

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE CIENCIAS

AGRICULTURA, CAMBIO CLIMÁTICO Y NUTRICIÓN

**EFFECTO DE LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA DE DISTINTOS PAÍSES
DEL MUNDO SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE ECONOMISTA**

Yael Justine Chuquitarco CavieDES

yael.chuquitarco@epn.edu.ec

DIRECTOR: Yasmín Salazar Méndez

yasmin.salazar@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2024

CERTIFICACIONES

Yo, Yael Justine Chuquitarco Caviedes declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Yael Justine Chuquitarco Caviedes

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Yael Justine Chuquitarco Caviedes, bajo mi supervisión.

Yasmín Salazar Méndez
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Yael Justine Chuquitarco Caviedes

Yasmín Salazar Méndez

DEDICATORIA

A mi madre, Verónica, mi mayor soporte fuente de inspiración. A mi padre, Roberto, un hombre incondicional que me respalda y me impulsa a cumplir todas mis metas.

Este logro es un reflejo de la fuerza y el respaldo que encuentro en cada uno de ustedes. Gracias por ser mi mayor motivación a lo largo de este viaje.

AGRADECIMIENTO

A mis padres, Verónica y Roberto, y a mi hermano, Alejandro, les expreso mi más profundo agradecimiento por su apoyo. Gracias por creer en mí desde el principio y ser la fuente de motivación para alcanzar este logro.

A mis queridos abuelos, Corina y Marcelo, gracias por confiar en mí desde mis primeros años de vida. Su apoyo inquebrantable y el amor que me han brindado me han convertido en la mujer que soy.

A mi tutora, Dra. Yasmín Salazar, gracias por su guía experta y su impulso constante para sacar lo mejor de mí en este trabajo.

A mis amigas y amigos, Pamela, Geovanna, Aylin, Mateo, Carlos y Mathew, les agradezco de corazón por su apoyo incondicional a lo largo de la carrera. Sus palabras de aliento fueron un pilar fundamental en momentos difíciles, y su presencia constante hicieron que este camino fuera mucho más memorable.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	2
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	3
DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTO	5
ÍNDICE DE CONTENIDO	6
RESUMEN.....	8
ABSTRACT	9
1. INTRODUCCIÓN	10
1.1. Objetivo general	11
1.2. Objetivos específicos.....	11
1.3. Alcance	11
1.4. Marco teórico.....	12
1.4.1. Teoría económica	12
1.4.2. Evidencia empírica	15
2. METODOLOGÍA	17
2.1. Datos.....	17
2.2. Metodología	18
• Modelo PVAR.....	18
• Causalidad en el sentido de Granger	19
• Función de respuesta al impulso.....	19
2.3. Descripción de las variables	20
2.3.1. Producción de arroz	20
2.3.2. Producción de frijol	21
2.3.3. Producción de maíz.....	22
2.3.4. Emisiones de metano.....	23
2.3.5. Emisiones de dióxido de carbono	24
2.3.6. Emisiones de óxido nitroso	25
3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	26
3.1. RESULTADOS	27
3.1.1. Resultados de granos básicos.....	27
3.1.2. Resultados de las emisiones de GEI.....	34
3.1.3. Tabla resumen de causalidad en el sentido de Granger.....	40
3.2. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	42
4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
5. ANEXOS.....	49

I.	Producción agrícola de arroz.....	49
II.	Producción agrícola de frijol	50
III.	Producción agrícola de maíz	51
IV.	Emisiones de CH ₄	52
V.	Emisiones de CO ₂	53
VI.	Emisiones de N ₂ O	54

RESUMEN

El cambio climático representa uno de los mayores desafíos actuales del mundo, y sus consecuencias afectarán el desarrollo de varios sectores económicos, entre estos la agricultura. En el presente estudio se analiza la relación bidireccional entre el cambio climático, medido a través de las emisiones de metano, dióxido de carbono y óxido nitroso, con la producción agrícola (arroz, maíz y frijol). Para esto, se estima un modelo de vectores autorregresivos para panel, considerando 17 países de América Latina, con datos obtenidos de FAOSTAT para el periodo 2001-2020. Los resultados sugieren el impacto negativo del cambio climático sobre el desarrollo de los cultivos y que, a su vez, este contribuye al incremento de los gases de efecto invernadero. Las prácticas empleadas en los cultivos, tales como el uso de fertilizantes o pesticidas, son posibles causas de este incremento de los gases de efecto invernadero. Se encontró que Brasil es el mayor productor agrícola y el mayor emisor de gases de efecto invernadero, mientras que países como El Salvador, Uruguay y Costa Rica son los menores productores agrícolas y, por ende, los que menos contaminan.

PALABRAS CLAVE: Cambio climático, producción agrícola, América Latina, modelo PVAR

ABSTRACT

Climate change represents one of the world's greatest current challenges, and its consequences will affect the development of several economic sectors, including agriculture. This study analyzes the bidirectional relationship between climate change, measured through emissions of methane, carbon dioxide and nitrous oxide, with agricultural production (rice, corn, and beans). For this, a panel autoregressive vector model is estimated, considering 17 Latin American countries, with data obtained from FAOSTAT for the period 2001-2020. The results suggest the negative impact of climate change on the development of crops and that, in turn, this contributes to the increase in greenhouse gases. The practices used in crops, such as the use of fertilizers or pesticides, are possible causes of this increase in greenhouse gases. It was found that Brazil is the largest agricultural producer and the largest emitter of greenhouse gases, while countries such as El Salvador, Uruguay and Costa Rica are the smallest agricultural producers and, therefore, the least polluting.

KEYWORDS: Climate change, agricultural production, Latin America, PVAR model

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático (CC) es considerado como uno de los desafíos más importantes y complejos que enfrenta el mundo en el siglo XXI (Agliardi *et al.*, 2020). El cambio climático amenaza el acceso a elementos básicos, como el agua, los alimentos, la salud y el uso de la tierra. Según Guzmán (2013), los efectos del CC en la economía son objeto de gran atención, especialmente en sectores clave, como la agricultura, la energía, el transporte y el turismo.

El CC, a través de los incrementos de temperaturas y precipitaciones, genera un impacto negativo en el rendimiento de los cultivos agrícolas (Ortiz, 2012). Asimismo, las alteraciones climáticas, provocadas por el CC, crean condiciones propicias para el desarrollo de plagas de insectos, afectando directamente a los cultivos (Khanal, 2009). Adicionalmente, Stern (2007) afirma que es probable que la disminución del rendimiento de los cultivos a causa del CC deje a millones de personas sin la capacidad de acceder a alimentos suficientes. Trabajos recientes, como los realizados por Palacios (2023) & Sorto (2020), muestran de manera empírica el impacto negativo en la producción agrícola debido al aumento de precipitaciones; sin embargo, para evaluar el impacto del CC en los cultivos también es posible utilizar otro tipo de variables como las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

Las emisiones de GEI representan un factor importante para evaluar el impacto del CC. Guzmán (2013) indica que el incremento de las emisiones de GEI genera una disminución de los cultivos agrícolas (medidos en hectáreas). Por otro lado, Ozlu (2022) pone en evidencia la simultaneidad existente entre el CC y la producción agrícola, dado que en su estudio muestra que la agricultura también incrementa el número de emisiones de GEI.

América Latina es considerada una de las zonas más vulnerables del mundo al CC (Amorín, 2023). Esta afirmación se fundamenta en el hecho de que los países latinoamericanos dependen en su mayoría de la agricultura y, a su vez, poseen menos recursos para adoptar medidas de adaptación al CC y se encuentran expuestos a eventos climáticos extremos (López, 2015).

A partir de lo expuesto anteriormente, surge el interés para analizar esta problemática en la región latinoamericana. Por tanto, en esta investigación se analiza la relación entre la producción agrícola de los granos básicos (arroz, maíz y frijol) y el cambio climático (emisiones de metano, dióxido de carbono y óxido nitroso). Para esto, utilizando datos de FAOSTAT de 17 países de AL para el período 2001-2020, se estima

un modelo PVAR. Los principales resultados sugieren una relación bidireccional entre la producción agrícola y el cambio climático. Es decir, las actividades agrícolas, mismas que incluyen el uso de fertilizantes, deforestación y cambios en el suelo, conllevan un aumento significativo en las emisiones de GEI. A su vez, estas mismas emisiones de GEI impactan negativamente en la producción agrícola.

El presente trabajo está organizado de la siguiente manera. Después de esta introducción, se presentan el objetivo general, los objetivos específicos, el alcance y el marco teórico que contiene la teoría económica y la evidencia empírica relacionadas con el cambio climático, la economía y la agricultura. Luego, en el capítulo 2 se muestran los datos y la metodología empleados. Sigue el capítulo 3 con los resultados, conclusiones y recomendaciones. Finalmente, se exponen las referencias bibliográficas de la investigación.

1.1. Objetivo general

Analizar la relación bidireccional entre el cambio climático, medido a través de las emisiones de metano, dióxido de carbono y óxido nitroso, y la producción agrícola de arroz, maíz y frijol en 17 países de América Latina durante el periodo 2001-2020, utilizando un modelo de vectores autorregresivos para panel.

1.2. Objetivos específicos

- Determinar el efecto del cambio climático, representado por las emisiones de metano, dióxido de carbono y óxido nitroso, en la producción agrícola de arroz, maíz y frijol en los países seleccionados de América Latina.
- Determinar cómo la agricultura influye en las emisiones de gases de efecto invernadero en los países estudiados.
- Identificar los principales países productores agrícolas y emisores de gases de efecto invernadero en la región latinoamericana, así como aquellos con menor producción agrícola y menor impacto ambiental.

1.3. Alcance

Para alcanzar los objetivos descritos, se realizará una revisión de la literatura teórica y de la evidencia empírica, y se trabajará con la base de datos estadísticos corporativos de la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAOSTAT) a nivel estadístico y econométrico. El análisis se realizará para todos los países cuya información conste en la base de datos mencionada.

1.4. Marco teórico

En este capítulo se presentan los aspectos teóricos de la relación entre el cambio climático y la producción agrícola. Y se expone la evidencia empírica relacionada al tema.

1.4.1. Teoría económica

1.4.1.1. Cambio climático y economía

El cambio climático se define como el conjunto de alteraciones extremas de los patrones meteorológicos, mismo que genera impactos negativos en la agricultura, los recursos hídricos y la salud (UNEP, 2013). Por esta razón, según Ali (2011) el cambio climático amenaza el progreso y la sostenibilidad social, política y económica a nivel mundial.

Las actividades humanas son en su mayoría responsables del cambio climático que se experimenta actualmente en el planeta. Según Malhi *et al.* (2021) los cambios significativos en el clima a escala mundial se originan debido al incremento de las acciones humanas que han afectado la composición de la atmósfera.

Según Cunningham & Cunningham (2006) las actividades humanas son las que han generado un incremento en la concentración de algunos gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. Los GEI que destacan los autores son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O) y los clorofluorocarbonos (CFCs). Al respecto, Tol (2009) sostiene que el cambio climático es un problema a largo plazo dado que algunos de los GEI poseen una vida atmosférica que se cuenta en decenas de miles de años.

La relación entre economía y cambio climático no es reciente, ya que las emisiones de dióxido de carbono han aumentado desde el comienzo de la Revolución Industrial (Vegara *et al.*, 2009). De este modo, los autores sugieren que esta época marcó una transición importante en producción y consumo, debido a que se dejaron atrás los métodos de producción convencionales y se dio paso a procesos industriales mecanizados, mismos que incrementaron las emisiones de GEI.

Según Vegara *et al.* (2009) la relación entre el nivel de actividad económica y el nivel de emisiones presenta cierta incertidumbre, debido a la constante evolución del tema y a que los científicos aún no han llegado a una explicación total del mismo. No obstante, la hipótesis de la curva de Kuznets postula una relación directa y creciente entre la renta per cápita y el nivel de emisiones de GEI, hasta alcanzar un punto de

inflexión en el cual cambia de signo (Holtz-Eakin y Selden, 1995). Con base en esta hipótesis, Huntington (2005) sostiene que durante las primeras etapas del desarrollo económico las emisiones de GEI incrementan hasta llegar a un punto en el cual se estabilizan debido a que se ha alcanzado un nivel determinado de desarrollo.

Adicionalmente, la economía climática y la política económica óptima se encuentran integradas a través del modelo DICE (Economía Climática Dinámica Integrada) de William D. Nordhaus (1994), mismo que modela la producción mundial en función de la tecnología, el capital, la mano de obra y el cambio climático. De este modo se explica cómo las emisiones de carbono actuales afectarán el calentamiento global y la producción económica en el futuro.

Actualmente, los países se encuentran en constante incertidumbre sobre las decisiones a tomar para contrarrestar los efectos generados por el cambio climático, es así como la intervención de expertos ha sido crucial para abordar esta problemática. Por ejemplo, la Asamblea General de las Naciones Unidas creó el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).

El IPCC convoca a expertos de diversos países con el propósito de elaborar informes acerca del cambio climático, sus consecuencias, y estrategias para adaptarse y mitigar sus efectos. Según últimos informes, los daños económicos globales por impacto del cambio climático son mayores con relación a estimaciones anteriores y estos daños aumentarán conforme incrementa la temperatura global (IPCC, 2022). Con base en el análisis del IPCC (2022) se afirma que los niveles altos de calentamiento global incrementan la exposición de las naciones a mayores riesgos, tales como el incremento del nivel del mar en regiones costeras, generando a su vez impacto en el sector económico.

Los países desarrollados son los que históricamente han sido los mayores contribuyentes al problema del cambio climático, mientras que las naciones menos desarrolladas son las más vulnerables a sus efectos (Roca, 2018). Por esta razón, IPCC (2022) resalta la alta sensibilidad de las economías en desarrollo con respecto a los impactos del cambio climático, pues estas enfrentarán desafíos cada vez mayores para el crecimiento económico.

La falta de medidas para contrarrestar el cambio climático podría resultar en una pérdida de hasta el 20 % del Producto Interno Bruto (PIB) global anual de manera indefinida (Stern, 2007). El autor muestra que el cambio climático constituye una variación importante para la economía, siendo este el mayor ejemplo de una falla de mercado nunca vista. De hecho, según Tol (2009), el cambio climático es considerado

la mayor de las externalidades en economía, con causas y consecuencias diversas y, además, los países de bajos ingresos o en vías del desarrollo son los que menos contribuyen al cambio climático y la vez son los más vulnerables a sus efectos, entre ellos en la agricultura, tema de interés en este trabajo.

1.4.1.2. Agricultura y cambio climático

La agricultura constituye una actividad humana fundamental que se desarrolla en la superficie de la tierra, actividad que ha desempeñado un rol central en la subsistencia y el desarrollo de las sociedades (Suleiman, 2014). En el contexto de las naciones en desarrollo, el autor destaca la importancia económica de la agricultura, que no es solamente una fuente de empleo, sino que también es una fuente de alimentos y de materia prima. Por otro lado, Adams *et al.* (1999) afirman que en países en vías del desarrollo es más limitante la respuesta inmediata, así como el acceso a recursos financieros y asistencia técnica para la adaptación al cambio climático.

Según Stern (2007) la producción agrícola es especialmente sensible al cambio climático debido a que la eficiencia de los cultivos está fuertemente influenciada por las condiciones climáticas. Ortiz (2012) sostiene que la agricultura a escala global sufrirá impactos significativos debido al cambio climático, dada la elevada posibilidad de una disminución en la producción de cultivos debido al aumento de las temperaturas y la reducción de las precipitaciones. Khanal (2009) concuerda con lo mencionado anteriormente y señala que las temperaturas más altas proporcionan un entorno ventajoso para la mayoría de las plagas de insectos. En otras palabras, el autor destaca que, con el cambio climático, la probabilidad de impactar negativamente en la producción de plantas se incrementa debido a las variaciones térmicas.

El sector agrícola es el más vulnerable al cambio climático debido a su estructura y sensibilidad a los parámetros climáticos, generando grandes impactos en la economía (Mendelsohn, 2008). No obstante, el efecto varía según el cultivo, la ubicación y la magnitud del cambio en dichos parámetros. De hecho, según Challinor *et al.* (2014), la producción total de trigo, arroz y maíz disminuirá si tanto las regiones templadas como las tropicales experimentarán un calentamiento global equivalente a los 2° C. Por lo tanto, Ortiz (2012) argumenta que uno de los posibles impactos negativos del cambio climático en la agricultura podría ser la disminución de la materia orgánica del suelo, ya que el aumento de la temperatura acelera la descomposición de la materia orgánica, afectando la fertilidad del suelo.

De este modo, el cambio climático generará un impacto mayor en las regiones tropicales dado que en este tipo de región los cultivos permanecen cerca de sus

temperaturas óptimas y, por tanto, serán las que experimenten consecuencias mayores (Malhi *et al.*, 2021). En este sentido, el IPCC (1996) y Smith *et al.* (1996) sostienen que el impacto en los cultivos en zonas con latitudes más bajas podría ser mayor con respecto a los impactos en los cultivos con latitudes más altas, de manera particular en el rendimiento del trigo y maíz.

Los efectos del cambio climático en la agricultura variarán considerablemente entre los distintos países en desarrollo, e incluso dentro de las diversas regiones que conforman un país (Mendelsohn, 2008). El autor sugiere que los impactos dependerán en su mayoría del clima local y de las condiciones que posee cada país, también del acceso al mercado y de las condiciones del suelo.

Por otra parte, Ortiz (2012) señala que la disminución en la cantidad de agua disponible para la población a causa del cambio climático obstaculizará el acceso a los alimentos, así como su disponibilidad. Para el autor la consecuencia inmediata será una afectación directa en la lucha contra la desnutrición infantil.

1.4.2. Evidencia empírica

Con respecto a los efectos del cambio climático sobre la agricultura, la evidencia empírica sugiere una relación inversa (mayor cambio climático genera menor producción agrícola) y bidireccional (la producción agrícola también afecta el cambio climático). Este hallazgo se verifica para algunos países de América Latina, región de estudio de este trabajo. A continuación, se presentan algunos de los hallazgos previos.

En el caso de Colombia, Izquierdo *et al.* (2008) sugieren que el aumento de 1° C promedio anual de la temperatura generaría una demanda hídrica para los cultivos que se incrementaría a razón de 5,267 m³/ha. De igual manera, el autor mostró que el cambio climático produce variaciones en la distribución de las precipitaciones y una tendencia creciente de la temperatura promedio.

Con referencia a Ecuador, Palacios (2023) afirma que el aumento en las precipitaciones en 1 mm genera una disminución de 1,405.70 ha de cultivos. Asimismo, en el caso de las variaciones climáticas, la evidencia muestra en Ecuador una disminución en el rendimiento agropecuario como consecuencia de las altas temperaturas.

En el caso peruano, Guzmán (2013) indica que en cuanto a las emisiones de GEI, el incremento de una kilotonelada de CO₂ genera una disminución en 5.75 ha de los cultivos agrícolas, lo cual sugiere una conexión directa y no-lineal entre la temperatura, la precipitación y la producción agrícola. Dicho resultado fue obtenido a

partir del modelo Ricardiano propuesto por Mendelsohn *et al.* (1994), mismo que explica la productividad de los cultivos como una función de la precipitación y la temperatura.

En Nicaragua, la producción agrícola se vio afectada de manera adversa por temperaturas alcanzando los 37 °C y 38 °C, ya que provocaron sequías y contribuyeron a la erosión del suelo (Sorto, 2020).

Según Sorto (2020), para el caso hondureño existe evidencia de que la temperatura promedio anual ha incrementado. El autor muestra que el cambio climático ha causado daños económicos en el sector agrícola que superan los 2,000 millones de dólares.

Costa Rica exhibe una elevada vulnerabilidad al cambio climático debido al aumento del nivel del agua en los océanos y las elevadas temperaturas. En consecuencia, el impacto directo del cambio climático se refleja en la capacidad productiva de la región, afectando los ecosistemas y los recursos esenciales para la subsistencia de la comunidad (Sorto, 2020).

Por último, según FAO (2017), se reporta que El Salvador experimentó un aumento de la temperatura en las últimas décadas de 1.3 ° C, superando el promedio global de 0.8 ° C. A nivel global, para Mendelsohn *et al.* (1994), pequeños agricultores se ven afectados por pérdidas económicas como consecuencia del cambio climático.

Según Ozlu (2022) el uso de pesticidas en la agricultura incrementa el número de emisiones de GEI. Asimismo, el autor afirma que actividades como la fertilización orgánica e inorgánica son fuentes importantes de emisiones de GEI en los cultivos agrícolas. Finalmente, el autor sugiere que las actividades agrícolas son una de las mayores contribuyentes a la huella de carbono, que es un indicador ambiental que refleja la cantidad de emisiones de GEI producidas por ciertas actividades humanas.

2. METODOLOGÍA

En este capítulo se presentan la fuente de información de los datos, la metodología empleada para la estimación del modelo y la estadística descriptiva de las variables de estudio.

2.1. Datos

La fuente de información utilizada en este estudio es la base de datos estadísticos corporativos de la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAOSTAT). Según consta en su página web, FAOSTAT proporciona datos relacionados con alimentación, agricultura, pesca, silvicultura, gestión de recursos naturales y nutrición. Del mismo modo, FAOSTAT desempeña un papel crucial como componente en los sistemas de información y divulgación de datos de la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO).

Adicionalmente, la FAO es la agencia de las Naciones Unidas encargada de liderar la iniciativa global para erradicar el hambre. Según consta en su página web, los objetivos principales de la FAO son alcanzar la seguridad alimentaria a nivel global y asegurar que la población mundial tenga acceso a alimentos adecuados y de buena calidad. Estos aspectos son fundamentales para que los seres humanos puedan llevar una vida saludable y activa.

De la base de datos descrita con anterioridad se obtuvieron las siguientes variables para el periodo 2001-2020:

- **Producciones de granos básicos:** arroz, frijol y maíz.
- **Emisiones de gases de efecto invernadero:** metano, dióxido de carbono y óxido nitroso.

Tabla 3.1. Países de América Latina que se incluyen en el estudio

Argentina	El Salvador
Bolivia	Honduras
Brasil	México
Chile	Nicaragua
Colombia	Panamá
República Dominicana	Paraguay
Costa Rica	Perú
Ecuador	Uruguay
	Venezuela

Elaboración propia

Para el presente trabajo se utiliza información de 17 países de América Latina que se presentan en la Tabla 3.1.

2.2. Metodología

El tipo de datos empleados en el presente estudio es de panel (o datos longitudinales), estructura que consiste en una serie de tiempo por cada unidad de corte transversal. La particularidad que diferencia a los datos de panel, en contraste con las combinaciones de corte transversal, radica en que se realiza un seguimiento de las mismas unidades (como personas o empresas o condados) a lo largo de un período de tiempo (Wooldridge, 2010).

El presente trabajo se enfoca en examinar la posible bidireccionalidad existente entre las variables de estudio. La bidireccionalidad existe cuando dos variables se afectan mutuamente a lo largo del tiempo. Por lo tanto, se adopta la metodología de modelo de vectores autorregresivos para panel (PVAR).

- **Modelo PVAR**

El modelo de vectores autorregresivos (VAR) caracteriza las interacciones que emergen de manera simultánea entre un conjunto de variables (Wooldridge, 2010). Según el mismo autor, el modelo VAR se configura como un sistema de ecuaciones simultáneas que se estructuran en su forma reducida sin imponer restricciones. En concordancia con esta estructura se establece que las variables contenidas en el modelo no desempeñan el papel de variables explicativas en ninguna de las ecuaciones componentes (Wooldridge, 2010).

En el contexto de un modelo PVAR se combinan las características de un modelo VAR con la estructura de datos de panel. Es decir, el modelo PVAR es una extensión del modelo VAR convencional.

El modelo PVAR permite analizar interacciones entre múltiples variables a lo largo del tiempo entre diferentes unidades observacionales. Se tiene N individuos observados en T períodos de tiempo y se analiza su interacción considerando G variables.

Según Camehl (2023) la especificación del modelo PVAR es:

$$Y_{it} = A_{i1}Y_{t-1} + A_{i2}Y_{t-2} + \dots + A_{ip}Y_{t-p} + u_{it}$$
$$i = 1,2,3, \dots, N \quad t = 1,2,3, \dots, T$$

Ecuación 2.1. Modelo PVAR

Donde:

Y_{it} : vector $G \times 1$ por cada individuo $i = 1, \dots, N$

$Y_{t-p} = (y'_{1t-p}, \dots, y'_{Nt-p})'$: vector $NG \times 1$

A_{ip} : matriz de coeficientes $G \times NG$ para rezagos $p = 1, \dots, P$

u_{it} : término de error

Para la interpretación de un modelo PVAR se utilizan la causalidad en el sentido de Granger y la función de respuesta al impulso.

- **Causalidad en el sentido de Granger**

La causalidad en el sentido de Granger se evalúa en un modelo PVAR para verificar si los valores pasados de una variable X_t causan en el sentido de Granger una variación en otra variable Y_t (Coello de Portugal, 2021). Según el autor, esto se logra mediante pruebas estadísticas que evalúan si la inclusión de los rezagos de X_t , es decir, X_{t-p} , mejora la capacidad de predecir Y_t en comparación con un modelo que no incluye los rezagos de X_t . Es decir, la causalidad en el sentido de Granger permite determinar si los valores pasados de X ayudan a pronosticar Y .

La interpretación estadística de los resultados se realiza con las siguientes hipótesis nula (H_0) y alternativa (H_1):

H_0 : *No existe causalidad en el sentido de Granger*

H_1 : *Existe causalidad en el sentido de Granger*

Criterio de decisión: a un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, si el p-valor < 0.05 , entonces se rechaza la hipótesis nula.

- **Función de respuesta al impulso**

En el contexto del modelo PVAR, se emplea la función de respuesta al impulso (FRI) para analizar la reacción de una unidad individual frente a un cambio repentino o impulso unitario en una variable específica (Uresti & Uresti, 2022). Según los autores, esta técnica evalúa la evolución de las variables endógenas en el tiempo como respuesta a dicho impulso, manteniendo constantes las demás variables.

2.3. Descripción de las variables

Según la definición del modelo VAR, todas las variables que lo integran se consideran endógenas. A continuación, se presentan las variables de producción agrícola y de cambio climático.

2.3.1. Producción de arroz

El arroz forma parte de los alimentos esenciales de más del 50% de la población global y representa el segundo cultivo de cereales, solo superado por el maíz (FAO, 2004). La trascendencia del arroz en la alimentación humana subraya la necesidad de que la cantidad de arroz consumida sea segura y cumpla con los estándares de calidad aceptables para los consumidores. Según FAO (2004), este grano es el encargado de proporcionar el 20 % del suministro de energía alimentaria, en contraste con el trigo que aporta el 19 %, y el maíz que representa el 5 %.

En la Tabla 3.2. se presenta la estadística descriptiva para la variable producción de arroz.

Tabla 3.2. Estadística descriptiva por país – arroz (miles de toneladas)

País	Observaciones	Media	Desviación estándar	Mín.	25 %	50 %	75 %	Máx.
Argentina	20	1 247.33	288.38	709.30	1 075.07	1 244.53	1 443.26	1 748.08
Bolivia	20	434.31	82.02	259.45	393.24	442.46	480.45	600.04
Brasil	20	11 680.60	1 021.05	10 184.19	10 951.10	11 666.22	12 342.09	13 476.99
Chile	20	141.21	24.99	94.67	125.83	137.87	161.13	192.81
Colombia	20	2 452.80	454.73	1 965.41	2 103.63	2 365.28	2 608.75	3 424.12
Costa Rica	20	203.59	36.09	146.57	182.37	196.48	222.14	278.98
Ecuador	20	1 463.28	188.76	1 066.61	1 372.49	1 474.50	1 569.00	1 778.38
El Salvador	20	30.81	5.94	22.52	26.39	29.36	35.48	41.84
Honduras	20	44.91	19.18	8.78	26.55	49.38	59.64	69.42
México	20	248.85	43.22	173.46	226.07	249.63	279.82	337.25
Nicaragua	20	361.88	73.84	246.20	296.51	367.07	419.65	476.99
Panamá	20	312.77	43.08	248.21	286.42	296.27	341.17	402.46
Paraguay	20	474.81	382.64	102.00	125.75	355.61	857.83	1 187.77
Perú	20	2 753.21	496.26	1 844.90	2 335.70	2 863.99	3 124.51	3 557.90
República Dominicana	20	790.12	116.53	576.62	719.71	779.33	900.51	965.25
Uruguay	20	1 254.88	170.96	905.70	1 187.18	1 274.90	1 351.10	1 643.00
Venezuela	20	863.20	231.51	490.58	676.21	936.84	1 062.15	1 158.06

Elaboración propia

Los resultados de la Tabla 3.2. sugieren que Brasil posee la mayor producción promedio anual de arroz con un valor de 11 680.59 miles de toneladas. Asimismo, Brasil se destaca por ser el país con el valor máximo anual de producción de arroz, con un

total de 13 476.99 miles de toneladas en el año 2011, lo cual se puede observar en el Anexo I.

Por otro lado, El Salvador es el país con la menor producción promedio de arroz, con un valor de 30.81 miles de toneladas. También, Honduras presenta el valor mínimo anual de producción de arroz, con tan solo 8.78 miles de toneladas en el año 2002.

2.3.2. Producción de frijol

El frijol, fundamental en la alimentación de la población, constituye una fuente de proteínas, hierro vegetal, fibra, ácido fólico, tiamina, magnesio, potasio y zinc (Rodríguez Castillo & Fernández Rojas, 2003). Del mismo modo, este grano figura entre las principales leguminosas cultivadas a nivel mundial; siendo superado únicamente por la soya. Además, el frijol es considerado como una de las primeras plantas domesticadas del Nuevo Mundo, junto con el maíz, y ha desempeñado un papel esencial en la alimentación de los primeros asentamientos de Mesoamérica y Suramérica (Ávila *et al.*, 2014).

Tabla 3.3. Estadística descriptiva por país – frijol (miles de toneladas)

País	Observaciones	Media	Desviación estándar	Mín.	25 %	50 %	75 %	Máx.
Argentina	20	350.35	144.09	96.11	274.32	334.78	417.66	633.82
Bolivia	20	62.63	32.16	13.60	35.32	64.36	87.66	107.71
Brasil	20	3 078.80	279.51	2 453.68	2 914.29	3 055.15	3 296.45	3 486.76
Chile	20	27.58	15.59	9.18	17.35	19.71	44.74	60.45
Colombia	20	128.44	23.54	54.15	121.37	133.09	142.58	160.88
Costa Rica	20	12.16	3.34	6.86	9.09	11.90	15.50	16.85
Ecuador	20	15.10	4.91	9.99	11.71	13.79	17.68	29.80
El Salvador	20	90.03	17.19	64.84	78.82	88.15	97.34	120.80
Honduras	20	92.77	24.42	59.23	70.46	88.30	109.26	132.89
México	20	1 115.40	219.09	567.78	1 029.50	1 105.74	1 215.61	1 549.09
Nicaragua	20	191.42	25.96	148.82	175.80	189.19	211.16	239.86
Panamá	20	4.28	0.92	2.78	3.58	4.32	4.75	5.94
Paraguay	20	57.40	10.86	26.44	53.10	58.16	65.28	70.00
Perú	20	81.37	12.42	58.52	74.70	85.95	89.53	98.61
República Dominicana	20	31.73	5.78	21.26	28.86	31.50	36.02	42.02
Uruguay	20	3.33	0.15	3.07	3.19	3.35	3.50	3.55
Venezuela	20	37.88	24.18	14.58	22.07	32.79	43.73	117.34

Elaboración propia

La Tabla 3.3. muestra que, al igual que en el arroz, Brasil se destaca por poseer la mayor producción promedio de frijol, con un total de 3 078.80 miles de toneladas. También, Brasil se destaca por ser el país con el valor máximo anual de producción de frijol, con un valor de 3 486.76 miles de toneladas para el año 2009 (Anexo II). Por otro

lado, Uruguay presenta la menor producción promedio de frijol, registrando un valor de 3.33 miles de toneladas. Por último, Panamá es el país que posee el valor mínimo anual de producción de frijol, con una cifra de 2.78 miles de toneladas registradas en el año 2010.

2.3.3. Producción de maíz

El maíz es un componente esencial en la dieta de numerosas naciones, y presenta diversas aplicaciones y utilidades industriales según la (FAO, 1993). La adaptabilidad genética del maíz posibilita su cultivo en una amplia gama de climas, que abarcan desde regiones tropicales hasta templadas. Del mismo modo, según el organismo, el maíz es fundamental en diversas industrias, proporcionando productos como el almidón, el aceite y las proteínas, las bebidas alcohólicas, los edulcorantes y el combustible.

Tabla 3.4. Estadística descriptiva por país – maíz (miles de toneladas)

País	Observaciones	Media	Desviación estándar	Mín.	25 %	50 %	75 %	Máx.
Argentina	20	28 327.99	14 462.38	13 121.38	15 280.68	22 340.01	35 311.52	58 395.81
Bolivia	20	913.05	181.05	538.09	762.36	954.87	1 009.71	1 260.93
Brasil	20	64 232.46	22 089.48	35 113.31	46 910.91	57 296.79	80 796.51	103 963.62
Chile	20	1 219.12	259.01	592.99	1 098.60	1 255.17	1 395.81	1 538.76
Colombia	20	1 533.85	195.03	1 191.90	1 390.74	1 522.55	1 721.48	1 872.86
Costa Rica	20	14.14	4.18	6.72	12.39	13.26	17.51	23.86
Ecuador	20	1 052.28	391.65	337.06	787.93	973.68	1 325.49	1 873.52
El Salvador	20	762.09	101.40	571.47	695.94	762.23	831.16	925.84
Honduras	20	569.04	71.72	445.11	515.60	556.86	618.35	705.31
México	20	23 124.23	3 173.45	17 635.42	20 561.75	22 968.60	25 312.88	28 250.16
Nicaragua	20	449.95	71.42	291.38	406.35	450.35	500.06	588.60
Panamá	20	102.36	23.09	66.72	81.18	97.74	124.25	140.57
Paraguay	20	3 085.78	1 774.82	830.00	1 519.52	3 094.17	5 027.49	5 834.59
Perú	20	1 472.61	155.80	1 200.05	1 343.09	1 519.62	1 575.96	1 746.43
República Dominicana	20	38.27	6.71	27.54	34.79	36.24	43.99	51.13
Uruguay	20	407.77	195.87	163.40	262.85	336.23	528.28	816.00
Venezuela	20	1 917.97	494.38	1 023.09	1 517.49	2 070.90	2 314.26	2 638.01

Elaboración propia

La Tabla 3.4 muestra que Brasil es el país que presenta la mayor producción promedio de maíz, con un valor de 64 232.46 miles de toneladas. Se identifica que este país tiene el valor máximo anual de producción de maíz, con un valor de 103 963.62 miles de toneladas registradas en el año 2009 (Anexo III).

Por otro lado, el país que presenta la menor producción promedio de maíz es Costa Rica, con una cifra de 14.14 miles de toneladas. Asimismo, este país posee el

valor mínimo anual de producción de maíz, con un valor de 6.72 miles de toneladas en el año 2017.

Emisiones de GEI

Las emisiones de GEI son liberaciones de gases que se acumulan en la atmósfera de la Tierra y son capaces de absorber la radiación infrarroja del Sol (Gadea, 2019). Para el presente estudio se consideran el metano, dióxido de carbono y óxido nítrico.

2.3.4. Emisiones de metano

El metano, componente predominante del gas natural, constituye uno de los gases de efecto invernadero que incide en la temperatura y el sistema climático terrestre (Methane to Markets, 2008). Según el organismo, el metano presenta una duración limitada en la atmósfera, aproximadamente de 12 años. Las emisiones de CH₄ se miden en miles de toneladas.

Tabla 3.5. Estadística descriptiva por país - CH₄ (miles de toneladas)

País	Observaciones	Media	Desviación estándar	Mín.	25 %	50 %	75 %	Máx.
Argentina	20	4 842.30	238.54	4 463.03	4 657.06	4 810.65	5 067.94	5 237.72
Bolivia	20	1 147.28	180.05	791.49	1 062.19	1 156.28	1 199.37	1 487.09
Brasil	20	19 663.58	1 132.74	16 691.46	19 197.26	19 820.85	20 600.98	21 264.61
Chile	20	890.73	32.18	834.67	865.75	897.85	917.72	934.43
Colombia	20	3 025.79	176.16	2 785.78	2 896.14	3 005.62	3 077.28	3 481.10
Costa Rica	20	168.53	17.08	141.83	154.48	167.22	179.10	200.73
Ecuador	20	831.21	45.55	750.82	799.20	840.64	870.95	899.11
El Salvador	20	146.31	15.91	117.48	134.65	147.10	160.63	169.16
Honduras	20	305.65	41.16	213.12	284.39	308.00	335.31	376.96
México	20	5 957.88	212.15	5 476.02	5 861.60	6 048.25	6 090.54	6 187.15
Nicaragua	20	343.35	49.92	277.29	303.10	328.93	393.48	420.93
Panamá	20	154.38	9.72	138.75	145.21	157.71	162.91	166.16
Paraguay	20	854.53	116.42	679.08	735.30	864.35	958.78	1 014.03
Perú	20	1 236.90	133.88	1 030.14	1 123.91	1 266.91	1 344.39	1 440.73
República Dominicana	20	380.71	51.84	294.91	327.01	394.59	419.42	453.33
Uruguay	20	897.84	65.22	765.42	856.78	888.66	962.87	987.01
Venezuela	20	2 599.45	85.32	2 405.93	2 543.03	2 617.94	2 665.64	2 698.32

Elaboración propia

En la Tabla 3.5. se destaca Brasil como el país con mayores emisiones en promedio de CH₄, registrando un total de 19 663.58 miles de toneladas. Este resultado es consistente con los obtenidos en las variables correspondientes a las producciones de arroz, maíz y frijol, en los cuales este país es el mayor productor y, por ende, el mayor

contribuyente de las emisiones de CH₄. De igual manera, Brasil presenta el valor máximo de emisiones de CH₄, alcanzando su punto más alto en el año 2020 con un valor total de 21 264.61 miles de toneladas (Anexo IV).

Por otro lado, en la Tabla 3.5. se muestra a El Salvador como el país con la menor cantidad de emisiones promedio de CH₄, con un valor de 146.31 miles de toneladas. Este resultado es consistente con el obtenido en la variable producción de arroz, el cual sugiere que El Salvador es el país con la menor producción promedio anual de arroz y, por tanto, es uno de los países que menos emisiones genera. También, El Salvador presenta el valor mínimo anual de emisiones de CH₄, con 117.48 miles de toneladas en el año 2020, resultado que se puede observar en el Anexo V.

2.3.5. Emisiones de dióxido de carbono

El dióxido de carbono, generado como consecuencia de las acciones humanas, representa el gas de efecto invernadero predominante (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 2023). Según esta agencia, las emisiones de dióxido de carbono se han multiplicado en gran medida, debido a que es un gas que puede permanecer durante décadas en la atmósfera y esto ha ocasionado graves consecuencias.

Tabla 3.6. Estadística descriptiva por país – CO₂ (miles de toneladas)

País	Observaciones	Media	Desviación estándar	Mín.	25 %	50 %	75 %	Máx.
Argentina	20	253 186.39	25 972.33	204 717.65	228 392.86	263 945.33	269 492.58	291 346.71
Bolivia	20	76 322.07	8 269.13	65 570.12	69 320.60	74 168.98	81 434.18	89 274.29
Brasil	20	1 148 493.00	339 137.80	719 113.80	831 354.30	1 167 055.00	1 468 301.00	1 540 143.00
Chile	20	20 993.21	13 561.01	-2 426.41	14 758.40	26 731.84	29 341.94	36 980.13
Colombia	20	152 484.65	17 245.86	134 064.51	138 503.93	146 449.87	161 823.72	185 371.33
Costa Rica	20	3 651.56	3 096.80	14.97	623.82	3 676.83	6 442.17	7 554.42
Ecuador	20	60 846.63	4 951.51	52 708.65	57 221.05	59 882.66	64 232.74	69 678.05
El Salvador	20	7 656.23	421.24	7 017.08	7 414.08	7 604.08	7 828.58	8 906.08
Honduras	20	14 137.94	1 651.10	11 071.09	12 958.47	14 353.88	15 329.54	16 710.06
México	20	463 036.57	58 407.47	367 116.09	413 067.74	474 237.49	516 378.54	530 882.04
Nicaragua	20	24 130.24	5 155.93	15 342.32	22 419.89	26 433.85	28 008.11	28 187.36
Panamá	20	13 197.95	2 121.66	9 972.43	11 399.08	13 684.02	15 042.85	16 227.13
Paraguay	20	62 063.70	7 612.23	52 516.53	58 684.45	60 540.44	64 529.63	74 430.65
Perú	20	118 148.10	22 433.71	89 975.29	95 562.32	120 004.80	138 726.09	147 426.78
República Dominicana	20	19 923.43	2 452.21	16 032.79	18 040.33	19 833.88	21 778.60	24 373.13
Uruguay	20	-258.08	4 265.56	-5 341.17	-3 949.94	-880.14	2 485.12	7 043.58
Venezuela	20	245 786.25	52 653.42	132 458.49	233 209.89	264 290.34	285 557.71	306 819.66

Elaboración propia

Los resultados de la Tabla 3.6. muestran que, en promedio, Brasil presenta la mayor cantidad de emisiones de CO₂, con un valor de 1 148 493 miles de toneladas. De la misma forma, este país presenta el máximo valor anual de emisiones de CO₂, con un valor de 1 540 143 miles de toneladas en el año 2010 (Anexo V).

Por otro lado, Uruguay es el país con la menor cantidad promedio de emisiones de CO₂, con un valor de - 258.08 miles de toneladas. El valor negativo indica que se ha logrado capturar y eliminar más CO₂ del que la atmósfera ha emitido. Del mismo modo, el valor mínimo anual de emisiones de CO₂ se encuentra en Uruguay con un valor de - 5 341.17 miles de toneladas registradas en el año 2003. En el Anexo E se puede observar que Uruguay a partir del año 2012 empezó con emisiones de CO₂ positivas y, a partir de ese año, en ese país se observa una tendencia creciente.

2.3.6. Emisiones de óxido nitroso

El óxido nitroso es un gas de efecto invernadero que se emite en actividades como agricultura, transporte e industria (Mottet, 2023). El autor sostiene que el óxido nitroso tiene una potencia 300 veces mayor que la del dióxido de carbono. Además, el uso de fertilizantes, especialmente de aquellos con adición de nitrógeno, refuerza el efecto invernadero.

Tabla 3.7. Estadística descriptiva por país – N₂O (miles de toneladas)

País	Observaciones	Media	Desviación estándar	Mín.	25%	50%	75%	Máx.
Argentina	20	152.89	11.94	134.12	145.12	150.14	159.50	179.22
Bolivia	20	39.33	11.48	24.74	33.89	35.30	42.30	72.63
Brasil	20	585.61	58.34	469.25	546.56	594.96	621.30	703.91
Chile	20	26.28	1.73	23.46	25.54	26.27	27.09	31.01
Colombia	20	67.28	3.99	61.90	64.08	66.94	68.97	77.53
Costa Rica	20	5.42	0.66	4.46	4.79	5.48	5.89	6.46
Ecuador	20	17.32	0.94	15.55	16.48	17.40	18.06	18.76
El Salvador	20	4.42	0.60	3.17	4.10	4.38	4.96	5.37
Honduras	20	9.33	1.41	6.39	8.57	9.67	10.24	12.11
México	20	360.61	40.99	284.45	325.27	378.95	391.98	417.77
Nicaragua	20	9.89	1.60	7.24	8.66	9.49	11.51	12.58
Panamá	20	4.31	0.23	3.98	4.13	4.34	4.43	4.79
Paraguay	20	29.64	4.45	23.10	25.40	29.98	32.83	37.40
Perú	20	30.07	2.27	25.89	28.01	30.71	31.49	33.55
República Dominicana	20	10.33	1.21	7.86	9.55	10.35	11.19	12.09
Uruguay	20	26.13	1.49	22.69	25.87	26.60	26.93	27.87
Venezuela	20	45.88	2.32	41.67	43.69	46.47	47.55	48.94

Elaboración propia

La Tabla 3.7. muestra que, en promedio, Brasil posee la mayor cantidad de emisiones de óxido nitroso con un valor de 585.61 miles de toneladas. Además, se identifica que Brasil registra el valor máximo anual de emisiones de óxido nitroso, alcanzando su punto más alto en el año 2020, con un total de 703.91 miles de toneladas.

Por el contrario, los resultados muestran que, en promedio, Panamá es el país con la menor cantidad de emisiones de óxido nitroso, con un valor de 4.31 miles de toneladas. Asimismo, se observa que El Salvador posee el valor mínimo anual de emisiones de óxido nitroso, alcanzando un valor 3.17 miles de toneladas en el año 2019. Estos resultados se pueden apreciar en el Anexo VI.

3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se muestran los resultados de la estimación del modelo PVAR, mismo que tiene como objetivo analizar la relación entre el cambio climático y la producción agrícola para los países de América Latina. A continuación, se muestran los resultados del modelo PVAR y se presentan los resultados de la causalidad en el sentido de Granger y la función de respuesta al impulso.

3.1. Resultados

3.1.1. Resultados de granos básicos

a) Producción de arroz

La Tabla 4.1. muestra los resultados de la estimación del modelo PVAR para la variable producción de arroz. Consecutivamente, se presentan la causalidad en el sentido de Granger en la Tabla 4.2. y la función de respuesta al impulso en la Figura 4.1.

Los resultados de la Tabla 4.1. muestran que, a nivel individual, las emisiones de dióxido de carbono y las emisiones de óxido nítrico causan en el sentido de Granger a la producción de arroz. No obstante, las emisiones de metano no causan en el sentido de Granger a la producción de arroz.

En la Tabla 4.2. se observa que, a nivel global, las emisiones de metano, las emisiones de dióxido de carbono y las emisiones de óxido nítrico causan en el sentido de Granger a la producción de arroz. Es decir, los valores pasados de las variables de cambio climático sí influyen en la futura producción de arroz.

Los resultados obtenidos para la variable de la producción de arroz son consistentes con los de Challinor *et al.* (2014), quienes sostienen que la producción agrícola disminuirá si las regiones templadas y tropicales experimentan un incremento en la temperatura equivalente a 2°C. Esta consecuencia se evidencia a raíz del aumento de los GEI, los cuales intensifican el efecto invernadero y, como resultado, producen que la temperatura promedio en el mundo aumente, generando impactos negativos en los cultivos.

Tabla 4.1. Modelo PVAR - arroz

	Arroz	CH ₄	CO ₂	N ₂ O
Arroz (-1)	0.689289 (0.05459) [12.6257]	0.004101 (0.02109) [0.19440]	34.53587 (7.37618) [4.68208]	-0.006785 (0.00160) [-4.24260]
Arroz (-2)	0.272466 (0.05468) [4.98261]	-0.004376 (0.02113) [-0.20713]	-36.52579 (7.38827) [-4.94375]	0.006056 (0.00160) [3.78084]
CH ₄ (-1)	0.360734 (0.21534) [1.67519]	1.455237 (0.08320) [17.4900]	-21.43053 (29.0944) [-0.73659]	0.018932 (0.00631) [3.00137]
CH ₄ (-2)	-0.335875 (0.21475) [-1.56405]	-0.451263 (0.08298) [-5.43850]	26.44805 (29.0145) [0.91155]	-0.018484 (0.00629) [-2.93839]
CO ₂ (-1)	0.001570 (0.00041) [3.78677]	-4.33E-05 (0.00016) [-0.27030]	1.058056 (0.05601) [18.8889]	1.19E-06 (1.2E-05) [0.09761]
CO ₂ (-2)	-0.001109 (0.00042) [-2.67084]	0.000118 (0.00016) [0.73369]	-0.161919 (0.05609) [-2.88663]	4.59E-06 (1.2E-05) [0.37783]
N ₂ O(-1)	6.468750 (2.71496) [2.38263]	-7.352237 (1.04902) [-7.00864]	-1983.415 (366.817) [-5.40709]	0.321616 (0.07953) [4.04403]
N ₂ O(-2)	-7.642148 (2.75662) [-2.77229]	7.350301 (1.06512) [6.90089]	2052.831 (372.447) [5.51175]	0.690355 (0.08075) [8.54937]
C	22.85051 (19.9256) [1.14679]	0.223559 (7.69900) [0.02904]	1941.173 (2692.15) [0.72105]	0.054809 (0.58368) [0.09390]
Observaciones incluidas	306			
R ²	0.988308	0.999400	0.979955	0.996900
R ² ajustado	0.987993	0.999384	0.979415	0.996816
Suma residuos al cuadrado	26557156	3964851.	4.85E+11	22787.85
Ecuación S.E.	299.0285	115.5408	40401.66	8.759382
Estadístico F	3138.232	61831.38	1814.934	11936.76
Log-verosimilitud	-2173.993	-1883.012	-3675.255	-1093.686
Akaike AIC	14.26793	12.36609	24.08010	7.207098
Schwarz SC	14.37744	12.47561	24.18962	7.316616
Media dependiente	1482.958	2584.311	156909.8	85.32000
Desviación estándar	2729.002	4654.415	281592.9	155.2338
Determinante de la covarianza residual (ajustado por grados de libertad)		4.26E+19		
Determinante de la covarianza residual Log-verosimilitud		3.78E+19		
Criterio de información Akaike		-8634.007		
Criterio de información Schwarz		56.66671		
Número de coeficientes		57.10478		
		36		

Error estándar en () & estadístico t en []

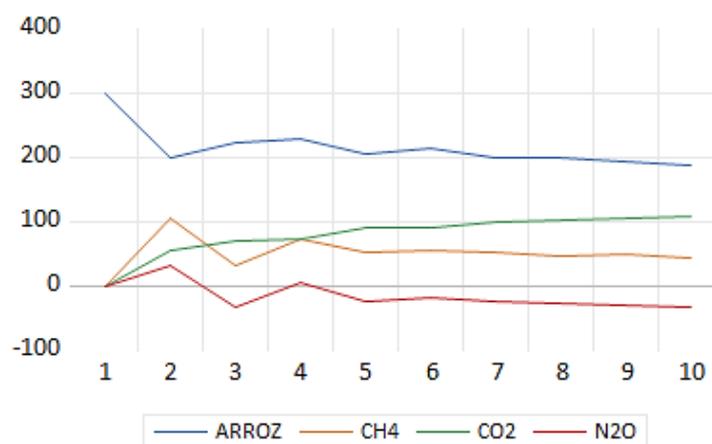
Elaboración propia

Tabla 4.2. Causalidad en el sentido de Granger-arroz

Periodo: 2001 – 2020			
Observaciones incluidas: 306			
Variable dependiente: Arroz			
Independiente	Chi-cuadrado	Grados de libertad	p-valor
CH ₄	3.332114	2	0.1890
CO ₂	17.32096	2	0.0002
N ₂ O	10.46712	2	0.0053
Total	84.27476	6	0.0000

Elaboración propia

Figura 4.1. Función de respuesta al impulso-arroz



Elaboración propia

Adicionalmente, se observa en la Figura 4.1. que la producción de arroz responde ante variaciones de los GEI. La respuesta de la producción de arroz ante variaciones del metano y del óxido nitroso muestra un efecto negativo a largo plazo, pese a que la respuesta de la producción de arroz, ante variaciones del dióxido de carbono, muestra un efecto positivo.

b) Producción de maíz

Los resultados de la estimación correspondiente al modelo PVAR del maíz se presentan en la Tabla 4.3. A continuación, se muestran la causalidad en el sentido de Granger en la Tabla 4.4. y la función de respuesta al impulso en la Figura 4.2.

Tabla 4.3. Modelo PVAR - maíz

	Maíz	CH ₄	CO ₂	N ₂ O
Maíz (-1)	0.308486 (0.04836) [6.37956]	0.003593 (0.00217) [1.65610]	1.049180 (0.78775) [1.33188]	-0.000279 (0.00017) [-1.66590]
Maíz (-2)	0.783648 (0.05263) [14.8893]	-0.000786 (0.00236) [-0.33293]	-2.061776 (0.85741) [-2.40467]	0.000575 (0.00018) [3.15258]
CH ₄ (-1)	-12.29671 (1.90898) [-6.44151]	1.494249 (0.08566) [17.4446]	15.80870 (31.0987) [0.50834]	0.008643 (0.00662) [1.30609]
CH ₄ (-2)	12.77049 (1.93590) [6.59665]	-0.502270 (0.08687) [-5.78218]	-11.52369 (31.5373) [-0.36540]	-0.009555 (0.00671) [-1.42387]
CO ₂ (-1)	-0.008585 (0.00333) [-2.58112]	-1.95E-05 (0.00015) [-0.13063]	0.961008 (0.05418) [17.7366]	2.02E-05 (1.2E-05) [1.75630]
CO ₂ (-2)	0.007604 (0.00333) [2.28024]	0.000202 (0.00015) [1.34808]	-0.077883 (0.05432) [-1.43371]	-8.62E-06 (1.2E-05) [-0.74536]
N ₂ O (-1)	145.7996 (25.3778) [5.74517]	-8.119495 (1.13871) [-7.13041]	-2484.745 (413.423) [-6.01018]	0.463523 (0.08797) [5.26917]
N ₂ O (-2)	-157.1744 (26.1573) [-6.00882]	7.975899 (1.17369) [6.79558]	2658.662 (426.121) [6.23921]	0.540675 (0.09067) [5.96304]
C	-5.383578 (171.629) [-0.03137]	3.532329 (7.70109) [0.45868]	1305.973 (2795.97) [0.46709]	0.141025 (0.59493) [0.23704]
Observaciones incluidas	306			
R ²	0.980618	0.999411	0.978776	0.996838
R ² ajustado	0.980096	0.999395	0.978205	0.996753
Suma residuos al cuadrado	1.93E+09	3894084.	5.13E+11	23239.93
Ecuación S.E.	2551.899	114.5050	41572.34	8.845842
Estadístico F	1878.336	62955.71	1712.095	11703.84
Log-verosimilitud	-2830.073	-1880.257	-3683.996	-1096.692
Akaike AIC	18.55603	12.34808	24.13723	7.226743
Schwarz SC	18.66555	12.45760	24.24675	7.336260
Media dependiente	7905.822	2584.311	156909.8	85.32000
Desviación estándar	18088.19	4654.415	281592.9	155.2338
Determinante de la covarianza residual (ajustado por grados de libertad)		3.30E+21		
Determinante de la covarianza residual Log-verosimilitud		2.93E+21 -9299.429		
Criterio de información Akaike		61.01587		
Criterio de información Schwarz		61.45394		
Número de coeficientes		36		

Error estándar en () & estadístico t en []

Elaboración propia

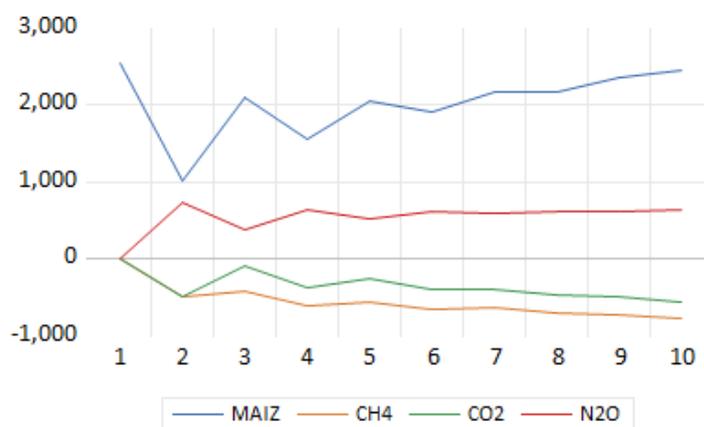
Tabla 4.4. Causalidad en el sentido de Granger - maíz

Independiente	Chi-cuadrado	Grados de libertad	p-valor
CH ₄	45.52983	2	0.0000
CO ₂	6.713403	2	0.0349
N ₂ O	37.88220	2	0.0000
Total	60.70080	6	0.0000

Elaboración propia

En la Tabla 4.4. se observa que, tanto a nivel individual como global, las emisiones de metano, las emisiones de dióxido de carbono y las emisiones de óxido nitroso causan en el sentido de Granger a la producción de maíz.

Figura 4.2. Función de respuesta al impulso-Maíz



Elaboración propia

La función de respuesta al impulso, ilustrada en la Figura 4.2., muestra como la producción de maíz responde ante variaciones de los GEI. Con respecto al metano y al dióxido de carbono, se puede observar que, a largo plazo, el efecto sobre la producción de maíz es negativo. Este resultado coincide con las afirmaciones de Guzmán (2013), quien afirma que el incremento en kilotoneladas de los GEI produce un efecto negativo en los cultivos agrícolas.

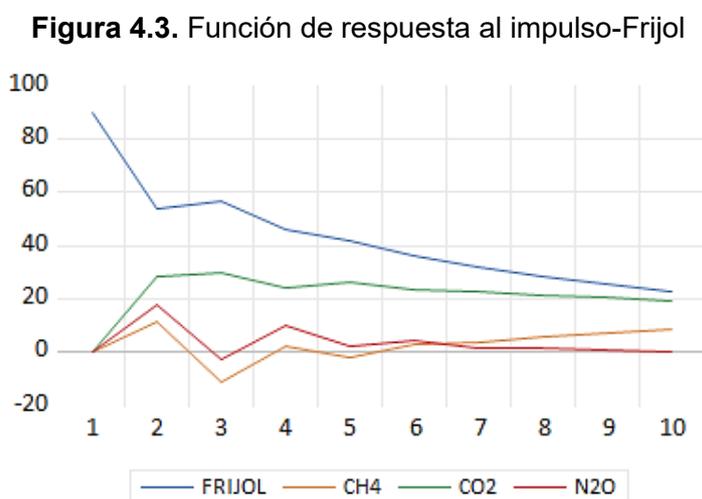
Sin embargo, la respuesta de la producción de maíz ante variaciones del óxido nitroso no muestra una tendencia clara, puesto que existen períodos de incremento y de decremento.

c) Producción de frijol

En la Tabla 4.5. se muestran los resultados de la estimación del modelo PVAR para la variable de la producción de frijol. Posteriormente, se presentan la causalidad en el sentido de Granger en la Tabla 4.6. y la función de respuesta al impulso en la Figura 4.3.

En la Tabla 4.6. se observa que, global e individualmente, las emisiones de metano, las emisiones de dióxido de carbono y las emisiones de óxido nitroso causan en el sentido de Granger a la producción de frijol. De este modo, es posible afirmar que los valores pasados de las variables de cambio climático influyen en la producción de frijol.

La Figura 4.3. muestra como la producción de frijol responde ante variaciones de los GEI. Se puede observar que la respuesta de la producción de frijol, ante variaciones del dióxido de carbono, muestra un efecto negativo al largo plazo. Sin embargo, no existe una tendencia clara para la respuesta de la producción de frijol ante variaciones del metano y óxido nitroso.



Elaboración propia

Tabla 4.5. Modelo PVAR - frijol

	Frijol	CH ₄	CO ₂	N ₂ O
Frijol (-1)	0.646066 (0.04842) [13.3442]	0.224039 (0.06070) [3.69101]	32.15099 (22.5197) [1.42768]	0.005559 (0.00483) [1.14999]
Frijol (-2)	0.221787 (0.04770) [4.64926]	-0.136544 (0.05981) [-2.28311]	-34.98459 (22.1887) [-1.57669]	-0.001137 (0.00476) [-0.23871]
CH ₄ (-1)	-0.181972 (0.06418) [-2.83541]	1.423313 (0.08046) [17.6895]	-3.074848 (29.8517) [-0.10300]	0.012298 (0.00641) [1.91916]
CH ₄ (-2)	0.198676 (0.06434) [3.08811]	-0.425579 (0.08066) [-5.27634]	5.022711 (29.9248) [0.16784]	-0.012709 (0.00642) [-1.97847]
CO ₂ (-1)	0.000818 (0.00012) [6.95756]	1.20E-05 (0.00015) [0.08164]	0.971413 (0.05466) [17.7706]	2.13E-05 (1.2E-05) [1.81221]
CO ₂ (-2)	-0.000667 (0.00012) [-5.67389]	-7.71E-06 (0.00015) [-0.05227]	-0.064544 (0.05470) [-1.17996]	-2.08E-05 (1.2E-05) [-1.77446]
N ₂ O(-1)	3.320406 (0.80342) [4.13283]	-6.851807 (1.00725) [-6.80246]	-2114.761 (373.700) [-5.65898]	0.395647 (0.08022) [4.93222]
N ₂ O(-2)	-3.434154 (0.83314) [-4.12196]	6.736309 (1.04451) [6.44927]	2231.527 (387.521) [5.75847]	0.621022 (0.08318) [7.46568]
C	-13.33279 (6.60481) [-2.01865]	8.281646 (8.28048) [1.00014]	2098.290 (3072.13) [0.68301]	0.236758 (0.65945) [0.35902]
Observaciones incluidas	306 después de ajustes			
R ²	0.985955	0.999428	0.978482	0.996738
R ² ajustado	0.985577	0.999412	0.977903	0.996650
Suma residuos al cuadrado	2405357.	3780677.	5.20E+11	23978.53
Ecuación S.E.	89.99358	112.8253	41859.17	8.985309
Estadístico F	2606.147	64845.28	1688.205	11342.19
Log-verosimilitud	-1806.548	-1875.735	-3686.100	-1101.479
Akaike AIC	11.86632	12.31853	24.15098	7.258029
Schwarz SC	11.97584	12.42805	24.26050	7.367547
Media dependiente	318.5116	2584.311	156909.8	85.32000
Desviación estándar	749.3376	4654.415	281592.9	155.2338
Determinante de la covarianza residual (ajustado por grados de libertad)	4.74E+18			
Determinante de la covarianza residual	4.21E+18			
Log-verosimilitud	-8297.879			
Criterio de información Akaike	54.46980			
Criterio de información Schwarz	54.90786			
Número de coeficientes	36			

Error estándar en () & estadístico t en []

Elaboración propia

Tabla 4.6. Causalidad en el sentido de Granger - frijol

Periodo: 2001 - 2020

Observaciones incluidas: 306

Variable dependiente: Frijol

Independiente	Chi-cuadrado	Grados de libertad	p-valor
CH ₄	18.23680	2	0.0001
CO ₂	49.38781	2	0.0000
N ₂ O	17.14522	2	0.0002
Total	98.49956	6	0.0000

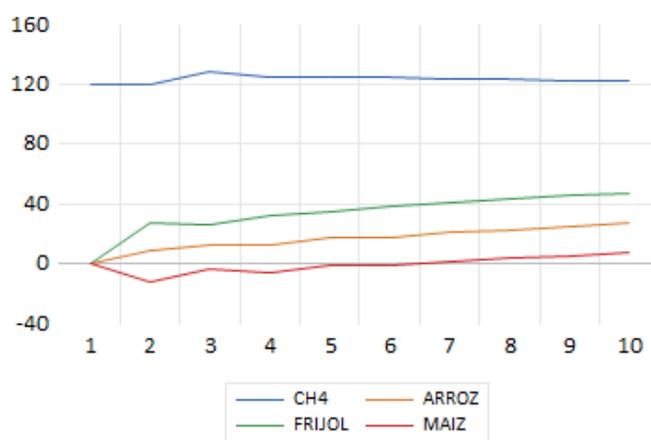
Elaboración propia

3.1.2. Resultados de las emisiones de GEI

a) Emisiones de metano (CH₄)

La Tabla 4.7. presenta los resultados de la estimación del modelo PVAR para la variable de emisiones de metano. A continuación, se muestran la causalidad en el sentido de Granger en la Tabla 4.8. y la función de respuesta al impulso en la Figura 4.4.

Figura 4.4. Función de respuesta al impulso – CH₄



Elaboración propia

Tabla 4.7. Modelo PVAR – CH₄

	CH ₄	Arroz	Frijol	Maíz
CH ₄ (-1)	1.038412 (0.05331) [19.4793]	0.959488 (0.13452) [7.13294]	0.119958 (0.04395) [2.72972]	-4.316539 (1.10255) [-3.91506]
CH ₄ (-2)	-0.053018 (0.05375) [-0.98631]	-0.918557 (0.13564) [-6.77202]	-0.098188 (0.04431) [-2.21580]	4.563443 (1.11177) [4.10468]
Arroz (-1)	0.018589 (0.02008) [0.92576]	0.618921 (0.05067) [12.2150]	-0.044483 (0.01655) [-2.68726]	-3.153245 (0.41531) [-7.59258]
Arroz (-2)	-0.007109 (0.02017) [-0.35237]	0.343989 (0.05091) [6.75704]	0.043656 (0.01663) [2.62490]	3.284176 (0.41727) [7.87068]
Frijol (-1)	0.301046 (0.06311) [4.77008]	-0.178181 (0.15925) [-1.11887]	0.632838 (0.05203) [12.1638]	0.291100 (1.30530) [0.22301]
Frijol (-2)	-0.219765 (0.06393) [-3.43738]	0.140412 (0.16133) [0.87036]	0.225660 (0.05270) [4.28163]	-1.556834 (1.32231) [-1.17736]
Maíz (-1)	-0.005285 (0.00200) [-2.64060]	0.016705 (0.00505) [3.30789]	-0.001959 (0.00165) [-1.18756]	0.433263 (0.04139) [10.4673]
Maíz (-2)	0.006752 (0.00224) [3.01702]	-0.025106 (0.00565) [-4.44599]	0.002026 (0.00184) [1.09843]	0.636630 (0.04629) [13.7545]
C	6.948028 (8.55842) [0.81184]	16.68145 (21.5958) [0.77244]	-10.28079 (7.05517) [-1.45720]	-141.3439 (177.009) [-0.79851]
Observaciones incluidas	306 después de ajustes			
R ²	0.999358	0.988115	0.983176	0.981825
R ² ajustado	0.999341	0.987795	0.982723	0.981336
Suma residuos al cuadrado	4239935.	26996614	2881292.	1.81E+09
Ecuación S.E.	119.4817	301.4924	98.49528	2471.168
Estadístico F	57817.39	3086.543	2169.528	2005.532
Log-verosimilitud	-1893.276	-2176.504	-1834.170	-2820.236
Akaike AIC	12.43317	14.28434	12.04686	18.49174
Schwarz SC	12.54269	14.39385	12.15638	18.60126
Media dependiente	2584.311	1482.958	318.5116	7905.822
Desviación estándar	4654.415	2729.002	749.3376	18088.19
Determinante de la covarianza residual (ajustado por grados de libertad)	6.92E+19			
Determinante de la covarianza residual Log-verosimilitud	-8708.043			
Criterio de información Akaike	57.15061			
Criterio de información Schwarz	57.58868			
Número de coeficientes	36			

Error estándar en () & estadístico t en []

Elaboración propia

Tabla 4.8. Causalidad en el sentido de Granger – CH₄

Independiente	Chi-cuadrado	Grados de libertad	p-valor
Arroz	3.366155	2	0.1858
Frijol	23.58904	2	0.0000
Maíz	9.154987	2	0.0103
Total	34.33751	6	0.0000

Elaboración propia

Los resultados mostrados en la Tabla 4.8. sugieren que, a nivel individual, las producciones de frijol y maíz causan en el sentido de Granger a las emisiones de metano. No obstante, la producción de arroz no causa en el sentido de Granger a las emisiones de metano. Adicionalmente, a nivel global, la producción de los tres granos, es decir, arroz, frijol y maíz, causan en el sentido de Granger a las emisiones de metano. Este resultado se confirma con lo planteado por Ozlu (2022), quien sugiere que las actividades agrícolas son una de las mayores contribuyentes de las emisiones de GEI debido al uso de pesticidas y por la fertilización orgánica e inorgánica.

Asimismo, al observar la Figura 4.4. se puede apreciar que las emisiones de metano, ante variaciones de las producciones de arroz, frijol y maíz, poseen una tendencia creciente. En otras palabras, las variaciones de la producción agrícola generan incremento de las emisiones de metano, resultado ya sugerido por Ozlu (2022).

b) Emisiones de dióxido de carbono (CO₂)

La Tabla 4.9. contiene los resultados de la estimación del modelo PVAR para la variable emisiones de dióxido de carbono. Posteriormente, se muestran la causalidad en el sentido de Granger en la Tabla 4.10. y en la Figura 4.5 se muestra la función de respuesta al impulso.

Tabla 4.9. Modelo PVAR – CO₂

	CO ₂	Arroz	Frijol	Maíz
CO ₂ (-1)	0.938528 (0.05984) [15.6828]	0.002246 (0.00040) [5.59664]	0.000839 (0.00012) [7.01199]	-0.021436 (0.00304) [-7.04694]
CO ₂ (-2)	-0.048171 (0.06328) [-0.76120]	-0.001715 (0.00042) [-4.04183]	-0.000619 (0.00013) [-4.88938]	0.023223 (0.00322) [7.21968]
Arroz (-1)	32.35283 (8.30510) [3.89554]	0.715932 (0.05569) [12.8553]	-0.008983 (0.01660) [-0.54100]	-4.260147 (0.42214) [-10.0918]
Arroz (-2)	-32.46897 (8.27082) [-3.92572]	0.270571 (0.05546) [4.87852]	0.017753 (0.01654) [1.07365]	4.414778 (0.42040) [10.5014]
Frijol (-1)	59.20528 (25.2197) [2.34758]	-0.265709 (0.16912) [-1.57116]	0.624923 (0.05042) [12.3942]	-0.483932 (1.28190) [-0.37751]
Frijol (-2)	-36.96126 (24.1252) [-1.53206]	0.250659 (0.16178) [1.54942]	0.229430 (0.04823) [4.75676]	-1.389350 (1.22626) [-1.13300]
Maíz (-1)	-0.940689 (0.76660) [-1.22709]	0.019046 (0.00514) [3.70499]	-0.000763 (0.00153) [-0.49808]	0.455422 (0.03897) [11.6878]
Maíz (-2)	1.365085 (0.84307) [1.61919]	-0.025786 (0.00565) [-4.56121]	0.002707 (0.00169) [1.60634]	0.656538 (0.04285) [15.3209]
C	5326.274 (3228.55) [1.64974]	6.812707 (21.6497) [0.31468]	-13.13919 (6.45468) [-2.03561]	-70.90362 (164.104) [-0.43206]
Observaciones incluidas	306 después de ajustes			
R ²	0.973968	0.987537	0.985306	0.983700
R ² ajustado	0.973267	0.987201	0.984910	0.983261
Suma residuos al cuadrado	6.30E+11	28310265	2516466.	1.63E+09
Ecuación S.E.	46041.47	308.7406	92.04862	2340.248
Estadístico F	1388.992	2941.598	2489.439	2240.469
Log-verosimilitud	-3715.241	-2183.773	-1813.457	-2803.579
Akaike AIC	24.34144	14.33185	11.91148	18.38287
Schwarz SC	24.45096	14.44137	12.02100	18.49239
Media dependiente	156909.8	1482.958	318.5116	7905.822
Desviación estándar	281592.9	2729.002	749.3376	18088.19
Determinante de la covarianza residual (ajustado por grados de libertad)		7.18E+24		
Determinante de la covarianza residual Log-verosimilitud		-10475.19		
Criterio de información Akaike		68.70062		
Criterio de información Schwarz		69.13869		
Número de coeficientes		36		

Error estándar en () & estadístico t en []

Elaboración propia

Tabla 4.10. Causalidad en el sentido de Granger – dióxido de carbono

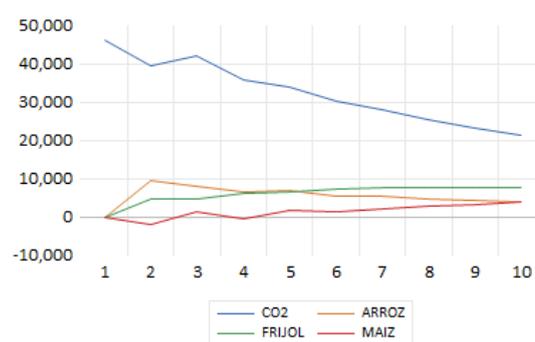
Período: 2001 - 2020			
Observaciones incluidas: 306			
Variable dependiente: CO ₂			
Independiente	Chi-cuadrado	Grados de libertad	p-valor
Arroz	15.55043	2	0.0004
Frijol	6.032329	2	0.0490
Maíz	2.864763	2	0.2387
Total	28.62456	6	0.0001

Elaboración propia

Los resultados presentados en la Tabla 4.10. sugieren que, a nivel individual, las producciones de arroz y frijol causan en el sentido de Granger a las emisiones dióxido de carbono. Sin embargo, la producción de maíz no causa en el sentido de Granger a las emisiones de dióxido de carbono. Del mismo modo, a nivel global, las producciones de arroz, frijol y maíz causan en el sentido de Granger a las emisiones de dióxido de carbono.

En la Figura 4.5. se observa que la respuesta de las emisiones de dióxido de carbono, ante variaciones de la producción de arroz, maíz y frijol, muestra una tendencia decreciente a largo plazo. Es decir, a la larga la producción agrícola incrementaría las emisiones de GEI. Este resultado confirma lo expuesto por Ozlu (2022), quien señala que las actividades agrícolas son una de las mayores contribuyentes a la huella carbono.

Figura 4.5. Función de respuesta al impulso - CO₂



Elaboración propia

c) Emisiones de óxido nitroso (N₂O)

La Tabla 4.11. presenta los resultados de la estimación del modelo PVAR para la variable de emisiones de óxido nitroso. A continuación, se muestran la causalidad en el sentido de Granger en la Tabla 4.12. y la función de respuesta al impulso en la Figura 4.6.

Tabla 4.11. Modelo PVAR – N₂O

	N ₂ O	Arroz	Frijol	Maíz
N ₂ O(-1)	0.579715 (0.05334) [10.8681]	11.31844 (1.91901) [5.89806]	3.307261 (0.59200) [5.58659]	-7.957273 (15.7614) [-0.50486]
N ₂ O(-2)	0.405571 (0.05403) [7.50677]	-11.46594 (1.94370) [-5.89902]	-2.900498 (0.59962) [-4.83725]	7.738374 (15.9642) [0.48473]
Arroz (-1)	-0.006360 (0.00145) [-4.40106]	0.658474 (0.05199) [12.6646]	-0.029942 (0.01604) [-1.86674]	-3.138181 (0.42703) [-7.34877]
Arroz (-2)	0.005567 (0.00145) [3.82897]	0.333996 (0.05231) [6.38511]	0.046863 (0.01614) [2.90413]	3.338918 (0.42963) [7.77169]
Frijol (-1)	0.014060 (0.00462) [3.04078]	-0.013807 (0.16635) [-0.08300]	0.673831 (0.05132) [13.1303]	0.968534 (1.36631) [0.70887]
Frijol (-2)	-0.006535 (0.00481) [-1.35857]	0.130171 (0.17305) [0.75219]	0.166824 (0.05339) [3.12486]	-1.857384 (1.42135) [-1.30678]
Maíz (-1)	-0.000494 (0.00015) [-3.27406]	0.007885 (0.00542) [1.45377]	-0.004462 (0.00167) [-2.66670]	0.449672 (0.04455) [10.0941]
Maíz (-2)	0.000679 (0.00017) [3.98531]	-0.013502 (0.00613) [-2.20353]	0.005091 (0.00189) [2.69346]	0.652854 (0.05033) [12.9727]
C	0.961943 (0.66683) [1.44256]	31.23832 (23.9900) [1.30214]	-13.75392 (7.40074) [-1.85845]	-51.39455 (197.037) [-0.26084]
Observaciones incluidas	306 después de ajustes			
R ²	0.997010	0.987479	0.984196	0.980774
R ² ajustado	0.996930	0.987142	0.983770	0.980256
Suma residuos al cuadrado	21974.01	28440902	2706646.	1.92E+09
Ecuación S.E.	8.601545	309.4521	95.46354	2541.616
Estadístico F	12380.23	2927.916	2311.912	1893.867
Log-verosimilitud	-1088.122	-2184.478	-1824.603	-2828.838
Akaike AIC	7.170731	14.33645	11.98434	18.54796
Schwarz SC	7.280249	14.44597	12.09385	18.65748
Media dependiente	85.32000	1482.958	318.5116	7905.822
Desviación estándar	155.2338	2729.002	749.3376	18088.19
Determinante de la covarianza residual (ajustado por grados de libertad)	3.82E+17			
Determinante de la covarianza residual Log-verosimilitud	-7912.719			
Criterio de información Akaike	51.95241			
Criterio de información Schwarz	52.39048			
Número de coeficientes	36			

Error estándar en () & estadístico t en []

Elaboración propia

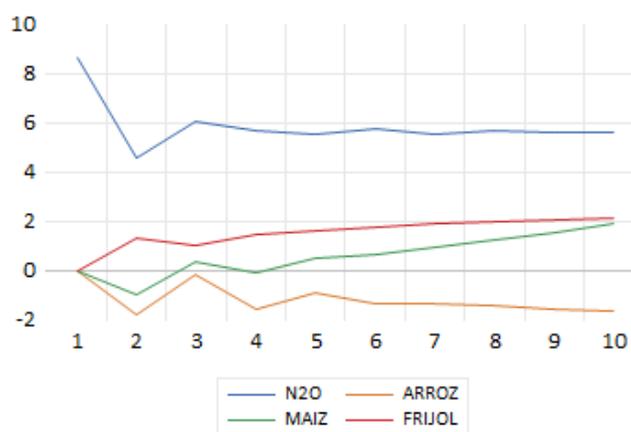
Tabla 4.12. Causalidad en el sentido de Granger – Dióxido de Carbono

Periodo: 2001 - 2020			
Observaciones incluidas: 306			
Variable dependiente: N2O			
Independiente	Chi-cuadrado	Grados de libertad	p-valor
Arroz	21.03531	2	0.0000
Frijol	11.91363	2	0.0026
Maíz	16.01597	2	0.0003
Total	40.70355	6	0.0000

Elaboración propia

La Tabla 4.12. muestra que, a nivel individual y global, las producciones de arroz, frijol y maíz causan en el sentido de Granger a las emisiones de óxido nitroso.

Figura 4.6. Función de respuesta al impulso - N₂O



Elaboración propia

La Figura 4.5. indica cómo las emisiones de óxido nitroso poseen una tendencia creciente ante variaciones de las producciones de frijol y maíz. No obstante, la respuesta de las emisiones de óxido nitroso ante variaciones de la producción de arroz no muestra una tendencia clara, ya que hay momentos de decremento y de incremento.

3.1.3. Tabla resumen de causalidad en el sentido de Granger

a) Resultados de efecto de emisiones de GEI sobre producción

La Tabla 4.13. contiene un resumen del efecto de las emisiones de GEI en las producciones de arroz, maíz y frijol. Los resultados sugieren la presencia de un efecto positivo entre las variables de cambio climático y de producción agrícola; sin embargo, no se encontró que las emisiones de CH₄ tengan impacto en la producción de arroz.

Tabla 4.13. Efecto de GEI en la producción de granos básicos

→	Arroz	Frijol	Maíz
CO ₂	Sí	Sí	Sí
CH ₄	No	Sí	Sí
N ₂ O	Sí	Sí	Sí

Elaboración propia

b) Resultados de efecto de producción sobre emisiones de GEI

En la Tabla 4.14. se presenta el efecto de las producciones de arroz, maíz y frijol en las emisiones de GEI. Los resultados sugieren que la producción agrícola tiene efecto positivo sobre las emisiones de GEI; sin embargo, no se encontró que el arroz tenga efecto en las emisiones de CH₄ y que el maíz influya en las emisiones de CO₂.

Tabla 4.14. Impacto de la producción de granos básicos en GEI

→	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Arroz	Sí	No	Sí
Frijol	Sí	Sí	Sí
Maíz	No	Sí	Sí

Elaboración propia

Tabla 4.15. Relación entre GEI y producción de granos básicos

CO ₂ → Arroz (Sí) Arroz → CO ₂ (Sí)	CO ₂ → Frijol (Sí) Frijol → CO ₂ (Sí)	CO ₂ → Maíz (Sí) Maíz → CO ₂ (No)
CH ₄ → Arroz (No) Arroz → CH ₄ (No)	CH ₄ → Frijol (Sí) Frijol → CH ₄ (Sí)	CH ₄ → Maíz (Sí) Maíz → CH ₄ (No)
N ₂ O → Arroz (Sí) Arroz → N ₂ O (Sí)	N ₂ O → Frijol (Sí) Frijol → N ₂ O (Sí)	N ₂ O → Maíz (Sí) Maíz → N ₂ O (Sí)

Elaboración propia

En la Tabla 4.15. se observa la relación entre las variables de cambio climático y la producción de granos básicos. Los resultados muestran que la relación bidireccional se da en todos los casos excepto en el metano con el arroz, el maíz con el dióxido de carbono y el metano con el maíz.

Pese a las excepciones mencionadas con anterioridad, los resultados sugieren el impacto negativo del cambio climático en los cultivos agrícolas. Este resultado coincide con lo planteado por Palacios (2023), quien sugiere que el incremento de las emisiones de GEI afecta en las variaciones de la temperatura y las precipitaciones, disminuyendo en la producción agrícola.

Por último, los resultados muestran la relación que fue propuesta por Ozlu (2022), quien afirma que la producción agrícola genera un efecto negativo en las emisiones de GEI.

3.2. Conclusiones y recomendaciones

En esta investigación se analizó la relación entre el cambio climático (medido por las emisiones de GEI) y la producción agrícola de granos básicos (arroz, maíz y frijol) para 17 países latinoamericanos, periodo 2001 - 2020. Los resultados sugieren que el cambio climático tiene un impacto negativo en la producción agrícola y, a su vez, las mismas prácticas agrícolas incrementan las emisiones de GEI en la atmósfera; es decir, se verifica la simultaneidad entre las variables de estudio. El incremento de las emisiones de GEI se da posiblemente porque las actividades agrícolas incluyen el uso de fertilizantes, pesticidas, la quema de residuos agrícolas y la mala gestión del suelo.

Los hallazgos de esta investigación son una contribución al área de estudio relacionada con la economía ambiental y la economía del bienestar, y constituyen información clave para diseñar políticas públicas que no solo se enfoquen en la mitigación y adaptación al CC, sino que a su vez promuevan la resiliencia del sector agrícola por el CC por medio de políticas ambientales.

A nivel general, los resultados de los análisis efectuados indican que Brasil es el mayor productor agrícola y el mayor emisor de GEI. Por el contrario, El Salvador es el menor productor de arroz y el menor emisor de metano. También, Uruguay es el menor productor de frijol y es el país con menos emisiones de dióxido de carbono. Asimismo, Costa Rica es el menor productor de maíz. Por último, Panamá es el país que emite menos óxido nitroso.

El presente estudio posee algunas limitaciones que requieren ser consideradas. La variable precipitaciones presentaba datos constantes para todos los años a nivel de cada país, lo que resultó en una restricción para su inclusión dentro del modelo. La variable precipitaciones habría proporcionado información relevante sobre cómo la disponibilidad de agua para riego influye en el crecimiento de los cultivos. Asimismo, no se incorporaron todos los países de AL, excluyendo específicamente a Cuba, Haití y Guatemala, debido a la falta de datos. Por último, se recomienda que en futuros estudios se consideren nuevos enfoques, por ejemplo, incluyendo la temperatura. En el presente trabajo el objetivo principal era examinar el efecto del cambio climático a través de las emisiones de GEI, razón por la cual la variable temperatura no fue incluida. No obstante, la inclusión de esta variable permitirá observar cómo los cultivos responden a variaciones térmicas y, a su vez, analizar cuáles cultivos son más vulnerables.

La crisis climática que se vive actualmente requiere que existan compromisos por parte de la sociedad civil, así como de los gobiernos de cada una de las naciones. Así, es necesario desarrollar estrategias que permitan el desarrollo del sector agrícola de manera sostenible, de modo que se reduzca la vulnerabilidad y se garanticen los recursos para las futuras generaciones, protegiendo los recursos naturales y promoviendo la conservación ambiental del planeta Tierra.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, R. M., Hurd, B. H., Lenhart, S., & Leary, N. (1999). *Effects of global climate change on agriculture: An interpretative review*. *Climate Research*, 11(1), 19–30. <https://doi.org/10.3354/cr011019>
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. (7 de junio de 2023). *US EPA*. Obtenido de <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono>
- Agliardi, E., Casari, M., Xepapadeas, A. (2020). *Introduction: special issue on the economics of climate change and sustainability (Part B)*. *Environment and Development Economics* 25, 1–4. <https://doi.org/10.1017/S1355770X19000470>
- Ali YO (2011). *Legal Profession and Climate Change in Nigeria*. Obtenido de http://www.yusufali.net/articles/LEGAL_PROFESSION_AND_CLIMATE_CHANGE_IN_NIGERIA.pdf
- Amorín, C. (3 marzo de 2023). *América Latina entre las zonas altamente vulnerables al cambio climático | REL UITA*. Rel UITA. Obtenido de <https://www.rel-uita.org/mundo/america-latina-entre-las-zonas-altamente-vulnerables-al-cambio-climatico/#:~:text=A%20fines%20de%20febrero%20se%20difundi%C3%B3%20la%20segunda,de%20alta%20vulnerabilidad%20humana%E2%80%9D%20ante%20este%20proceso%20planetario.>
- Ávila Miramontes, J. A., Avila Salazar, J. M., Rivas Santoyo, F. J., & Martínez Heredia, D. (2014). *El Cultivo del Frijol: Sistemas de Producción en el Noroeste de México*. Sonora. Obtenido de <https://agricultura.unison.mx/memorias%20de%20maestros/EL%20CULTIVO%20DEL%20FRIJOL.pdf>
- Camehl, A. (2023). Penalized estimation of panel vector autoregressive models: A panel LASSO approach. *ELSEVIER*, 1118-1204.
- Challinor, A.J., Watson, J., Lobell, D.B., Howden, S.M., Smith, D.R., & Chhetri, N. (2014) *A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation*. *Nat. Clim. Chang.* 4, 287–291.
- Coello de Portugal, C. A. (2021). *La Causalidad de Granger en el Análisis y la Previsión de Series Temporales Clásicas, de Intervalo y de Histograma*. [Tesis

de grado, Universidad Pontificia Comillas].

<https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/62362>

Cunningham W, Cunningham MA (2006). *Principles of Environmental Science: Inquiry and Applications second edition, McGraw Hill*. Boston USA.

FAO (1993). *El maíz en la nutrición humana*. Obtenido de <https://www.fao.org/3/t0395s/T0395S00.htm>

FAO (2004). *El Arroz y la Nutrición Humana*. Obtenido de <https://www.fao.org/3/y4875s/y4875s02.pdf>

FAO (2017). *Cronología del Corredor Seco: El acelerador de la resiliencia en Centroamérica | Agronoticias: Actualidad agropecuaria de América Latina y el Caribe*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Obtenido de <http://www.fao.org/in-action/agronoticias/detail/es/c/1024540/>

FAOSTAT. (2020). *Información sobre operaciones postcosecha*. Obtenido de <https://www.fao.org/in-action/inpho/crop-compendium/cereals-grains/es/>

Gadea, C. (18 de octubre de 2019). *Gases de efecto invernadero (GEI). Advertencia global sobre el cambio climático - Bester*. Obtenido de <https://bester.energy/gases-de-efecto-invernadero-gei/#:~:text=Los%20gases%20de%20efecto%20invernadero%2C%20conocidos%20como%20GEI%2C%20son%20aquellos,el%20calor%20en%20la%20atm%C3%B3sfera.>

Guzmán, E. (2013). *Impacto económico del cambio climático en la agricultura en la región Cusco, Perú: una aproximación a través del modelo Ricardiano*. CIES: Consorcio de Investigación Económica y Social.

Holtz-Eakin, D. y T. M. Selden. (1995). *Stoking the fires? CO2 emissions and economic growth*. *Journal of Public Economics*, 57: 85-101.

Huntington, H. G. (2005). *US carbon emissions, technological progress, and economic growth since 1870*. *International Journal of Global Energy Issues*, 23, 4: 292-306.

IPCC (1996) *Climate Change 1995: The IPCC second assessment report, Vol 2, Scientific-technical analyses of impacts, adaptations, and mitigation of climate change, Chaps 13 and 23*. Watson RT, Zinyowera MC, Moss RH (eds) Cambridge University Press, Cambridge, p 427–467, 745–771

- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
- Izquierdo, J., Chavarro, J. I., & Trujillo, G. A. (2008). *Agricultura y cambio climático en el Huila*. *Ingeniería y Región*, 5, 149–158. <https://doi.org/10.25054/22161325.835>
- Khanal, R. C. (2009). *Climate Change and Organic Agriculture*. *Journal of Agriculture and Environment*, 10, 116–127. <https://doi.org/10.3126/aej.v10i0.2136>
- López, A. (2015). *Cambio climático y actividades agropecuarias en América Latina*. CEPAL.
- Malhi, G. S., Kaur, M., & Kaushik, P. (1 de Febrero de 2021). *Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. Sustainability (Switzerland)*. MDPI. <https://doi.org/10.3390/su13031318>
- Mendelsohn, R. (2008). *The impact of climate change on agriculture in developing countries*. *Journal of Natural Resources Policy Research*, 1(1), 5–19. <https://doi.org/10.1080/19390450802495882>
- Mendelsohn, R., W.D. Nordhaus, & D. Shaw. (1994). *The impact of global warming on agriculture: A Ricardian analysis*. *American Economics Review* 84(4): 753-771
- Methane to Markets. (2008). *La importancia del metano y las actividades de reducción de sus emisiones*. Obtenido de <http://www.methanetomarkets.org/>
- Mottet, N. (2023). *Todo sobre los gases de efecto invernadero*. Obtenido de ClimateTrade: [https://climatetrade.com/es/todo-sobre-los-gases-de-efecto-invernadero/#:~:text=%C3%93xido%20nitroso%20\(N2O\)&text=Esto%20es%20particularmente%20problem%C3%A1tico%20porque,que%20el%20di%C3%B3xido%20de%20carbono](https://climatetrade.com/es/todo-sobre-los-gases-de-efecto-invernadero/#:~:text=%C3%93xido%20nitroso%20(N2O)&text=Esto%20es%20particularmente%20problem%C3%A1tico%20porque,que%20el%20di%C3%B3xido%20de%20carbono).
- Nordhaus, W. (1994). *Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Ortiz, R. (2012). *El cambio climático y la producción agrícola*. *Banco Interamericano de Desarrollo*, 26(1), 2215–2652.

- Ozlu, E., Arriaga, F. J., Bilen, S., Gozukara, G., & Babur, E. (01 de octubre de 2022). *Carbon Footprint Management by Agricultural Practices*. Biology. MDPI. <https://doi.org/10.3390/biology11101453>
- Palacios, M., Massa-Sánchez, P., & Martínez-Fernández, V.-A. (2023). *Cambio climático y contaminación ambiental como generadores de crisis alimentaria en la América Andina: un análisis empírico para Ecuador*. Investigación Operacional, 39(2). Obtenido de <https://revistas.uh.cu/invoperacional/article/view/4024>
- Roca, J. (2018). *La economía del cambio climático de William Nordhaus, premio Nobel 2018*. Ecología Política, 56: 24-27
- Smith, JB., Huq, S., Lenhart, S., Mata, LJ., Nemesova, I., & Toure, S. (1996) *Vulnerability and adaptation to climate change: a synthesis of results from the U.S. Country Studies Program*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht
- Sorto, E. J. (2020). *Impacto del cambio climático en la salud de El Salvador*. Crea Ciencia Revista Científica, 12(2), 15. <https://doi.org/10.5377/creaciencia.v12i2.10171>
- Stern N. (2007) *How Climate Change Will Affect People Around the World*. In: *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge: Cambridge University Press; 65-103. doi:10.1017/CBO9780511817434.009
- Suleiman, I. L. (2014). *An appraisal of climate change and agriculture in Nigeria*. Journal of Geography and Regional Planning, 7(9), 176–184. <https://doi.org/10.5897/jgrp2013.0405>
- Tol, R. (2009). *The Economic Effects of Climate Change*. Journal of Economic Perspectives, 29-51.
- United Nations Environmental Problem (UNEP) (2013). *Climate Change-home*. www.unep.org/climatechange
- Uresti, I. N., & Uresti, I. N. (4 de marzo de 2022). *Función de respuesta al impulso*. Obtenido de <https://leyderecho.org/funcion-de-respuesta-al-impulso/#:~:text=Las%20funciones%20de%20respuesta%20a%20los%20impulsos%20son,variables%20a%20las%20perturbaciones%20que%20afectan%20a%20el%20sistema>.

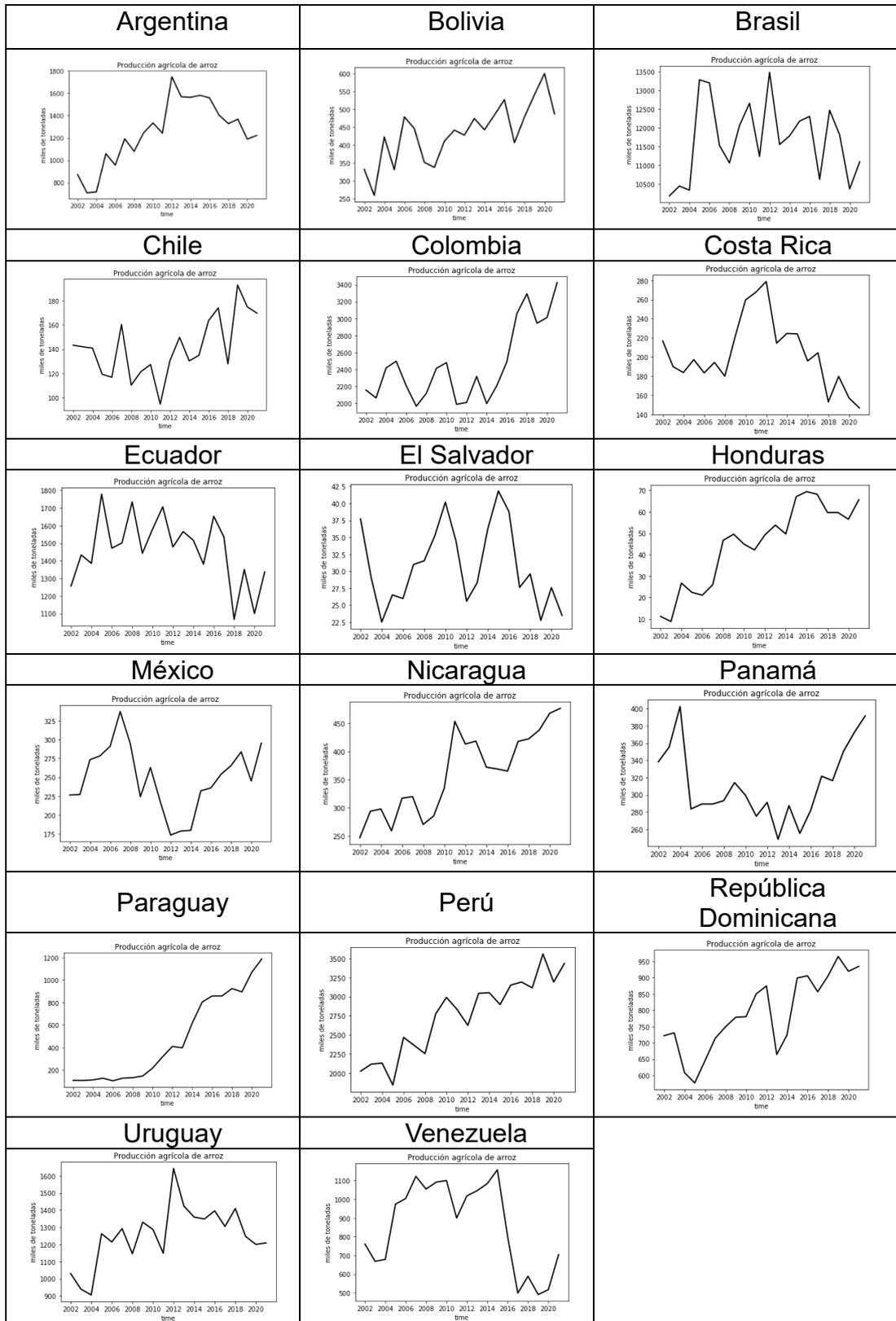
Vegara, J. M., Busom, I., Coldeforns, M., Guerra, A. I., & Sancho, F. (2009). *El cambio climático: análisis y política económica. Una introducción*. Colección estudios económicos.

Wooldridge, J. M. (2010). *Econometric analysis of cross section and panel data*. MIT Press.

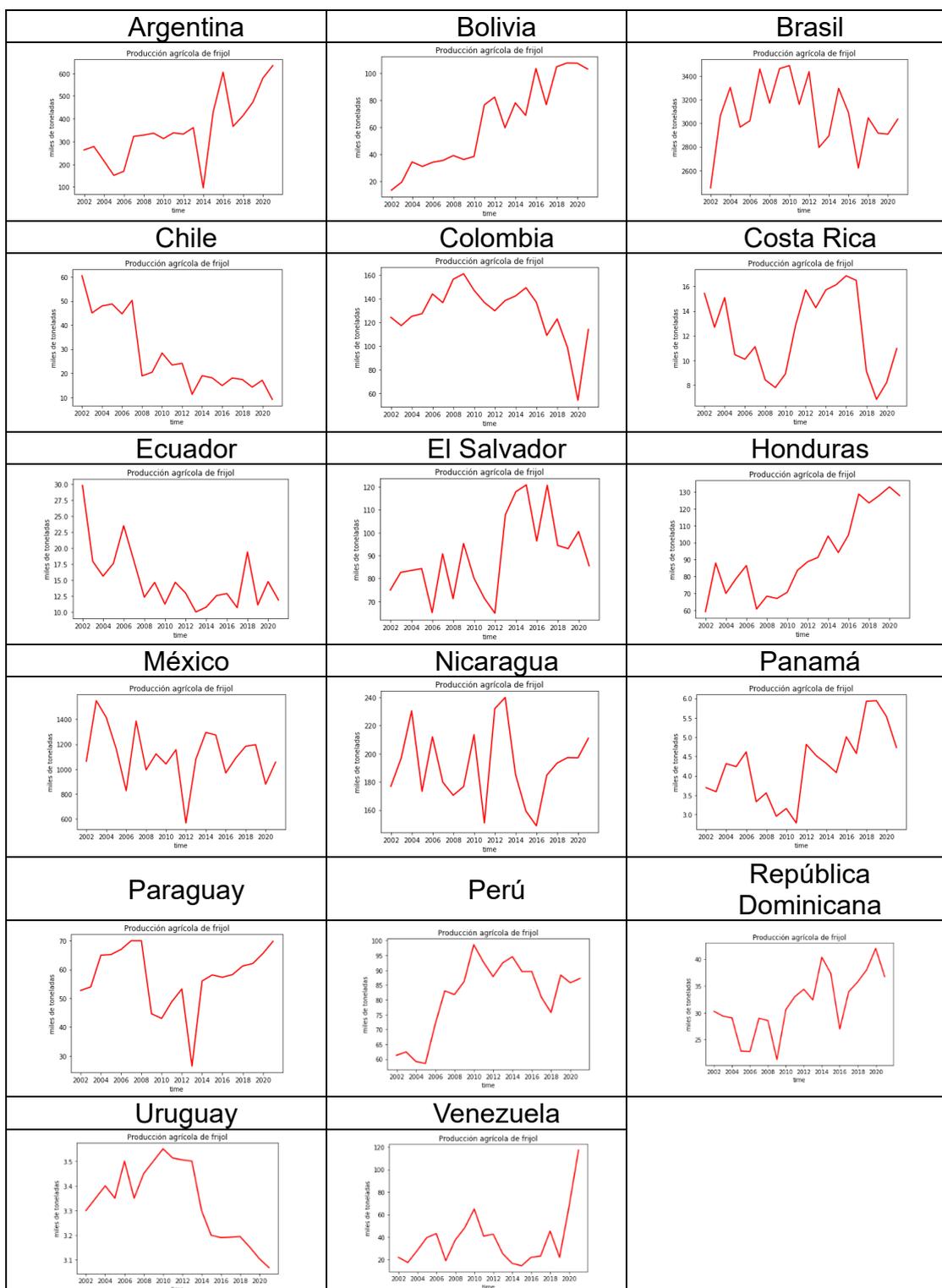
Wooldridge, J. M. (2010). *Introducción a la econometría. Un enfoque moderno*. México: Cengage Learning.

5. ANEXOS

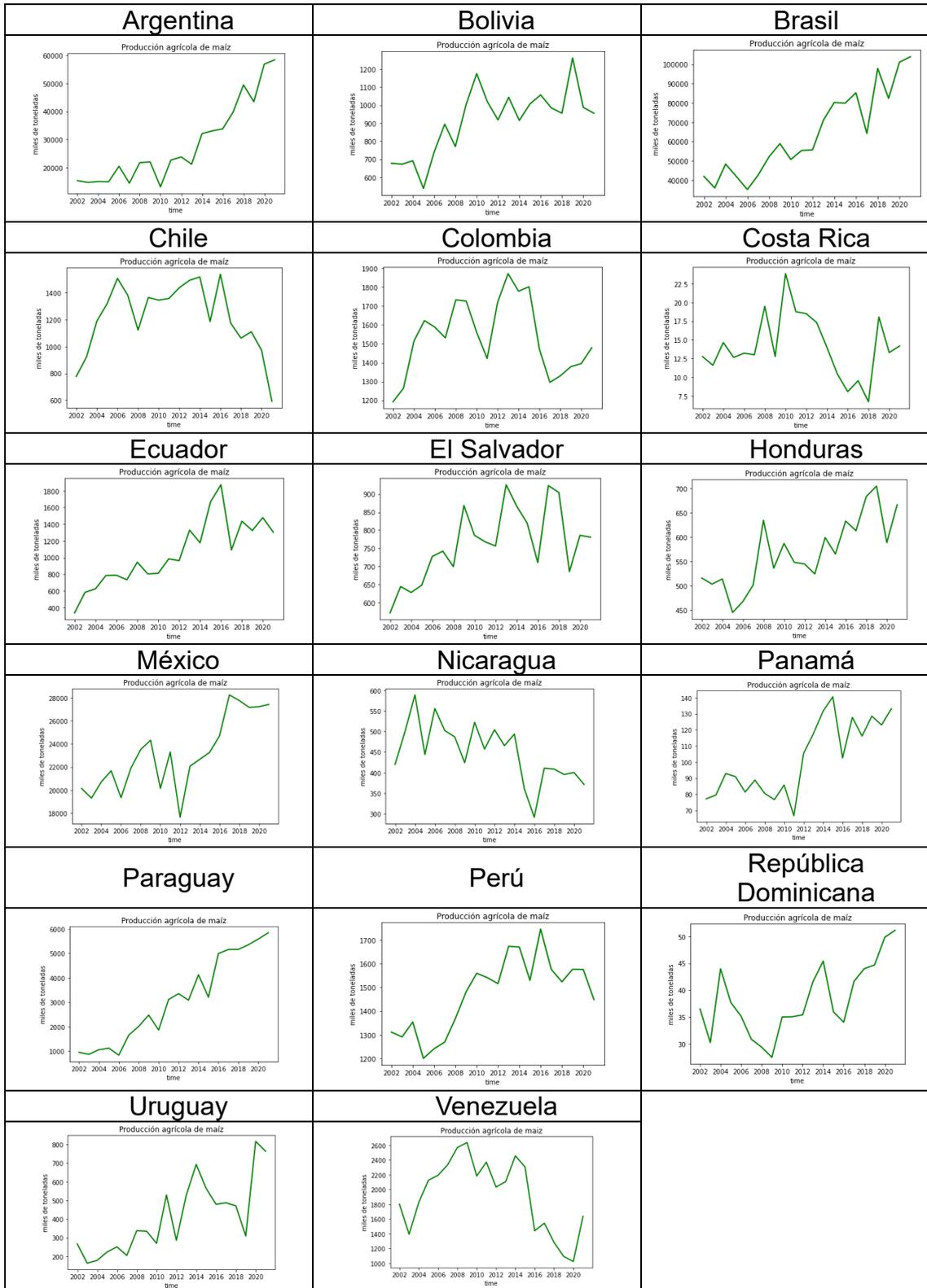
I. Producción agrícola de arroz



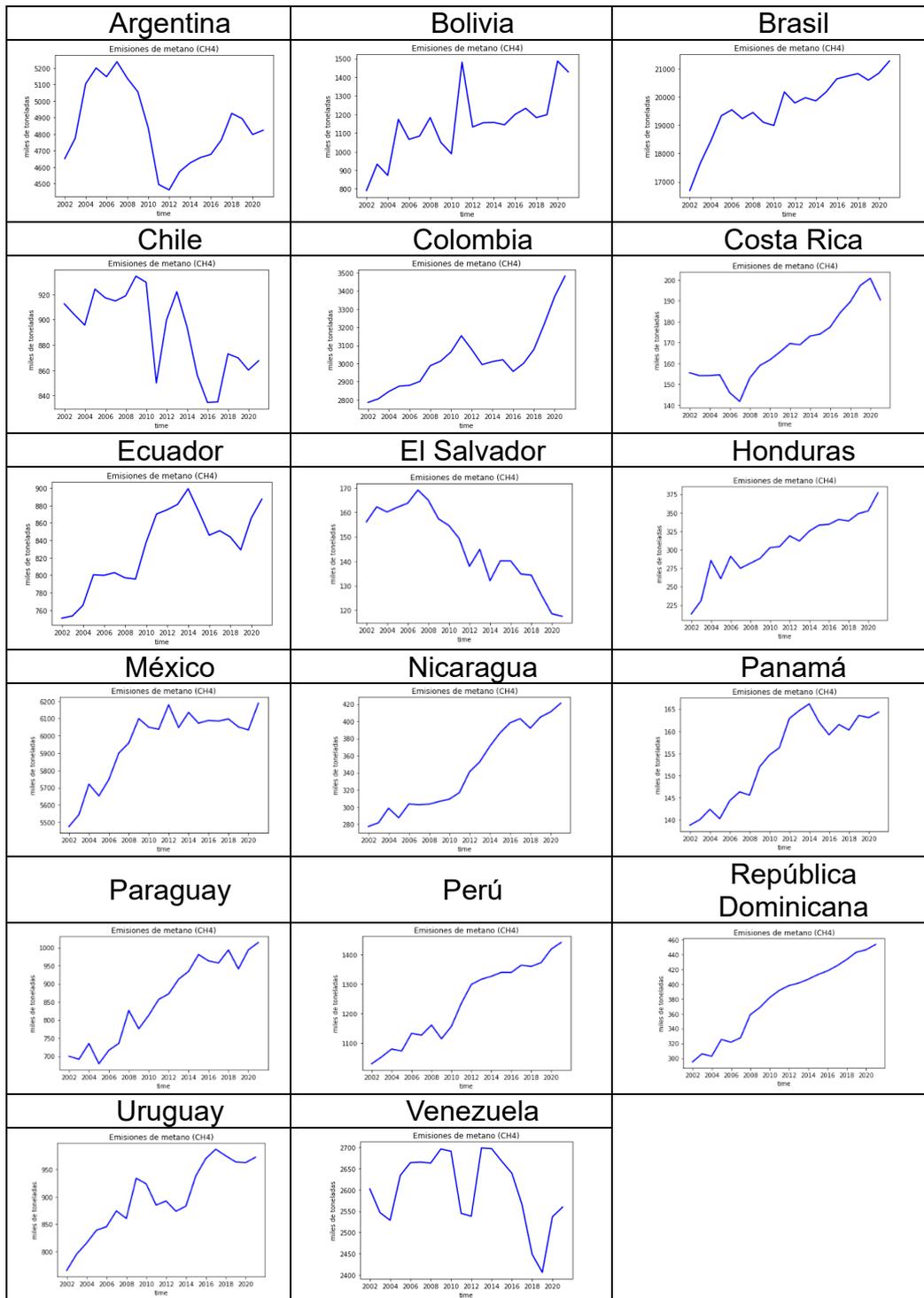
II. Producción agrícola de frijol



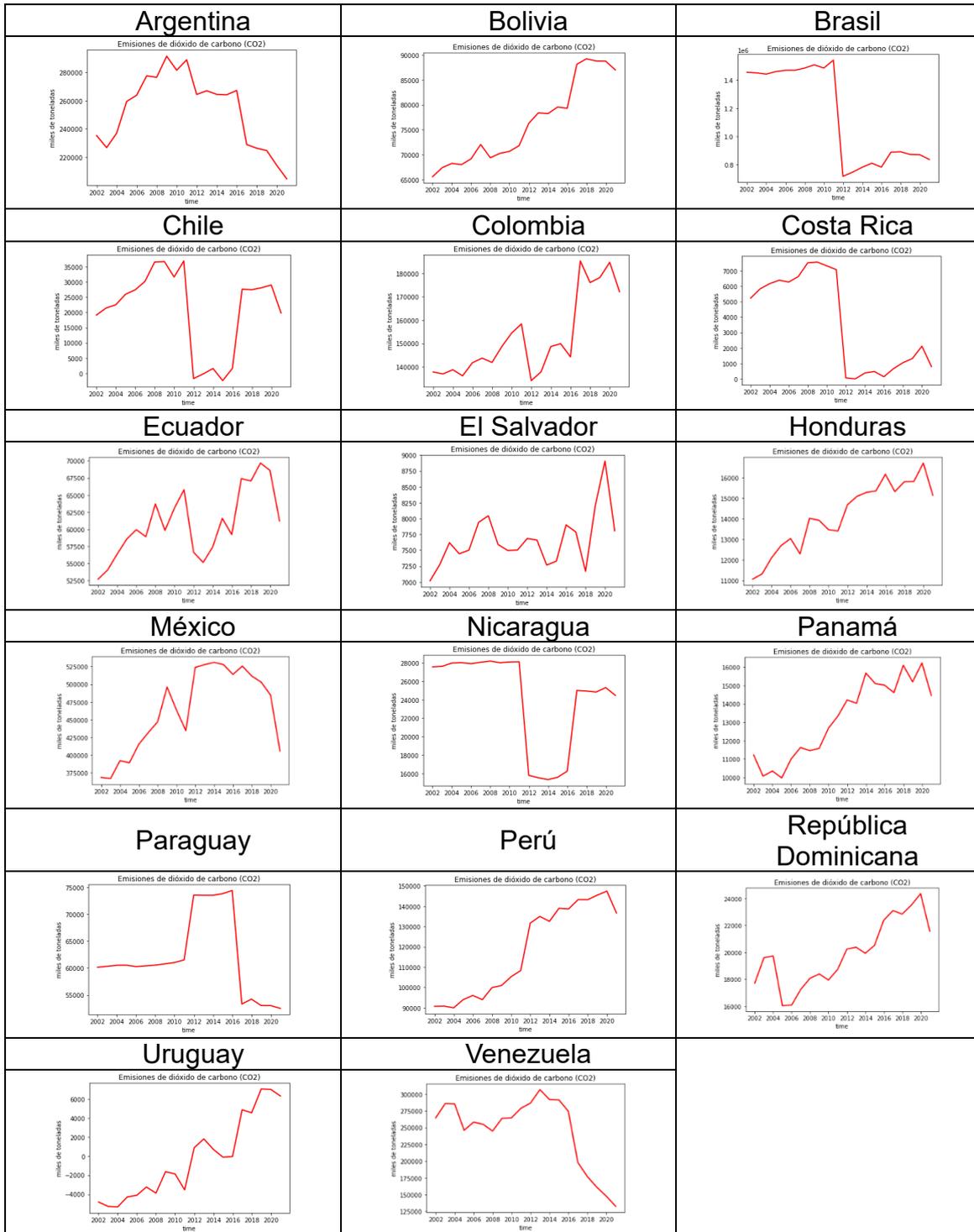
III. Producción agrícola de maíz



IV. Emisiones de CH₄



V. Emisiones de CO₂



VI. Emisiones de N₂O

