipitación en verano al cuadrado	-0.0001	0
Precipitación en otoño	-0.0096	0
Precipitación en otoño al cuadrado	0.0001	0
R2	0.3372	
R2 Ajustada	0.3369	

Fuente: elaboración propia

Los incrementos en la temperatura en invierno y en verano tienen efectos negativos en el ingreso, mientras que en primavera y otoño son positivos (ver tabla 4.3). Para los valores de las precipitaciones, observamos que los incrementos en invierno y otoño afectan de manera negativa



el ingreso, mientras que en primavera y verano son benéficos. Aunque los valores tienen a sobreestimarse es este primer acercamiento, generalmente los efectos de las variables en el ingreso tienen el mismo sentido que en el modelo ricardiano.

#### **4.3.2 Modelo con adaptación: ricardiano**

El modelo con adaptación incluye variables socioeconómicas y de características del suelo, además de las variables climáticas. Al igual que el modelo sin adaptación, la variable dependiente es el logaritmo del ingreso neto por hectárea y las variables climáticas se elevan al cuadrado.

Se presentan algunas variables explicativas con niveles de confianza menores al 95%, debido a su importancia en el modelo. Estas variables son: temperatura en otoño, temperatura en otoño al cuadrado, precipitación en verano, precipitación en otoño al cuadrado, canal y rotación de cultivos. Las variables del modelo las agrupamos de la siguiente manera para efectos de interpretación: climáticas, características de la unidad de producción y características del suelo.

Las características de las unidades de producción a su vez se dividen en cuatro categorías:

1. Infraestructura de riego: canales de concreto, pozos y ríos.
2. Tecnología: tractor, maquinaria.
3. Perfil socioeconómico: edad del jefe de familia, escolaridad del jefe de familia.
4. Características de producción: fertilizantes, asistencia técnica y rotación de cultivos, altitud.

La temperatura máxima promedio, es la variable más importante de este modelo, aunque para otoño no es estadísticamente significativa. Nótese que para primavera y otoño la temperatura tiene

efectos positivos en el ingreso, mientras que en verano e invierno los efectos son negativos. Estos resultados son importantes dado que 52% del valor de la producción agrícola de Chihuahua se genera en el ciclo primavera-verano.

Estos resultados son congruentes con los cultivos de mayor valor económico. 60 % del valor de la producción de la Entidad se genera en 5 productos: maíz grano (16 %), nuez (14 %), manzana (13 %), chile verde (10 %) y alfalfa (8 %). La siembra del maíz se realiza entre abril y mayo, por lo que se requiere cierto nivel de humedad en el suelo y temperaturas entre 25 y 30 °C para su óptimo crecimiento.

Para la manzana, temperaturas diurnas que superen los 38 °C en verano dañan la corteza de los frutos y en invierno si las temperaturas son altas y no se logra acumular al menos 300 UF; el resultado es una disminución en la cantidad y calidad de producto; los cultivos perennes (41 % del valor total de la producción) requieren de ciertas horas de frío acumuladas (hasta 1000 UF) en la temporada de dormancia, de modo que un incremento en la temperatura causa interrupciones en este proceso.

Respecto a la precipitación, se observa un impacto positivo en el ingreso en primavera y verano y negativo en otoño e invierno. Los incrementos en la precipitación, favorecen la recarga de los acuíferos, el llenado de presas y otros cuerpos de almacenamiento, por lo que no es tan sencillo ver un efecto directo en las fechas que llueve y las que se aprovecha el agua. Aunque gran parte del Estado de Chihuahua está en estrés hídrico, es difícil cuantificar la disminución de los mantos freáticos y correlacionarlo con el ingreso.

**Tabla 4.4***Modelo ricardiano*

<b>In Ingreso neto por hectarea</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>P &gt;   t  </b>
Temperatura en invierno	-0.4594	0
temperatura en invierno al cuadrado	0.0083	0
Temperatura en primavera	0.6894	0
Temperatura en primavera al cuadrado	-0.0093	0
Temperatura en verano	-1.1852	0
Temperatura en verano al cuadrado	0.0174	0
Temperatura en otoño	0.1048	0.376
Temperatura en otoño al cuadrado	-0.0005	0.817
Precipitación en invierno	-0.0101	0
Precipitación en invierno al cuadrado	0.0001	0.01
Precipitación en primavera	0.0259	0
Precipitación en primavera al cuadrado	-0.0001	0.011
Precipitación en verano	0.0003	0.575
Precipitación en verano al cuadrado	-0.0001	0
Precipitación en otoño	-0.0034	0
Precipitación en otoño al cuadrado	0.0001	0.105
canal	0.0755	0.186
pozo	-0.1729	0.003
Tractor	1.0386	0
Maquinaria	0.7034	0
sup_priv	0.6726	0
Fertilizante	0.5471	0.001
rotación	-0.0466	0.424
Asistencia técnica	0.9756	0
edad	0.0012	0.014
Bachillerato	0.1072	0
altitud	0.0004	0
leptosol	-0.5588	0
R2		0.4313
R2 Ajustada		0.4309

Fuente: elaboración propia

Respecto a la precipitación, se observa un impacto positivo en el ingreso en primavera y verano y negativo en otoño e invierno. Los incrementos en la precipitación, favorecen la recarga de los acuíferos, el llenado de presas y otros cuerpos de almacenamiento, por lo que no es tan sencillo ver un efecto directo en las fechas que llueve y las que se aprovecha el agua. Aunque gran parte del Estado de Chihuahua está en estrés hídrico, es difícil cuantificar la disminución de los mantos freáticos y correlacionarlo con el ingreso. La mayor parte de los coeficientes de los

términos al cuadrado son significativas, lo que significa que los efectos del clima en el ingreso tienen una tendencia no lineal.

Las variables de infraestructura de riego presentan resultados mixtos. Por un lado, el ingreso se incrementa si la unidad de producción tiene canales de concreto, aunque esta variable no es estadísticamente significativa. En tanto, la presencia de pozo en la unidad de producción pareciera que no representativa de beneficio; esto pudiera ser por los altos costos de bombeo, dado que a medida que pasa el tiempo, el nivel freático de los acuíferos disminuye y los costos asociados al bombeo se incrementan.

Respecto a las variables tecnológicas, tenemos que el tractor tiene un peso fundamental en el ingreso. Una unidad de producción que agregue un tractor a su producción, puede incrementar el ingreso neto cerca del 104 %. Asimismo, la maquinaria agrícola (trilladoras, cosechadoras, de labranza, etc.) tiene un impacto positivo.

Del grupo perfil socioeconómico, tenemos que las unidades de producción cuyo jefe de familia cuenta con bachillerato se incrementa el ingreso neto; de igual manera, los jefes de familia con mayor edad suponen mayor ingreso para sus unidades de producción; respecto a la tenencia de la tierra, la propiedad privada impacta de manera positiva el ingreso. Finalmente, las variables de producción presentan resultados mixtos; el uso de fertilizantes y asistencia técnica con impacto positivo en el ingreso y la rotación de cultivos con impacto negativo.

La característica del suelo estadísticamente significativa para este modelo fue el tipo leptosol (medido en porcentaje), cuyo impacto en el ingreso es negativo. El suelo tipo leptosol es tierra fina sobre afloramientos rocosos en zonas erosionadas, por lo que no son muy aptos para actividades

agrícolas. Finalmente, una mayor altitud impacta de manera positiva el ingreso, con los cultivos actuales.

La tabla 4.5 proporciona mayor claridad de los efectos marginales de las variables climáticas sobre el ingreso neto por hectárea, tanto en un escenario con adaptación y sin adaptación. Se observa un mayor impacto en el ingreso en el modelo sin adaptación a nivel estacional, aunque los signos son en el mismo sentido para ambos casos. Un incremento en la temperatura en invierno en 1 °C reduce el ingreso 45.94 % en el modelo sin adaptación, mientras que para el modelo sin adaptación la minusvalía es de 99 %. Esta anotación de las magnitudes es importante, ya que las elasticidades son más altas sin adaptación.

**Tabla 4.5**

*Efectos marginales de las variables climáticas sobre el ingreso neto por hectárea*

	Con Adaptación	Sin Adaptación
<b><math>d\ln V/dT</math></b>		
Temperatura en invierno	-45.94%	-99.00%
	0	0
Temperatura en primavera	68.94%	74.00%
	0	0
Temperatura en verano	-118.52%	-230.00%
	0	0
Temperatura en otoño	10.47%	176.00%
	-0.37	0
<b><math>d\ln V/dP</math></b>		
Precipitación en invierno	-1.00%	-0.80%
	0	0
Precipitación en primavera	2.58%	4.00%
	0	0
Precipitación en verano	0.10%	1.00%
	-0.57	0
Precipitación en otoño	-0.30%	-1.00%
	0	0

Fuente: elaboración propia

Para las variables de precipitación, exceptuando invierno, los valores son más altos para el modelo sin adaptación. El periodo de mayor interés para esta variable es verano, tal que una disminución en 1 mm de lluvia impacta negativamente el ingreso en 0.10 % con adaptación y 1 % sin adaptación.

#### **4.3.3 Modelos con adaptación en función de la modalidad: riego y temporal**

En Chihuahua, 98 % del ingreso agrícola se genera en la modalidad riego, por lo que solo 2 % del ingreso corresponde a temporal. En tanto, 58 % de la superficie agrícola está dentro de la modalidad temporal. La relevancia de estas cifras, consiste en la inferencia de una baja productividad y ausencia de capacidades productivas en los terrenos de temporal. Se evalúa el modelo ricardiano tomando como referencia la modalidad de producción: riego y temporal.

Los modelos tienen como variable dependiente el ingreso neto por hectárea y como variables explicativas el clima, variables socioeconómicas y características del suelo. Al igual que el modelo para todos los cultivos, la presencia de variables no significativas, pero teóricamente importantes. Asimismo, se rechaza la prueba de normalidad en los residuos para ambos modelos, así como heterocedasticidad y multicolinealidad.

En la tabla 4.6 observamos mayor causalidad ( $R$  cuadrada ajustada) entre las variables climáticas, socioeconómicas y de características del suelo sobre el ingreso neto por hectárea, para cultivos de temporal que riego. Respecto a la temperatura, en ambas modalidades tiene el mismo sentido, solo cambia la magnitud; los cultivos de riego presentan mayor sensibilidad a los incrementos de temperatura.

Tabla 4.6

*Modelos ricardianos en función de la modalidad: riego, temporal*

<b>In Ingreso neto por unidad de producción</b>	<b>Riego</b>	<b>Temporal</b>
Temperatura en invierno	-1.09 0	-0.22 0
temperatura en invierno al cuadrado	0.027 0	0.01 -0.17
Temperatura en primavera	1.01 0	0.85 0
Temperatura en primavera al cuadrado	-0.02 0	-0.01 0
Temperatura en verano	-3.13 0	-1.96 0
Temperatura en verano al cuadrado	0.05 0	0.001 0
Temperatura en otoño	2.44 0	0.29 -0.07
Temperatura en otoño al cuadrado	-0.04 0	-0.003 -0.29
Precipitación en invierno	-0.01 0	-0.008 0
Precipitación en invierno al cuadrado	0.01 -0.46	0.001 -0.88
Precipitación en primavera	0.02 0	0.015 0
Precipitación en primavera al cuadrado	-0.01 0	-0.001 -0.01
Precipitación en verano	-0.01 0	0.003 0
Precipitación en verano al cuadrado	0.01 -0.03	0.001 0
Precipitación en otoño	0.007 -0.258	-0.005 0
Precipitación en otoño al cuadrado	-0.001 0	0.001 0
Aspersión	0.07 -0.11	
Yunta	-0.41 0	
Vehiculos para transporte de carga	0.42 0	0.45 0
Maquinaria	0.64 0	0.51 0
Superficie privada	0.67 0	0.45 0
Porcentaje de suelos tipo phaeozem	-1.09 0	0.28 0
Bachillerato	0.09 0	

*continúa...*

...continuación de la tabla 4.6

Presión a los recursos naturales	0.57	-0.48
	-0.01	0
Estrés hídrico	0.001	0.001
	-0.69	-0.42
Tractor		1.05
		0
Fertilizante		0.37
		0
Semilla mejorada		0.04
		-0.25
Rotación de cultivos		-0.16
		-0.04
Asistencia técnica		0.9
		0
índice de aridez		0.28
		0
Resistencia de la vegetación		-1.69
		0
R2	0.1557	0.3576
R2 Ajustada	0.1538	0.357

Fuente: elaboración propia

Este resultado es consistente con los estudios realizados en la región norte del país a cultivos de manzana y nuez, ambos bajo la modalidad de riego principalmente; para el caso de la manzana, la presencia de inviernos más cálidos tiene efectos importantes en la floración, del cual depende todo el ciclo anual de la manzana, así como la mayor presencia de plagas (Ramírez et al., 2011).

Para el caso de la nuez, en el escenario más catastrófico de incremento en la temperatura para la región noroeste de México, se estaría eliminando el nogal y en general a los frutales caducifolios del patrón de cultivo regional (Medina et al., 2019).

Respecto a las características de la unidad de producción, el factor tecnológico tiene efectos positivos en el ingreso; el tractor es la variable con mayor peso relativo para temporal<sup>14</sup>, aunque la maquinaria agrícola y vehículos de carga son importantes para ambas modalidades; los vehículos

<sup>14</sup> No significativa estadísticamente para riego, dado que muchos cultivos de esta modalidad son perennes, por lo que el tractor no es indispensable.



de carga juegan un importante papel en la logística de los productos, en un contexto donde los mercados no están en el mismo lugar de los centros productivos. La variable yunta tiene un impacto negativo en el ingreso del riego, lo que es consistente con la teoría.

La variable aspersión para el riego, incrementa el ingreso. Cabe señalar que las tecnologías de riego, se emplean con mucha regularidad en las huertas de manzana y nuez, por lo que el sentido de la variable es consistente y relevante para el modelo. Algunas otras variables, como pozos, ríos, estanques, etc., resultaron con un menor grado de significancia estadística, por lo que se descartaron del modelo de riego.

En los cultivos de temporal se observa que el uso de fertilizantes, semilla mejorada y asistencia técnica, tienen efectos positivos en el ingreso<sup>15</sup>. No obstante, la rotación de cultivos aparece con signo negativo; de acuerdo al modelo, se pueden generar pérdidas al introducir más cultivos en el ciclo agrícola, sobre todo si tienen poca resistencia a las condiciones climáticas adversas.

La característica del suelo que mostró significancia es el porcentaje de suelo tipo phaeozem, con signo negativo para el riego y positivo para temporal; este tipo de suelo, se caracteriza por la presencia de materia orgánica, por lo que un mayor porcentaje implica más fertilidad. Lo anterior indica, lo importante que es la variable para la productividad en temporal.

En el Estado de Chihuahua, de los 61 acuíferos contabilizados, 41 ya no tienen disponibilidad de agua. Esta estadística es consistente con el modelo, donde la variable estrés hídrico, basada en el índice de Lang, se relaciona de manera positiva con el ingreso de ambas

---

<sup>15</sup> Para riego no tienen significancia estadística.

modalidades<sup>16</sup>; recordemos que a menor valor del factor de Lang, mayor exposición al estrés hídrico.

El índice de resistencia de la vegetación afecta de manera negativa al ingreso para los cultivos de temporal; recordemos que el nivel más bajo de este índice es 5, mientras que el más alto es 1; por ello, la relación inversa es consistente.

#### **4.4 Escenarios para la Cuenca Laguna de Bustillos**

De acuerdo con simulaciones realizadas con base en escenarios de cambio climático, estimamos los cambios en temperatura y precipitación para la Cuenca Laguna de Bustillos. Los escenarios utilizados para tal propósito se construyeron utilizando una resolución espacial de 30'' x 30'', bajo los modelos climáticos acoplados GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR. Asimismo, se proyectó bajo los escenarios de emisiones RCP 4.5 y RCP 8.5, bajo el horizonte temporal cercano (2015-2039), medio (2045-2069) y lejano (2075-2099).

Las proyecciones de precipitación (ver tabla 4.8) dibujan un escenario con reducciones importantes tanto en un horizonte cercano (2015-2039), medio (2045-2069) y lejano (2075-2099). Para el modelo climático GFDL-CM3, en el horizonte cercano y con un forzamiento de 4.5, se tiene una disminución en las precipitaciones de 21 mm, así como un incremento en la temperatura de 0.4 °C. Mientras tanto, para el modelo MPI-ESM-LR, bajo los mismos criterios dichas precipitaciones se reducen 17.83 mm y la temperatura aumenta 0.19 °C. Si el forzamiento radiativo es de 8.5, las precipitaciones anuales se incrementan en 57.68 mm y la temperatura sube 0.57 °C

---

<sup>16</sup> Aunque no es estadísticamente significativa.

en el modelo GFDL-CM3; en MPI-ESM-LR se reducen las lluvias en 37.83 mm y se incrementa la temperatura 0.45 °C.

**Tabla 4.7**

*Escenario base de normales climatológicas 1981-2010*

	Precipitación	Temperatura media
Enero	13.28	6.73
Febrero	6.38	8.13
Marzo	6.23	10.90
Abril	9.73	14.00
Mayo	19.83	17.45
Junio	40.43	21.30
Julio	113.98	20.98
Agosto	123.85	19.88
Septiembre	104.25	18.20
Octubre	26.73	14.33
Noviembre	11.20	9.93
Diciembre	12.48	7.15
<b>Total</b>	<b>488.33</b>	<b>Promedio 14.08</b>

Fuente: elaboración propia

Para los horizontes medio y lejano, ambos modelos climáticos predicen resultados mixtos en las precipitaciones. Esto es, incremento en las precipitaciones en RCP4.5 para GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR en el horizonte medio y en el horizonte lejano, solo RCP8.5 para GFDL-CM3 tiene incrementos en esta variable. Los demás resultados con reducciones en las precipitaciones.

Respecto a la temperatura (ver tabla 4.8), se proyectan incrementos en los horizontes medio y lejano; el modelo climático más pesimista GFDL-CM3 proyecta en RCP 4.5 +1.65 °C y +2.39 °C y en RCP 8.5 +2.77 °C y 5.01 °C. En tanto, MPI-ESM-LR proyecta en RCP 4.5 +0.88 °C y 1.55 °C y en RCP 8.5 +2.29 °C y 4.18 °C.

Tabla 4.8 Cambios en la precipitación para la Cuenca Laguna de Bustillos

	HORIZONTE CERCANO (2015-2039)				HORIZONTE MEDIO (2045-2069)				HORIZONTE LEJANO (2075-2099)			
	RCP 4.5		RCP 8.5		RCP 4.5		RCP 8.5		RCP 4.5		RCP 8.5	
	GFDL-CM3	MPI-ESM-LR	GFDL-CM3	MPI-ESM-LR	GFDL-CM3	MPI-ESM-LR	GFDL-CM3	MPI-ESM-LR	GFDL-CM3	MPI-ESM-LR	GFDL-CM3	MPI-ESM-LR
Invierno	-2.38	-8.13	27.63	0.13	-1.88	0.88	-4.88	-0.63	-3.13	9.13	9.38	-20.38
Primavera	-14.03	1.73	-7.53	-3.28	-4.53	-0.52	-20.78	-9.03	-17.53	-14.78	-17.53	-22.28
Verano	-3.00	-12.75	8.50	-32.50	14.00	-16.00	5.50	-52.75	10.75	-45.00	-30.00	-85.25
Otoño	-1.67	1.33	29.08	-2.17	39.33	-0.17	21.08	-1.67	-14.43	4.58	44.83	-10.43
	-21.08	-17.83	57.68	-37.83	46.93	-15.83	0.93	-64.08	-24.33	-46.08	6.68	-138.33

Nota: los datos fueron extraídos de la Actualización de escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación, de la Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales de la UNAM

Tabla 4.9 Cambios en la temperatura para la Cuenca Laguna de Bustillos

	HORIZONTE CERCANO (2015-2039)				HORIZONTE MEDIO (2045-2069)				HORIZONTE LEJANO (2075-2099)			
	RCP 4.5		RCP 8.5		RCP 4.5		RCP 8.5		RCP 4.5		RCP 8.5	
	GFDL-CM3	MPI-ESM-LR	GFDL-CM3	MPI-ESM-LR	GFDL-CM3	MPI-ESM-LR	GFDL-CM3	MPI-ESM-LR	GFDL-CM3	MPI-ESM-LR	GFDL-CM3	MPI-ESM-LR
Invierno	-0.15	-0.38	-0.04	0.08	0.81	0.38	1.89	1.54	1.58	0.64	3.33	3.22
Primavera	0.54	0.01	0.21	0.29	1.65	0.67	2.75	1.89	2.37	1.98	4.58	4.08
Verano	0.36	0.37	1.04	0.63	1.61	1.03	2.89	2.57	2.38	1.78	5.81	4.65
Otoño	0.86	0.78	1.07	0.79	2.54	1.46	3.54	3.14	3.24	1.80	6.32	4.79
	0.40	0.19	0.57	0.45	1.65	0.88	2.77	2.29	2.39	1.55	5.01	4.18

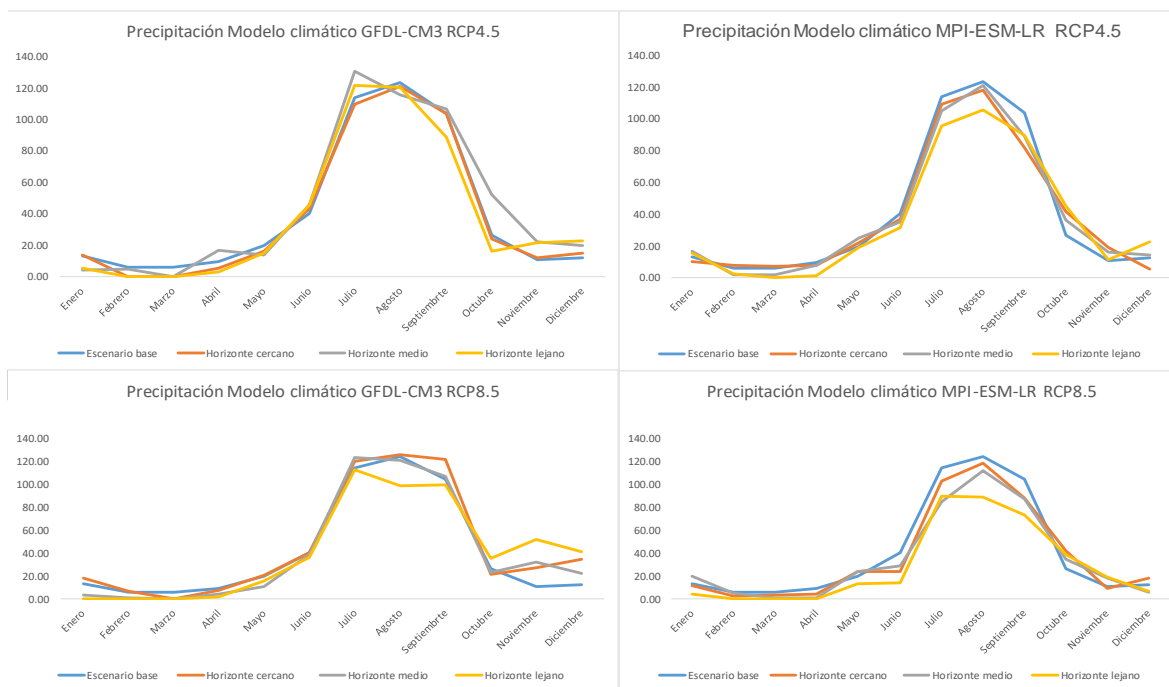
Nota: los datos fueron extraídos de la Actualización de escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación, de la Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales de la UNAM

Los cambios intraanuales de la temperatura se distribuyen de manera casi homogénea, teniendo los mayores incrementos en otoño. Aunque en el horizonte cercano se observan pequeños movimientos a la baja en invierno, en el escenario más lejano la temperatura tiene un incremento importante de más del 3% para RCP8.5.

En la figura 4.2 se aprecia el cambio interanual en los patrones de precipitación para RCP 4.5. Nótese que durante primavera (mar-abr-may) las precipitaciones en los escenarios proyectados son menores que el escenario base, en verano se ajustan más al nivel del escenario base y en otoño e invierno son mayores. Ambos modelos sugieren que en el futuro las lluvias se estarán desplazando hacia otoño e invierno.

**Figura 4.2**

*Cambio de patrón de la precipitación en la Cuenca Laguna de Bustillos (2015-2099)*



Fuente: elaboración propia con datos de *Actualización de escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación*, de la Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales de la UNAM

Respecto a RCP8.5, es más evidente la disminución en las precipitaciones, sobre todo en primavera-verano. Esto se observa con mayor claridad en el modelo climático MPI-ESM-LR, donde esas disminuciones, no se recuperan en otoño-invierno. En GFDL-CM3 parte de estas pérdidas de precipitación se recuperan en otoño-invierno.

#### **4.5 Impactos**

En este apartado se describen los impactos en los ingresos netos agrícolas proyectados en la Cuenca Laguna de Bustillos, bajo los modelos climáticos GFDL-CM y MPI-ESM-LR y mediante forzamientos radiativos 4.5 y 8.5. Para el efecto, se multiplican los efectos marginales por los cambios en la temperatura y precipitación de los diferentes escenarios planteados.

En la Tabla 4.9 se observa la predicción del modelo ricardiano respecto a los escenarios planteados por GFDL-CM3; en el horizonte cercano, los cambios en temperatura y precipitación dan como resultado -23% en el ingreso neto por hectárea con RCP4.5. No obstante, con RCP8.5 las pérdidas son de -151%, lo que implicaría la pérdida total del sector agrícola.

Lo que indican estos resultados, es la falta de capacidades que tiene la Cuenca Laguna de Bustillos ante los inminentes cambios en las variables climáticas. Si bien es cierto que los modelos no son estáticos y en el tiempo se van ajustando ciertos valores, existe un umbral para los cultivos de la Cuenca que no debe ser cruzado. En los horizontes medio y lejano, de continuar con las mismas capacidades adaptativas, el ingreso neto agrícola se encontrará en valores cercanos a cero.

**Tabla 4.9**

*Impactos del cambio climático en los ingresos netos por hectárea en la Cuenca Laguna de Bustillos, Modelo Climático GFDL-CM3*

HORIZONTE CERCANO (2015-2039)		
	RCP 4.5	RCP 8.5
Cambio en los Ingresos Netos	-23	-151
HORIZONTE MEDIO (2045-2069)		
	RCP 4.5	RCP 8.5
Cambio en los Ingresos Netos	-109	-260
HORIZONTE LEJANO (2075-2099)		
	RCP 4.5	RCP 8.5
Cambio en los Ingresos Netos	-196	-534

Fuente: elaboración propia

El Modelo climático MPI-ESM-LR (ver tabla 4.10) es más optimista respecto a los impactos en el ingreso. En el horizonte cercano con RCP4.5 los impactos representan el -6%, mientras que con RCP8.5 -61%. Para el horizonte medio con RCP4.5 el impacto es de -82%, mientras que, para el resto de los escenarios, si las variables socioeconómicas se mantienen constantes, estamos hablando de la desaparición del sector agrícola.

Los resultados que puedan tenerse en los diferentes horizontes de tiempo, dependen de las estrategias que se formulen tanto al interior como al exterior de las unidades de producción agrícola para fortalecer las capacidades y de manera progresiva adaptarse a las nuevas condiciones. Los diversos impulsos generados mediante estrategias de adaptación, serán el artífice para minimizar las pérdidas en el ingreso.

**Tabla 4.10**

*Impactos del cambio climático en los ingresos netos por hectárea en la Cuenca Laguna de Bustillos, Modelo climático MPI-ESM-LR*

HORIZONTE CERCANO (2015-2039)		
	RCP 4.5	RCP 8.5
Cambio en los Ingresos Netos	-6	-61

HORIZONTE MEDIO (2045-2069)		
	RCP 4.5	RCP 8.5
Cambio en los Ingresos Netos	-82	-241

HORIZONTE LEJANO (2075-2099)		
	RCP 4.5	RCP 8.5
Cambio en los Ingresos Netos	-139	-414

Fuente: elaboración propia

## 4.5 Adaptación

Una vez estimado el modelo ricardiano para Chihuahua, México y evaluado en la Cuenca Laguna de Bustillos, se puede establecer un marco de referencia para los escenarios climáticos futuros y su adaptación. Partimos del hecho que, los agricultores del Estado de Chihuahua toman decisiones cada inicio de ciclo agrícola, sobre que cultivo sembrar, que tecnología aplicar, en que fechas realizar cada uno de los procesos, que agentes involucrar, etc. Esto les permite, maximizar sus beneficios, sujetos a sus restricciones presupuestales y climáticas.



Los agricultores de la Cuenca, al momento de tomar sus decisiones de producción, se ven influenciados por tres vías: sus experiencias, las experiencias de otros agricultores (Estado de Chihuahua) y sus expectativas hacia el futuro. Si la expectativa es un incremento en las temperaturas, tomarán las experiencias de los agricultores de zonas más cálidas para reformular su estrategia de producción.

En el modelo aplicado al Estado de Chihuahua, se pudo observar la presencia de algunas adaptaciones, siendo la más importante el uso de tecnología. En la medida que las unidades de producción tengan acceso a tecnología de producción, almacenamiento, transporte, logística, riego y protección de los cultivos, se recuperará parte del ingreso perdido por las condiciones climáticas.

Para la Cuenca de análisis, la adaptación por el lado de la tecnología presenta hitos fundamentales. Por el lado de la producción, 90%<sup>17</sup> de las unidades tienen acceso a tractor, lo que posiciona esta adaptación en un nivel alto (ver tabla 4.11). De acuerdo al modelo ricardiano, una unidad de producción que pasa de no tener acceso a tractor a contar con al menos uno, incrementa sus ingresos en 103%.

Para tecnologías de almacenamiento, transporte y logística en la Cuenca se observan capacidades más limitadas. Solamente 0.8 % de las unidades tiene instalaciones para el manejo de la producción (deshidratadoras, seleccionadoras, empacadoras) y 19 % cuentan con vehículos de carga de más de dos toneladas. Las tecnologías de almacenamiento, transporte y logística tienen un efecto positivo en el ingreso.

---

<sup>17</sup> Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007, INEGI

El uso de fertilizantes tiene un nivel alto de adaptación, lo que es útil en términos de los rendimientos de los cultivos. En tanto, la semilla mejorada cuenta con un nivel bajo de adaptación, lo que da lugar a generar estrategias que estén orientadas a mejorar la genética de las semillas para tener mayor resistencia a la variabilidad climática. En la Cuenca, solo 6% de la superficie utiliza semilla mejorada.

Respecto a las tecnologías de riego, se observa en la Cuenca que únicamente 1.2 % de las unidades censadas usa aspersión, 1.5 % micro aspersión y 0.2 % goteo. Esto abre una enorme ventana de oportunidad como estrategia de adaptación y más en una Cuenca cuyo acuífero está dentro de la categoría de sobreexplotado.

La adaptación por el lado de la tecnología, requiere un empuje fuera de la unidad de producción, ya sea desde el gobierno en sus tres niveles, el mercado y las organizaciones civiles. Todo ello por la capacidad económica limitada de los agricultores. Esta adaptación se puede materializar mediante créditos, subvenciones, inversiones de sociedades cooperativas agrícolas, arrendamientos con garantías gubernamentales, etc.

De acuerdo al modelo ricardiano, hay estrategias de adaptación que para este caso de estudio son poco claras, tal es el caso de la rotación de cultivos. En diferentes modelos, el ingreso neto tiene respuesta negativa a rotación de cultivos, aunque en mayor medida en temporal. Los cultivos de temporal pasan por un proceso de adaptación natural, haciéndose más resistentes a las características de su entorno, lo que pasa en menor medida con los cultivos de riego.

Otra adaptación detectada en el modelo es el riego. El CAGyF 2007 nos muestra que 59.34% de la superficie sembrada es de temporal y solo aporta 15.3% del ingreso. Esto abre una

ventana de oportunidad para generar infraestructura de riego (principalmente mediante bordos y sistemas de captación de lluvia) e incrementar la productividad de estas parcelas. Aunque las propias características físicas de estos terrenos muchas veces impiden llevar a cabo estrategias efectivas, se recuperaría una parte de la productividad. En resumen, se plantea una reconversión parcial de la modalidad de producción.

**Tabla 4.11**

*Adaptaciones en la Cuenca Laguna de Bustillos*

<b>Adaptación</b>	<b>Componente</b>	<b>Observado en</b>	
		<b>modelo ricardiano</b>	<b>Nivel</b>
Tecnología	Tractor	si	Alto
	Maquinaria agrícola	si	Bajo
	Vehículos de carga	si	Medio
	Semilla mejorada	si	Bajo
	Fertilizantes	si	Alto
	Rotación de cultivos	si	Bajo
Riego	Aspersión	si	Bajo
	Canal de concreto	si	Bajo
Productos financieros	Crédito	no	Bajo
	Seguros	no	Bajo
	Subvenciones	no	Bajo
Asistencia Técnica	Asistencia técnica	si	Bajo

Fuente: elaboración propia

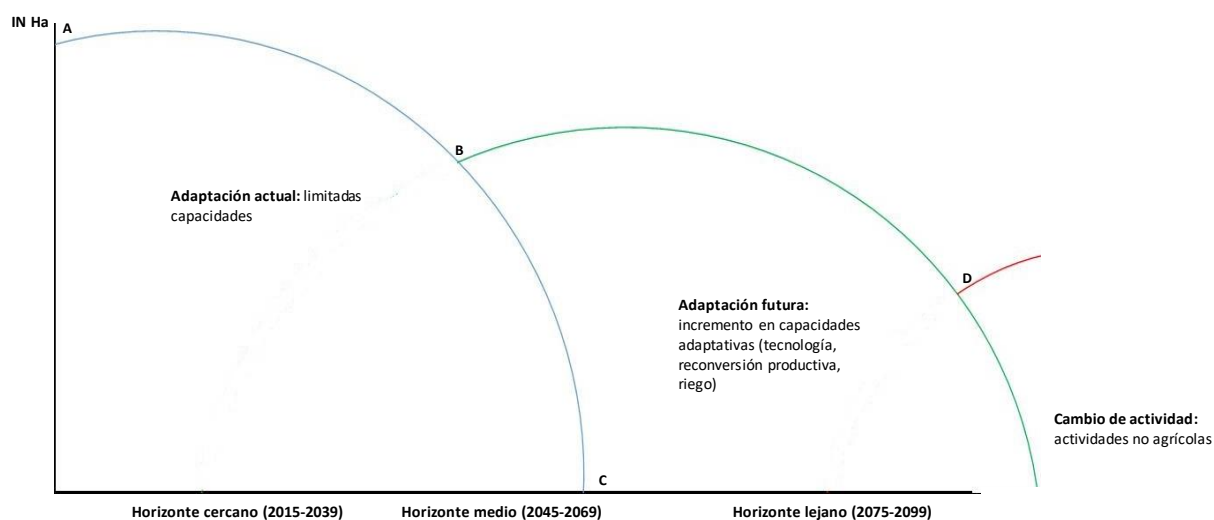
Dentro de la adaptación por riego, las unidades de producción tienen un margen de maniobra importante en su interior, para lograr una mejor gestión del recurso hídrico. Esto significa, que además de adoptar tecnologías de uso eficiente del agua, pueden mejorar sus técnicas de riego, cambiar los horarios, la organización de cultivos, las fechas de siembra, etc.

Existen otras adaptaciones no detectadas en el modelo: crédito, seguros, subvenciones. A lo largo de la Cuenca, solamente 9 % de los encuestados afirmaron contar o haber contado con

algún crédito agrícola, mientras solo 0.3% dijo contar o haber contado con algún seguro agrícola. Respecto a las transferencias del gobierno por la actividad agrícola, 15% de los encuestados afirmaron haber recibido apoyos. El nivel de adaptación de estos componentes es bajo.

**Figura 4.3**

*Adaptación en la Cuenca Laguna de Bustillos*



Fuente: elaboración propia

De acuerdo al modelo ricardiano, la adaptación en la Cuenca Laguna de Bustillos será paulatina y estará en función de la construcción de capacidades. El modelo indica que las estrategias pueden ser eficaces, pero en el horizonte cercano en común denominador es la falta de capacidades; pocas unidades de producción cuentan con tecnología, riego, asesoría técnica, financiamiento, acceso a mercados, etc.

En la figura 4.3 observamos que en el tiempo los ingresos netos por hectárea seguirán disminuyendo en promedio. Nótese el comportamiento de la variable del ingreso del punto A al punto C, lo que pasaría si la adaptación se mantuviera estática y las variables climáticas se

comportaran de acuerdo a lo pronosticado por el modelo MPI-ESM-LR RCP4.5. Este segmento del gráfico indica la desaparición del sector agrícola en la Cuenca por la falta de rentabilidad, de no existir un cambio en las capacidades adaptativas. De acuerdo al argumento del modelo, esto no pasa en la realidad, debido a que los agricultores en la medida que ven sus minusvalías cambian sus estrategias productivas, dado un entorno con diferentes condiciones climáticas.

El punto B de la Figura 4.3, indica que hay una construcción efectiva de capacidades adaptativas. Cabe señalar que esto no se da en un periodo corto de tiempo, si no que tienen que pasar varios años para que el resultado sea palpable. De acuerdo al modelo, la tecnificación tanto del proceso productivo, como el riego y la logística es la adaptación más importante, por lo que se tendría que incrementar la adquisición de tractores, maquinaria agrícola, vehículos de transporte, espacios para almacenamiento, conservación de productos y tecnificación del riego.

Actualmente, parte relevante de los agricultores utilizan la infraestructura de canales de tierra, lo que implica pérdidas importantes de agua por evapotranspiración y filtración. El reto es tecnificar el riego en las unidades de producción de esta modalidad, con aspersión, microaspersión, goteo u otra técnica con eficiencia en el ahorro de agua. También, la construcción de presas, bordos, canales de concreto, reservorios de agua, etc., tendrán un impacto positivo en el ingreso. Estas adaptaciones serán posibles si se unen esfuerzos entre gobierno, agricultores y mercado.

La reconversión productiva es otra de las propuestas de adaptación. A medida que los incrementos en la temperatura se hagan patentes, veremos la caída en los rendimientos de algunos cultivos, que aun con la inserción de tecnología su operación se volverá insostenible; esto implica la introducción de nuevos cultivos que tengan mayor tolerancia a la escasez de agua e incremento en la temperatura y radiación solar.

Si se construyen capacidades de adaptación efectivas, los ingresos netos por hectárea retomarán la senda de crecimiento hasta el punto D, donde ya no sea atractivo para los campesinos seguir trabajando la tierra. Después de eso, se prevé el cambio de uso de la tierra por actividades no agrícolas; algunas alternativas son darle un uso residencial o industrial, para que siga generando un ingreso para sus propietarios.

## Conclusiones

En este análisis de tipo transversal, se utilizó información del Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007 a nivel microdatos, para comprender el papel que juega el clima en los ingresos de los agricultores de la Cuenca Laguna de Bustillos en el Estado de Chihuahua, México. Se empleó un estudio a nivel cuenca hidrográfica por ser la unidad básica de gestión desde una visión del territorio, dado que sus límites naturales y políticos permiten tratar sus componentes como una unidad homogénea.

El marco teórico de referencia corresponde al enfoque ricardiano, planteado por Mendelsohn en 1994. La pretensión principal al usar un enfoque holístico, fue justamente recoger las observaciones de la integración de las partes que interactúan en el espacio y sus efectos en el largo plazo. El ingreso agrícola es sometido a una regresión sobre el clima estacional, variables socioeconómicas y características del suelo.

El clima, al ser un componente fuera del control de los agricultores, plantea riesgos para el ingreso, por lo que se contempló la adaptación como una estrategia de gestión. La regresión efectuada en el modelo econométrico, permitió identificar la dirección y magnitud de los impactos sobre el ingreso, así como los componentes de adaptación actual.

Los efectos marginales de la regresión indican que, ante el aumento en la temperatura de 1 °C anual, el ingreso neto por hectárea tiene un impacto de -85.05 %. En tanto, ante una disminución en la precipitación de 1 mm anual, el impacto en el ingreso es de -1.38 %. A nivel intraanual, se observa que el incremento de la temperatura impacta positivamente el ingreso en primavera y otoño, mientras que en verano e invierno tiene efectos negativos. Para el caso de la precipitación,

un incremento en la cantidad de lluvia impacta positivamente el ingreso en primavera y verano, mientras que en otoño e invierno el efecto es negativo.

Se proyectaron impactos marginales en el ingreso neto por hectárea en los horizontes cercano, medio y lejano, bajo los modelos climáticos MPI-ESM-LR y GFDL-CM3 y con forzamientos radiativos de 4.5 y 8.5. Los resultados sugieren en el horizonte cercano (2015-2039) impactos entre -6 y -23 % en el ingreso bajo el RCP4.5, mientras que en un horizonte medio (2045-2069), los efectos pueden estar entre -82 y -109 % para el mismo RCP.

Los cultivos con mayor valor para la Cuenca y en los cuales se concentran las amenazas, son la manzana y el maíz. Para el caso de la manzana que requiere determinadas horas de frío (debajo de 7 °C) en el periodo de dormancia, observamos que en el mediano y largo plazo difícilmente podrá obtenerlos. Esto implica el uso de compensadores de horas frío, que, si bien no van a reemplazar por completo esa deficiencia, ayudan a mitigar los efectos negativos. Las unidades de producción con pocas capacidades para el empleo de estas alternativas serán los más perjudicados.

Respecto al maíz, para la modalidad riego también es vulnerable al incremento en las temperaturas y escasez de agua. Durante los periodos de sequías, la variedad de maíz cultivado en la modalidad de riego no tiene la resistencia suficiente y de no suministrarle la cantidad de agua requerida, terminará por disminuir de manera importante sus rendimientos. Para el maíz de temporal, la resistencia a la falta de lluvia e incremento de la temperatura es mayor, por lo que no es tan evidente una disminución fuerte en los rendimientos.



Debido al enfoque estático comparativo de este estudio, las magnitudes de los impactos en el futuro pueden cambiar. Se ha evaluado en los cambios de temperatura y precipitación, pero no en el resto de las variables. Además, los cambios esperados en el clima dependerán también de las emisiones futuras y de las recalibraciones de los modelos climáticos. Lo que sí se puede afirmar con un nivel de confianza alto, es la dirección de los impactos.

Ante la eminente contracción en el ingreso neto de los agricultores de la Cuenca, la gestión de la adaptación jugará un rol fundamental. Partiendo de la adaptación actual, el modelo ricardiano ha identificado tres componentes: tecnología, riego y asistencia técnica. Respecto a la tecnología, se observa una parte dedicada a la producción y otra al resto de la cadena de valor de los cultivos.

Respecto a la tecnología de producción, la Cuenca cuenta con capacidades con nivel medio, siendo el tractor es el principal elemento de esta adaptación. También figuran el mejoramiento genético de la semilla y los fertilizantes químicos, que al igual que el tractor impacta positivamente el ingreso neto. De acuerdo con la información del CAGF2007, hasta ese momento no hay indicios de la aplicación generalizada de agricultura de precisión; esto es, uso de sistemas de nanotecnología y medios electrónicos para obtener registros de los cultivos y los elementos con los que interactúan.

La tecnología de almacenamiento, procesamiento, transporte y logística son la segunda parte de esta adaptación; los vehículos de transporte de carga y la maquinaria agrícola tienen efectos positivos en el ingreso, aunque para la cuenca el valor de esta adaptación es bajo. Es decir, menos del 25 % de las unidades de producción cuentan con esta tecnología. Empero, en términos de tecnología de almacenamiento, procesamiento y transporte de última generación (cámaras de control de temperatura, vehículos de carga bajos en emisiones, etc.), existe una brecha importante.

El riego es la segunda adaptación observada. Las unidades de producción que cuentan con infraestructura para transporte de agua como canales de concreto, incrementan su ingreso 7.5 %<sup>18</sup>, al igual que aquellas con mecanismos de aspersión. Cabe señalar que la modalidad riego en esta Cuenca, depende particularmente del agua subterránea. La adaptación por riego es baja para la Cuenca.

En los últimos años, se han acentuado las disputas e inequidades respecto a la asignación del agua del Acuífero Cuauhtémoc. Los agricultores con mayor capacidad de extracción del recurso, hacen uso de mayores volúmenes de los que tienen asignados, dado que no todos los aprovechamientos cuentan con medidores, ni hay una supervisión rigurosa de los volúmenes de las concesiones. Se estima que anualmente el déficit sobrepasa medio millón de metros cúbicos de agua.

La tercera adaptación observada es la asistencia técnica. Aunque tiene un nivel bajo, esta adaptación constituye uno de los pilares para hacer frente al cambio climático. Los agricultores requieren tener acceso a mayor información agroclimática de calidad y en los tiempos precisos, así como el acompañamiento de personal técnico para planificar la producción de sus cultivos.

El modelo identificó dos adaptaciones, con escaso nivel de significancia estadística y contraintuitivos económicamente. Los parámetros obtenidos de las variables rotación de cultivos y pozos presentan signos negativos, lo que significaría que se impacta el ingreso en la misma dirección, cuando en la práctica se esperaría un efecto positivo. Estos resultados pueden atribuirse

---

<sup>18</sup> Variable con poca significancia estadística.

a un problema de falta de eficiencia de las estimaciones, como consecuencia de la presencia de multicolinealidad, propia de los modelos ricardianos.

El modelo no identificó la significancia de las adaptaciones con componentes de productos financieros: acceso a créditos y seguros. Esto ocurre debido a su casi nula presencia en las unidades de producción de la Cuenca de estudio; solo 9 % de las unidades habían tenido acceso a algún crédito, mientras que, solo 0.3 % había tenido acceso a seguro agrícola. La adaptación por el lado de la innovación y tecnología requiere la participación de la Banca de desarrollo, instituciones de crédito, sector financiero, organismos multilaterales y gobierno para su financiamiento, por lo que dentro de la planeación de la adaptación representa una importante ventana de oportunidad.

Para hacer frente a los efectos del cambio climático, se requiere una adaptación proactiva. Esto implica: identificar la o las partes del sistema agrícola con mayor vulnerabilidad al cambio climático, planificar las estrategias partiendo de lo local, gestionar las acciones para desarrollar resiliencia y evaluar los resultados. Los involucrados deben estar dispuestos a asumir los costos de la adaptación tanto en la producción como en los procesos colaterales. La organización de los agricultores de la Cuenca y su interlocución con los diferentes niveles de gobierno y el sector empresarial es fundamental en este proceso.

En consonancia con otros estudios mediante el enfoque ricardiano citados en el capítulo dos, este análisis se enfrentó a algunas limitaciones, sobre todo de carácter empírico. En primer lugar, no se contempla el efecto de carbonización en el rendimiento de los cultivos. En experimentos controlados en invernaderos, se ha encontrado un mayor rendimiento en los cultivos debido a mayor presencia de  $CO_2$ , sin embargo en una macroescala es complejo obtener estos valores. El segundo elemento es el efecto de los precios; por tratarse de un modelo estático

comparativo de equilibrios a largo plazo con datos de corte transversal, no se detecta el efecto de cambio en el precio de un equilibrio a otro.

Finalmente, este estudio tampoco estima los costos de la adaptación en la Cuenca Laguna de Bustillos, debido a que está fuera de su alcance metodológico y objetivos iniciales. Las estrategias de adaptación, de cara a los impactos del cambio climático sobre el ingreso agrícola, deberán ser definidas por los involucrados, tanto en el corto como largo plazo, de ello dependerá la cantidad de recursos que se destinen para este fin. (Seo & Mendelsohn, 2008a)

## Bibliografía

- Abegunde, V. O., Sibanda, M., & Obi, A. (2019). The Dynamics of Climate Change Adaptation in Sub-Saharan Africa: A Review of Climate-Smart Agriculture among Small-Scale Farmers [Review]. *Climate*, 7(11), 23, Article 132. <https://doi.org/10.3390/cli7110132>
- Abera, N., & Tesema, D. (2019). Perceptions and practices of climate change adaptation and mitigation strategies among farmers in the Konta Special District, Ethiopia [Article]. *Environmental & Socio-Economic Studies*, 7(4), 1-16. <https://doi.org/10.2478/environ-2019-0019>
- Abidoye, B. O., Kurukulasuriya, P., & Mendelsohn, R. (2017). STRUCTURAL RICARDIAN ANALYSIS OF SOUTH-EAST ASIAN AGRICULTURE [Article]. *Climate Change Economics*, 8(3), 17, Article 1740005. <https://doi.org/10.1142/s201000781740005x>
- Abidoye, B. O., Mendelsohn, R., Ahmed, S., Amanullah, S., Chasidpon, C., Baker, L., . . . Truong, T. (2017). SOUTH-EAST ASIAN RICARDIAN STUDIES: BANGLADESH, SRI LANKA, THAILAND, AND VIETNAM [Article]. *Climate Change Economics*, 8(3), 8, Article 1740004. <https://doi.org/10.1142/s2010007817400048>
- Abubakari, S., Dong, X. H., Su, B., Hu, X. N., Liu, J., Li, Y. H., . . . Xu, S. J. (2019). Modelling streamflow response to climate change in data-scarce White Volta River basin of West Africa using a semi-distributed hydrologic model [Article]. *Journal of Water and Climate Change*, 10(4), 907-930. <https://doi.org/10.2166/wcc.2018.193>
- Ahmed, M. N., & Schmitz, P. M. (2015). Climate change impacts and the value of adaptation - can crop adjustments help farmers in Pakistan? [Article]. *International Journal of Global Warming*, 8(2), 231-257. <https://doi.org/10.1504/ijgw.2015.071954>
- Alatorre, L. C., García, A. K., Rodríguez, A. J., Erives, V., & González, E. (2014). Estimación de la erosión potencial en la Cuenca Laguna de Bustillos, Chihuahua, México. *Geología, cambio ambiental y paisaje*.
- Alves, F., Leal, W., & Azeiteiro, U. (2010). *Theory and Practice of Climate Adaptation*. Springer.
- Amado Alvarez, J. P., Pérez Cutillas, P., Ramírez Valle, O., & Alarcón Caballero, J. J. (2016). **Análisis de la calidad del agua en las Lagunas de Bustillos y de los Mexicanos (Chihuahua, México)**. In.
- Andren, T. (2007). *Econometrics*. Ventus.
- Andrews, D. G. (2010). *An Introduction to Atmospheric Physics* (C. U. Press, Ed. Second Edition ed.).
- Araya, A., Prasad, P. V. V., Gowda, P. H., Djanaguiraman, M., & Kassa, A. H. (2020). Potential impacts of climate change factors and agronomic adaptation strategies on wheat yields in central highlands of Ethiopia [Article; Early Access]. *Climatic Change*, 19. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02627-y>
- Armstrong, A. K., Krasny, M. E., & Schuldt, J. P. (2018). CLIMATE CHANGE SCIENCE The Facts. In *Communicating Climate Change* (pp. 7-20). Cornell University Press.
- Arshad, M. N., Ahmad, A., Wajid, S. A., Cheema, M. J. M., & Schwartz, M. W. (2017). Adapting DSSAT Model for Simulation of Cotton Yield for Nitrogen Levels and Planting Dates [Article]. *Agronomy Journal*, 109(6), 2639-2648. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.04.0233>

- Auffhammer, M. (2018). Quantifying Economic Damages from Climate Change [Article]. *Journal of Economic Perspectives*, 32(4), 33-52. <https://doi.org/10.1257/jep.32.4.33>
- Baltagi, B. H. (2011). *Econometrics*. Springer.
- Balzer, W., & Haendler, E. W. (1989). Ordinary Least Squares as a Method of Measurement. *Erkenntnis (1975-)*, 30(1/2), 129-146.
- Barthel, A., Agosta, C., Little, C. M., Hattermann, T., Jourdain, N. C., Goelzer, H., . . . Bracegirdle, T. J. (2020). CMIP5 model selection for ISMIP6 ice sheet model forcing: Greenland and Antarctica [Article]. *Cryosphere*, 14(3), 855-879. <https://doi.org/10.5194/tc-14-855-2020>
- Bauer, A., & Bhan, M. (2018). *Climate without nature*
- A critical Anthrology of the Anthropocene* (C. U. Press, Ed. First ed.).
- Bernard, A. L., & Vielle, M. (2003). Measuring the welfare cost of climate change policies: A comparative assessment based on the computable general equilibrium model GEMINI-E3 [Article]. *Environmental Modeling & Assessment*, 8(3), 199-217. <https://doi.org/10.1023/a:1025595223960>
- Bleakley, H., & Chul, S. (2017). Adaptation to the weather: Lessons from U.S. History. *The Journal of Economic History*, 77(3).
- Bozzola, M., Massetti, E., Mendelsohn, R., & Capitanio, F. (2018). A Ricardian analysis of the impact of climate change on Italian agriculture [Article]. *European Review of Agricultural Economics*, 45(1), 57-79. <https://doi.org/10.1093/erae/jbx023>
- Bryant, C., Sarr, M., & Délusca, K. (2016). *Agricultural Adaptation to Climate Change*. Springer.
- Cao, G. P., Wang, C. J., Zhu, L. G., & Fei, X. M. (2018). Can Farmer Adapt to Climate Change - An Evidence from Shandong in China [Article]. *Ekoloji*, 27(106), 271-280, Article UNSP e106020.
- Capa-Morocho, M., Ines, A. V. M., Baethgen, W. E., Rodriguez-Fonseca, B., Han, E., & Ruiz-Ramos, M. (2016). Crop yield outlooks in the Iberian Peninsula: Connecting seasonal climate forecasts with crop simulation models [Article]. *Agricultural Systems*, 149, 75-87. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.08.008>
- Catalano, M., Forni, L., & Pezzolla, E. (2020). Climate-change adaptation: The role of fiscal policy [Article]. *Resource and Energy Economics*, 59, 19, Article Unsp 101111. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2019.07.005>
- Cera Campos, J. I. (2015). *Prospección de indicadores de respuesta frente al abatimiento del acuífero, una exploración entre menonitas y mestizos de la región Cuauhtémoc, Chihuahua UACJ*. Cuauhtémoc, Chihuahua.
- Chatzopoulos, T., & Lippert, C. (2015). Adaptation and Climate Change Impacts: A Structural Ricardian Analysis of Farm Types in Germany [Article]. *Journal of Agricultural Economics*, 66(2), 537-554. <https://doi.org/10.1111/1477-9552.12098>
- Chen, Y., Wu, Z., Okamoto, K., Han, X., Ma, G., Chien, H., & Zhao, J. (2013). The impacts of climate change on crops in China: A Ricardian analysis. *Global and Planetary Change*, 104, 61-74. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.01.005>
- Chihuahua, G. d. E. d. (2010a). *Análisis de competitividad del Estado de Chihuahua: maíz*. Chihuahua, México
- Chihuahua, G. d. E. d. (2010b). *Análisis de competitividad: manzana*. Chihuahua, México: Gobierno del Estado de Chihuahua
- Chihuahua, G. d. E. d. (2019). *Programa Estatal de Cambio Climático Chihuahua 2019*. Chihuahua, Chih.

- Chávez B., A. E., & Corral A., J. A. (2013). *Relaciones espaciales entre los cambios del nivel estático del acuífero Cuauhtémoc Chihuahua y la cobertura de huertas de manzana durante 1993-2003* Universidad Autónoma de Ciudad Juárez]. Cuauhtémoc, Chihuahua.
- Closset, M., Dhehibi, B. B. B., & Aw-Hassan, A. (2015). Measuring the economic impact of climate change on agriculture: a Ricardian analysis of farmlands in Tajikistan [Article]. *Climate and Development*, 7(5), 454-468. <https://doi.org/10.1080/17565529.2014.989189>
- Comellas, J. L. (2011). *Historia de los Cambios Climáticos* (R. S.A., Ed.).
- Conagua. (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuauhtémoc (0805), Estado de Chihuahua*. Ciudad de México
- Conagua. (2016). *ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales de las 757*

*cuencas hidrológicas que comprenden las 37 regiones hidrológicas en que se encuentra dividido los Estados Unidos*

*Mexicanos.*

- De Salvo, M., Begalli, D., Capitello, R., & Signorello, G. (2015). A spatial micro-econometric approach to estimating climate change impacts on wine firm performance: A case study from Moldavia region, Romania. *Agricultural Systems*, 141(Supplement C), 48-57. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.09.008>
- De Salvo, M., Raffaelli, R., & Moser, R. (2013). The impact of climate change on permanent crops in an Alpine region: A Ricardian analysis. *Agricultural Systems*, 118(Supplement C), 23-32. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agsy.2013.02.005>
- De Salvo, M., Raffaelli, R., & Moser, R. (2013). The impact of climate change on permanent crops in an Alpine region: A Ricardian analysis [Article]. *Agricultural Systems*, 118, 23-32. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2013.02.005>
- Diallo, A., Emmanuel, D., & Owusu, V. Climate change adaptation strategies, productivity and sustainable food security in southern Mali [Article; Early Access]. *Climatic Change*, 19. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02684-8>
- Diallo, A., Emmanuel, D., & Owusu, V. (2020). Climate change adaptation strategies, productivity and sustainable food security in southern Mali [Article; Early Access]. *Climatic Change*, 19. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02684-8>
- Dinar, A., & Mendelsohn, R. (2011). *Handbook on Climate Change and Agriculture*. Edward Elgar.
- Dolman, H. (2019). *Biogeochemical Cycles and Climate*. Oxford.
- Dourojeanni, A., Jouravlev, A., & Chávez, G. (2002). Gestión del agua a nivel cuencas: teoría y practica. *Cepal*.
- Díaz C., R. E., Bravo P., L. C., Alatorre C., L. C., & Sánchez F., E. (2014). Análisis geoespacial de la interacción entre el uso de suelo

y de agua en el área peri-urbana de Cuauhtémoc, Chihuahua.

Un estudio socioambiental en el norte de México. *Investigaciones Geográficas*, 83.

Enríquez V., J. C. (2013). *Análisis de la competencia en el gasto de agua en Ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua con las huertas de manzana colindantes con la mancha urbana* Universidad Autónoma de Ciudad Juárez]. Cuauhtémoc, Chihuahua.

Esteve, P., Varela-Ortega, C., Blanco-Gutiérrez, I., & Downing, T. E. (2015). A hydro-economic model for the assessment of climate change impacts and adaptation in irrigated

- agriculture. *Ecological Economics*, 120(Supplement C), 49-58.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.09.017>
- FAO. (2015). Agricultura y cambio climático
- Economía y modelación In *Memoria del cuarto Seminario Regional de Agricultura y Cambio Climático*
- Santiago, 13 y 14 de noviembre de 2013. Santiago, Chile: FAO
- CEPAL
- Farmer, T., & Cook, J. (2013). *Climate Change Science: A modern Synthesis*. Springer Sciences.
- Fernandez, F. J., & Blanco, M. (2015). Modelling the Economic Impacts of Climate Change on Global and European Agriculture. Review of Economic Structural Approaches [Article]. *Economics-the Open Access Open-Assessment E-Journal*, 9, 54, Article 201510.  
<https://doi.org/10.5018/economics-ejournal.ja.2015-10>
- Ferrera, I. (2017). *Climate Change and The Oceanic Carbon Cycle*. Apple Academic Press Inc.
- Fezzi, C., & Bateman, I. (2015). The Impact of Climate Change on Agriculture: Nonlinear Effects and Aggregation Bias in Ricardian Models of Farmland Values [Article]. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 2(1), 57-92.  
<https://doi.org/10.1086/680257>
- Fleischer, A., Lichtman, I., & Mendelsohn, R. (2008). Climate Change, Irrigation, and Israeli Agriculture: Will Warming Be Harmful? *Ecological Economics*, 65(3).
- Fonta, W. M., Kedir, A. M., Bossa, A. Y., Greenough, K. M., Sylla, B. M., & Ayuk, E. T. (2018). A Ricardian valuation of the impact of climate change on Nigerian cocoa production: Insight for adaptation policy [Article]. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 10(5), 689-710. <https://doi.org/10.1108/ijccsm-05-2016-0074>
- Gadedjisso-Tossou, A., Egbendewe, A. Y. G., & Abbey, G. A. (2016). Assessing the impact of climate change on smallholder farmers' crop net revenue in Togo [Article]. *Journal of Agriculture and Environment for International Development*, 110(2), 229-248.  
<https://doi.org/10.12895/jaeid.20162.453>
- Galindo, L. M., Reyes, O., & Alatorre, J. E. (2015). Climate change, irrigation and agricultural activities in Mexico: A Ricardian analysis with panel data. *Journal of Development and Agricultural Economics*, 7 (7).
- García Cortés, E. J. (2014). *Dinámica del crecimiento del área de inundación de la Laguna de Bustillos utilizando imagenes LANDSAT para el año 2013* Universidad Autónoma de Ciudad Juárez]. Cuauhtémoc, Chih.
- Grageda, J., Ruiz, J. A., García, G. E., Nuñez, J. H., Valenzuela, J., Ruiz, O., & Jiménez, A. (2016). Efecto del cambio climático en la acumulación de horas frío en la región nogalera de Hermosillo, Son. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, Publicación Especial*.
- Gunarathna, M., Sakai, K., Nakandakari, T., Momii, K., & Kumari, M. K. N. (2019). Sensitivity Analysis of Plant- and Cultivar-Specific Parameters of APSIM-Sugar Model: Variation between Climates and Management Conditions [Article]. *Agronomy-Basel*, 9(5), 19, Article 242. <https://doi.org/10.3390/agronomy9050242>
- Hamamcioglu, C., & Yenen, Z. (2018). PROPOSING A HOLISTIC BASIN-SCALE AS A STRATEGY OF SMART PLANNING IN ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE [Proceedings Paper]. *Sustainable Development and Planning Ix*, 226, 169-180.  
<https://doi.org/10.2495/sdp170151>



- Hanif, U., Syed, S. H., Ahmad, R., Malik, K. A., & Nasir, M. (2010). Economic Impact of Climate Change on the Agricultural Sector of Punjab [with Comments]. *The Pakistan Development Review*, 49(4), 771-798.
- Harde, H. (2017). Scrutinizing the carbon cycle and CO<sub>2</sub> residence time in the atmosphere [Article]. *Global & Planetary Change*, 152, 19-26.  
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.02.009>
- Hasan, M. M., & Rahman, M. M. (2019). Simulating climate change impacts on T. aman (BR-22) rice yield: a predictive approach using PRECIS and DSSAT models [Article; Early Access]. *Water and Environment Journal*, 13. <https://doi.org/10.1111/wej.12523>
- Hendricks, N. P. (2018). Potential Benefits from Innovations to Reduce Heat and Water Stress in Agriculture [Article]. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 5(3), 545-576. <https://doi.org/10.1086/697305>
- Hossain, M. S., Arshad, M., Qian, L., Zhao, M. J., Mehmood, Y., & Kachele, H. (2019). Economic impact of climate change on crop farming in Bangladesh: An application of Ricardian method [Article]. *Ecological Economics*, 164, 11, Article 106354.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106354>
- Hossain, M. S., Qian, L., Arshad, M., Shahid, S., Fahad, S., & Akhter, J. (2019). Climate change and crop farming in Bangladesh: an analysis of economic impacts [Article]. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 11(3), 424-440.  
<https://doi.org/10.1108/ijccsm-04-2018-0030>
- Hsiang, S., & Kopp, R. E. (2018). An Economist's Guide to Climate Change Science. *The Journal of Economic Perspectives*, 32(4), 3-32.
- Huang, K. X., & Sim, N. (2018). Why do the econometric-based studies on the effect of warming on agriculture disagree? A meta-analysis [Article]. *Oxford Economic Papers-New Series*, 70(2), 392-416. <https://doi.org/10.1093/oep/gpx051>
- Huang, L., Zhou, M., Lv, J., & Chen, K. (2020). Trends in global research in forest carbon sequestration: A bibliometric analysis [Article]. *Journal of Cleaner Production*, 252, 17, Article 119908. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119908>
- Hulley, G., & Ghent, D. (2019). *Taking the temperature of the earth*. Candice Janco.
- Huong, N. T. L., Bo, Y. S., & 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(4), 449-457.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jssas.2018.02.006>
- INECC. (2016). *Compromisos de mitigación y adaptación ante el cambio climático para el periodo 2020-2030*. Ciudad de México
- INECC. (2019). *Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático México*
- INEEC. (2018). *Sexta Comunicación Nacional y Segundo Informe Bienal de actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Ciudad de México
- Inegi. (2010). *Compendio de Información Geográfica 2010, Cuauhtémoc, Chihuahua*.
- INEGI. (2013). *Conociendo Chihuahua*. INEGI.
- INIFAP. (2013a). *Actualización de paquetes tecnológicos, agrícolas y pecuarios en el Estado de Chihuahua*. Chihuahua, México: SAGARPA
- INIFAP. (2013b). *Requerimientos agroecológicos de cultivos*. Jalisco, México: SAGARPA
- IPCC. (1990). *Climate Change, The IPCC Scientific Assessment*.

- IPCC. (2007). *Climate Change 2007, The physical science basis, working group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*.
- IPCC. (2013). *Cambio Climático 2013, bases físicas, Resumen para responsables de políticas, Grupo de trabajo I*.
- IPCC. (2014a). *Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Working Group II*.
- IPCC. (2014b). *Climate Change: Mitigation of Climate Change, working group III*. C. U. Press.
- Islam, M. R., & Khan, M. M. (2019). *The Science of Climate Change* (First ed.). Jhon Wiley & Sons, Inc., and Scrivener Publishing LLC.
- Islam, M. T., & Nursey-Bray, M. (2017). Adaptation to climate change in agriculture in Bangladesh: The role of formal institutions. *Journal of Environmental Management*, 200(Supplement C), 347-358.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.092>
- Jose, S., & Nameer, P. O. (2020). The expanding distribution of the Indian Peafowl (*Pavo cristatus*) as an indicator of changing climate in Kerala, southern India: A modelling study using MaxEnt [Article]. *Ecological Indicators*, 110, 12, Article 105930.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105930>
- Kaini, S., Nepal, S., Pradhananga, S., Gardner, T., & Sharma, A. K. (2019). Representative general circulation models selection and downscaling of climate data for the transboundary Koshi river basin in China and Nepal [Article; Early Access]. *International Journal of Climatology*, 19. <https://doi.org/10.1002/joc.6447>
- Kassie, B. T., Asseng, S., Rotter, R. P., Hengsdijk, H., Ruane, A. C., & Van Ittersum, M. K. (2015). Exploring climate change impacts and adaptation options for maize production in the Central Rift Valley of Ethiopia using different climate change scenarios and crop models [Article]. *Climatic Change*, 129(1-2), 145-158. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1322-x>
- Khanal, U., & Wilson, C. (2019). Derivation of a climate change adaptation index and assessing determinants and barriers to adaptation among farming households in Nepal [Article]. *Environmental Science & Policy*, 101, 156-165.  
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.08.006>
- Kumar, K. S. K. (2011). Climate sensitivity of Indian agriculture: do spatial effects matter? [Article]. *Cambridge Journal of Regions Economy and Society*, 4(2), 221-235.  
<https://doi.org/10.1093/cjres/rsr004>
- Kurukulasuriya, P., & Ajwad, M. I. (2007). Application of the Ricardian technique to estimate the impact of climate change on smallholder farming in Sri Lanka [Article]. *Climatic Change*, 81(1), 39-59. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-9021-2>
- La Scalia, G., Micale, R., & Enea, M. (2019). Facility layout problem: Bibliometric and benchmarking analysis [Article]. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 10(4), 453-472. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2019.5.001>
- Leal Filho, W. (2015). *Handbook of Climate Change Adaptation*. Springer.
- Leal, W. (2015). *Handbook of Climate Change Adaptation*. Springer.
- Leal, W. (2018). *Climate Change Impact and Adaptation Strategies for Coastal Communities*. Springer.
- Lee, H. L., Lin, Y. P., & Petway, J. R. (2018). Global Agricultural Trade Pattern in A Warming World: Regional Realities [Article]. *Sustainability*, 10(8), 21, Article 2763.  
<https://doi.org/10.3390/su10082763>

- Li, J. J., Fan, G., & He, Y. (2020). Predicting the current and future distribution of three Coptis herbs in China under climate change conditions, using the MaxEnt model and chemical analysis [Article]. *Science of the Total Environment*, 698, 8, Article 134141. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134141>
- Lima, C. O., & Bonetti, J. (2020). Bibliometric analysis of the scientific production on coastal communities' social vulnerability to climate change and to the impact of extreme events [Review; Early Access]. *Natural Hazards*, 22. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03974-1>
- Lippert, C., Krimly, T., & Aurbacher, J. (2009). A Ricardian analysis of the impact of climate change on agriculture in Germany [Article]. *Climatic Change*, 97(3-4), 593-610. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9652-9>
- Liu, H., Li, X. B., Fischer, G., & Sun, L. X. (2004). Study on the impacts of climate change on China's agriculture [Article]. *Climatic Change*, 65(1-2), 125-148. <https://doi.org/10.1023/b:clim.00000037490.17099.97>
- Liverpool-Tasie, L. S. O., Sanou, A., & Tambo, J. A. (2019). Climate change adaptation among poultry farmers: evidence from Nigeria [Article]. *Climatic Change*, 157(3-4), 527-544. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02574-8>
- Lloyd, E. A., & Winsberg, E. (2018). *Climate Modelling: Philosophical and Conceptual Issues*. Palgrave.
- Lopez-Doriga, U., Jimenez, J. A., Bisaro, A., & Hinkel, J. (2020). Financing and implementation of adaptation measures to climate change along the Spanish coast [Article]. *Science of the Total Environment*, 712, 13, Article 135685. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135685>
- Lorenz, K., & Rattan, L. (2018). *Carbon Sequestration in Agricultural Ecosystems*. Springer.
- Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., & Field, C. B. (2016). Understanding and responding to danger from climate change: the role of key risks in the IPCC AR5 [Article]. *Climatic Change*, 136(3-4), 427-444. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1645-x>
- Magrin, G. (2015). Adaptación al cambio climático en América Latina y el Caribe. *Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Documentos de Proyectos*, 692, 80.
- Martínez, M. E., Hernández, O. A., & Porras, D. A. (2020). Impacto de la Biodiversidad de Cultivos en un Clima Cambiante. In *Factores críticos y estratégicos en la interacción territorial, desafíos actuales y escenarios futuros* (Vol. III). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Massetti, E., & Mendelsohn, R. (2011). The impact of climate change on US agriculture: a repeated cross-sectional Ricardian analysis. In A. Dinar & R. Mendelsohn (Eds.), *Handbook on Climate Change and Agriculture* (pp. 141-166). Edward Elgar Publishing Ltd.
- Massetti, E., & Mendelsohn, R. (2018). Measuring Climate Adaptation: Methods and Evidence [Article]. *Review of Environmental Economics and Policy*, 12(2), 324-341. <https://doi.org/10.1093/reep/rey007>
- Matthew, O. J., Abiodun, B. J., & Salami, A. T. (2015). Modelling the impacts of climate variability on crop yields in Nigeria: performance evaluation of RegCM3-GLAM system [Article]. *Meteorological Applications*, 22(2), 198-212. <https://doi.org/10.1002/met.1443>

- Medina, G., Grajeda, J., Ruiz, J. A., Casas, J. I., Rodríguez, V. M., & De la Mora, C. (2019). Disminución de las horas frío como efecto del cambio climático en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10.
- Medina, G. R., José Ariel, Ramírez, M. R., & Díaz, G. (2011). Efecto del cambio climático en la acumulación de frío en la región manzanera de Chihuahua
- Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*.
- Mehrabi, F., & Sepaskhah, A. R. Winter Wheat Yield and DSSAT Model Evaluation in a Diverse Semi-Arid Climate and Agronomic Practices [Article; Early Access]. *International Journal of Plant Production*, 23. <https://doi.org/10.1007/s42106-019-00080-6>
- Mehrabi, F., & Sepaskhah, A. R. (2019). Winter Wheat Yield and DSSAT Model Evaluation in a Diverse Semi-Arid Climate and Agronomic Practices [Article; Early Access]. *International Journal of Plant Production*, 23. <https://doi.org/10.1007/s42106-019-00080-6>
- Mendelsohn, R. (2014). The Impact of Climate Change on Agriculture in Asia [Article]. *Journal of Integrative Agriculture*, 13(4), 660-665. [https://doi.org/10.1016/s2095-3119\(13\)60701-7](https://doi.org/10.1016/s2095-3119(13)60701-7)
- Mendelsohn, R., Arellano, G. J., & Christensen, P. (2009). A Ricardian analysis of Mexican farms. *Environment and Development Economics*.
- Mendelsohn, R., & Dinar, A. (2003). Climate, water, and agriculture [Article]. *Land Economics*, 79(3), 328-341. <https://doi.org/10.2307/3147020>
- Mendelsohn, R., Nordhaus, W. D., & Shaw, D. (1994a). The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis. *The American Economic Review*, 84(4).
- Mendelsohn, R., Nordhaus, W. D., & Shaw, D. (1994b). The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis. *The American Economic Review*, 84(4), 753-771.
- Mendelsohn, R., & Reinsborough, M. (2007). A ricardian analysis of US and Canadian farmland [Article]. *Climatic Change*, 81(1), 9-17. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9138-y>
- Mendelsohn, R. O., & Massetti, E. (2017). The Use of Cross-Sectional Analysis to Measure Climate Impacts on Agriculture: Theory and Evidence [Article]. *Review of Environmental Economics and Policy*, 11(2), 280-298. <https://doi.org/10.1093/reep/rex017>
- Migliore, G., Zinnanti, C., Schimmenti, E., Borsellino, V., Schifani, G., Di Franco, C. P., & Asciuto, A. (2019). A Ricardian analysis of the impact of climate change on permanent crops in a Mediterranean region [Article]. *New Medit*, 18(1), 41-51. <https://doi.org/10.30682/nm1901d>
- Mishra, D., Sahu, N. C., & Sahoo, D. (2016). Impact of climate change on agricultural production of Odisha (India): a Ricardian analysis [Article]. *Regional Environmental Change*, 16(2), 575-584. <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0774-5>
- Mulwa, C., Marenya, P., Rahut, D. B., & Kassie, M. (2017). Response to climate risks among smallholder farmers in Malawi: A multivariate probit assessment of the role of

- information, household demographics, and farm characteristics [Article]. *Climate Risk Management*, 16, 208-221. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2017.01.002>
- Muruzabal, J. J. (2014). *Teoría de muestras e inferencia estadística* (4a ed.). Garceta Grupo Editorial.
- Mushtaq, S., Kath, J., Stone, R., Henry, R., Laderach, P., Reardon-Smith, K., . . . Pischke, F. (2020). Creating positive synergies between risk management and transfer to accelerate food system climate resilience [Article; Early Access]. *Climatic Change*, 14. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02679-5>
- Möller, D. (2019). *Chemistry of the Climate System* (Third edition ed.). DE GRUYTER.
- Nadin, R., Opitz-Stapleton, S., & Yinlong, X. (2015). *Climate Risk and Resilience in China*. Routledge.
- Nashwan, M. S., & Shahid, S. (2020). A novel framework for selecting general circulation models based on the spatial patterns of climate [Article; Early Access]. *International Journal of Climatology*, 22. <https://doi.org/10.1002/joc.6465>
- Nyuor, A. B., Donkor, E., Aidoo, R., Buah, S. S., Naab, J. B., Nutsugah, S. K., . . . Zougmore, R. (2016). Economic Impacts of Climate Change on Cereal Production: Implications for Sustainable Agriculture in Northern Ghana [Article]. *Sustainability*, 8(8), 17, Article 724. <https://doi.org/10.3390/su8080724>
- Ober, K., & Sakdapolrak, P. (2020). Whose climate change adaptation "barriers"? Exploring the coloniality of climate change adaptation policy assemblages in Thailand and beyond [Article]. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 41(1), 86-104. <https://doi.org/10.1111/sjtg.12309>
- Onyekuru, N. A., & Marchant, R. (2016). Assessing the economic impact of climate change on forest resource use in Nigeria: A Ricardian approach [Article]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 220, 10-20. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.01.001>
- Palatnik, R. R., & Roson, R. (2012). Climate change and agriculture in computable general equilibrium models: alternative modeling strategies and data needs [Article]. *Climatic Change*, 112(3-4), 1085-1100. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0356-6>
- Palutikof, J., Boulter, S., Ash, A., Smith, M., Parry, M., Waschka, M., & Guitart, D. (2013). *Climate Adaptation Futures*. Wiley-Blackwell.
- Parra, R. A., Ortíz, P., Amado, J. P., & Chavez, N. (2009). PRODUCTIVIDAD Y CRECIMIENTO DE MANZANO BAJO DÉFICIT DE RIEGO CONTROLADO. *Terra Latinoamericana*.
- Polsky, C. (2004). Putting Space and Time in Ricardian Climate Change Impact Studies: Agriculture in the U.S. Great Plains, 1969-1992. *Annals of the Association of American Geographers*, 94(3), 549-564.
- Polsky, C., & Easterling, W. E. (2001). Adaptation to climate variability and change in the US Great Plains: A multi-scale analysis of Ricardian climate sensitivities [Article]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 85(1-3), 133-144. [https://doi.org/10.1016/s0167-8809\(01\)00180-3](https://doi.org/10.1016/s0167-8809(01)00180-3)
- Prabnakorn, S., Maskey, S., Suryadi, F. X., & de Fraiture, C. (2018). Rice yield in response to climate trends and drought index in the Mun River Basin, Thailand [Article]. *Science of the Total Environment*, 621, 108-119. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.136>
- Pérez, B. V. (2005). ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN Y COMERCIALIZACIÓN DE MANZANA EN PUEBLA Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. Coahuila, México.



- Quaye, F., Nadolnyak, D., & Hartarska, V. (2018). Climate Change Impacts on Farmland Values in the Southeast United States [Article]. *Sustainability*, 10(10), 16, Article 3426. <https://doi.org/10.3390/su10103426>
- Ramirez-Villegas, J., Jarvis, A., & Laderach, P. (2013). Empirical approaches for assessing impacts of climate change on agriculture: The EcoCrop model and a case study with grain sorghum [Article]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170, 67-78. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.09.005>
- Ramírez, M. R., Ruíz, J. A., Medina, G., Jacobo, J. L., Parra, R. á., Ávila, M. R., & Amado, J. P. (2011). Perspectivas del sistema de producción de manzano en Chihuahua, ante el cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, Publicación especial*.
- Robertson, J. O., Chilingar, G. V., Sorokhtin, O. G., Sorokhtin, N. O., & Long, W. (2018). *The Evolution of the Earth's Climate*. Wiley.
- Romanov, V. (2018). *Greenhouse Gases and Clay Minerals*. Springer.
- Rurinda, J., Mapfumo, P., van Wijk, M. T., Mtambanengwe, F., Rufino, M. C., Chikowo, R., & Giller, K. E. (2014). Sources of vulnerability to a variable and changing climate among smallholder households in Zimbabwe: A participatory analysis. *Climate Risk Management*, 3, 65-78. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.crm.2014.05.004>
- Sadiq, S., Saboor, A., Mohsin, A. Q., Khalid, A., & Tanveer, F. (2019). Ricardian analysis of climate change-agriculture linkages in Pakistan [Article]. *Climate and Development*, 11(8), 679-686. <https://doi.org/10.1080/17565529.2018.1531746>
- Sarker, M. A. R., Alam, K., & Gow, J. (2012). Exploring the relationship between climate change and rice yield in Bangladesh: An analysis of time series data [Article]. *Agricultural Systems*, 112, 11-16. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.06.004>
- Schlenker, W., Hanemann, W. M., & Fisher, A. C. (2006). The impact of global warming on US agriculture: An econometric analysis of optimal growing conditions [Article]. *Review of Economics and Statistics*, 88(1), 113-125. <https://doi.org/10.1162/rest.2006.88.1.113>
- Schmidt-Thomé, P., & Klein, J. (2013). *Climate Change Adaptation in Practice*. Wiley-Blackwell.
- Selvaraju, R. (2010). Climate Risk assessment and management in agriculture. *Climate, Energy and Tenure Division, FAO*.
- Seo, S. (2013). Refining spatial resolution and spillovers of a micro-econometric analysis of adapting portfolios to climate change using the global positioning system [Article]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18(7), 1019-1034. <https://doi.org/10.1007/s11027-012-9405-3>
- Seo, S. N., & Mendelsohn, R. (2008a). An analysis of crop choice: Adapting to climate change in South American farms [Article]. *Ecological Economics*, 67(1), 109-116. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.12.007>
- Seo, S. N., & Mendelsohn, R. (2008b). Measuring impacts and adaptations to climate change: a structural Ricardian model of African livestock management [Article]. *Agricultural Economics*, 38(2), 151-165. <https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.2008.00289.x>
- Seo, S. N. N., Mendelsohn, R., & Munasinghe, M. (2005). Climate change and agriculture in Sri Lanka: a Ricardian valuation [Article]. *Environment and Development Economics*, 10, 581-596. <https://doi.org/10.1017/s1355770x05002044>
- SIAP. (2007). *Situación actual y perspectivas del maíz en México 1996-2012*. Ciudad de México
- Silvestro, P. C., Pignatti, S., Yang, H., Yang, G. J., Pascucci, S., Castaldi, F., & Casa, R. (2017). Sensitivity analysis of the Aquacrop and SAFYE crop models for the assessment of water

- limited winter wheat yield in regional scale applications [Article]. *Plos One*, 12(11), 30, Article e0187485. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187485>
- Simonet, G., & Leseur, A. (2019). Barriers and drivers to adaptation to climate change—a field study of ten French local authorities [Article]. *Climatic Change*, 155(4), 621-637. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02484-9>
- Smit, B., & Wandel, J. (2006). Adaptation, adaptive capacity and vulnerability [Article; Proceedings Paper]. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, 16(3), 282-292. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.03.008>
- Spanos, A. (1986). *Statistical foundations of econometric modelling* (1a ed.). Cambridge University Press.
- Squires, V. R., Milner, H. M., & Daniell, K. A. (2015). *River Basin Management in the Twenty-first Century* (1st, Ed.). Taylor & Francis Group.
- Surinder, J., Bashisht, B., Sharma, S., & Kaur, S. (2018). Understanding Climate Change impacts on crop productivity and water balance.
- Tibesigwa, B., Visser, M., & Turpie, J. (2017). Climate change and South Africa's commercial farms: an assessment of impacts on specialised horticulture, crop, livestock and mixed farming systems [Article]. *Environment Development and Sustainability*, 19(2), 607-636. <https://doi.org/10.1007/s10668-015-9755-6>
- Tkemaladze, G. S., & Makhshvili, K. A. (2016). Climate changes and photosynthesis. *Annals of Agrarian Science*, 14(2), 119-126. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aasci.2016.05.012>
- Torquebiau, E. (2016). *Climate Change and Agriculture Worldwide*. Springer.
- Trinh, T. A. (2018). The Impact of Climate Change on Agriculture: Findings from Households in Vietnam [Article]. *Environmental & Resource Economics*, 71(4), 897-921. <https://doi.org/10.1007/s10640-017-0189-5>
- United Nations Framework Convention on Climate Change, (1994).
- Vaitkeviciute, J., Chakir, R., & Van Passel, S. (2019). Climate Variable Choice in Ricardian Studies of European Agriculture [Article]. *Revue Economique*, 70(3), 375-401. <https://doi.org/10.3917/reco.703.0375>
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping [Article]. *Scientometrics*, 84(2), 523-538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Van Passel, S., Massetti, E., & Mendelsohn, R. (2017). A Ricardian Analysis of the Impact of Climate Change on European Agriculture [Article]. *Environmental & Resource Economics*, 67(4), 725-760. <https://doi.org/10.1007/s10640-016-0001-y>
- Wang, J. R., Hu, L. T., Li, D. D., & Ren, M. F. (2020). Potential Impacts of Projected Climate Change under CMIP5 RCP Scenarios on Streamflow in the Wabash River Basin [Article]. *Advances in Meteorology*, 2020, 18, Article 9698423. <https://doi.org/10.1155/2020/9698423>
- Wang, J. X., Huang, J. K., Zhang, L. J., & Li, Y. M. (2014). Impacts of climate change on net crop revenue in North and South China [Article]. *China Agricultural Economic Review*, 6(3), 358-378. <https://doi.org/10.1108/caer-12-2012-0138>
- Wang, J. X., Mendelsohn, R., Dinar, A., Huang, J. K., Rozelle, S., & Zhang, L. J. (2009). The impact of climate change on China's agriculture [Article]. *Agricultural Economics*, 40(3), 323-337. <https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.2009.00379.x>

- Weber, M., & Hauer, G. (2003). A regional analysis of climate change impacts on Canadian agriculture [Article]. *Canadian Public Policy-Analyse De Politiques*, 29(2), 163-180. <https://doi.org/10.2307/3552453>
- Wei, B., Wang, R. L., Hou, K., Wang, X. Y., & Wu, W. (2018). Predicting the current and future cultivation regions of *Carthamus tinctorius* L. using MaxEnt model under climate change in China [Article]. *Global Ecology and Conservation*, 16, 12, Article e00477. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00477>
- WMO. (1979). Proceedings of the World Climate Conference. A conference of experts on climate and mankind, Geneva.
- WMO. (2018). *Declaración de la Organización Meteorológica Mundial sobre el estado del clima mundial en 2017*.
- Wooldridge, J. M. (2009). *Introducción a la Econometría, Un enfoque moderno*. CENGAGE Learning.
- Xin, X., Lin, T., Liu, X. Y., Wan, G. H., & Zhang, Y. S. (2013). The impacts of climate change on the People's Republic of China's grain output Regional and crop perspective [Article]. *China Agricultural Economic Review*, 5(4), 434-458. <https://doi.org/10.1108/caer-03-2013-0049>
- Yu, D. J., Xu, Z. S., & Wang, W. R. (2019). A bibliometric analysis of Fuzzy Optimization and Decision Making (2002-2017) [Article]. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 18(3), 371-397. <https://doi.org/10.1007/s10700-018-9301-8>



## Anexo 1

*Nota metodológica: tratamiento de los datos para el modelo econométrico y construcción de escenarios*

*i. Proceso de obtención de las variables de estudio*

*a. Dependiente*

La variable dependiente se denomina “*ingreso neto por hectárea*” (*INh*). *INh* se expresa de la siguiente manera:

$$INh_{ij} = \sum_{j \in J} P_{ij} Q_{ij} - \sum_{j \in J} P_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

Donde, *IN* ingreso neto del producto *i* de la unidad de producción *j*,  $P_{ij}$  es un vector de los precios de entrada y salida,  $R_{ij}$  la cantidad producida y  $X_{ij}$  es la cantidad de insumos. Se obtuvo información para 11 productos, cultivados en el Estado de Chihuahua en el ciclo agrícola 2007 y perennes, que representan el 87% del valor total de la producción (ver tabla A1).

En términos económicos, lo que nos indica (1) es que el ingreso neto es el resultado de las ventas (o el valor de la producción) menos los costos incurridos en esa producción. En estos términos, la tabla 2 muestra el valor de la producción en 2007 de los 11 productos agrícolas más importantes.

Tabla A1 Principales productos agrícolas del Estado de Chihuahua en 2007 (precios corrientes)

	<b>Producto</b>	<b>Valor de producción (miles de pesos)</b>	
1	Alfalfa	\$	874,912.69
2	Algodón hueso	\$	1,025,062.40
3	Avena forrajera en verde	\$	1,019,818.34
4	Cebolla	\$	403,643.28
5	Chile verde	\$	1,779,593.76
6	Frijol	\$	387,798.39
7	Maíz forrajero en verde	\$	434,278.11
8	Maíz grano	\$	1,651,775.94
9	Manzana	\$	2,272,332.50
10	Nuez	\$	1,191,877.87
11	Papa	\$	804,567.48

El componente de cantidades,  $Q_{ij}$ , se obtuvo del Censo Nacional Agrícola, Ganadero y Forestal 2007, solo disponible en Microdatos del INEGI. Para cada unidad de producción, se efectuó la multiplicación del precio del cultivo por la cantidad producida en toneladas, para materializar  $P_{ij}Q_{ij}$ . Las tres variables que se utilizan para definir las cantidades producidas son: “volumen cosechado del cultivo en P-V”, “volumen cosechado cultivo O-I” y “volumen cosechado del cultivo perenne”.

Los precios de los productos agrícolas se obtuvieron del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), en su plataforma de Cierre de la producción agrícola, esto para el 2007 (tabla A2). Para el cálculo del costo de producción por producto se utilizó la información del documento *Análisis de Competitividad* editado por el *Gobierno del Estado de Chihuahua*, en cuyo contenido se integran costos de insumos, preparación del cultivo, siembra, labores de postsiembra y otros costos.

Tabla A2 Precios por producto (SIAP 2007)

	Producto	Modalidad (\$ Medio x ton)	
		Riego	temporal
1	Alfalfa	211.32	
2	Algodón hueso	\$ 5,806.26	
3	Avena forrajera en verde	\$ 252.27	\$ 294.36
4	Cebolla	\$ 1,599.25	
5	Chile verde	\$ 3,153.88	
6	Frijol	\$ 6,650.78	\$ 5,950.33
7	Maíz forrajero en verde	\$ 288.70	\$ 345.91
8	Maíz grano amarillo	\$ 1,846.38	\$ 2,034.79
	Maíz grano blanco	\$ 2,174.97	\$ 2,027.58
9	Manzana golden delicious	\$ 5,993.80	\$ 2,724.56
	Manzana red delicious	\$ 6,437.15	\$ 2,840.97
10	Nuez	\$ 26,805.72	
11	Papa	\$ 4,382.64	\$ 6,792.17

La expresión  $P_{ij} X_{ij}$  de (1) referente a los costos de producción (tabla 3), se obtiene del Análisis de competitividad realizado para cada producto por el Gobierno del Estado de Chihuahua, así como de informes de paquetes tecnológicos del FIRA (se toma la relación costo-beneficio).

Para el algodón hueso<sup>19</sup>, se estiman los costos de producción a partir del paquete tecnológico BMF (riego por bombeo, semilla mejorada y fertilizante), puesto que es utilizado en 98% de los cultivos a nivel Estatal. Para el resto de los productos se utiliza la misma dinámica de cálculo, excepto para alfalfa, avena forrajera en verde, avena forrajera en verde y maíz forrajero en verde. En estos tres productos, se tomó la relación costo – beneficio de los informes del FIRA, con base en el precio de venta de referencia.

<sup>19</sup> Consultar <http://www.chihuahua.gob.mx/atach2/sdr/uploads/File/algodon.pdf>

Tabla A3 Costos por producto (SIAP 2007, FIRA y Analisis de Competitividad del Estado de Chihuahua)

	Producto	Modalidad (\$ Medio x ha)		Rendimiento		Tecnología	
		Riego	temporal	Riego	temporal	Riego	temporal
1	Alfalfa	\$	118.00	63.32			
2	Algodón hueso	\$	10,677.11	3.84			BMF
3	Avena forrajera en verde	\$	147.53	31.08	14.02		
4	Cebolla	\$	28,010.70	36.7			BMF, GMF
5	Chile verde	\$	42,933.04	28			BMF, GMF
6	Frijol	\$	4,708.64	2	0.73		BMF
7	Maíz forrajero en verde	\$	210.73	76.26	25.09		TMS, TMF, TCF
8	Maíz grano amarillo	\$	9,115.29	8.5	1.5		BMF, GMF
	Maíz grano blanco	\$	9,115.29	8.5	1.5		BMF, GMF
9	Manzana golden delicious	\$	42,635.79	16.58			BMF
	Manzana red delicious	\$	42,635.79	16.58			BMF
10	Nuez	\$	20,312.53	1.66			BMF, GCF, GMF
11	Papa	\$	44,070.98	38			BMF

*b. Independientes*

Las variables independientes del modelo se clasifican en: climáticas, características del suelo, económicas, características de la unidad de producción y otras variables de control. Las variables climáticas corresponden a la temperatura y precipitación estacional (primavera, verano, otoño e invierno) y sus valores elevados al cuadrado.

Se descargó el archivo “Estaciones climatológicas 2018” en formato kmz, de la página de CONAGUA. Posteriormente, en Google Earth se hizo la delimitación por municipio tomando los valores normales de las variables climatológicas de 1981 a 2010, de una estación representativa (en la medida de lo posible), tomando los valores mensuales de temperatura media normal y precipitación normal. Una vez construida la base por mes, se hizo la operación aritmética correspondiente para estacionalizarla (en el caso de la temperatura se tomó el promedio y la precipitación se sumó).

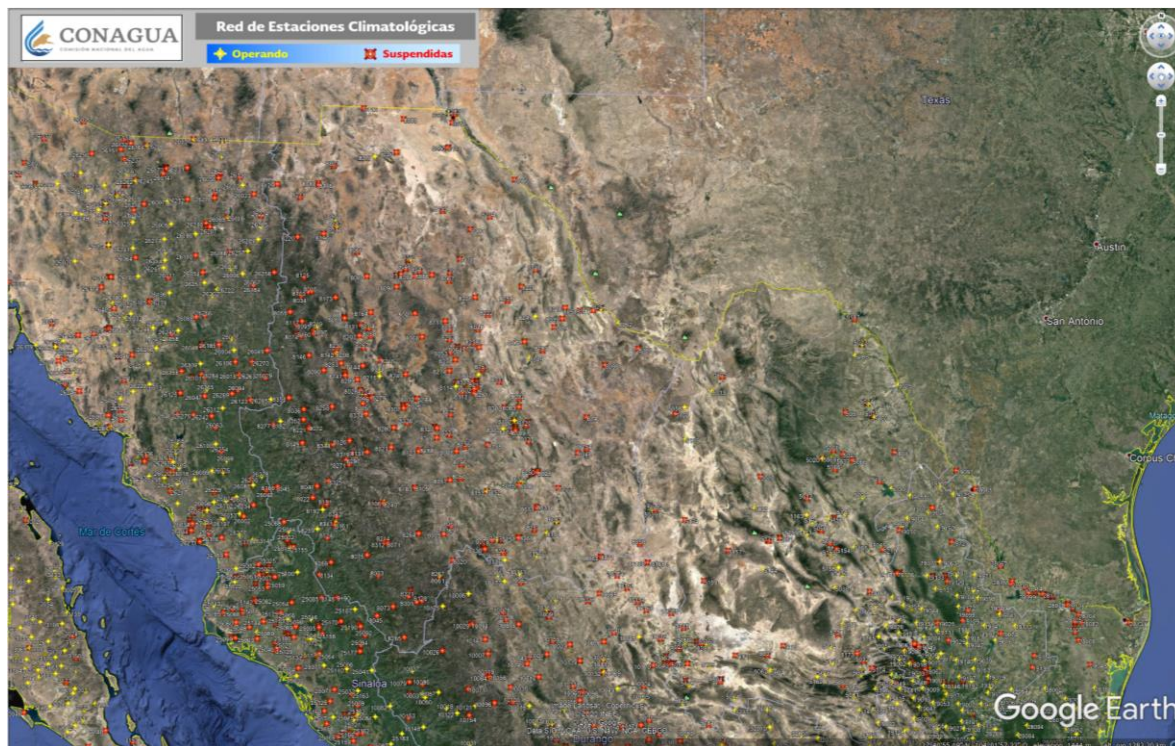


Figura A1. Red de de estaciones metereológicas de CONAGUA

« Volver a Google Earth

SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL

NORMALES CLIMATOLÓGICAS

ESTADO DE: CHIHUAHUA PERIODO: 1981-2010

ESTACION: 00008215 LAS CHEPAS LATITUD: 28°42'55" N. LONGITUD: 107°14'45" W. ALTURA: 2,076.0 MSNM.

ELEMENTOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
<b>TEMPERATURA MAXIMA</b>													
NORMAL	15.2	16.8	19.3	23.2	26.9	29.3	26.4	25.0	24.4	22.2	18.8	15.5	21.9
MAXIMA MENSUAL	18.5	20.3	20.8	25.2	29.4	31.6	28.6	26.6	26.3	23.5	21.0	17.6	
AÑO DE MAXIMA	2000	2000	1999	2000	2000	1982	2003	2003	2002	1998	1999	1981	
MAXIMA DIARIA	24.0	26.0	27.5	31.5	33.0	35.0	34.0	32.0	33.0	30.0	30.0	23.0	
FECHA MAXIMA DIARIA	18/2000	25/2009	03/2009	03/1998	31/1998	26/1998	02/2002	10/2003	23/2008	02/2000	02/2000	10/1981	
AÑOS CON DATOS	12	13	12	13	13	14	14	12	12	13	12	13	
<b>TEMPERATURA MEDIA</b>													
NORMAL	6.9	8.1	10.3	14.2	17.5	20.7	19.9	18.9	17.4	14.5	10.4	6.9	13.8
AÑOS CON DATOS	12	13	12	13	13	14	14	11	11	13	12	13	
<b>TEMPERATURA MINIMA</b>													
NORMAL	-1.5	-0.5	1.3	5.2	8.0	12.1	13.3	12.8	10.3	6.7	1.9	-1.7	5.7
MINIMA MENSUAL	-3.1	-3.8	0.0	2.6	6.9	11.0	12.5	11.6	5.9	4.8	-2.1	-3.8	
AÑO DE MINIMA	1999	2004	2003	1998	2005	2004	2000	2000	2010	1999	1999	1999	
MINIMA DIARIA	-11.0	-9.0	-9.0	-3.0	0.5	5.0	1.0	8.0	1.0	-6.0	-11.0	-9.0	
FECHA MINIMA DIARIA	19/2001	24/2010	04/2002	04/1998	15/1998	06/1999	03/2010	31/2000	13/2010	30/2009	30/2010	12/1998	
AÑOS CON DATOS	12	13	12	13	13	14	14	11	11	13	13	13	
<b>PRECIPITACION</b>													
NORMAL	22.5	4.1	2.5	2.6	4.2	18.4	56.7	45.5	22.2	15.8	3.0	3.7	201.2
MAXIMA MENSUAL	90.8	29.4	29.0	29.3	35.9	122.1	176.2	247.6	115.2	103.2	46.8	19.9	
AÑO DE MAXIMA	2007	2005	2006	2004	2007	2000	2010	2008	2007	2000	2000	2006	
MAXIMA DIARIA	34.2	21.5	29.0	18.5	35.5	33.5	72.4	67.4	61.5	65.6	15.5	18.2	
FECHA MAXIMA DIARIA	10/1982	12/2001	19/2006	25/2001	16/2007	16/1999	29/1982	27/2006	08/2007	20/2000	07/2000	10/2007	
AÑOS CON DATOS	11	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
<b>EVAPORACION TOTAL</b>													
NORMAL													
AÑOS CON DATOS													
<b>NUMERO DE DIAS CON LLUVIA</b>													
NORMAL	3.4	0.9	0.8	0.7	1.5	4.8	7.5	6.8	3.7	2.4	0.8	0.8	34.1
AÑOS CON DATOS	11	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
<b>NIEBLA</b>													
NORMAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
AÑOS CON DATOS	12	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
<b>GRANIZO</b>													
NORMAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
AÑOS CON DATOS	12	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
<b>TORRENTA E.</b>													
NORMAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
AÑOS CON DATOS	12	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	

Figura A2. ejemplo de normales climatológicas de 1981 a 2010

Las variables de características del suelo se obtuvieron del Prontuario de Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, elaborado por el INEGI. Se revisó cada documento por municipio, extrayendo los tres datos edafológicos predominantes y el sistema de topoformas más importante.

Respecto a las variables económicas, fueron extraídas del Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007, mismo que fue consultado en el Laboratorio de Microdatos del INEGI, previa solicitud. Cabe señalar que, para trabajar con los datos del Censo, la alternativa inmediata fue hacerlo de manera presencial en dicho laboratorio, por la sensibilidad de la información. Las

variables económicas del modelo son dicotómicas en su mayoría, pues resultan de la aplicación de una encuesta, con opciones “sí” o “no”. Aunque cabe señalar que algunas de ellas fueron reconstruidas de continuas a discretas; por ejemplo, si en una pregunta el encuestado contestaba con cero, se toma como la respuesta “no” y cualquier respuesta diferente de cero se toma como “sí”.

Las variables económicas son: rotación de cultivos, semilla mejorada, acceso a apoyos económicos del gobierno, acceso a créditos, uso de tractos, maquinaria agrícola, fertilizantes químicos, animales para la siembra, etc. Las variables de características de la unidad de producción, se construyeron bajo la misma lógica, siendo estas: edad del jefe de la unidad de producción, nivel de educación, superficie privada o ejido, acceso a agua potable, cultivos de riesgo o temporal, tecnología de riego, latitud, altitud, etc.

Las variables de control utilizadas en el modelo son: índice de aridez, factor de estacionalidad y estrés hídrico, extraídas del Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático, editado por e INECC en 2019<sup>20</sup>.

*ii. Proceso de estimación de escenarios de cambio climático e impactos en los agricultores de la Cuenca*

Para proyectar los efectos del cambio climático en el sector agrícola de la Cuenca Laguna de Bustillos, se usaron los datos de los escenarios de cambio climático del atlas Climático publicado por la UNAM <sup>21</sup>.

---

<sup>20</sup> Para mayor referencia consultar <https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/page/index.html#zoom=6&lat=27.5591&lon=-114.7819&layers=1>.

<sup>21</sup> Para mayor referencia consultar: <https://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas>



Se trabajó con los modelos GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR en sus horizontes medio y lejano, con forzamientos radiativos de 4.5 y 8.5. Para elaborar la base de datos, se aplicaron todas las combinaciones de modelo climático, forzamiento radiativo, horizonte, mes y coordenada representativa de cada municipio de la Cuenca.

En la figura A3 podemos apreciar en una escala de 30" x 30 el mapa de clima proyectado en un horizonte lejano; esto se aplicó para cada una de las combinaciones. Se sumaron los datos de cada combinación por mes para las precipitaciones y se promediaron los de las temperaturas. De este modo, se obtuvo la media de temperatura de la Cuenca y las precipitaciones totales.

Para proyectar los impactos en los ingresos netos, recurrimos a la siguiente expresión:

$$AT_1=(T_{t+1}-T_t) * EMT \quad \text{y} \quad AP_1=(P_{t+1}-P_t) * EMP \quad (2)$$

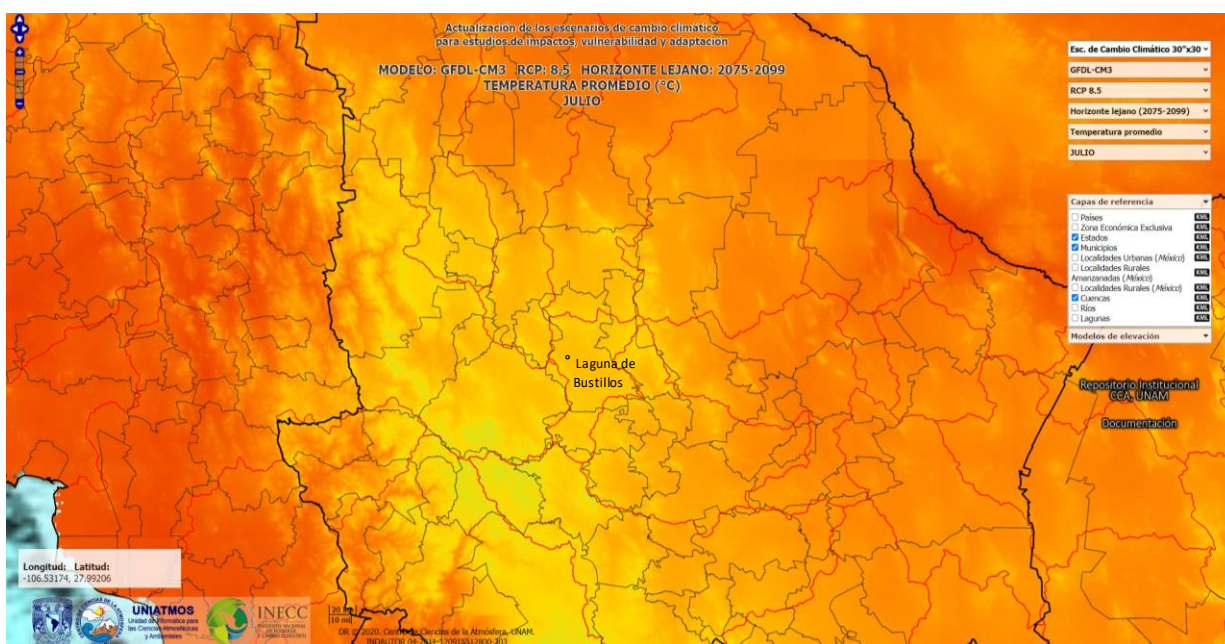


Figura A3. Modelo climático GFDL-CM3 evaluado en la Cuenca Laguna de Bustillos

Donde  $T_t$  y  $P_t$  son la temperatura y precipitación del periodo actual,  $T_{t+1}$  y  $P_{t+1}$  son la temperatura y precipitación en un horizonte medio y EMT y EMP los efectos marginales de la temperatura y precipitación sobre el ingreso neto, respectivamente.

De lo anterior tenemos que:

$$IN_{t+1} = IN_t + [(AT_1 * IN_t) + (AP_1 * IN_t)] \quad (3)$$

Donde  $IN_{t+1}$  es el ingreso neto por unidad de producción en un horizonte medio y  $IN_t$  es el ingreso neto actual. Como el resultado queda en términos absolutos, para expresar la variación del ingreso neto, tenemos:

$$\Delta IN = [(IN_{t+1} - IN_t) / IN_t] * 100 \quad (4)$$

Para aplicarlo a un horizonte largo, utilizamos la siguiente expresión:

$$IN_{t+2} = IN_t + [(AT_2 * IN_t) + (AP_2 * IN_t)] \quad (5)$$

El ingreso neto se proyecta tanto para el sector agrícola de la cuenca en general, como para el modo riego y temporal, manzana y maíz.