

Incidencia del cambio climático en el nivel de producción agrícola de Guatemala, durante el periodo 1990-2019: un enfoque ricardiano

DOI del artículo: 10.36631/ECO.2023.28.02
Artículo de investigación científica y tecnológica

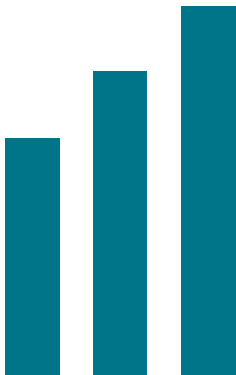
Gabriel Giovanni Chamo Molina

Licenciado en Economía Empresarial magíster en Administración de Empresas

Correo electrónico: gchamo@bi.com.gt

Fecha de recepción: 10/5/2023

Fecha de aceptación: 18/5/2023



Resumen

El cambio climático es un problema que enfrenta la mayoría de países, principalmente el calentamiento global. En el presente estudio se abordan los efectos que ha ejercido el cambio climático en la producción agrícola en Guatemala, durante el periodo de 1991 a 2019. Para fines de esta investigación, se utilizaron las variables: temperatura, precipitación pluvial y el índice de producción agrícola del país (IPA) calculado por la FAO. El análisis se efectuó mediante el uso de una función de producción para evaluar desde una perspectiva exógena los efectos

climáticos. La importancia de esta investigación radica en contribuir a la discusión sobre cómo el cambio climático puede tener efectos adversos en el sector agrícola, siendo esta una de las actividades económicas importantes del país, en términos de producción y generación de empleo, por lo que resulta relevante demostrar la necesidad de implementar medidas para la mitigación y adaptación de la producción al cambio climático.

Palabras clave: cambio climático, producción agrícola, sector agrícola

IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON THE LEVELS OF AGRICULTURAL PRODUCTION IN GUATEMALA DURING THE PERIOD 1990-2019: A RICARDIAN APPROACH

Science and technology research paper

Gabriel Giovanni Chamo Molina

Bachelor in Business Economy, Master in Business Administration

Email: gchamo@bi.com.gt

Reception date: 10/5/2023

Acceptance date: 18/5/2023

Abstract

Climate change, and especially global warming, has become a problem for the majority of countries in the world. This study addresses the effects of climate change in Guatemala's agricultural production from 1991 to 2019, using the following variables: temperature, rainfall, and the country's agricultural production index (IPA) as determined by FAO. In this analysis we used a production function in order to evaluate the effects of climate from an exogenous perspective. This research project is a contribution to the ongoing discussion about how climate change can result in adverse effects for the agricultural sector, an important economical activity in the country in terms of production and generation of jobs, highlighting the need to implement measures that can mitigate and adapt production to climate change.

Keywords: climate change, agricultural production, agricultural sector

Introducción

El cambio climático es una problemática global que incide en factores tanto sociales como económicos, y genera una serie de problemas a nivel económico, social y de políticas públicas. De esta cuenta, se prevé que las consecuencias del cambio climático afectarán el crecimiento económico y la seguridad alimentaria durante el presente siglo (Field *et al.*, 2014). Los autores mencionan que, de continuar con las emisiones de dióxido de carbono al ritmo actual, la temperatura media mundial aumentará entre 1.4 grados Celsius (°C) y 5.8 °C. Por otro lado, el Grupo Intergubernamental del Cambio Climático, IPCC por sus siglas en inglés (2005), menciona que, en cierto grado, el efecto negativo es inevitable.

De acuerdo con López *et al.* (2018), los efectos climáticos no serán uniformes entre países ni al interior de estos, por lo que es posible que algunas regiones se beneficien y, al mismo tiempo, otras se vean perjudicadas. En términos productivos, el clima es de los principales determinantes de la producción agrícola, dicho esto, es posible que este sea uno de los sectores más afectados por los impactos negativos del calentamiento global (Fischer *et al.*, 2005; Mendelsohn, 2009). Por cierto, la región de Centroamérica y el Caribe tiene una alta vulnerabilidad a los efectos del cambio climático.

Guatemala es un país cuya población es altamente dependiente de la actividad agrícola, al extremo de que para gran parte de la población la agricultura representa una actividad de subsistencia. Según Mora *et al.* (2010), el sector representa alrededor del 10 % del PIB y la mitad de la fuerza laboral del país. En ese sentido, los estudios relacionados con los impactos climáticos sobre la producción en particular y, sobre la economía en general, han sido una de las preocupaciones a lo largo de las últimas décadas. Uno de los métodos ampliamente utilizados para medir dicho impacto es el utilizado por Mendelsohn *et al.* (1994), quienes, por medio de una modificación a la función de producción adaptada a la producción agrícola, con un enfoque ricardiano, explican el comportamiento de la producción agrícola y los ingresos de los productores como reacción a choques exógenos relacionados con cambios climáticos.

Con base en lo anterior, el presente estudio tiene como objetivo determinar la incidencia del cambio climático en el nivel de producción agrícola de Guatemala durante el periodo de 1990-2019, bajo un enfoque ricardiano de la producción, a través de un modelo de mínimos cuadrados ordinarios (MCO) y de vectores de corrección de errores (VEC), basados en la función de producción planteada por Mendelsohn *et al.* (1994).

Inicialmente, dentro del modelo se estableció una relación entre el IPA y las variables climatológicas como variables exógenas. Además, se utilizaron otras variables exógenas tales como los factores de producción, trabajo y capital, y algunas variables socioeconómicas. Posteriormente, se determinaron los óptimos de producción en términos de temperatura y precipitación pluvial para, a partir de estos factores, establecer cómo la producción podría verse afectada por los cambios climáticos.

Marco referencial

Marco contextual

A continuación, se expondrán los principales aspectos de tres estudios vinculados a la incidencia que tiene el cambio climático en los costos de oportunidad de los productores agrícolas, así como sus implicaciones sobre el nivel de producción e innovación productiva, además de cómo el cambio climático puede ser un índice para mejorar la productividad agrícola.

La primera investigación hace alusión a los diferentes impactos que el cambio climático genera en la producción, el consumo, los niveles de precios y el comercio agrícola. La segunda investigación presenta las oportunidades que existen para la mitigación de los efectos mediante los métodos de innovación en la agricultura y el tercer estudio hace referencia a los efectos del cambio climático sobre las reducciones en la producción y la renta de la tierra en Guatemala.

Impactos del cambio climático sobre la agricultura; aplicación del modelo DSSAT. Con el propósito de identificar los impactos del cambio climático, Nelson *et al.* (2009) determinaron que las poblaciones más afectadas se encuentran en los países en vías de desarrollo, ya que estos presentan una deficiencia en cuanto a políticas de seguridad alimentaria y desarrollo agrícola. Además, en estos países existe una vinculación muy fuerte entre el cambio de temperaturas y los períodos pluviales, lo cual afecta la producción de los cultivos. Todo esto caracteriza a los cultivos relacionados con tal fenómeno como de alto riesgo, dada la merma observada en los niveles de producción.

La metodología implementada por Nelson *et al.* (2009) buscó detallar el impacto del cambio climático mediante estimaciones sobre producción, consumo, precios y comercio agrícola; para proyectar un posible costo de adaptación. A través de un modelo de proyección de la oferta y de la demanda, desarrollado por Nelson *et al.* (2009) llamado IMPACT-2009, se proyectó la producción de 32 productos agrícolas y ganaderos básicos, en 281 regiones alrededor del mundo. Esta estimación se vinculó con un modelo biofísico llamado Sistema de Apoyo a la Decisión para la Transferencia de Agrotecnología (por sus siglas en inglés, DSSAT) para brindar una estimación detallada en el impacto de las frecuentes fluctuaciones del cambio climático sobre cinco cultivos: arroz, trigo, maní, soja y maíz.

Los resultados mostraron que cuando los cultivos se encuentran bajo los efectos del cambio climático, la economía agrícola se ve afectada negativamente. Asimismo, se identificó que los costos de adaptación son más elevados mientras menos mitigación se tenga, lo cual deriva en una disminución del rendimiento

del cultivo, y esto genera un efecto en cadena sobre los costos de producción y, al mismo tiempo, un aumento en los precios de los productos agrícolas. Este problema no solo afecta la baja en la producción sino también el alza en los precios, lo cual influye en la malnutrición de la población en el corto y el mediano plazo. Los resultados sugieren que el choque del cambio climático sobre la producción puede mitigarse con la aplicación de políticas públicas y programas de desarrollo agrícola rural adecuados.

Efectos del cambio climático en la agricultura: Innovación y políticas públicas, el caso centroamericano. Este estudio fue realizado por Mora *et al.* (2010) y encuentra que los efectos del cambio climático ya no son neutrales, particularmente en la agricultura. El trabajo revela que las regiones con mayor riesgo, y a la vez más afectadas, son las regiones tropicales y subtropicales de los países de la región centroamericana, cuya actividad económica depende mucho de la agricultura y de actividades primarias.

De igual manera, la mayor parte de la población de la región vive en condiciones de pobreza, por lo que presenta mayor vulnerabilidad, y la agricultura es uno de los sectores que a lo largo del tiempo depende directamente de los recursos naturales tales como, agua, suelo y biodiversidad, de lo cual a su vez depende su desarrollo y del nivel socioeconómico de cada país.

Los enfoques metodológicos para determinar los posibles efectos o impactos presentan un cierto grado de complejidad, principalmente por las variables involucradas. Los estudios que analizan los costos económicos y las diferentes opciones de mitigación y adaptación utilizan dos metodologías conjuntas. Por un lado, se utiliza una estimación de la función de producción; por el otro, la utilización del método ricardiano, cuya aplicación evidencia los efectos económicos del cambio climático en Centroamérica.

La investigación concluyó que la innovación relacionada con la implementación de nuevas tecnologías para lograr la mitigación de riesgo de una baja en la producción, y de esa manera no afectar el bienestar de la población más vulnerable, permite facilitar el desarrollo de políticas públicas.

Efectos del cambio climático sobre la agricultura: el caso de Guatemala. Esta investigación, realizada por Mora *et al.* (2010), tuvo como finalidad guiar a los hacedores de políticas públicas en cuanto a la necesidad de actuar sobre el cambio climático y analizar políticas, acciones nacionales e inversión en innovación, con el objetivo principal de realizar una evaluación económica de lo que el cambio climático conlleva y sus diferentes escenarios en el desarrollo de las comunidades. Asimismo, analiza las fluctuaciones de temperatura y precipitación pluvial en las regiones que presentan efectos directos sobre la producción y rendimiento de la tierra.

Por otro lado, la metodología utilizada para este estudio se basó en una función de producción para estimar los efectos, tanto físicos como económicos, relacionados con el cambio climático. Para esto se estimaron choques de variables climáticas sobre los niveles de producción.

El estudio mostró la sensibilidad que existe en la producción agrícola como consecuencia de los cambios climáticos, sin tomar en cuenta cómo el agricultor puede adaptarse a su entorno o al cambio tecnológico. Los hallazgos evidenciaron que la renta de los hogares suele disminuir debido al cambio climático, sin que las familias puedan adaptarse o revertir tal situación, lo cual representa un panorama poco alentador.

Marco teórico

La siguiente exposición teórica se dividirá en tres secciones: en la primera sección se abordarán las exposiciones teóricas del cambio climático; seguidamente, se presentan los aspectos teóricos de los diferentes modelos de producción; por último, se describe la relación teórica entre los modelos económicos y el cambio climático.

Teoría del cambio climático. El cambio climático es un fenómeno atribuido a la actividad humana que altera la estructura natural de la atmósfera terrestre (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 2005). Reportes presentados por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático muestran evidencia de que en los últimos cien años la temperatura de la tierra ha aumentado en 0.8 °C y el nivel del mar ha aumentado aproximadamente 22 centímetros, debido al aumento de la temperatura. Mark Maslin (2014) indica que, al final de siglo, la temperatura podría aumentar entre los 2.4 °C y los 5.4 °C, lo cual aumentaría el nivel del mar entre 52 cm y 98 cm, y con esto se crearían eventos climáticos perjudiciales para la vida humana.

Efecto invernadero. Los inicios de la teoría del efecto invernadero se dieron en el siglo XIX por Joseph Fourier (1824), conocido por ser un gran administrador, egiptólogo, matemático y científico. Como alumno de Laplace y LaGrange, Fourier no proveyó ecuaciones, sino sentó las bases del cambio climático mediante un análisis crítico sobre el problema de la temperatura terrestre y el efecto invernadero (Fleming, 1999).

La teoría llamada "théorie analytique de la chaleur"¹ de Joseph Fourier, citado por Fleming (1999), fue la base para el denominado «efecto invernadero». Dicha teoría parte de que la luz solar y el frío nocturno tienen efectos diferentes en la conducción de radiación calórica, lo cual está sustentado por los principios básicos de la física.

¹ Teoría analítica del calor.

La teoría del efecto invernadero se basa en el principio de que la radiación solar que absorbe la tierra emite gases transparentes, los cuales se elevan a la atmósfera y logran absorber nuevamente una radiación térmica. La interacción de gases y radiación solar genera una elevación de la temperatura, de tal manera que dentro de la atmósfera terrestre suelen tener una temperatura más elevada y emiten esta radiación térmica por todas partes. A tal proceso se le conoce como efecto invernadero natural (Jons & Henderson, 1990).

La atmósfera se compone de varios gases tales como el H₂O (agua), que es el más liviano en su composición de densidad versus la masa. Los gases tales como el CO₂ (dióxido de carbono), el CH₄ (metano), el N₂O (nitrito de óxido), el O₃ (ozono transfóbico), son los más representativos que componen la actual atmósfera terrestre. Estos gases son los más pesados en cuanto a su relación densidad/masa, por lo que producen una mayor radiación, lo cual se traduce en temperaturas más altas (Jons & Henderson, 1990).

Los gases de efecto invernadero natural, que en su mayoría son compuestos por H₂O y CO₂, reflejan una radiación tal que provoca que la tierra se encuentre dentro de su atmósfera a una temperatura estable. Los gases del efecto invernadero no natural realizan el mismo proceso que los del efecto invernadero natural. Estos gases son emitidos por la actividad humana y se sabe que son más pesados, por lo que absorben una mayor cantidad de radiación y provocan temperaturas más altas.

De acuerdo con Maslin (2014), el efecto invernadero natural es esencial para la sobrevivencia natural de la raza humana, ya que mantiene la temperatura humana y terrestre alrededor de los 35 grados Celsius, si no fuese así los trópicos se encontrarían por debajo de los -10 grados Celsius. Por el contrario, la emisión de gases pesados aumenta la temperatura de los trópicos, y eleva al mismo tiempo los niveles de mar.

Efecto invernadero y los niveles del mar. En la mitad del siglo XX, varios científicos reconocieron la importancia del efecto invernadero, se pensó que era poco probable que la humanidad modificara su estilo de vida y que, por lo tanto, no se modificaría el impacto en el clima. Sin embargo, varios estudios reflejan que los océanos contienen cincuenta veces más CO₂ que la atmósfera, derivado de la actividad humana. Tales estudios parecen sugerir que la proporción se mantendría fija en el tiempo. Un estudio, elaborado por un Comité Asesor Científico de la Presidencia de Ecuador en 1965, indica que los científicos Revelle y Seuss, en 1957 demostraron que los océanos, al no tener la capacidad de absorber la totalidad del CO₂ emitido por la actividad humana, el resto es absorbido por la atmósfera.

Durante la era de hielo la temperatura global era de alrededor de cinco grados Celsius, muchos de los océanos eran glaciares y el nivel de los océanos mostraba niveles de cien metros menos que los niveles oceánicos actuales (Titur *et al.*, 1991). Maslin (2014) considera que la emisión de los gases originados por la actividad

terrestre acelerara el proceso de calentamiento, lo cual repercute en un aumento de los niveles de mar.

Revelle (1960) estimó que para 2060 el nivel de dióxido de carbono se habría duplicado, con lo que aumentaría la temperatura atmosférica en tres grados Celsius, y esto provocaría la expansión de los océanos, el derretimiento de los glaciares y probablemente de la capa de hielo que cubre Groenlandia. Por lo tanto, se estimó que para 2085 los niveles oceánicos se encontrarán 54 centímetros por encima de la tendencia que se esperaba, lo cual generará un aumento en los niveles del mar de 71 centímetros durante el siguiente siglo (Maslin, 2014). Estos cambios climáticos afectarán los niveles de mar, el cambio en los vientos, las presiones atmosféricas y las corrientes interoceánicas (Titur *et al.*, 1991). Otros resultados observados muestran una expansión termal en los océanos, es decir, que la temperatura aumenta al igual que la densidad oceánica.

Ciclos hidrológicos y el cambio climático. Los aspectos cíclicos hidrológicos se muestran a partir de la observación y el análisis de la precipitación pluvial, la evaporación y el transporte de la humedad a la atmósfera (Trenberth & Guillemot 1996, 1998).

El H₂O es el recurso natural más valioso del planeta ya que da vida al mismo, es esencial para la producción de alimentos y el desarrollo económico. El ciclo hidrológico está conformado por diferentes componentes, los cuales son la evaporación de cuerpos de agua y suelos húmedos, la evaporación de gases en la tierra con vegetación y el transporte del H₂O hacia la atmósfera (vapor) (Trenberth & Guillemot 1996, 1998).

La evaporación del agua es una de las fases de cambio del agua, en el entendido de que hay tres estados de la materia: líquido, sólido y gaseoso. La radiación solar provoca la evaporación en los cuerpos de agua y las transpiraciones de la tierra, lo cual se conoce como efecto invernadero. El agua cuando llega a la atmósfera en forma gaseosa se le da el nombre de «líquido solar», ya que el estado gaseoso del agua absorbe la radiación o energía solar que, al llegar a niveles máximos de altitud donde el aire suele tener menor temperatura, influye sobre el mecanismo de choques térmicos (Marshall, 2014). Este mismo mecanismo influye en la formación de cúmulos de nubes y nubes dinámicas, lo que a su vez conlleva a la precipitación líquida y sólida (Bengtsson *et al.*, 2014). La condensación, que es una liberación de energía de los trópicos y subtrópicos, genera las precipitaciones pluviales (Marshall, 2014).

Marshall (2014) menciona que los ciclos hidrológicos son el principio básico del mecanismo del agua en la tierra. Los biomas humanos demandan esta agua purificada para el uso de la agricultura y la generación de bienes para la subsistencia humana. Se determinó que el mal uso de las tierras mediante fertilizantes químicos modifica el ciclo hidrológico y del carbono, lo que genera emisiones de

efecto invernadero que pueden causar cambios en los ciclos de las precipitaciones (Bengtsson *et al.*, 2014).

Humedad del suelo, precipitaciones pluviales y calentamiento global.

La humedad del suelo es importante, debido a su interacción con la atmósfera. La humedad del suelo se interpreta como el nivel de saturación de la capa del suelo, el cual está regulado por las lluvias y la evaporación potencial de las mismas (Etahir, 1998). Mientras los cultivos se extienden, gran parte de la lluvia se absorbe y el suelo la retiene para evaporarse (Jensen, 1935). La humedad de los suelos, según algunos estudios realizados, es catalogada como la respiración heterotrófica del suelo (Schimel *et al.*, 1994). El efecto de las temperaturas más cálidas acelera la respiración heterotrófica (RH), lo que aumenta la actividad de las enzimas extracelulares que degradan la materia orgánica de los suelos (Giardina & Ryan, 2000).

Fundamentos de la producción. La producción es una de las formas de organización que la humanidad ha adoptado a lo largo del tiempo para la satisfacción de sus necesidades, en la que se utilizan los factores de producción para crear bienes o servicios y para la distribución de la riqueza. Por su parte, las fuerzas productivas son aquellos elementos, tanto materiales como de capital de trabajo, que hacen que la producción sea posible (Méndez, 2009).

Los procesos productivos son procesos de transformación donde es necesaria una entrada de insumos para que exista una salida de un producto final. La productividad en gran medida se verá influenciada o restringida por los factores de producción, y se generará un sinfín de posibilidades de producción, mismas que permiten la utilización de múltiples insumos y productos. Es por ello que para considerar qué producir, tal como describen Geofry *et al.* (2011), es conveniente describir las tecnologías y sus restricciones mediante una función de producción. De esta manera, usualmente se denota la cantidad y como los productos y la cantidad X como los factores de producción, planteada en términos de una función como $y = f(X)$, que determina las unidades que se pueden producir utilizando un vector X de insumos, donde la función de producción debe ser estrictamente continua, creciente y cuasiconcava.

Factores de producción. Los factores de producción son esenciales para determinar las preguntas más importantes de la ciencia económica: ¿Qué producir? ¿Cómo producir? ¿Para quién producir?

Los factores de la producción son: tierra, trabajo, capital y capacidad empresarial.

Tierra. Se expresa como los recursos disponibles de una pieza de tierra o recursos naturales que se usan como materia prima para la generación de bienes y servicios (Gillespie, 2014). Algunos de los recursos hidráulicos son renovables y recursos minerales reciclados (Parking & Loría, 2010).

Trabajo. Incluye el personal o capital de trabajo involucrado para hacer llevar a cabo la producción de bienes o servicios (Gillepsie, 2014). La calidad del trabajo dependerá del capital humano, lo que se transfiere mediante conocimientos y habilidades que las personas obtienen mediante la educación o la capacitación (Parking & Loría, 2010). Así mismo, la decisión sobre la oferta de la mano de obra está determinada por factores exógenos y endógenos puramente económicos ligados al mercado del trabajo, donde se fija el precio o el salario (Samuelson & Nordhaus, 2010).

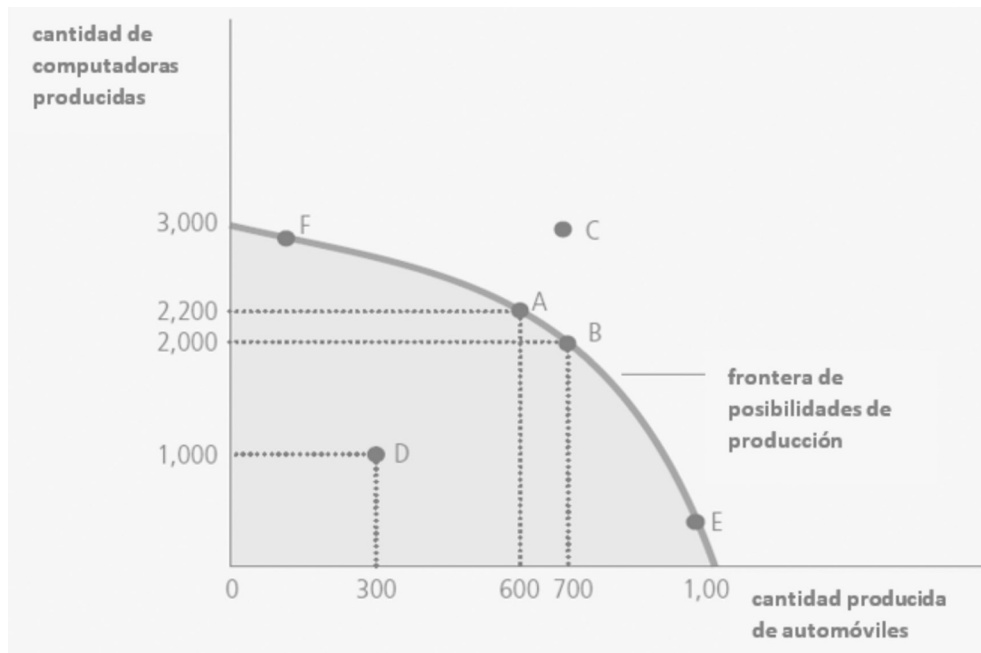
Capital. El capital se desempeña como herramienta de financiamiento que los agentes económicos utilizan para producir bienes y servicios (Parkin & Loría, 2010). Por otro lado, el capital está formado por todos aquellos elementos duraderos que a su vez utilizan ciertos insumos productivos, por lo que es la fuente para generar mayor producción. El capital puede tener varios años de duración, por lo que los productores deben definir la cantidad de capital que interviene en la producción, de acuerdo con sus planes de producción de largo plazo.

Capacidad empresarial. Se refiere a las habilidades de administración, de creación de nuevas ideas y del manejo de las personas de una manera efectiva y eficiente para la generación de bienes y servicios necesarios para satisfacer las necesidades del mercado (Gillepsie, 2014).

Frontera de posibilidades de producción. La frontera de posibilidades de producción muestra las distintas alternativas de combinaciones de producción de dos bienes distintos. Sobre dicha frontera puede determinarse la producción óptima de una empresa o de una economía en su conjunto (Dwivedi, 2008). También presenta los costos de oportunidad de las economías y los posibles intercambios entre dos economías diferentes (Smith, 1999).

De acuerdo con la Figura 1, la posibilidad de producción fuera de la frontera (punto C) es el punto inalcanzable de producción de computadoras y automóviles, ya que la economía no cumple con la cantidad suficiente de factores de producción para su expansión. El punto D, dentro de la frontera de posibilidades de producción, es factible pero no eficiente ya que no se estaría utilizando la totalidad de los factores de producción. Por último, las posibilidades eficientes y factibles son las que se encuentran en cualquier punto a lo largo de la curva de producción (Mankiw, 2017).

Figura 1
Frontera de posibilidades de producción



Fuente: Mankiw (2017).

Teoría de la función de producción. La literatura de los modelos de producción es amplia, tanto teóricamente como empíricamente. Las funciones de producción ilustran el problema económico que enfrenta cada sociedad: la escasez (Charles *et al.*, 1982).

Los primeros avances con las funciones de producción datan de la época de Adam Smith. Se busca la manera más eficiente de producir con la menor cantidad de factores de producción posible. Los avances tecnológicos y la forma en que se visualizaba la función de producción en aquel entonces se han vuelto más eficientes debido a la innovación. El postulado de David Ricardo sobre las ventajas comparativas dio paso a un nuevo panorama de cómo se comporta la producción en relación con dos bienes y el intercambio de los mismos (Kurz & Salvadori, 1995).

Las demostraciones empíricas han sido de interés para los economistas, especialmente acerca de las decisiones de cómo alcanzar un objetivo específico de producción, para construir un modelo de producción que toma en cuenta diferentes factores de producción, tales como el capital, el trabajo, la tierra y los materiales empleados, durante un periodo de tiempo determinado. Asimismo, algunas funciones de producción toman en cuenta diferentes variables que puedan afectar la misma (Nicholson & Snyder, 2005).

La escasez de bienes es una de las razones por las cuales existe un *trade-off* para el uso de factores de producción, tales como el trabajo, el capital, los recursos

naturales, entre otros (Charles *et al.*, 1982). La función de producción se puede establecer mediante entradas y salidas, donde las entradas son los factores de producción y la salida es la cantidad producida (Nicholson & Snyder, 2005). Se puede representar mediante la siguiente función:

$$Q = f(x_1, x_2, x_3 \dots x_n). \quad (1)$$

Donde Q representa la cantidad producida y $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$, son los insumos o factores de producción.

Tecnología de producción. La tecnología en la producción es la forma más general para describir la relación entre la entrada de los insumos y la salida, y describe la capacidad técnica o la manera más eficiente de producir (Rasmussen, 2013).

Restricción de costos. Los agentes económicos que llevan a cabo la producción deben tomar en cuenta los precios del trabajo, del capital y de otros factores de producción sujetos a los presupuestos limitados (Nicholson & Snyder, 2005).

Elección de factores de la producción. Los agentes económicos deben decidir la cantidad a utilizar de los factores de producción, de acuerdo con un proceso de optimización, de modo que el uso de los mismos sea tal que le genere al productor las máximas ganancias (Nicholson & Snyder, 2005).

Modelos econométricos de series de tiempo: VAR. Los modelos econométricos son modelos planteados para la evaluación de la teoría económica. Es necesario recalcar que para la realización de estos modelos econométricos se debe contar con series de tiempo adecuadas para obtener resultados más confiables.

Por su parte, existen diversos métodos para la utilización de modelos estáticos hasta modelos dinámicos (Enders, 2015). La estimación de ecuaciones mediante la interpretación de datos económicos da cabida a la formulación de una serie de hipótesis para luego ser testeadas.

Modelos de series de tiempo. La econometría ha evolucionado especialmente con el uso de las series de datos, de tal manera que los modelos simples son capaces de realizar pronósticos, interpretar y testear hipótesis (Enders, 2015, p.1). Así mismo el análisis de los datos cada vez es más complejo, lo que ha llevado a desarrollar metodologías tales como los análisis para los pronósticos con descomposición de series de tiempo en tendencia, estacionalidad o ciclicidad (Enders, 2015). Tal complejidad ha llevado al desarrollo de diferentes modelos econométricos para tener una aproximación de pronósticos mucho más precisa, tal como lo son los modelos de series de tiempo autorregresivos (VAR) e integrados de promedios móviles (como los modelos Arima).

Modelos VAR. La metodología de los modelos autorregresivos suele tener una similitud con el modelo de ecuaciones simultáneas, ya que consideran diferentes variables endógenas de manera conjunta. A diferencia de los modelos de ecuaciones simultáneas, cada variable endógena se explica mediante sus valores pasados o rezagados; usualmente no existen variables exógenas en el modelo (Gujarati, 2010). El modelo vectorial autorregresivo cuenta con un orden, el cual se basa en rezagos que ingresan en cada ecuación.

Modelo estructural y espacial de la producción y la variable del cambio climático. Estadística y econométricamente existen técnicas que pueden ser implementadas para establecer una línea lógica entre las variables del cambio climático y la producción agrícola. Múltiples métodos de regresión son utilizados para medir el impacto sobre las variaciones meteorológicas y un cultivo en específico. Los modelos econométricos para la estimación de la producción y las variables económicas se basan en lo que se conoce como «Black Box» o «forma reducida» de una relación estadística entre una función de producción y las variables climatológicas, tales como la precipitación pluvial y la temperatura (Molua & Lambi, 2007).

La estimación de la magnitud del efecto económico productivo se debe medir con base en conceptos y modelos económicos. Existe un número grande de aproximaciones y modelos que utilizan los fundamentos económicos existentes para la medición de la producción. Estos se pueden clasificar en métodos de aproximación estructural y métodos de aproximación espacial (McCarl *et al.*, 2001).

Modelos de aproximación estructural para la agricultura. La literatura indica que la aproximación estructural, generalmente, utiliza modelos económicos y simula cualquier efecto, adaptación y consecuencia económica del cambio climático. La aproximación estructural generalmente comienza con la evaluación de modelos de simulación de cultivos a nivel individual o a nivel de campo (McCarl *et al.*, 2001). La construcción de estas simulaciones se basa en los modelos biofísicos los cuales calculan cambios en los rendimientos de los cultivos, y hacen una adaptación por cultivo y región (Molua & Lambi, 2007).

Los modelos económicos estimados mediante la aproximación estructural simulan los comportamientos que buscan maximizar los ingresos agrícolas, el bienestar de los productores y los consumidores (McCarl *et al.*, 2001). Los modelos de circulación general incorporan los factores económicos del sector agrícola para estimar cambios del rendimiento del área, de los suministros y de los precios de mercado, resultantes de un *shock* del cambio climático en las variables económicas (Adams *et al.*, 1998).

La aproximación estructural en la agricultura proporciona una comprensión más detallada de las respuestas físicas y económicas en conjunto con los ajustes. Káiser *et al.* (1993) advierten que cualquier estudio que se realice sobre el impacto

económico del cambio climático debe incluir un modelaje de ajustes en el papel de la agricultura, de lo contrario los escenarios previstos serán tanto positivos como negativos pero exagerados en la realidad. Al no tener en cuenta la adaptación humana al clima esperado, resultará en una sobrestimación de daños.

La aproximación estructural puede brindar la facilidad de plantear dos posibles escenarios ante la adaptabilidad del productor agrícola. Un escenario con adaptación y otro sin adaptación. El escenario con adaptación supone que los agricultores pueden adaptarse a los efectos del cambio climático, y a la vez adaptar la variedad de cultivos en el tiempo. El escenario sin adaptación supone que los agricultores no muestran ningún ajuste de su comportamiento ante el cambio climático en el tiempo. Con este tipo de ideas, Molua & Lambi (2007) simularon una baja en los ingresos de los productores agrícolas en el tiempo.

Los desafíos planteados por McCarl *et al.* (2001) consisten en identificar e incorporar las adaptaciones más importantes que los agricultores pueden emplear, debido a que estos modelos estructurales suelen estimar de igual manera las condiciones del mercado, tomando en cuenta el cambio climático. Todo esto se traduce en cambios en el bienestar de los consumidores y los productores.

Aproximación espacial analógica en la agricultura. La aproximación espacial analógica utiliza modelos que pueden estimar los efectos del cambio climático en la agricultura, basándose en las diferencias observadas entre la producción agrícola y el clima entre las regiones. Este enfoque fundamenta su análisis en cómo los agricultores se adaptaron a través del tiempo con respecto al cambio de clima (Molua & Lamb, 2007).

Los modelos espaciales (análogos) asumen que las regiones frías tienden a tener el mismo patrón que las regiones cálidas. Una de las premisas clave es que las prácticas agrícolas con variedad de cultivos de regiones más cálidas son transferibles (McClar *et al.*, 2001). El enfoque espacial evita modelar con precisión el rendimiento y el uso de las implicaciones físicas del cambio climático. Asume que las respuestas de los cultivos y los agricultores ya están presentes en los datos observados. Estos modelos también son aplicados bajo el enfoque ricardiano de Mendelsohn *et al.* (1994).

Modelos de equilibrio general computable y sistemas de información geográfica, según Darwin *et al.* (1999), miden el impacto económico del clima sobre las cantidades de producción agrícola, sin embargo, el enfoque no cuenta con el análisis de más variables que inciden en el cambio climático, tales como las concentraciones de CO₂, los cambios de producción y las alteraciones en los precios (McClar *et al.*, 2001).

Funciones de producción con la variable del cambio climático. La literatura del cambio climático y los enfoques de producción proponen dos

modelos para llegar a una aproximación del uso de la tierra y el producto final de la misma, estimando no solo los costos del cambio climático sobre la producción agrícola (Quiggin & Horowitz, 1999). De igual manera, se explica que el estudio mediante la aproximación por el modelo de producción tradicional puede llevar a una sobrestimación de los efectos climatológicos en la producción, por lo que el enfoque ricardiano provee una visión más crítica (Mendelsohn *et al.*, 1994).

Función de producción agrícola bajo el enfoque ricardiano. La teoría de la producción agrícola presenta cuál será el resultado de una acción progresiva o trabajo en conjunto de varios factores, desde el bien escogido para producir, los abonos y el capital de trabajo (Manzanares, 1964). Una función de producción agrícola se expresa de manera exógena y endógena con entradas de productividades marginales. Las entradas exógenas incluyen variables tales como el clima y las condiciones del suelo, en tanto que las variables endógenas incluyen variables como el capital, el trabajo y las materias primas para el cultivo, en términos de productividades marginales, que toman en cuenta todas aquellas habilidades o características que los agricultores incorporan para llevar a cabo la producción (Fleischer *et al.*, 2007).

Según la Comisión Económica para América Latina (Cepal) (2009), la función de producción se puede plantear empíricamente como:

$$Q = f(m, x, z) \tag{2}$$

Donde Q representa la cantidad producida por medio de los factores de producción establecidos; m representa las variables o habilidades del capital humano; x incluye los factores de producción tales como el capital, el trabajo y las materias primas a utilizar; y z representa a las variables climáticas.

Además, los beneficios del productor por la producción de n cantidad de productos que recibe en un periodo determinado, se representa como:

$$\pi = \sum_{j=1}^n [p_j Q_j(m_j, x_j, z_j) - w_j x_j] \tag{3}$$

$j = 1, 2 \dots n$ cantidad de cultivos

Donde π representa los beneficios financieros; p_j los precios del cultivo j ; Q_j representa el total de la producción, representado por su respectiva función de producción, para cada uno de los tipos de cultivos j ; la cual a su vez depende de los factores de la producción definidos anteriormente, para cada uno de los cultivos. Por su parte, w_j es el precio de los factores de la producción en cada uno de los cultivos (Fleischer *et al.*, 2007).

El modelo se plantea bajo el supuesto de que los agricultores buscan maximizar su utilidad, sujeto a la restricción de costos totales. Por lo tanto, deben satisfacer el vector x , acerca de la cantidad de los factores de producción mencionados anteriormente, es decir, se toma por seguro que los agricultores escogen los recursos óptimos (capital, trabajo y materias primas) para poder producir (Fleischer *et al.*, 2007).

Para cada uno de los cultivos, el precio está representado por el ingreso marginal, que a su vez está definido por la productividad marginal del factor de la producción, cuyo representante es w , el precio del factor de la producción. Tal resultado es consecuencia de derivar la función de producción respecto a x_j y se representa por la siguiente ecuación:

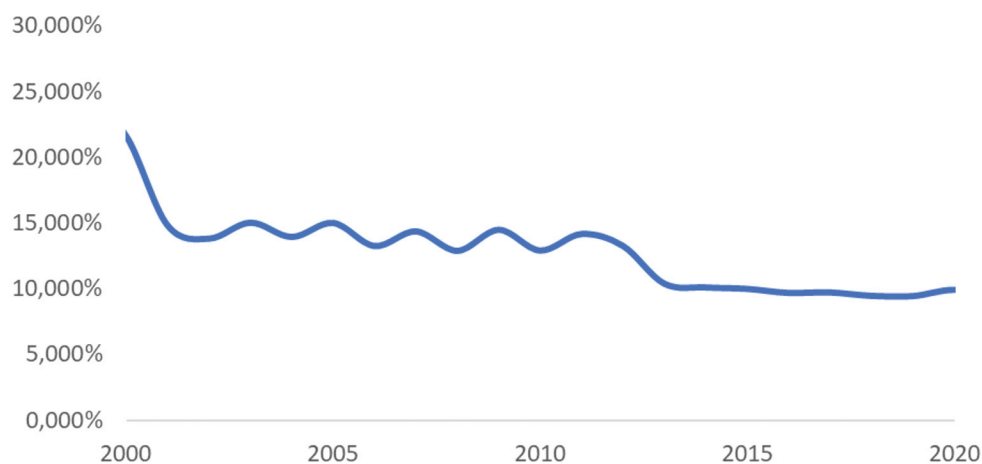
$$p_j = \frac{\partial Q}{\partial x_j} = w \quad (4)$$

Justificación de la investigación

Después de que en 1999 y 2000 el sector de agricultura, silvicultura, ganadería, caza y pesca tenía una participación respecto al PIB del 23.0 % y 22.1 %, en promedio, respectivamente. Tal participación cayó a 14.0 % en 2001 y, en promedio, se mantuvo en 14.2 % de 2001 a 2012, para luego caer a 8.70 % en promedio de 2013 a 2019 (ver Figura 1). Sin embargo, si se le suma la agroindustria, este último promedio llega a alcanzar aproximadamente un 21 % (Banco de Guatemala [Banguat], 2019).

Figura 1

Guatemala: aporte del sector agricultura, silvicultura, ganadería, caza y pesca al PIB



Fuente: elaboración y empalme propio, con datos del Banguat (2022).

La topografía y la geografía guatemalteca hacen de la agricultura una actividad económica esencial para el desarrollo económico. El país está dividido en ocho regiones con una extensión territorial de 108 889 kilómetros cuadrados, según el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAGA). De dicha extensión, el 38.1 % del total es utilizado por el subsector agrícola, del cual corresponde un 11.1 % anual o de temporada, 11.3 % para agricultura permanente, 15.2 % para pastizales y 0.5 % para zonas agrícolas heterogéneas, de acuerdo con datos del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

En términos de ocupación, la agricultura es un sector muy importante para la economía guatemalteca. Según el Instituto Nacional de Estadística (INE, 2019), la población de 15 años y más, que trabaja en este subsector, representa un 51.7 % del total, con un potencial de 73 541 kilómetros cuadrados de extensión territorial apta para la producción derivada del subsector, aproximadamente un 67.5 % del territorio nacional. De igual manera, según los datos de la Encuesta Nacional de

Condiciones de Vida (Encovi), el 91.4 % de los hogares del país tienen como cabeza a un productor agropecuario (INE, 2018). Los granos básicos o de subsistencia como el maíz, el frijol, el trigo y el arroz se constituyen en los principales productos generados. Por otro lado, predomina la producción para la exportación, siendo el banano y el café, los productos más importantes para ese fin (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente [Iarna], 2012).

El Banco Mundial (BM, 2009) asegura que la agricultura es la actividad económica más vulnerable a la variabilidad del clima y a las condiciones meteorológicas extremas. Sumado a esta vulnerabilidad, también están los problemas de degradación de la tierra. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, IPCC por sus siglas en inglés (2012), afirma que la temperatura mundial ha registrado un aumento de 0.74 grados Celsius en el siglo veinte. En el caso de Guatemala, se ha observado una tendencia ascendente desde la década de los setenta, con un incremento promedio de 0.6 grados Celsius. Para 2020, de continuar la tendencia actual, podría oscilar el aumento entre 0.4 y 0.9 grados Celsius (Cepal, 2011). Asimismo, se prevé un incremento en la temperatura de dos grados centígrados para 2050, por encima de los niveles máximos considerados para evitar efectos catastróficos del clima (IPCC, 2008).

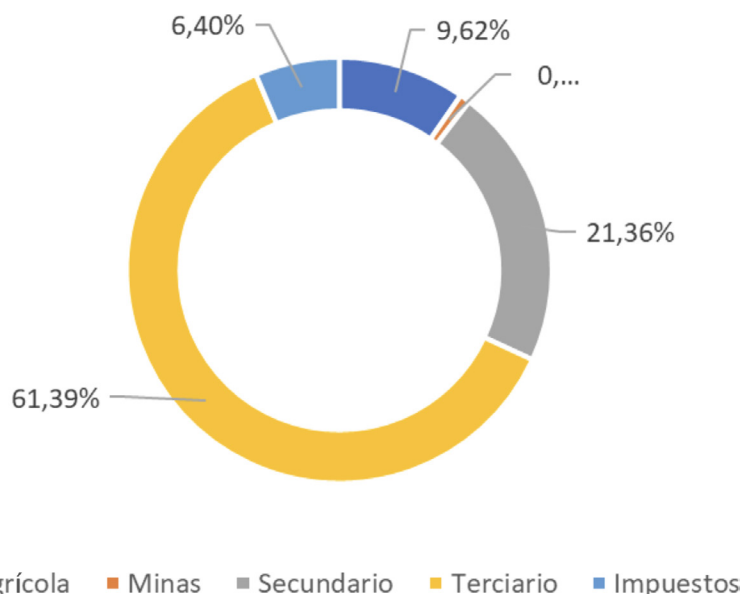
El Iarna (2011) asume que el cambio climático al que se enfrenta Guatemala es de manera local, es decir, afecta ciertas áreas del país de manera directa y otras de manera indirecta. El MARN (2001) plantea tres escenarios posibles: el primer escenario sería un aumento de 2.6 grados Celsius, lo cual provocaría una disminución del 2 % de la precipitación pluvial, este se califica como un escenario normal. El segundo escenario, un escenario optimista, indica que si la temperatura aumenta en 2.5 grados Celsius, las precipitaciones pluviales aumentarían un 9.0 %. El tercer escenario, el más pesimista, planteado por el MARN, indica que si aumenta la temperatura en 3.3 grados Celsius, las precipitaciones pluviales tendrían un déficit del 28 %. El Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh, 2014) afirma que la temperatura ha incrementado entre 0.03 a 0.04 grados Celsius por año desde 1971 hasta 2014, estas fluctuaciones de temperatura han provocado un aumento promedio de las precipitaciones pluviales de 214.6 a 240 milímetros entre 2001 y 2014 (Insivumeh, 2014).

El sector agropecuario es uno de los sectores que se han visto seriamente afectados por el cambio climático. El aumento de las temperaturas puede modificar el ciclo hidrológico. Estas condiciones tan variables afectarían la disponibilidad de agua, la aridez de la tierra para un mejor cultivo, con una frecuencia más amplia de sequías (Cepal *et al.*, 2018). Irina Arakelyan *et al.*, (2017) afirman que el cambio climático ya está teniendo efectos significativos en la agricultura, mediante las variaciones climáticas y la frecuencia de los cambios extremos. Se espera que estos eventos aumenten en las siguientes décadas. Según la Cepal *et al.* (2018), para 2030 los rendimientos de los granos básicos y el café podrían disminuir significativamente

a causa del cambio climático. El maíz podría disminuir en promedio un 7 % al igual que el frijol; el café, aunque sería el menos afectado, podría tener una pérdida considerable del 6 % de reducción en su rendimiento.

Figura 2

Guatemala: aporte del sector agrícola al PIB en 2019



Fuente: elaboración propia con datos del Banguat (2019).

Los fenómenos naturales en las últimas décadas se han intensificado en Centroamérica, tanto en intensidad como en frecuencia. Grandes fenómenos, tales como el huracán Mitch de 1998, las sequías de 2001, la tormenta tropical Stan en 2005, etc., han ocasionaron daños, los cuales han causado pérdidas de vidas humanas y han tenido un efecto negativo en la producción agrícola. Con pérdidas de más del 63 % en algunos casos (Cepal, 2011a).

Con base en lo anterior, se puede evidenciar que Guatemala es un país vulnerable y propenso al cambio climático (BM, 2019). Las fluctuaciones climatológicas o cambios de temperaturas pueden generar alteraciones en los patrones pluviales, así como también un desplazamiento de tierras utilizables para la agricultura. Asimismo, Guatemala depende en buena medida de su sector agrícola, tanto por el importante porcentaje de aportación al PIB como por la generación de ingresos y empleo de gran parte de la población, sector que, además, es sensible a los cambios climáticos.

Con base en todo lo anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿En qué medida el cambio climático incide sobre los niveles de producción agrícola de Guatemala?

Metodología de la investigación

Sujetos de investigación

Para fines de la presente investigación, se tomarán como sujetos de investigación la producción agrícola medida por el índice de producción agrícola de Guatemala y las hectáreas cultivables; empleando las estimaciones de la FAO. De esta cuenta, se incluyen las variables climatológicas tales como la temperatura y la precipitación pluvial, utilizando las mediciones realizadas por el Insivumeh y el Instituto Nacional de Electrificación (INDE). De igual manera, se utilizaron las estadísticas de empleo elaboradas por la Organización Internacional del Trabajo (OIT) y finalmente el salario mínimo establecido por el Ministerio de Trabajo y Previsión Social de Guatemala (Mintrab).

Población

En la presente investigación, se entiende como población la cantidad total de producción agrícola del territorio guatemalteco comprendido en el periodo de 1990 a 2019, presentado por Cepal en su portal estadístico Cepalstat, en el cual se evidencia que el sector agrícola en Guatemala representa 3,856 hectáreas, de las cuales 862 hectáreas son de tierras arables y 1,183 hectáreas de cultivos permanentes. Donde en promedio la superficie cosechada por tipo de cultivo está representada por: 49.5 % maíz, 16.7 % caña de azúcar, 16.3 % café, 5 % frijol seco, 1.4 % sorgo, 0.8 % soja, 0.6 % arroz, 0.2 % yuca, el restante porcentaje agrupa a los otros cultivos. Añadido a esto, se considera como población las observaciones de la variación climatológica recabadas y presentadas por el Insivumeh en el periodo de 1990 a 2019, ambas en frecuencia anual.

Muestra

En relación con la muestra, los datos estarán comprendidos en el periodo de 1990 a 2019, con 29 observaciones. Se utilizarán datos de la producción agropecuaria, temperatura máxima, mínima, precipitación pluvial máxima, mínima, mano de obra del sector agrícola, hectárea total cultivable y salario mínimo del sector agrícola.

Instrumento

El estudio se adaptó para el caso de Guatemala, con base en las metodologías utilizadas por Fleischer *et al.* (2007) y Mendelshon *et al.* (1994). Con respecto a la primera, se adaptó tomando en cuenta una función de producción agrícola para Guatemala, que incluye variables endógenas y exógenas, que considera el enfoque

ricardiano planteado por dichos autores. Se plantea la estimación de una función de producción mediante mínimos cuadrados ordinarios (MCO) para poder intuir el comportamiento de las variables climáticas sobre la producción agrícola y cómo estas influyen tanto de manera positiva como negativa.

De ambos autores, para el caso guatemalteco se emplea la siguiente ecuación para el planteamiento de la función de producción:

$$Q = f(Li, Ai) \tag{5}$$

Donde $i = 1, 2, \dots, n$ cultivos y la variable exógena Q se refiere al índice de producción agrícola total, en tanto que las variables exógenas son:

Li = factor trabajo de cada sector i

Ai = variables climáticas e irrigación de cada sector i

La ecuación de producción resultante es de segundo grado. Ya que la literatura plantea rendimientos marginales decrecientes en la producción, junto con una transformación económica², queda expresada de la siguiente manera:

$$Q_{t-1} = \beta_i + \beta_i TMx_{t-1} + \beta_i TMx^2_{t-1} + \beta_i TMn_{t-1} + \beta_i TMn^2_{t-1} + \beta_i PP_{t-1} + \beta_i PP^2_{t-1} + L_{t-1} + u_{t-1} \tag{6}$$

Donde:

Qt = índice de producción agrícola del período t

Vector Ai de variables climáticas e irrigación:

TMx = temperatura máxima

TMx^2 = temperatura máxima al cuadrado

TMn = temperatura mínima

TMn^2 = temperatura mínima al cuadrado

PP = precipitación pluvial

PP^2 = precipitación pluvial al cuadrado

Por último, los coeficientes β_i son los coeficientes estimados que acompañan a las variables explicativas y representa el término de error de la ecuación.

² Es cuando una función, de cualquier grado, se transforma a una función en mínimos cuadrados ordinarios, tal como se realiza cuando se estudia la función Cobb Douglas de manera econométrica.

Por otro lado, se asumió que los agricultores, excepto el trabajo, mantienen constante el uso del resto de insumos utilizados en cada ciclo productivo, por lo que no están tomados en cuenta en la ecuación.

Procedimiento

- Luego de seleccionar y delimitar el tema de investigación se procedió a escoger los componentes esenciales que forman la parte medular de la investigación, con lo cual se procedió a plantear la pregunta de investigación, los objetivos, las hipótesis y las limitaciones de la investigación. Posteriormente, se procedió a la recolección de los datos para construir las series de tiempo de las variables seleccionadas para realizar la estimación.
- Se analizaron los datos recolectados para revisar su congruencia y relevancia dentro del estudio.
- Finalmente, como variable dependiente se construyó el índice de producción agrícola, el cual será determinante para probar la hipótesis planteada.

Con respecto a las variables explicativas o independientes, donde la variable dependiente es el índice de la producción y las independientes son la PEA del sector agrícola y la variación climática (temperatura y precipitación pluvial) ya que según (Mora *et al.*, 2008 & Yalquerque *et al.*, 2020) se asume que los agricultores buscan maximizar sus beneficios eligiendo el óptimo de los recursos para generar la mayor utilidad y rendimiento de la producción.

Presentación de resultados

Después de estimar la ecuación planteada mediante MCO, se encontró que el término de error estaba correlacionado con algunas de las variables independientes, lo cual ocasionaba problemas de autocorrelación y heterocedasticidad, derivado de que las series temporales no presentaban estacionariedad, lo cual no permitía capturar el comportamiento dinámico, por lo que se optó por utilizar un modelo de vectores autorregresivos (VAR) dinámico, ya que este es muy útil para mostrar la simultaneidad entre las diferentes variables tal como se plantea en la Ecuación 6.

Se utilizaron 29 observaciones de datos meteorológicos, de 1990 a 2019. En la Tabla 1 se observan las estadísticas descriptivas, en donde Q es el índice de producción agrícola de Guatemala obtenido por la FAO. Por su parte, los datos meteorológicos proporcionados por el Insivumeh y el INDE se denotan por las variables TMx , TMx^2 , TMn , TMn^2 , PP y PP^2 , las cuales representan temperatura máxima, temperatura máxima al cuadrado, temperatura mínima, temperatura mínima al cuadrado, precipitación pluvial y precipitación pluvial al cuadrado, respectivamente. Con la incorporación cuadrática de estas variables se busca eliminar su comportamiento monótono (Tonconi, 2015). L representa la fuerza laboral en el sector agrícola, de acuerdo a los cálculos efectuados por la Organización Internacional del Trabajo.

Tabla 1
Resumen de resultados de estadística descriptiva de las variables

Cuenta	Q	TMx^2	TMx^2	TMn	TMn^2	PP	PP^2	L
Media	66.95	25.63	657.14	15.51	240.89	928.20	915 648.02	4.25
Error típico	4.38	0.07	3.42	0.08	2.48	43.96	75 098.97	0.06
Mediana	62.47	25.68	659.63	15.53	241.03	945.70	894 348.49	4.30
Desviación estándar	23.59	0.36	18.40	0.42	13.33	236.71	404 420.30	0.35
Varianza de la muestra	556.62	0.13	338.72	0.18	177.76	56 031.30	163 555 782 553.59	0.12
Rango	70.23	1.63	83.63	1.74	55.05	1024.30	1 523 031.67	1.34
Mínimo	35.17	24.78	614.21	14.93	223.00	231.30	53 499.69	3.72
Máximo	105.40	26.42	697.84	16.68	278.06	1 255.60	1 576 531.36	5.06
Suma	1 941.58	743.34	1 9057.14	449.93	6 985.73	26 917.70	26 553 792.61	123.24
Cuenta	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00

Fuente: elaboración propia mediante el paquete econométrico R.

En la Tabla 1 se pueden observar los datos estadísticos, donde el índice de producción medio es de 66.95, así mismo con una dispersión de los datos del 23.59 %, donde el índice de producción agrícola logró llegar a máximos de 105.40 de 29 observaciones. Del mismo modo, la temperatura media máxima se encuentra en 25.63 grados Celsius, siendo muy similar a la temperatura ambiente, con una dispersión de los datos del

0.36 %. Por su parte, la temperatura máxima fue de 26.42 grados Celsius, por el lado de la temperatura mínima, la media se encuentra en 15.51 grados Celsius, donde la máxima registrada fue de 16.68 grados Celsius. Por el lado de la precipitación pluvial, la media fue de 928.2 milímetros, con una desviación de 236.71 milímetros.

Estimación del modelo de la función de producción

En este apartado se presentan los resultados de la transformación econométrica de la función de producción bajo el esquema de un modelo VAR. El objetivo principal es determinar el efecto de las variaciones de la precipitación pluvial y la temperatura, como consecuencia del cambio climático, sobre los niveles de producción agrícola.

Test de raíz unitaria. Según Mahadeva y Robinson (2009), para poder comprobar o cuantificar relaciones causales entre variables, los datos deben presentar ruido blanco³, ser estadísticamente significativos, estacionales y que presentan un buen ajuste; de lo contrario, la regresión podría ser espuria. Para comprobar la estacionariedad de las series, se realiza la prueba de raíz unitaria mediante el test de Dickey-Fuller, como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2
Pruebas de raíz unitaria en niveles

variable	T-estadístico	P-valor
Q	-21,861	0.47960
L	-0.8891	0.7766
TMx	-4.9958	0.0004
TMx2	-4.9963	0.0004
TMn	0.0206	0.9517
TMn2	0.063	0.9557
PP	-5.0875	0.0003
PP2	-4.5502	0.0012

Fuente: elaboración propia con el paquete Eviews 11.

Se observa que el índice de producción agrícola, la variable de trabajo, la temperatura mínima y la temperatura mínima al cuadrado, no son estacionarias en niveles ya que se cumple la hipótesis nula de que sí hay raíz unitaria y se debe aceptar la hipótesis alternativa respecto a la no existencia de raíz unitaria; esto se debe a que el *P-value* de ambas no es menor en 0.05 %, es decir no es significativa (Mahadeva & Robinson, 2009).

³ Se denomina así a los valores que derivan de un proceso estocástico, son independientes e idénticamente distribuidos a lo largo del tiempo con una media cero e igual varianza (Villavicencio, 2014).

Tabla 3
Pruebas de raíz unitaria en primera diferencia

variable	T-estadístico	P-valor
Q	-4.46	0.0086
L	-5.09	0.0003
TM	-5.28	0.0003
TM ²	-5.30	0.0003

Fuente: elaboración propia con el paquete Eviews 11.

Sin embargo, al trabajar con un modelo estructural, una función de producción con transformación econométrica estimada mediante un VAR suele tener variables exógenas que afectan en forma contemporánea a otras variables endógenas, por lo que, en la mayoría de los casos, esto se soluciona con la utilización de rezagos óptimos indicados por los criterios de Akaike, Shwarz y Hannan-Quinn, al encontrar que el rezago óptimo es igual a uno.

Resultados del modelo VAR. Para poder evaluar los efectos del cambio climático de manera óptima se estimaron cuatro diferentes modelos VAR de acuerdo con la Ecuación 16, con el fin de probar la robustez de los mismos.

Al elevar al cuadrado las variables, como es el caso de las variables climatológicas, esto puede conducir a problemas de colinealidad entre las variables y del mismo modo esto puede afectar la significancia de las variables, sin embargo, es necesario incluir las variables de esta manera ya que se desea eliminar el comportamiento monótono de las mismas (Segerrson & Dixon, 1998; Tonconi, 2015; Choque, 2016). Por otro lado, se espera que las variables climatológicas incluidas dentro del modelo, especialmente las elevadas al cuadrado, muestren signo negativo, ya que esto indicaría que existen rendimientos decrecientes a escala en el nivel de producción agrícola.

De acuerdo con los resultados (véase la Tabla 4), los coeficientes de temperatura no son significativos en casi todo los casos, al igual que la precipitación pluvial no cuenta con la misma recurrencia en los modelos estimados, no obstante, el *F* estadístico muestra una fuerte relación entre todas las variables y la variable dependiente, que junto al *R*² (99.5 %), evidencian que los parámetros utilizados en el modelo son significativos globalmente, lo cual se constituyen en los principales criterios para elegir el modelo eficiente (Taconi, 2015).

Tomando como referencia el estudio realizado por Mora *et al.* (2010), se utilizó un modelo de regresión tipo Lin-Log, incluyendo las temperaturas máximas para estimar los niveles óptimos de temperatura. Estos modelos se estiman mediante derivadas parciales, en donde la primera de ellas es el valor óptimo y la segunda representa la relación convexa o cóncava del modelo.

Tabla 4
Resultados del modelo VAR

dependiente	Q	Q	Q	Q
modelo/coeficiente	modelo 1	modelo 2	modelo 3	modelo 4
	Lin Log	Lin Lin	Lin Lin	Lin Log
coeficiente	-1 762.98	-1 778.58	-207.944	-206.695
	(-1.555)	(-1.536)	(-0.5361)	(-0.5341)
Qt-1	0.9831	0.2207	0.1441	1.011
	(-36.3515)	(-1.0735)	(-0.6452)	(-33.835)
L	-5.0987	-1.7892	-1.1832	-3.7126
	(-0.6826)	(-0.7634)	(-0.9224)	(-0.4896)
TMx	136.85	23.81		
	-1.1553	-0.2605		
TMx²	-2.6347	-0.4579		
	(-1.1369)	(-1.257)		
TMn			35.26	28.7627
			-0.6967	-0.5813
TMn²			-1.1584	-9594
			(-0.7168)	(-0.6029)
PP	-0.0079	-0.0009	-0.005	-0.0054
	(-1.0556)	(-1.1797)	(-0.0079)	(-0.6955)
PP²	0.0000042	0.0000004	0.00000151	0.00000174
	(-0.9474)	(-0.8857)	(-0.325)	(-0.3794)
R²	0.995	0.2767	0.17	0.994
F-stadistic	709.67	1.27	-0.0787	636.47
Akaike Aic	4.2733	4.2694	4.4023	4.3816
Schwarz	4.6063	4.6053	4.7040	4.7100

Nota. Los datos entre paréntesis representan el *t-value* y entre corchetes el *p-value*. Fuente: elaboración propia con el paquete econométrico Eviews 11.

Tal como menciona Yarleque *et al.* (2020), si los modelos no son significativos por *P-value* y/o *T-value*, como la mayoría de modelos que implican variables climáticas, el modelo óptimo se escoge por los criterios del R^2 alto, *F* estadístico alto, Akaike bajo y Schwarz bajo, por lo que el modelo 1 de la Tabla 4 cumple con la gran mayoría de estos criterios, en comparación a los otros modelos, y es este el modelo óptimo para continuar con la evaluación de la hipótesis planteada anteriormente.

Estabilidad en el modelo VAR

Prueba de estacionariedad. Siguiendo lo planteado en los trabajos de Yarleque *et al.* (2020), Quispe (2015) y Carrasco (2014), luego de la estimación del modelo VAR, se hizo la comprobación de estacionariedad mediante el análisis de *AR Roots*. Si alguno de estos valores es mayor que uno en algún módulo, el proceso no es estacionario y posiblemente sea necesario diferenciar la serie. Este no es el caso, ya que las raíces de la parte *AR* son menores que uno en módulo y se comprobó que el modelo no cuenta con ninguna raíz fuera del círculo unitario, es decir que el modelo sí cumple con las condiciones de estabilidad, según se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5
Prueba de raíz AR Roots para estabilidad del modelo

variables endógenas	D(Q) log(L)
variables endógenas	CTMx TMx ²
<i>root</i>	<i>modulus</i>
0.9369	0.9368
0.0787	0.0786

Fuente: elaboración propia mediante datos de Eviews.

Prueba de autocorrelación. Para determinar que no existan problemas de autocorrelación se realizó la prueba LM con un rezago congruente con la estimación del modelo VAR. La hipótesis nula de la prueba muestra que no existe correlación serial, por lo cual se rechaza la misma.

Tabla 6
Prueba LM para demostrar que no existe autocorrelación

Hipótesis nula: no existe correlación serial en <i>lag</i> estimado	
<i>lag</i>	<i>prob</i>
1	0.623

Fuente: elaboración propia mediante el paquete econométrico Eviews.

Discusión de resultados

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede dar respuesta al planteamiento del problema, en cuanto al efecto y la medida de la variación climática sobre la producción agrícola. Cabe resaltar que los parámetros de las variables exógenas del modelo tienen los signos esperados. Lo mismo sucede con los signos de las variables elevadas al cuadrado, ya que se busca que estos muestren evidencia de rendimientos decrecientes a escala. Los resultados son similares a los encontrados por Carrasco (2016); Yarleque *et al.* (2020); Armestar y Aguilar (2020) y Mora *et al.* (2010), en sus respectivas investigaciones, quienes utilizaron estimaciones Lin-Log para encontrar la temperatura y la precipitación pluvial óptimas, a partir de las cuales el índice de producción se maximiza.

Para encontrar los valores óptimos de la temperatura y la precipitación pluvial, se utilizaron derivadas parciales de la función de producción, representada por la estimación del modelo VAR. De acuerdo con Mora *et al.* (2010), las variables endógenas se toman como constantes. De esta manera se facilita el proceso de derivación, tal como se realiza en el modelo de crecimiento económico de Solow y Swan, en el cual, a partir de una transformación econométrica y al encontrar sus constantes, estas se utilizan para calcular las derivadas parciales de sus diferentes componentes.

Tomando en cuenta el modelo 1 de la Tabla 4, resulta la siguiente ecuación:

$$Q(TMx, PP) = -a_0 + a_1Q_{t-1} + a_2\text{LogL} + a_3TMx - a_4TMx^2 - a_5PP + a_6PP^2 \quad (7)$$

Cabe resaltar que al calcular el promedio de las variables temperatura, precipitación pluvial e IPA, los valores resultantes coinciden con los valores de 2005, por lo que dichos valores se toman como dados para este año. Luego, para las variables exógenas se realizó la siguiente sustitución:

$$TMx = X \quad (8)$$

$$PP = Y \quad (9)$$

Con lo cual, podemos plantear la Ecuación 7 como:

$$Q(X, Y) = -a_0 + a_1Q_{t-1} + a_2\text{LogL} + a_3X - a_4X^2 - a_5Y + a_6Y^2 \quad (10)$$

A partir de la Ecuación 10, se efectuaron las derivadas parciales, expresadas por las siguientes funciones:

$$Q_{xx} = a_3 - 2a_4X \quad (11)$$

$$Q_{yy} = -a_5 + 2a_6Y \quad (12)$$

Para encontrar el óptimo, se procede a igualar a cero las derivadas parciales y se despeja para X y Y.

Para óptimo de X:

$$Q_{xx} = 0 \quad (13)$$

$$0 = a_3 - 2a_4X \quad (14)$$

$$2a_4X = a_3 \quad (15)$$

$$X = \frac{a_3}{2a_4} \quad (16)$$

Para óptimo de Y:

$$Q_{yy} = 0 \quad (17)$$

$$0 = -a_5 + 2a_6Y \quad (18)$$

$$a_5 = 2a_6Y \quad (19)$$

$$Y = \frac{a_5}{2a_6} \quad (20)$$

Por lo tanto, $X = \frac{a_3}{2a_4}$ tenemos que la temperatura máxima que maximiza la producción está expresada por $Y = \frac{a_5}{2a_6}$. De estas ecuaciones se sustituyen los coeficientes correspondientes encontrados en la estimación del modelo VAR, con lo cual, los valores de X y Y quedan de la siguiente manera:

$$X = \frac{136.85}{2(2.6347)} = 25.97 \text{ }^\circ\text{C} \tag{21}$$

$$Y = \frac{0.0079}{2(0.00000428)} = 922.9 \text{ mm} \tag{22}$$

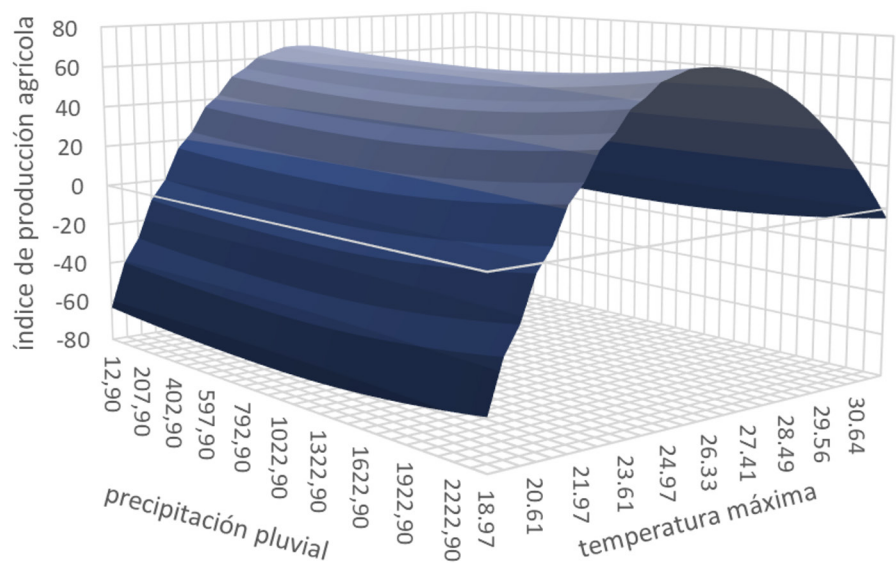
Por último, los valores óptimos tanto del IPA, PP y TMx, se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 8
Valores óptimos

índice de producción máximo	precipitación pluvial óptimo	temperatura máxima óptima
62.30	922.89 mm	25.97°C

Fuente: elaboración propia.

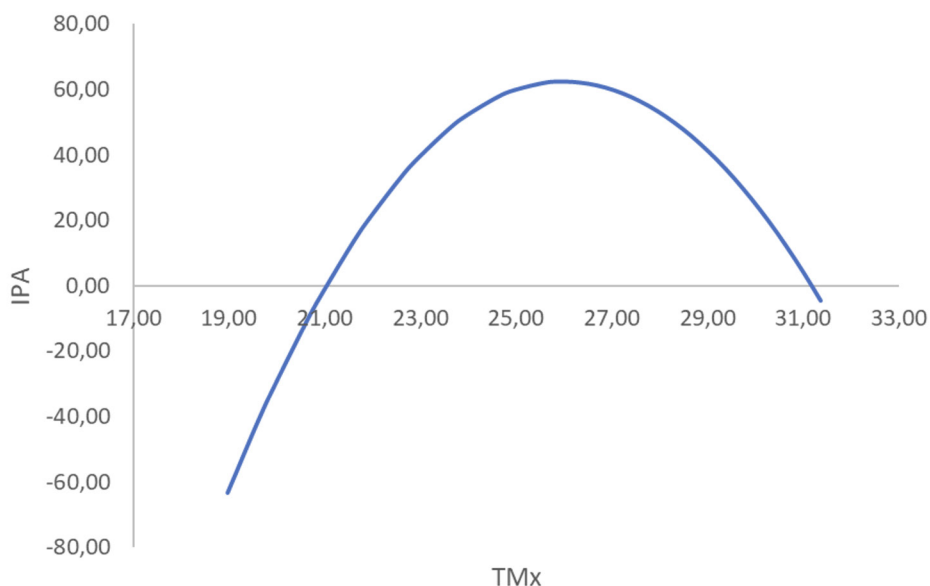
Figura 3
Producción agrícola ante variaciones en la precipitación pluvial y la temperatura máxima



Fuente: elaboración propia a partir de los resultados encontrados.

A partir de la Tabla 8 y la Figura 3, se observa que la producción agrícola se ve afectada a medida que aumenta la temperatura máxima y la precipitación pluvial. El IPA alcanza un máximo de 62.3 a partir del cual comienza a descender en la medida en que la PP supera los 922.9 mm. El mismo comportamiento se observa con respecto a la TMx, al superar los 25.97 °C. Todo esto evidencia la existencia de rendimientos decrecientes a escala en la producción agrícola en relación con la precipitación pluvial y la temperatura. Según registros, en 2005 los niveles de PP y TMx sobrepasaron los máximos encontrados, con 26.42 °C y 1 150.30 mm, respectivamente, congruentes con la caída en la producción agrícola observada en 2005 en la Figura 1.

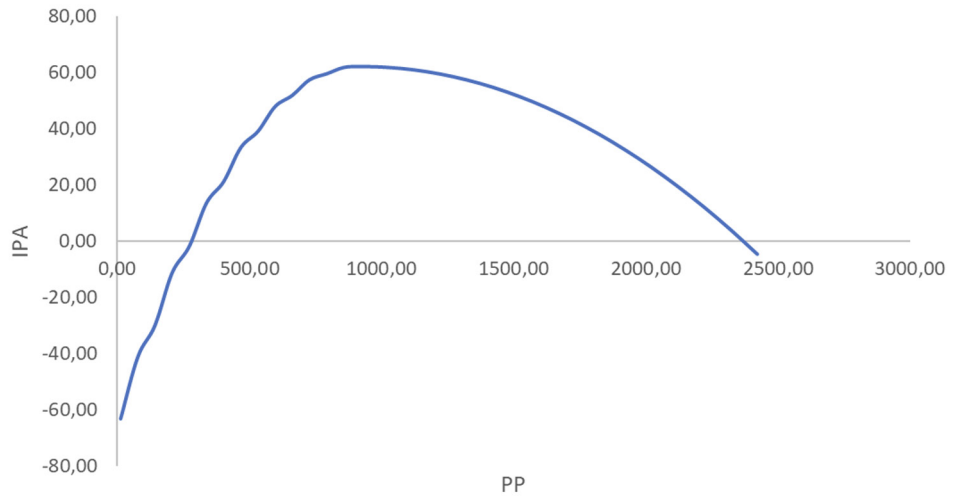
Figura 4
Producción agrícola ante variaciones en la temperatura máxima



Fuente: elaboración propia de acuerdo con los resultados encontrados.

La Figura 4 muestra el impacto de las variaciones climáticas de la temperatura máxima sobre la producción agrícola. Se observa que la temperatura óptima se encuentra en 25.97 grados Celsius misma que maximiza la producción, sin embargo, a partir de ese punto las disminuciones o incrementos sobre la temperatura podrían originar disminuciones en la producción, lo cual muestra que el valor de la temperatura encontrada es el óptimo. La misma interpretación es congruente con la Figura 5, con un a precipitación pluvial óptima de 922.8 mm.

Figura 5
Producción agrícola ante variaciones y precipitación pluvial



Fuente: elaboración propia de acuerdo con los resultados encontrados.

Conclusiones

- De acuerdo con el modelo planteado, se determinó la existencia de una relación e incidencia entre el cambio climatológico y la producción agrícola de Guatemala, durante el periodo de 1990 a 2019.
- Mediante la estimación de una función de producción y una transformación econométrica, se determinó que, eventualmente, cuando se sobrepasa el óptimo de temperatura y precipitación pluvial, la producción tiende a decaer, con lo que se muestra la existencia de rendimientos marginales decrecientes de la producción con respecto a los cambios climatológicos.
- Los hallazgos encontrados muestran que a medida que la temperatura incrementa en una desviación estándar de 0.36 grados Celsius, por encima de los 25.97 grados Celsius y, al mismo tiempo, la precipitación pluvial incrementa marginalmente 100 mm consecutivos después de haber alcanzado 922.90 milímetros, el índice de producción comienza a caer, en promedio, 3.6 puntos básicos hasta alcanzar valores negativos.
- Las variaciones en la temperatura y la precipitación pluvial tienen un efecto directo en los niveles de producción agrícola, lo que eventualmente podría afectar la oferta de bienes primarios y provocar una consecuente subida en los precios de los mismos, que afecte de manera agregada a la economía.

Referencias

- Adams, R. M. & Neumann, J. (1998). *The Economics of Climate Change*. Cambridge University Press.
- Arakelyan, I., Wreford, A. & Moran, D. (2017). Can agriculture be climate smart? En K. N. Makoto (ed.), *Building a Climate Resilient Economy and Society* (pp. 115-131). Elgar. <https://doi.org/10.4337/9781785368455.00019>
- Banco de Guatemala. (2019). *Estudio de la economía nacional 2019*. https://www.banguat.gob.gt/sites/default/files/banguat/Publica/doctos/estudio_de_la_economia_2019.pdf
- Banco Mundial (2009). *Country Note on Climate Change Aspects in Agriculture Guatemala 53792* [Informe]. <http://hdl.handle.net/10986/9475>
- Bengtsson, L., Bonnet, R., Calisto, M., Destouni, G., Gurney, R., Johannessen, J., Kerr, Y., Lahoz, W. A. & Rast, M. (eds.). (2014). *The Earth's Hydrological Cycle*. Springer.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2010). *Efectos del cambio climático sobre la agricultura*. <https://hdl.handle.net/11362/25917>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2011a). Guatemala: *Efectos del cambio climático sobre la agricultura*. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/25917-guatemala-efectos-cambio-climatico-la-agricultura>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2011b). *La economía del cambio climático en Centroamérica*. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/26058-la-economia-cambio-climatico-centroamerica-reporte-tecnico-2011>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2011c). *Agricultura y cambio climático: instituciones, políticas e innovación*. <https://hdl.handle.net/11362/7021>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Fondo Nórdico de Desarrollo, Banco Interamericano de Desarrollo & Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales de Guatemala. (2018). *La economía del cambio climático en Guatemala*. [Documento técnico 2018]. <https://hdl.handle.net/11362/43725>
- Darwin, R., Tsigas, M., Lewadrowski, J. & Ranases, A. (1999). Climate Change, World Agriculture and Land Use. En G. Frisvold & B. Kuhn (eds.), *Global Environmental Change and Agriculture* (pp. 297-326). Edward Elgar Publishing. <https://www.elgaronline.com/view/edcoll/9781035303502/9781035303502.00019.xml>

- Dwivedi, D. N. (2008). *Microeconomics Theory and Applications*. Pearson Education Asia.
- Eltahir, E. A. B. (1998). A soil moisture-rainfall feedback mechanism. *Water Resources Research*, 34(4), 765-776. <https://eltahir.mit.edu/wp-content/uploads/2014/05/1998-Eltahir.pdf>
- Enders, W. (2015). *Applied Econometric Time Series* (4.ª ed.). Wiley.
- Fleischer, A., Lichtman, I. & Mendelsohn, R. (2007). Climate change, irrigation, and Israeli agriculture: Will warming be harmful? *Ecological Economics*, 65(3), 508-515. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.07.014>
- Fleming, J. R. (1999). Joseph Fourier, the 'greenhouse effect', and the quest for a universal theory of terrestrial temperatures. *Endeavour*, 23(2), 72-75. [https://doi.org/10.1016/S0160-9327\(99\)01210-7](https://doi.org/10.1016/S0160-9327(99)01210-7)
- Giardina, C. P. & Ryan, M. G. (2000). Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature. *Nature*, (404), 858-861. <https://doi.org/10.1038/35009076>
- Gillespie, A. (2014). *Foundations of Economics* (3.ª ed.). Oxford University Press.
- Gómez, E. (1964). Funciones de producción en la agricultura. *Revista de Estudios Agrosociales*, (48), 35-130. https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_reas/ro48_02.pdf
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2008). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_sp.pdf
- Holzman, B. (1937), *Sources of moisture for precipitation in the United States* (Boletín técnico n.º 589). United States Department of Agriculture. <https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT86200584/PDF>
- Huntington, T. G. (2017). Climate Warming-Induced Intensification of the Hydrologic Cycle: An Assessment of the Published Record and Potential Impacts on Agriculture. *Advances in Agronomy*, (109), 1-53. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385040-9.00001-3>
- Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente. (2011). *Cambio climático y biodiversidad. Elementos para analizar sus interacciones en Guatemala con un enfoque ecosistémico* (Documento n.º 37). Universidad Rafael Landívar. http://www.infoiarna.org.gt/rediarna/2012/Red%20Informa%201/adjuntos/Cambio_climatico_biodiversidad_FINAL.pdf
- Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente. (2012). *Perfil Ambiental de Guatemala 2010-2012*. Universidad Rafael Landívar. <https://www.url.edu.gt/publicacionesurl/FileCS.ashx?Id=40177>

- Instituto Nacional de Estadística. (2019a). *Encuesta Nacional Agropecuaria de Granos Básicos (maíz, frijol y arroz)*. <https://www.ine.gob.gt/sistema/uploads/2020/01/15/20200115211422F2bGNAvSXAHCJsfl1SReTg1sJMZq9Qfs.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística (2019b). *Encuesta Nacional de Empleo e Ingresos*. <https://www.ine.gob.gt/sistema/uploads/2020/08/13/2020081353830FopQpWf6BcBWj8taVS3Q3mRKxgDsvwPe.pdf>
- Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. (2014). *Variabilidad y cambio climático en Guatemala*. Departamento de Investigación y Servicios Climáticos. https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2021/02/Variabilidad_y_cambio_climatico.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2012). *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [Summary for policymakers and technical summary]*. https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN_FD_SPM_final.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2018). *Global Warming of 1.5 °C*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2022/06/SR15_Full_Report_LR.pdf
- Jehle, G. A. & Reny, P. J. (2011). *Advanced Microeconomic Theory*. Prentice Hall.
- Jones, M. D. H. & Henderson-Sellers, A. (1990). History of the greenhouse effect. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 14(1), 1-8. <https://doi.org/10.1177/030913339001400101>
- Krugman, P., Wells, R. & Olney, M. L. (2008). *Fundamentos de Economía*. Editorial Reverté.
- Kurz, H. D. & Salvadori, N. (1995). *Theory of production: A long-period analysis* (1.^a ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511625770>
- Marshall, S. J. (2014). *The water cycle*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09091-6>
- Maslin, M. (2014) *Climate change: A very short introduction* (3.^a ed.). Oxford University Press.
- Maurice, S. C., Phillips, O. R. & Ferguson, C. E. (1982). *Economic Analysis: Theory and Application* (4.^a ed.). Homewood, Irwin.
- McCarl, B. A., Adams, R. M. & Hurd, B. H. (2001). *Global Climate Change and its Impact on Agriculture*. <https://agecon2.tamu.edu/people/faculty/mccarl-bruce/papers/879.pdf>
- Mendelsohn, R., Nordhaus, W. D. & Shaw, D. (1994). The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis. *The American Economic Review*, 84(4), 753-771. <https://www.jstor.org/stable/2118029>

- Méndez, J. S. (2009) *Fundamentos de economía para la sociedad del conocimiento* (4.ª ed.). Mc Graw Hill.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2008). *El estado de los recursos fitogenéticos Guatemala 2008*. <https://es.scribd.com/document/387088915/Estado-de-Los-Recursos-Fitogeneticos-en-Guatemala-Segundo-Informe-Nacional-2008#>
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2001). *Primera comunicación sobre el cambio climático en Guatemala*. https://www.cac.int/sites/default/files/Primera_Comunicaci%C3%B3n_Nacional._Guatemala._2001.pdf
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (2014). *Mapa de bosques y uso de la tierra 2012: Mapa de cambios en uso de la tierra 2001-2010 para la estimación de emisiones de gases de efecto invernadero* [Documento informativo]. <https://biblioteca.ufm.edu/opac/record/1073846>
- Molua, E. L. & Lambi, C. M. (2007). *The economic Impact of Climate Change on Agriculture in Cameroon* (Policy Research Working Paper n.º 4364). <https://doi.org/10.1596/1813-9450-4364>
- Nelson, G. C., Rosegrant, M. W., Koo, J., Robertson, R., Sulser, T., Zhu, T., Ringle, C., Msangi, S., Palazzo, A., Batka, M., Magalhaes, M., Valmonte-Santos, R., Ewing, M. & Lee, D. (2009). *Cambio climático. El impacto en la agricultura y los costos de adaptación*. Instituto Internacional de Investigación Sobre Políticas Alimentarias. https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/AGRO_Noticias/docs/costo%20adaptacion.pdf
- Nicholson, W. & Snyder, C. (2005). *Microeconomic Theory: Basic Principles and Extensions* (10.ª ed.). Thomson South-Western.
- Parkin, M. & Loira, E. (2010) *Microeconomía versión para Latinoamérica* (9.ª ed.). Pearson Education.
- Quiggin, J. & Horowitz, J. K. (1999). The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis Comment. *American Economic Review*, 89(4), 1044-1045. <https://doi.org/10.1257/aer.89.4.1044>
- Rasmussen, S. (2013). *Production Economics: The Basic Theory of Production Optimisation* (2.ª ed.). Springer.
- Samuelson, P. A. & Nordhaus, W. D. (2010). *Economía con aplicaciones en Latinoamérica* (19.ª ed.). McGraw Hill.
- Schimel, D. S., Braswell, B. H., Holland, E. A., McKeown, R. & Ojima, D. S. (1994). *Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils*. University of New Hampshire. https://scholars.unh.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=&httpsredir=1&article=1606&context=earthsci_facpub

- Selvam, A. M. (2015). *Rain Formation in Warm Clouds: General Systems Theory*. Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-13269-3>
- Smith, H. M. (1999). *Understanding Economics* (1.^a ed.). M. E. Sharpe.
- Titus, J.G., Barth, M.C. (investigadores principales), Gibbs, M.J., Hoffman, J.S., & Kenney, M. (1983). *An Overview of the Causes and Effects of Sea Level Rise*. http://papers.risingsea.net/downloads/Challenge_for_this_generation_Barth_and_Titus_chapter1.pdf
- Titus, J. G., Park, R. A., Leatherman, S. P., Weggel, J. R., Greene, M. S., Mausel, P. W., Brown, S., Gaunt, C., Trehan, M. & Yohe, G. (1991). Greenhouse effect and sea level rise: The cost of holding back the sea. *Coastal Management*, 19(2), 171-204. <https://doi.org/10.1080/08920759109362138>
- Tonconi, J. (2015). Producción agrícola alimentaria y cambio climático: Un análisis económico en el departamento de Puno, Perú. *Idesia*, 33(2), 119-136. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292015000200014>
- Trenberth, K. E. & Guillemot, C. J. (1996). *Evaluation of the atmospheric moisture and hydrological cycle in the NCEP reanalysis* [Reporte técnico]. University Corporation for Atmospheric Research. doi:10.5065/D6V40S4C
- Trenberth, K. E. & Guillemot, C. J. (1998). Evaluation of the atmospheric moisture and hydrological cycle in the NCEP/NCAR reanalyses. *Climate Dynamics*, (14), 213-231. <https://doi.org/10.1007/s003820050219>
- Pörtner, D. et al (2018). Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. *Cambridge University Press*. <http://dlib.hust.edu.vn/handle/HUST/21737>
- Villavicencio, J. (2014). Introducción a las series de tiempo. http://www.estadisticas.gobierno.pr/iepr/LinkClick.aspx?fileticket=4_BxecUaZmg%3D