

Emisiones de CO₂ y crecimiento económico en la región de América Latina.

Isaac Sánchez Juárez *

Rosa María García Almada **

Ninfa Stella Chávez Gutiérrez ***

Resumen

El objetivo de este artículo consiste en verificar la relación econométrica de causalidad entre las emisiones de CO₂ y el crecimiento económico en una muestra de seis países de América Latina de 1990 al 2019 (Argentina, Brasil, Colombia, Chile, México y Perú). La hipótesis es que a mayor actividad económica medida por el PIB mayor la emisión de contaminantes, particularmente de CO₂. Para verificarla se usaron series de tiempo tomadas de la CEPAL de las emisiones de CO₂ en miles de toneladas y el PIB total en millones de dólares. Se evaluó estacionariedad de las series, estimaron modelos VAR, calcularon funciones impulso-respuesta, cointegración y causalidad en el sentido de Granger y finalmente se aplicó el método de descomposición de varianza. El principal resultado fue que para la región existe correlación y cointegración entre las series estudiadas; no obstante, no se encontró causalidad en el sentido de Granger, aunque sí se demuestra que la varianza de las emisiones de CO₂, tras un choque de 10 años parece estar explicada en un 78% en promedio por la varianza del PIB, este resultado con algunas diferencias se mantiene a nivel de los seis países de la muestra. Por lo que resulta urgente transitar hacia un crecimiento sostenible.

Palabras clave: Contaminación, desarrollo económico, ambiente, Latinoamérica, series de tiempo.

Abstract

CO₂ emissions and economic growth in the Latin American region

The objective of this paper is to verify the econometric causal relationship between CO₂ emissions and economic growth in a sample of six Latin American countries from 1990 to 2019 (Argentina, Brazil, Colombia, Chile, Mexico, and Peru). The hypothesis is that the greater the economic activity measured by GDP, the greater the emission of pollutants, particularly CO₂. To verify it, time series taken from ECLAC of CO₂ emissions in thousands of tons and total GDP in millions of dollars were used. Stationarity of the series was evaluated, VAR models were estimated, impulse-response functions, cointegration and Granger causality were calculated and finally the variance decomposition method was applied. The main result was that for the region there is correlation and cointegration between the series studied; However, no causality was found in the Granger sense, although it is shown that the variance of CO₂ emissions, after a 10-year shock, seems to be explained on average by 78% by the variance of GDP, this result with some differences remain at the level of the six countries in the sample. Therefore, it is urgent to move towards sustainable growth.

Keywords: Pollution, economic development, environment, Latin America, time series

JEL Classification: Q01, Q56, R11

* Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
isaac.sanchez@uacj.mx
<https://orcid.org/0000-0002-1975-5185>

** Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
maria.garcia@uacj.mx
<https://orcid.org/0000-0003-2330-8385>

*** Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
cgnstella@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-2041-4775>

1. Introducción¹

En la actualidad, la economía global se encuentra en constante crecimiento y desarrollo, esto trae consigo una serie de desafíos y preocupaciones ambientales, incluidas las emisiones de dióxido de carbono. Es fundamental comprender la relación entre el crecimiento económico y las emisiones de dióxido de carbono para poder abordar el problema y tomar medidas efectivas para mitigarlo. La producción y el consumo de energía son los principales responsables de las emisiones de gases de efecto invernadero, incluido el dióxido de carbono, y son los impulsores del crecimiento económico. A medida que la economía se expande, la demanda de energía y los patrones de consumo también aumentan, lo que resulta en un aumento de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂).

Por lo tanto, este artículo tiene como base la siguiente pregunta de investigación: ¿las emisiones de CO₂ son explicadas por las variaciones del PIB en la región de América Latina? En concreto el objetivo de este capítulo consiste en verificar la existencia de una relación de causalidad entre el crecimiento económico y las emisiones de CO₂ en una muestra de seis países de América Latina de 1990 al 2019 (Argentina, Brasil, Colombia, Chile, México y Perú). La hipótesis es que a mayor actividad económica medida por el PIB mayor será la emisión de contaminantes, particularmente de CO₂. El estudio encuentra su justificación ya que es importante analizar y comprender esta relación para abordar los desafíos que enfrenta el ambiente y hallar soluciones que permitan un crecimiento económico sostenible. La investigación resulta relevante por el uso de técnicas de econometría de series de tiempo, la selección de una muestra de los países más importantes de la región latinoamericana y el llamado a la atención a un problema preocupante para la humanidad sobre una base científica.

¹ Se agradecen los comentarios de los dos revisores anónimos. Esta investigación se desarrolló en el Laboratorio de Problemas Estructurales de la Economía Mexicana de la UACJ.

II. Revisión de la literatura

El primer trabajo revisado para el caso latinoamericano fue el de Apergis y Payne (2009), los autores estudiaron la relación causal entre emisiones de CO₂, el consumo de energía y el producto de 1971 al 2004. Encontraron que, en el largo plazo, el consumo de energía tiene un impacto significativo y positivo sobre las emisiones; mientras que el producto real denota un patrón de “U” invertida semejante a la hipótesis ambiental de la curva de Kuznets. Por otro lado, la dinámica de causalidad en el corto plazo les indicaba que el consumo de energía y el producto real observaron una causalidad unidireccional, mientras que a largo plazo la causalidad era bidireccional.

Otros autores que investigaron la relación entre las emisiones de CO₂ y el crecimiento económico en Latinoamérica fueron Blanco, González y Ruiz (2013), dichos autores utilizaron la prueba de causalidad de Granger para relacionar la inversión extranjera directa (IED) recibida con las emisiones de CO₂ de 1980 al 2007. Los autores destacan que, la causalidad va de la IED recibida en industrias altamente contaminantes hacia las emisiones per cápita de CO₂. Sin embargo, en otros sectores de actividad económica, los autores no lograron demostrar que la IED sea la causante de las emisiones.

Con datos de 116 países, Acheampong (2018), estudió las relaciones dinámicas entre las emisiones de CO₂, el consumo de energía y el crecimiento económico, de 1990 al 2014. Por medio de un panel de vectores autorregresivos (PVAR) estimado con el método generalizado de momentos (GMM) estableció las relaciones claves en el diseño de políticas públicas de índole ambiental. Sus resultados apuntan que, tanto a nivel regional como a nivel global, el crecimiento económico no es causa del consumo de energía; en segundo lugar, los resultados empíricos apuntan que, con la única excepción de Latinoamérica y el Caribe, el crecimiento económico no tiene un impacto causal sobre las emisiones de CO₂.

En Europa, Balsalobre-Lorent, Shahbaz, Roubaud y Farhani (2018) estudiaron la relación entre el crecimiento económico y las emisiones de CO₂ de 1985 al 2016.

Sus resultados confirman la existencia de una figura de “N” en la relación entre el crecimiento económico y las emisiones de CO₂. Además, incorporaron variables adicionales como: el consumo de energías renovables, apertura comercial, abundancia de recursos naturales y la innovación en recursos energéticos para mejorar las emisiones de carbono en el aire. En el caso del consumo de energías renovables y la interacción con el crecimiento económico encontraron un impacto positivo con las emisiones de CO₂. Confirmaron la necesidad de reducir los efectos negativos del consumo de recursos energéticos fósiles sobre el ambiente.

De manera similar, Gorus y Aydin (2019) estudiaron la relación causal entre consumo de energía, crecimiento económico y emisiones de CO₂ a través de la prueba de causalidad de Granger en ocho países ricos en petróleo: Argelia, Egipto, Irán, Irak, Omán, Arabia Saudita, Túnez y los Emiratos Árabes Unidos, para el periodo 1975-2014. No encontraron un nexo causal entre el crecimiento económico y las emisiones de CO₂.

Regresando a los estudios del continente americano, Román-Collado y Morales-Carrión (2018) realizaron un análisis de descomposición espacial multirregional, para estudiar la relación entre las emisiones de CO₂ y el crecimiento económico per cápita. Sus resultados apuntan que la región de Latinoamérica usa muchas energías fósiles y sufre los efectos de la carbonización. Por lo que la lección es que los países de la región deben desacoplar el crecimiento económico de las emisiones de CO₂.

De manera similar, en Seri y de Juan Fernández (2022), usando modelos de series de tiempo con pruebas de cointegración de 1960 al 2017, se estimaron los efectos del ingreso per cápita sobre las emisiones de CO₂. Sus resultados apuntan que la hipótesis de Kuznets en el largo plazo describe la relación entre el ingreso y las emisiones en una minoría de países de América Latina, mientras que en muchos casos el efecto del CO₂ sí tiene un impacto sobre la dirección de las políticas públicas en las acciones ambientales de la región.

Yuping et al. (2021) estudiaron el caso de Argentina para el periodo 1970-2018, encontraron que para el caso de Argentina la elasticidad de un modelo autorregresivo de rezagos distribuidos muestra que el consumo de energía renovable reduce las emisiones; mientras que el consumo de energía no renovable las empeora tanto en el corto como en el largo plazo. Con información de los países del MERCOSUR, de Souza, Freire, y Pires (2018) analizaron el impacto del consumo de energía separando entre energía renovable y no renovable; así como el efecto de ésta en las emisiones de CO₂. Con datos obtenidos del Banco Mundial, dividieron a los países en un panel balanceado con una serie de 1990 al 2014; los resultados muestran que el consumo de energía de fuentes renovables tiene un impacto negativo sobre las emisiones de CO₂, mientras que el consumo de energía de fuentes no renovables tuvo un impacto positivo.

Continuando con la búsqueda sobre el impacto de la actividad económica en la emisión de gases contaminantes se revisó el trabajo de Imori y Guilhoto (2008), quienes estudiaron esta relación en Brasil para el año 2004. Los autores documentan la contribución de la diversidad de sectores productivos sobre el total de emisiones, tomando en cuenta la estructura tecnológica de la economía, las interrelaciones entre los sectores y la capacidad sectorial para generar valor agregado, así como la participación del sector en la demanda final. El método utilizado fue una matriz de insumo-producto; su principal resultado muestra que, tanto desde una perspectiva de oferta como de una perspectiva de demanda, los sectores productivos claves, en especial el transporte contribuye a la contaminación.

Siguiendo con los estudios sobre Brasil, el documento elaborado por Seyfettin, Durmuş y Ayfer (2019) reporta que en años recientes las emisiones de CO₂ son un tema crítico que necesita ser atendido, sobre todo en países que son objeto de relocalización industrial como los llamados BRICS (Brasil, Rusia, India, China y Sudáfrica). Mediante un análisis de cointegración para el periodo 1992-2016, los autores encontraron una relación de largo plazo entre el crecimiento económico y

las emisiones de CO₂. El análisis de causalidad reveló la existencia de una relación bidireccional entre ambas variables.

Por otra parte, Pao y Tsai (2011), analizaron la dinámica entre las emisiones contaminantes, el consumo de energía y el producto de Brasil de 1980 al 2007. Por medio de un modelo de predicción de Grey (GM) encontraron que éstas tres variables tenían una relación de largo plazo. Las emisiones aparecían como una función inelástica tanto del consumo de energía como del producto. Detectaron que el consumo de energía era el determinante más importante de las emisiones. En lo referente a causalidad reportaron bidireccionalidad entre el ingreso, el consumo de energía y las emisiones. Sus recomendaciones apuntan a que Brasil tiene que adoptar una estrategia dual que incremente la inversión en energías limpias, así como en infraestructura que ayude a detener el desperdicio de energía mejorando la eficiencia de su uso.

En un estudio comparativo entre tres países asiáticos y Brasil, Alam, Murad, Noman y Ozturk (2016) verificaron el tipo de relación entre las variables de emisiones y producto, añadiendo el tamaño de la población del país. Los autores emplearon series de tiempo con datos anuales de 1970-2012. Estimaron un modelo de vectores autorregresivos con rezagos distribuidos (ARLD por sus siglas en inglés), en términos generales los resultados mostraron significancia estadística respecto a que aumentos en el ingreso y consumo de energía se corresponden con incrementos de CO₂. En lo que respecta a la relación entre las emisiones de CO₂ y el crecimiento de la población, hallaron significancia estadística para el caso de India y Brasil; pero no para el caso de China e Indonesia.

El estudio de Young-Jong, Chang y Seung-Hoon (2015) investigó la causalidad entre las variables de consumo de energía, emisiones de CO₂ y el crecimiento económico en Chile. Los autores utilizaron datos anuales desde 1965 hasta el 2010 para realizar pruebas econométricas de series de tiempo, así como una prueba de causalidad, la cual mostró que existía una relación unidireccional entre el consumo de energía y el crecimiento económico de las emisiones de CO₂ con el

crecimiento económico y del consumo de energía con las emisiones de CO₂. Sus resultados sugieren que el consumo de energía puede inducir el crecimiento económico, pero no a la inversa. Concluyen que Chile tiene un consumo dependiente de la energía del carbón por su rápido crecimiento económico, causando considerables emisiones de CO₂. Lo que sugiere que el país debería hacer esfuerzos por desarrollar tecnologías eficientes en el uso de energía, además de fuentes de energía renovable que ayuden a crecer de manera sostenible.

Para el caso colombiano Román, Cansino y Rodas (2018) utilizaron una metodología llamada “Análisis de descomposición de índices y/o método del índice de división medio logarítmico” (IDA-LMDI por sus siglas en inglés). El modelo fue desarrollado para encontrar la razón detrás de los cambios en las emisiones de CO₂ entre 1990 y el 2012. Sus resultados ayudan a entender el impacto de las medidas para mitigar las emisiones de CO₂. El análisis de descomposición cuenta con seis efectos que deben tomarse en cuenta: la carbonización, la sustitución de energías fósiles, la penetración de las energías renovables, la intensidad en el uso de la energía, la población y el ingreso. Los efectos del ingreso y la población aparecen como los principales responsables para el periodo analizado, de lo cual extraen como recomendación la necesidad de establecer políticas para mitigar las emisiones compatibles con el crecimiento económico.

Patiño, Padilla, Alcántara y Raymond (2020) estudiaron en Colombia la relación entre las emisiones de CO₂ y el gasto de energía con el PIB, las tres variables a nivel per cápita, para el periodo 1971-2017. Los autores estimaron dos modelos de ajuste parcial y encontraron que hay una disminución en las presiones ambientales durante algunos años; no obstante, sus resultados rechazan la hipótesis de la curva de Kuznets ambiental e indican que el crecimiento económico se relaciona con un aumento de estas presiones ambientales.

Para el caso de Perú, Raihan y Tuspekova (2022) evaluaron el impacto del crecimiento económico, el uso de energías renovables y la expansión de la tierra

dedicada al uso agrícola sobre las emisiones de CO₂. Los autores utilizaron datos de series de tiempo de 1990 al 2018 con las que estimaron un modelo ARLD. Los resultados arrojaron evidencia positiva y significativa del crecimiento económico sobre las emisiones de CO₂. Además, el uso de energías renovables parece reducir las emisiones de CO₂ en el largo plazo. El uso extensivo de tierra para cultivos agrícolas también tuvo un impacto en las emisiones de CO₂. El documento realiza recomendaciones de política para impulsar una economía que promueva el uso de energías renovables para asegurar la reducción de las emisiones y la sustentabilidad ambiental.

Alonso (2022), en un estudio para Perú probó el impacto del desarrollo del sistema financiero, el ingreso per cápita y el consumo de energía sobre las emisiones de CO₂. Mediante un modelo de vector de corrección de errores encontró una relación positiva entre el consumo de energía y las emisiones de CO₂; pero no halló significancia estadística que demostrara que el desarrollo del sistema financiero impactaba a la degradación ambiental.

En el caso mexicano Seung-Jae y Seung-Hoon (2016) investigaron la causalidad de corto y largo plazo entre el consumo de energía, las emisiones de CO₂ y el crecimiento económico, utilizando datos anuales de 1971 a 2017. Los autores emplearon pruebas de raíces unitarias, cointegración y causalidad de Granger. Los resultados indicaron la existencia de causalidad unidireccional entre el consumo de energía y las emisiones de CO₂ sobre el crecimiento económico, sin efectos de retroalimentación. Además, encontraron una causalidad bidireccional entre el consumo de energía y las emisiones de CO₂, lo que significa que un incremento en el consumo de energía afecta directamente las emisiones de CO₂ y además las emisiones de CO₂ estimulan el consumo de energía.

Otro estudio que analizó el caso mexicano y demostró la causalidad entre la actividad económica, la apertura comercial y las emisiones de CO₂ es el de Gómez y Rodríguez (2016). Los autores estudiaron el periodo 1971-2011, encontraron evidencia en el corto plazo de una causalidad unidireccional entre el PIB y el

cuadrado del PIB con las emisiones de CO₂, y entre el PIB y el cuadrado del PIB con la apertura comercial. Además de una causalidad bidireccional entre la apertura comercial y el PIB; los autores enfatizan que todas las variables tienen una causalidad unidireccional con las emisiones de CO₂ a largo plazo. A partir de su investigación sugieren que una reducción en el consumo de energía, de la actividad económica o un incremento de la apertura comercial podrían ayudar a reducir la contaminación.

Finalmente, Salazar-Nuñez, Venegas-Martínez y Lozano-Diez (2022) estudiaron las relaciones de corto y largo plazo entre el consumo de energías renovables y energías no renovables, el crecimiento económico y las emisiones de CO₂ en México para el periodo 1973-2018. Los autores demuestran con un modelo de cointegración ampliamente modificado de mínimos cuadrados ordinarios (FMOLS por sus siglas en inglés) las posibles asociaciones entre las variables. Además, aplicaron un modelo de causalidad de Granger para verificar empíricamente la hipótesis de Kuznets. Sus resultados apuntan que las emisiones de CO₂ en el corto y largo plazo están altamente influenciadas por el crecimiento económico. Los rezagos del PIB y los rezagos del consumo de energías no renovables influyen en el sentido de Granger a las emisiones de CO₂. Por lo que concluyen que las políticas deberían enfocarse en el uso de energías renovables para los sectores de transporte, manufacturas y construcción.

III. Datos y método

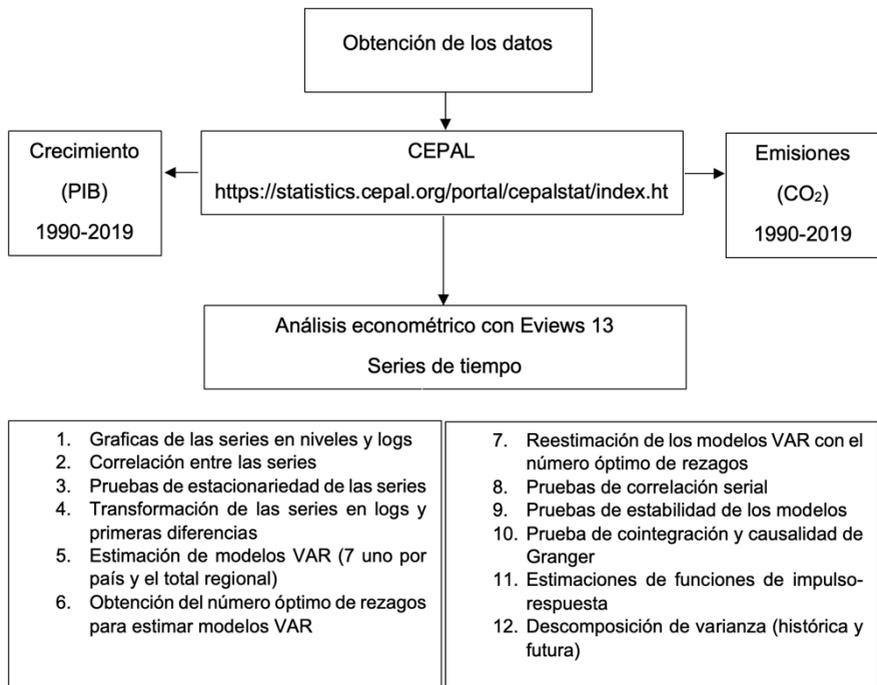
La presente investigación se realizó con dos variables anuales, por un lado, una serie de CO₂ en miles de toneladas y por el otro una serie de PIB real en millones de dólares. Los datos se obtuvieron de la CEPAL para el periodo 1990-2019. Se trabajó con datos de Argentina, Brasil, Colombia, Chile, México, Perú y el total de la muestra. Se eligieron estos países por ser aquellos con los que se contaba con información completa para el periodo y ser los más importantes de la región

objeto de estudio (además se decidió dejar fuera el periodo de la pandemia para interpretar mejor los resultados).

En cuanto a procedimiento metodológico primero se graficaron las series en sus niveles para observar su comportamiento y tendencia, enseguida se verificó que conforme a la hipótesis de trabajo existiera correlación positiva entre las variables y esta fuera estadísticamente significativa. Ahora bien, para analizar la causalidad y realizar un análisis de descomposición de varianza en primer lugar se verificó que las series fueran estacionarias, para ello se utilizó la prueba ADF (Dickey-Fuller Aumentada), esto permitió descubrir que en niveles no eran estacionarias, pero sí en primeras diferencias, en consecuencia, la estimación de los modelos VAR se hizo con los logaritmos de las variables en primeras diferencias.

Los modelos VAR se estimaron usando el número de rezagos indicado por los criterios de información AIC (Akaike), SC (Schwarz) y HQ(Hannan-Quinn). Una vez estimados los VAR se procedió a verificar que no existiera un problema de correlación serial en los residuos y que los modelos fueron estables mediante la raíz inversa del polinomio característico autorregresivo. Garantizada la calidad de los modelos, se verificó la cointegración y causalidad en el sentido de Granger, se estimaron las funciones de impulso-respuesta y se terminó con un ejercicio de descomposición de varianza histórica y futura (con un choque de 10 años) para verificar si las variaciones en el PIB son responsables (y en qué medida) de las variaciones en las emisiones de CO₂. Todas las operaciones se realizaron con Eviews 13 (ver Figura 1).

Figura 1. Procedimiento metodológico



Fuente: Elaboración propia

IV. CO₂ y crecimiento económico en América Latina

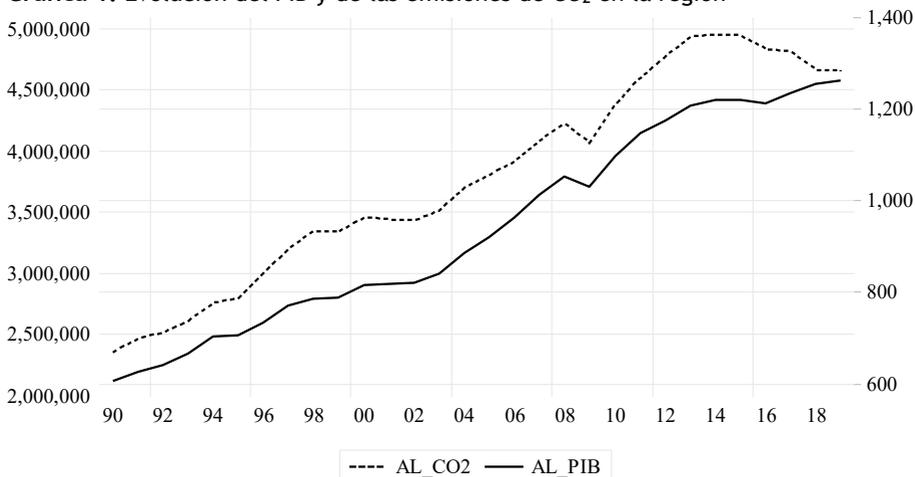
Como se puede apreciar en la Tabla 1 existe una correspondencia positiva entre el país con mayor PIB y número de emisiones de CO₂, entre el país con menor PIB y número de emisiones de CO₂. El país que más contamina es Brasil, seguido de México, Argentina, Colombia, Chile y Perú, este orden de países se mantiene si se usa el criterio del PIB. Como se puede apreciar en la Gráfica 1 existe una alta correlación entre las series que son objeto de investigación, los puntos máximo y mínimo coinciden. Aunque también debe reconocerse que existen momentos en los cuales las series siguen una relación inversa, como fue del 2016 al 2019.

Tabla 1. Estadísticas básicas de las series regionales.

	Argentina		Brasil		Colombia		Chile		México		Perú		AL	
	PIB	CO ₂	PIB	CO ₂	PIB	CO ₂	PIB	CO ₂	PIB	CO ₂	PIB	CO ₂	PIB	CO ₂
Media	42,4062	145	1,497,753	342	219,231	63	188,938	59	909,763	402	129,594	36	3,369,343	1,049
Mediana	395,117	143	1,441,986	330	196,894	59	182,801	55	906,190	423	110,667	31	3,227,660	1,040
Máximo	557,960	185	1,999,881	511	344,753	82	298,181	91	1,222,297	486	227,521	56	4,570,473	1,362
Mínimo	246,388	100	988,407	197	128,961	48	78,272	29	609,308	269	62,623	20	2,113,959	667
Desviación est.	101,002	28	354,701	92	68,459	9	69,043	19	186,860	69	53,947	12	823,366	225
Jarque-Bera	2.67	2.72	2.87	1.44	2.81	3.11	20.3	1.65	1.49	3.01	2.89	3.24	2.59	2.02
Probabilidad	0.26	0.25	0.23	0.48	0.24	0.21	0.36	0.43	0.47	0.22	0.23	0.19	0.27	0.36
Observaciones	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30

* PIB en millones de dólares reales y CO₂ en miles de toneladas. AL: América Latina (muestra total)
Fuente: elaboración propia.

Dado que se realizaron estimaciones econométricas con las series, destaca de la Tabla 1 que éstas son normales, lo que garantiza parte de la calidad de estas. En cuanto a la volatilidad de las series del PIB se observa que la que tuvo la mayor desviación estándar fue Brasil y la menor Perú. En el caso de CO₂ la de mayor volatilidad fue Brasil y la menor Colombia. En la Gráfica 1 se observa que la tendencia tanto de emisiones de CO₂ como de PIB es creciente con caídas en los noventa, principios de los dos mil, 2008-2009 y 2015. La tasa media anual de crecimiento de emisiones de CO₂ durante el periodo de estudio fue de 2.19%, mientras que la del PIB 2.60%, lo que revela la alta sincronía entre las series.

Gráfica 1. Evolución del PIB y de las emisiones de CO₂ en la región

AL: América Latina (muestra total)
Fuente: elaboración propia.

A nivel de país el crecimiento promedio anual del PIB y CO₂ respectivamente fue el siguiente: Argentina (2.6, 1.74%), Brasil (2.29, 2.65%), Colombia (3.33, 1.71%), Chile (4.56, 3.72%), México (2.34, 1.72%) y Perú (4.39, 3.39%). Observe que en dos de los tres países de alto crecimiento del PIB se registró también un alto crecimiento de las emisiones de CO₂. La Tabla 2 presenta los coeficientes de correlación entre las series, el más elevado se registró en Argentina y el menor en Chile, para toda América Latina existió una elevada correlación positiva, finalmente anotar que todos estos coeficientes resultaron estadísticamente significativos. Lo que se tiene hasta aquí es evidencia de la relación que existe entre el crecimiento económico y las emisiones, en la siguiente sección se presenta evidencia de la relación de causalidad para cumplir con el objetivo propuesto en la investigación.

Tabla 2. Coeficientes de correlación y significancia estadística

	Correlación		
	PIB vs CO₂	t-estadístico	Prob.
Argentina	0.83	7.78	0.000
Brasil	0.67	4.75	0.000
Colombia	0.64	4.43	0.000
Chile	0.34	1.91	0.066
México	0.71	5.11	0.000
Perú	0.34	1.93	0.063
AL	0.98	33.3	0.000

AL: América Latina (muestra total)

Fuente: elaboración propia.

V. Relación econométrica entre las emisiones de CO₂ y el PIB

En la Tabla 3 se presentan las pruebas de estacionariedad en las series, se confirma que las series tienen raíz unitaria en niveles, pero son estacionarias en primeras diferencias, en consecuencia, la estimación de los modelos VAR se realizó con los logaritmos y primeras diferencias del PIB y CO₂ (esto se corresponde con el cálculo de tasas de crecimiento, ver anexo 1).

Tabla 3. Pruebas de estacionariedad de las series (ADF)

	PIB				CO₂			
	Niveles		Difs.		Niveles		Difs.	
	t-estadístico	Prob.	t-estadístico	Prob.	t-estadístico	Prob.	t-estadístico	Prob.
Argentina	-1.48	0.528	-4.29	0.002	-1.47	0.531	-3.88	0.006
Brasil	-0.68	0.834	-3.57	0.013	-1.27	0.635	-4.23	0.002
Colombia	0.88	0.99	-2.81	0.068	-0.67	0.849	-5.84	0.000
Chile	-0.26	0.918	-4.19	0.002	-0.17	0.931	-5.30	0.000
México	-0.21	0.926	-5.60	0.000	-2.28	0.182	-5.26	0.000
Perú	2.66	1.000	-3.44	0.017	0.425	0.986	-4.48	0.001
AL	-0.45	0.886	-4.58	0.001	-1.73	0.403	-3.90	0.005

ADF (Dickey-Fuller Aumentada)

AL: América Latina (muestra total)

Fuente: elaboración propia.

Toda vez que se sabía que las series a utilizar debían estar en primeras diferencias se estimaron los VAR, posterior a ello se determinó el número óptimo de rezagos a considerar. En el caso de toda la muestra (AL) se trabajó con un rezago de acuerdo con el criterio de información AIC (Akaike). En el caso de Argentina un

rezago. Brasil dos rezagos. Colombia un rezago. Chile un rezago. México un rezago y Perú un rezago. Se reestimaron los VAR con los rezagos indicados. Para saber si estos VAR eran adecuados para realizar el análisis de causalidad y de descomposición de varianza se realizaron dos pruebas, la primera de correlación serial y la segunda de estabilidad, los resultados aparecen en la Tabla 5, se demuestra que los siete VAR estimados cumplen satisfactoriamente con la ausencia de correlación y resultaron estables.

Tabla 4. Pruebas de correlación serial y estabilidad de los VARs

VAR	H0: Ausencia de correlación serial		Raíces del polinomio característico
	Rao F-estadístico	Probabilidad	
PIB Arg vs CO₂ Arg	0.221	0.924	No
PIB Bra vs CO₂ Bra	0.954	0.443	No
PIB Col vs CO₂ Col	0.592	0.714	No
PIB Chi vs CO₂ Chi	0.621	0.649	No
PIB Mex vs CO₂ Mex	1.529	0.210	No
PIB Per vs CO₂ Per	0.389	0.814	No
PIB AL vs CO₂ AL	0.884	0.480	No

* En el caso de la prueba de correlación serial se hizo con 4 rezagos, solo se reporta el último.

No: Ninguna raíz se encontró fuera del círculo unitario.

AL: América Latina (muestra total)

Fuente: Elaboración propia

Se realizaron las siete pruebas de causalidad, para la muestra total no se identificó alguna relación entre las variables, lo mismo ocurrió en Argentina y México. En Brasil y Colombia todo parece indicar que las emisiones tienen una relación unidireccional con el PIB, lo que significa que es probable que las emisiones sean un determinante del crecimiento económico. Ahora bien, en Chile y en Perú la causalidad va del PIB al CO₂, lo que confirma la hipótesis de investigación parcialmente y permite asumir que la mayor contaminación proviene de la actividad humana para la generación de productos para nuestro consumo, lo que tiene implicaciones fundamentales en términos de lo que puede hacerse para contrarrestar la creciente contaminación (ver Tabla 5, para ver las pruebas de cointegración revisar anexo 2).

Tabla 5. Pruebas de causalidad de Granger

	Causalidad	Chi-cuadrada	Probabilidad
Argentina	PIB → CO ₂	0.09	0.761
	CO ₂ → PIB	0.82	0.364
Brasil	PIB → CO ₂	2.41	0.298
	CO ₂ → PIB	5.46	0.065
Colombia	PIB → CO ₂	1.97	0.159
	CO ₂ → PIB	3.40	0.065
Chile	PIB → CO ₂	5.45	0.019
	CO ₂ → PIB	0.00	0.923
México	PIB → CO ₂	0.12	0.720
	CO ₂ → PIB	0.37	0.540
Perú	PIB → CO ₂	2.88	0.089
	CO ₂ → PIB	0.274	0.600
AL	PIB → CO ₂	0.39	0.527
	CO ₂ → PIB	0.00	0.966

* La hipótesis nula es que la variable del lado izquierdo no es causa Granger de la del lado derecho.

AL: América Latina (muestra total)

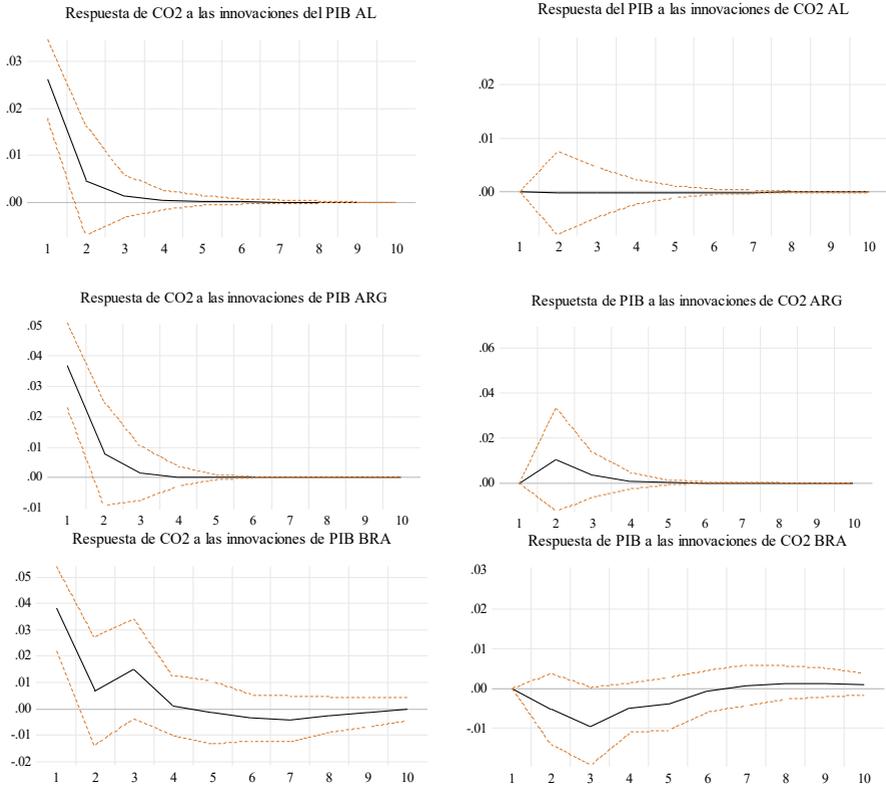
Fuente: elaboración propia.

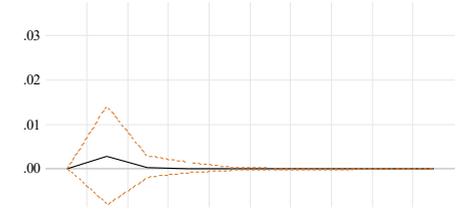
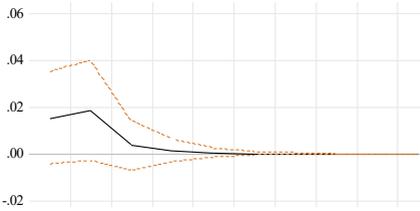
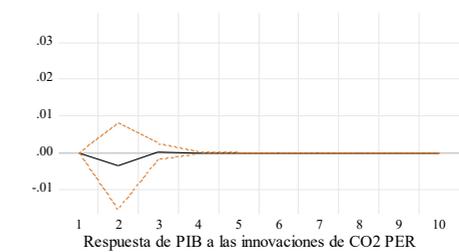
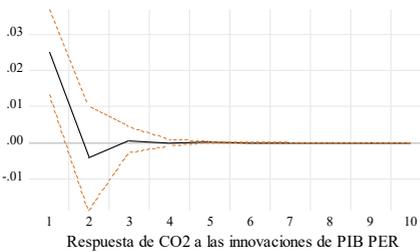
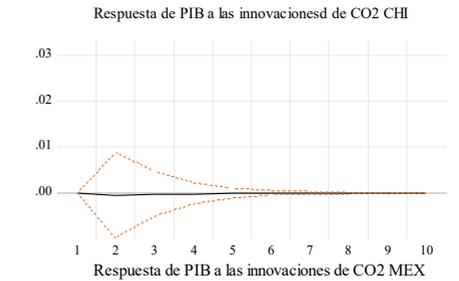
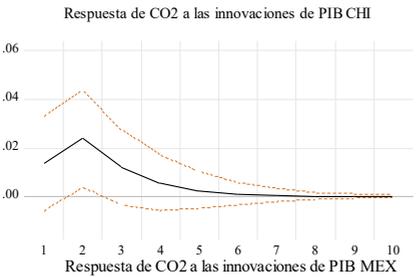
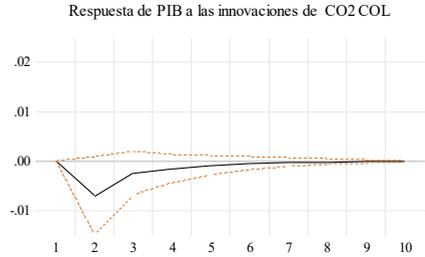
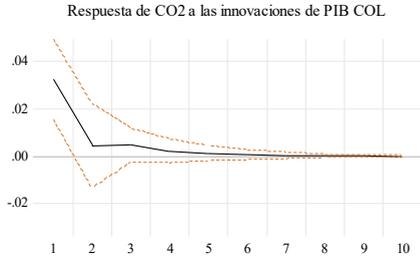
En aras de verificar con mayor detalle la relación de largo plazo entre las variables se estimaron las funciones de impulso-respuesta. En el caso de la muestra total y Argentina se encontró que la respuesta del CO₂ a las innovaciones del PIB eran positivas y se presentaban en los tres primeros años para luego desvanecerse. En Brasil las innovaciones positivas se observaron hasta el cuarto año, mientras que entre el sexto y octavo año se tornaron negativas. En este mismo país las respuestas del PIB a las innovaciones de CO₂ fueron negativas en los cinco primeros años del choque simulado. En el caso colombiano la respuesta del CO₂ a las innovaciones del PIB fueron positivas los primeros cuatro años para luego desvanecerse y de forma similar a Brasil las respuestas del PIB a las innovaciones de CO₂ fueron negativas los primeros cinco años. En Chile hasta el sexto año la respuesta de las innovaciones del CO₂ respecto al PIB fueron positivas. En el caso de México como se adelanta por la prueba de causalidad, las innovaciones tanto en un sentido como en otro son despreciables. Finalmente, en Perú hasta el

cuarto año la respuesta de las innovaciones del CO₂ respecto del PIB fueron positivas, mientras que la respuesta de las innovaciones del PIB respecto al CO₂ fueron positivas solo hasta el segundo año (ver Gráficas 2).

Gráficas 2. Funciones de impulso-respuesta PIB y CO₂

Respuesta Cholesky a las innovaciones una D.S.
± 2 asintótico analítico E.S.s





AL: América Latina (muestra total), ARG: Argentina, BRA: Brasil, COL: Colombia, CHI: Chile, MEX: México, PER: Perú.
Fuente: elaboración propia.

Con los modelos VAR se estimó la forma en la que tras un choque de diez años reaccionaba la varianza del CO₂ respecto del PIB. Como se puede ver en la Tabla 6 se encontró para la muestra total en promedio 78% de la varianza de las emisiones es explicada por el crecimiento económico, lo que ofrece evidencia para respaldar

la hipótesis de investigación, lo que además confirma buena parte de la revisión de la literatura. En los casos de Colombia, Chile y Perú fue donde se observó una asociación débil del CO₂ con el PIB. En los tres países más grandes de la región: Argentina, Brasil y México la varianza del CO₂ parece responder de forma importante en el crecimiento económico. Como evidencia adicional de la importancia que tienen las variaciones del PIB sobre la varianza de las emisiones de CO₂, en el anexo 3 se presenta una técnica conocida como descomposición histórica de varianza, la cual confirma que durante el periodo para el cual se tuvo información el crecimiento económico puede confirmarse parcialmente como un determinante de la contaminación medida a través de las emisiones de CO₂.

Tabla 6. Descomposición de varianza del CO₂ ante cambios en el PIB (10 años)

	Años	Varianza		Varianza		Varianza		Varianza
Argentina	1	67.16	Brasil	58.35	Colombia	41.61	Chile	7.00
	2	65.75		59.07		39.18		23.16
	3	65.66		62.32		39.66		26.40
	4	65.65		61.54		39.72		27.08
	5	65.65		60.40		39.74		27.23
	6	65.65		60.22		39.75		27.26
	7	65.65		60.31		39.75		27.26
	8	65.65		60.39		39.75		27.26
	9	65.65		60.40		39.75		27.27
	10	65.65		60.37		39.75		27.27
México	1	48.67	Perú	8.22	AL	82.19		
	2	49.37		17.78		79.61		
	3	49.38		18.09		78.98		
	4	49.38		18.13		78.84		
	5	49.38		18.14		78.80		
	6	49.38		18.14		78.80		
	7	49.38		18.14		78.79		
	8	49.38		18.14		78.79		
	9	49.38		18.14		78.79		
	10	49.38		18.14		78.79		

AL: América Latina (muestra total)

Fuente: elaboración propia.

VI. Conclusiones

Esta investigación se construyó sobre la base de la siguiente pregunta: ¿las emisiones de CO₂ son explicadas por las variaciones del PIB en la región de América Latina? Tras revisar la literatura y aplicar técnicas econométricas de series de tiempo se puede responder que efectivamente para toda la muestra existe evidencia parcial en el sentido de que la contaminación ambiental, aproximada por las emisiones de CO₂, es explicada por la actividad humana, en particular por las variaciones de la producción. No obstante, existen diferencias respecto a esto por país, se logró probar causalidad de Granger unidireccional en los casos de Chile y Perú, pero no fue así para el resto de los países. En el caso de la descomposición de varianza en los tres países más grandes de la región tras simular choques a diez años, los cambios en las emisiones de CO₂ se explican en un porcentaje alto por el crecimiento económico. Por lo que en conclusión existe evidencia favorable para la hipótesis de investigación propuesta, pero no es tan contundente como inicialmente se anticipaba.

Debe entenderse que las emisiones de gases de efecto invernadero, incluido el CO₂, son un problema ambiental global que requiere acción inmediata. En el caso específico de América Latina hay varias medidas que se pueden implementar para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y proteger el ambiente. Aquí están algunas:

Energías renovables: Una de las medidas más efectivas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero es aumentar el uso de las energías renovables, como la energía solar, eólica e hidroeléctrica. Estas fuentes de energía son sostenibles y no emiten gases de efecto invernadero.

Eficiencia energética: Mejorar la eficiencia energética es otro medio efectivo para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto incluye la implementación de tecnologías más innovadoras en la producción de energía y en el uso de esta en hogares, edificios e industrias.

Transporte sostenible: El sector de transporte es uno de los principales contribuyentes a las emisiones de gases de efecto invernadero. Para abordar este problema, es necesario fomentar el uso de vehículos eléctricos y de transporte público sostenible, así como mejorar la eficiencia energética de los vehículos a combustión interna.

Agricultura sostenible: La agricultura también puede contribuir a las emisiones de gases de efecto invernadero. Al implementar prácticas agrícolas sostenibles, como la agricultura de conservación, se puede reducir la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos por la industria agrícola.

Cambios en los patrones de consumo: Finalmente, es importante abordar los patrones de consumo que contribuyen a las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto incluye la promoción de un estilo de vida sostenible, como la adopción de dietas vegetarianas y la reducción del uso de productos de plástico desechables.

A estas medidas debe agregarse el establecer una economía circular para comprometerse con el reciclaje, reutilización, reducción y reparación de los bienes, como se ha intentado probar en esta investigación, todo parece indicar que el crecimiento económico debe reducirse, lo que significa crecer solo de forma sostenible y esto puede lograrse transitando de una economía lineal a una economía circular. Tareas en las que es fundamental la participación de los gobiernos, la industria y la sociedad en general.

VII. Referencias

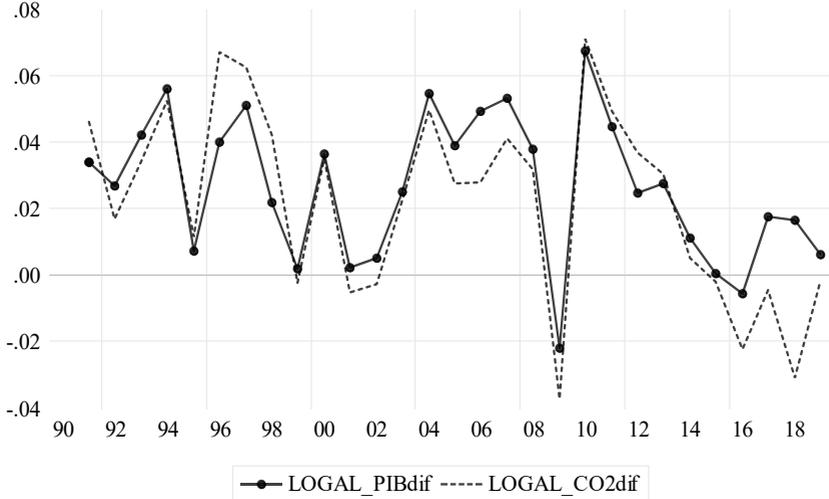
- Acheampong, A. O. (2018). Economic growth, CO₂ emissions and energy consumption: What causes what and where? *Energy Economics*, 74 (August), 677-692. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.07.022>
- Alam, M., Murad, W., Noman, A. H., & Ozturk, I. (2016). Relationships among carbon emissions, economic growth, energy consumption and population growth: Testing environmental Kuznets curve hypothesis for Brazil, China, India and Indonesia. *Ecological Indicators*, 70, 466-479. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.06.043>
- Alonso, F. (2022). El impacto del consumo de energía, el desarrollo del sistema financiero y el ingreso sobre las emisiones de CO₂ en el Perú. *Desafíos: Economía y Empresa*, (002), 55-65. <https://doi.org/10.26439/ddee2022.n002.5720>
- Apergis, N & Payne, J. E. (2009). CO₂ emissions, energy usage, and output in Central America. *Energy Policy*, 37 (8), 3282-3286. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.03.048>
- Balsalobre-Lorente, D; Shahbaz, M.; Roubaud, D.; & Farhani, S. (2018). How economic growth, renewable electricity and natural resources contribute to CO₂ emissions? *Energy Policy*, 113 (February), 356-367. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.050>
- Blanco, L; González, F. & Ruiz, I. (2013). The impact of FDI on CO₂ emissions in Latin America. *Oxford Development Studies*, 41 (1), 104-121. <https://doi.org/10.1080/13600818.2012.732055>
- de Souza, E. S., Freire, F. D. & Pires, J. (2018). Determinants of CO₂ emissions in the MERCOSUR: the role of economic growth, and renewable and non-renewable energy. *Environ Science and Pollution Research*, 25, 20769-20781. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2231-8>
- Gómez, M. y Rodríguez, J. C. (2016). Analysis of causality between economic growth and carbon emissions: The case of Mexico 1971-2011. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 10 (12), 1086-1091. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1128099>

- Gorus, M.S. & Aydin, M. (2019). The relationship between energy consumption, economic growth, and CO2 emission in MENA countries: Causality analysis in the frequency domain. *Energy*, 169 (February), 815-822. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.139>
- Imori, D. y Guilhoto, J. (2008). How the CO2 emissions are related with the Brazilian productive structure. En *WRSAL Regional Science Association International, Sao Paulo*. (pp. 25), São Paulo. Regional Science Association International
<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2408058>
- Pao, H, & Tsai, C. (2011). Modeling and forecasting the CO2 emissions, energy consumption, and economic growth in Brazil. *Energy*, 36 (5), 2450-2458 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.01.032>
- Patiño, I. L., Padilla, E., Alcántara, V. y Raymond, J. L. (2020). The relationship of energy and CO2 emissions with GDP per capita in Colombia. *Atmosphere*, 11(8), 778. <https://doi.org/10.3390/atmos11080778>
- Raihan, A. & Tuspekova, A. (2022). The nexus between economic growth, renewable energy use, agricultural land expansion, and carbon emissions: New insights from Peru. *Energy Nexus*. 6, (100067). <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100067>
- Román-Collado, R. & Morales-Carrión, A. V. (2018). Towards a sustainable growth in Latin America: A multiregional spatial decomposition analysis of the driving forces behind CO2 emissions changes. *Energy Policy*, 114 (April), 273-280. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.01.019>
- Román, R., Cansino, J. M., & Rodas, J. A. (2018). Analysis of the main drivers of CO2 emissions changes in Colombia (1990-2012) and its political implication. *Renewable Energy*, 116 (Part A), 402-411. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.016>
- Salazar-Nuñez, H., Venegas-Martínez, F. y Lozano-Diez, J. A. (2022). Assessing the interdependence among renewable and non-renewable energies, economic growth, and CO2 emissions in Mexico. *Environment, Development and Sustainability*, 24,12850-12866. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01968-y>

- Seri, C. & de Juan Fernández, A. (2022). CO2 emissions and income growth in Latin America: long-term patterns and determinants. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02211-y>
- Seung-Jae, L., & Seung-Hoon, Y. (2016). Energy consumption, CO2 emission, and economic growth: Evidence from Mexico. *Energy Source, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 11 (8), 711-717. <https://doi.org/10.1080/15567249.2012.726695>
- Seyfettin, E, Durmuş, Ç., & Ayfer, G. (2019). Investigation of causality analysis between economic growth and CO2 emissions: The case of BRICS-T countries. *International Journal of Energy Economics and Policy*. 9 (6), 430-438. <https://doi.org/10.32479/ijeep.8546>
- Young-Jong, J., Chang S., & Seung-Hoon Y. (2015). Energy consumption, CO2 emission, and economic growth: Evidence from Chile. *International Journal of Green Energy*. 12 (5), 543-550. <https://doi.org/10.1080/15435075.2013.834822>
- Yuping, L., Ramzan, M, Xincheng, L., Murshed, M., Ayobamiji, A., & Sunday, T. (2021). Determinants of carbon emissions in Argentina: The roles of renewable energy consumption and globalization. *Energy Reports*, 7 (November), 4747-4760. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.07.065>

VIII. Anexos

Anexo 1. Relación entre el PIB y CO₂ regional en logaritmos y primeras diferencias



Fuente: elaboración propia.

Anexo 2. Pruebas de cointegración de las series en logaritmos y primeras diferencias.

		Est.-z	Probabilidad
AL	PIB	-17.96	0.0349
	CO ₂	-14.44	0.0982
Argentina	PIB	-25.14	0.0026
	CO ₂	-25.79	0.0020
Brasil	PIB	-15.32	0.0770
	CO ₂	-11.59	0.2011
Colombia	PIB	-14.93	0.0860
	CO ₂	-30.44	0.0002
Chile	PIB	-18.85	0.0261
	CO ₂	-26.57	0.0014
México	PIB	-26.79	0.0013
	CO ₂	-25.55	0.0022
Perú	PIB	-25.71	0.0020
	CO ₂	-30.11	0.0003

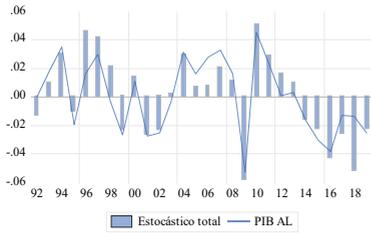
Salvo el caso marcado en negritas en todos se rechaza la hipótesis nula.

* La hipótesis nula es que las series no están cointegradas.

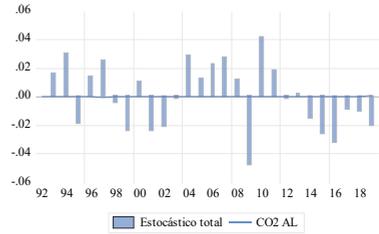
Fuente: elaboración propia.

Anexo 3. Descomposición histórica usando los ponderadores de Cholesky

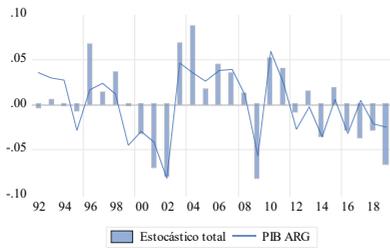
Choques del CO₂ a partir del PIB AL



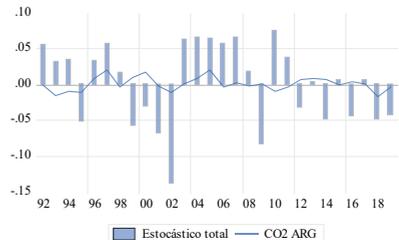
Choques del PIB a partir de CO₂ AL



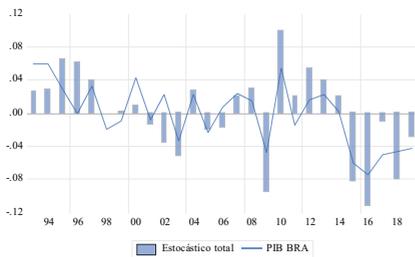
Choques del CO₂ a partir del PIB ARG



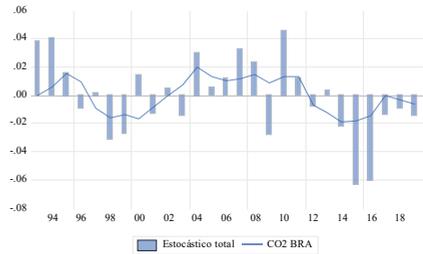
Choques del PIB a partir del CO₂ ARG



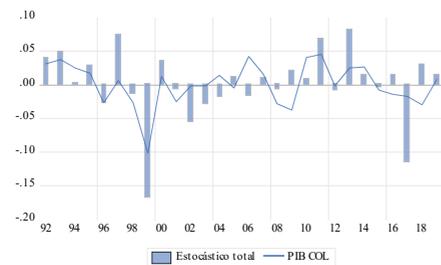
Choques del CO₂ a partir del PIB BRA



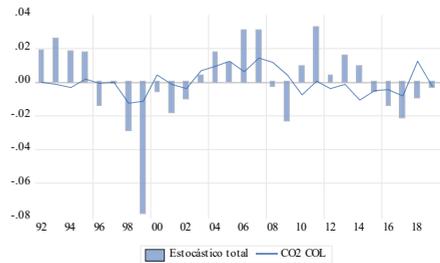
Choques del PIB a partir del CO₂ BRA

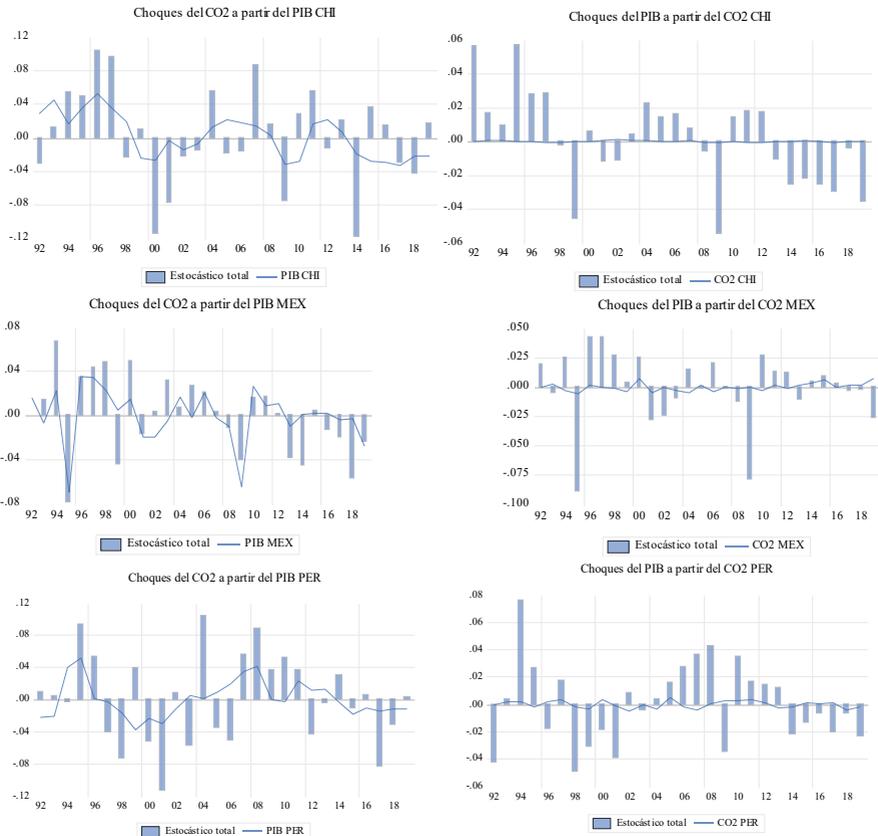


Choques del CO₂ a partir del PIB COL



Choques del PIB a partir del CO₂ COL





AL: América Latina (muestra total), ARG: Argentina, BRA: Brasil, COL: Colombia, CHI: Chile, MEX: México, PER: Perú.
Fuente: elaboración propia.