

EVIDENCIA DE LA CURVA MEDIOAMBIENTAL DE KUZNETS SEGÚN ETAPA DEL DESARROLLO

EVIDENCE OF THE ENVIRONMENTAL KUZNETS CURVE ACCORDING TO STAGE OF DEVELOPMENT

Alejandro Astudillo Jiménez *

Javier Aburto **

Felipe Barahona ***

Joaquín Pizarro ****

RESUMEN

En 1995 Grossman y Krueger plantearon que la relación entre crecimiento económico y emisión de contaminantes de los países tiene forma de U invertida a la Kuznets. Al analizar su validez en un grupo de países diferenciados por su etapa de desarrollo, se encuentra evidencia que valida sus postulados generales, pero se agrega un nuevo patrón de comportamiento relativo a la presencia de una curva de tipo escalonada ascendente, con una relación directa entre crecimiento económico y emisión de contaminantes, con acotados períodos de disminución o estabilización en ciertos umbrales de desarrollo, situación que se encuentra en la misma línea desarrollos teóricos e investigaciones empíricas recientes.

Palabras claves: curva de Kuznets, emisión de contaminantes, crecimiento económico.

ABSTRACT

In 1995, Grossman y Krueger proposed that economic growth and emission of pollutants of the countries have relationship in form of inverted U to the Kuznets. When analyzing his validity in a group of countries differentiated by their stage of development, we found evidence that validates its general postulates, but a new pattern of his behavior is added relative to the presence of a “stepped ascending” type of curve between economic growth and emission of pollutants, with limited periods of decrease or stabilization at some stage of development, at the same way that the recent theory and empirical investigation research.

Key words: Kuznets curve, pollutant emissions, economic growth.

JEL code: Q56, Q57, C53

Fecha de recepción 05 de Agosto 2022

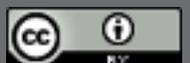
Fecha de aceptación 20 de Septiembre de 2022

* Ingeniero en Comercio Internacional, Universidad Tecnológica Metropolitana, Santiago de Chile, Magíster en Economía Financiera, Universidad de Santiago de Chile, Santiago de Chile. Filiación institucional: Instituto Nacional de Estadísticas, INE, Santiago de Chile. Correo electrónico: alejandro.astudillo@utem.cl. Orcid:<https://orcid.org/0000-0001-8228-4681>

**Licenciado en Ciencias de la Administración de Empresas, Universidad Tecnológica Metropolitana, Santiago de Chile. Filiación institucional: Universidad Tecnológica Metropolitana, UTEM. Santiago de Chile. Correo electrónico: javier.aburtoc@utem.cl.

*** Licenciado en Ciencias de la Administración de Empresas, Universidad Tecnológica Metropolitana, Santiago de Chile. Filiación institucional: Universidad Tecnológica Metropolitana, UTEM. Santiago de Chile. Correo electrónico: felipe.barahorag@utem.cl.

**** Licenciado en Ciencias de la Administración de Empresas, Universidad Tecnológica Metropolitana, Santiago de Chile. Filiación institucional: Universidad Tecnológica Metropolitana, UTEM. Santiago de Chile. Correo electrónico: joaquin.pizarro@utem.cl.



INTRODUCCIÓN

El crecimiento económico de los países es considerado como la condición basal para la mejora de los niveles de vida de la población; sin embargo, el aumento en el bienestar de las personas se encuentra relacionado con un mayor consumo de energía, lo que impacta de forma directa en los niveles de emisión de contaminantes y el calentamiento global (Halliru; Loganathan, Golam, Mardani y Kamyab, 2020; Waqih; Bhutto, Ghumro y Salam, 2019). De la misma forma, el aumento de la población en los centros urbanos ha contribuido a la degradación del medioambiente y la diversidad de los ecosistemas, situación que agrava aún más el deterioro medioambiental (Pontarollo y Mendieta, 2020).

Como una forma de explicar la relación existente entre la evolución del crecimiento económico y la emisión de contaminantes, Grossman y Krueger (1995) proponen la existencia de una relación en forma de U invertida entre ambas variables, la cual denominaron la Curva Medioambiental de Kuznets (CMK). Múltiples autores han realizado estudios y validaciones empíricas de las propuestas realizadas por Grossman y Krueger, cuyos resultados pueden ser agrupadas en tres líneas. En la primera ellas, se encuentran aquellas investigaciones que dan cuenta de una relación directa entre el crecimiento económico y los niveles de contaminación, en donde el daño medioambiental o emisión de material particulado se ve aumentado conforme la actividad económica del país sube (Pablo-Romero y De Jesús, 2016; Zambrano; Silva, Dávalos, Zambrano y Ruano, 2018). La segunda línea, sugiere que los países presentan una disminución en las emisiones de contaminantes una vez alcanzado un cierto umbral de producto interno bruto (Lawson; Martino y Nguyen-Van, 2020). En la tercera línea de desarrollo, las investigaciones han dado cuenta que los países presentan un comportamiento errático en la emisión de contaminantes, en donde, posterior a un descenso en las emisiones, se evidencia un repunte de ellas a consecuencia del aumento del producto interno bruto.

Una de las posibles explicaciones a las diferencias encontradas en las investigaciones relativas a la presencia de la CMK en los países, radica en su estado de desarrollo, evidenciándose de mejor forma en países que cuentan con un mayor desarrollo económico, quienes a su vez tienen una mejor recopilación de datos estadísticos y legislaciones más estrictas en relación con el cuidado del medioambiente, situación que incluso mejora las desigualdades económicas al interior del país (Filippidis; Tzouvanas y Chatziantoniou, 2021). Por su parte, los países subdesarrollados tienen a su haber factores políticos, sociales y legislativos que impide generar una interrelación entre crecimiento económico y cuidado por el entorno, lo que sumado a que su principal industria suele ser de carácter extractiva (Badeeb; Lean y Shahbaz, 2020), aumenta las dificultades para determinar la presencia de la CMK en su economía.

Considerando estos antecedentes, la presente investigación busca determinar, a través de un modelo de datos de panel, en donde se analizan variables relativas al consumo de combustibles fósiles, densidad urbana y su relación con el comportamiento del crecimiento económico, si el estado del desarrollo de las economías, medida a través del PIB per cápita, explica las diferencias en determinar la existencia de la CMK en los países. Para ello en el segundo apartado, aborda la literatura teórica y empírica relativa a la Curva Medioambiental de Kuznets. En el tercer numeral se desarrolla el modelo econométrico con el cual se efectúa el análisis de los datos, para luego pasar al cuarto apartado en donde se exponen los resultados obtenidos, finalizando con el capítulo 5, donde se abordan las conclusiones que se emanan de la investigación.

LITERATURA TEÓRICA Y LA EVIDENCIA EMPÍRICA

John Stuart Mill, en su libro *Principios de Economía Política* (1848), establece el primer desarrollo formal en la

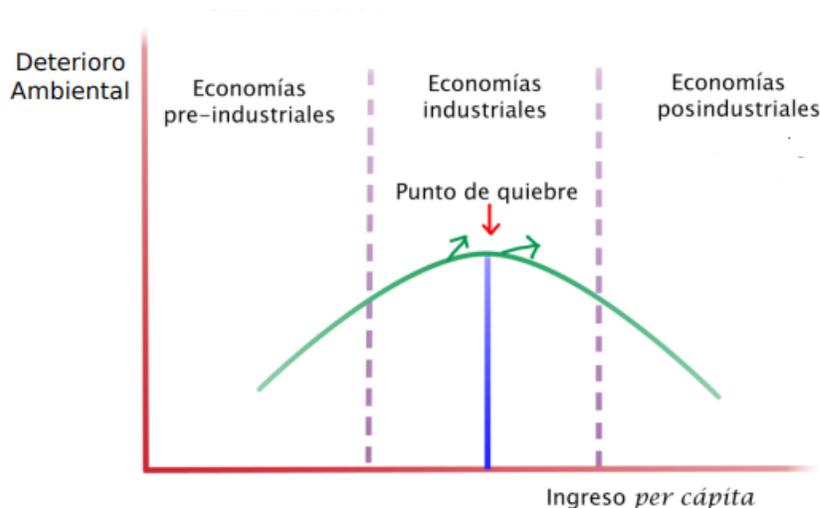
relación entre el crecimiento económico y su influencia sobre el medioambiente. En esta obra, Mill sostiene que el crecimiento no es posible de ser mantenido de forma infinita en el tiempo sin generar externalidades negativas, llegando incluso a un punto en donde los costos medioambientales y sociales superan a la rentabilidad económica obtenida por el crecimiento. En función de esto, desarrolla el concepto de *estado estacionario* en donde el crecimiento conduce a un estado de estancamiento en el crecimiento económico y del capital, no afectando necesariamente las condiciones de vida de la población (González, 2004).

En 1890 Alfred Marshall establece el concepto de *externalidad*, haciendo referencia al beneficio o perjuicio que recibe un agente económico como consecuencia de la producción o consumo de un segundo agente económico. Arthur Cecil Pigou extiende el término de externalidad en sus publicaciones: *Riqueza y Bienestar* y *La Economía del Bienestar*, en los años 1912 y 1920, haciendo énfasis en el rol que debe cumplir el Estado en regular los mercados, con el fin de evitar que las externalidades de la actividad económica afecten las condiciones de vida de las personas, proponiendo en este sentido el uso de los impuestos y subsidios para encausar de la mejor forma posible los fallos del mercado (Yáñez, 2017). Coase (1960), además sostiene que el Estado debe garantizar los derechos de propiedad de ambas partes, de modo que a través del mutuo acuerdo entre las partes involucradas, el mercado irá en la búsqueda del óptimo social, negociando indemnizaciones, cese de producción o incluso su reubicación, teniendo ambas partes beneficios al final del proceso. Daly (1974), aborda nuevamente el concepto del estado estacionario haciendo énfasis en el control social como factor promotor de la estabilidad macroeconómica y ambiental. En este sentido, señala que de forma aislada el control de precios no es una solución eficiente para el manejo de recursos naturales, puesto que induce a trasladar el consumo de un recurso a otro, generando con ello eternos sustitutos. Considerando este análisis, propone un sistema de venta de cuotas por parte

del Estado donde se fuerza a los inversores a realizar progresos tecnológicos.

Grossman y Krueger abordan el efecto de las liberalizaciones comerciales en la contaminación y agotamiento de los recursos naturales, planteando que las economías presentan un tránsito de tres etapas. En la primera de ellas, las economías evidencian una expansión como consecuencia directa del mayor intercambio comercial, y dado que las formas de producción se mantienen, el aumento en la actividad económica trae consigo un deterioro ambiental. En una segunda etapa, se genera un efecto composición en donde los países tenderán a especializarse en las industrias donde poseen ventaja comparativa, moviendo recursos hacia sectores con menores regulaciones, y por lo tanto más contaminantes, aunque esto último estará condicionado a los factores y la tecnología productiva utilizada en el país. Finalmente, las economías transitarán hacia un tercer estado, en donde las características productivas de los países tienden a la adopción de nuevas tecnologías optimizadoras, reduciendo la contaminación estableciéndose sobre la base de estas tres etapas la denominada Curva Medioambiental de Kuznets.

Figura 1. Modelo gráfico de la teoría de la Curva Ambiental de Kuznets



Fuente: Panayotou, 1993; Vázquez, 2014.

Para demostrar sus planteamientos, Grossman y Krueger (1995) realizaron una investigación en 42 países utilizando tres variables asociadas con la contaminación del aire: dióxido de azufre y materia oscura (humo), junto con las variables como PIB per cápita, PIB per cápita al cuadrado y al cubo, ubicación, uso de suelo, densidad poblacional, modelo político y el tiempo. A raíz de los resultados, se concluye que la relación entre contaminación e ingreso posee una forma de U invertida con un punto de inflexión en un rango de USD\$ 4000 a USD\$ 5000 per cápita.

Siguiendo con esta línea de investigación, Panayotou (1993) evidenció la existencia de una relación deforestación-ingresos en forma de U invertida, junto con una tasa de deforestación mayor en los países tropicales en desarrollo que los países templados desarrollados. Asimismo, determina la elasticidad emisión/ingresos la que explica que un aumento del 1 por ciento en el ingreso per cápita da como resultado un aumento del 2,3 por ciento en las emisiones; sin embargo, a medida que aumentan los ingresos, la elasticidad de las emisiones disminuyen situación se presenta en torno a los USD\$ 3000, concluyendo que la degradación ambiental tiende a empeorar antes de mejorar en el camino hacia

el desarrollo de un país, cifra que coincide con Ajanaku y Collins (2021), quienes estimaron el mismo umbral tras haber estudiado la deforestación en África entre 1990 y 2016.

Selden y Song (1994), amplían los estudios en la materia agregando variables como óxido de nitrógeno y monóxido de carbono, así como países analizados (130), confirman el modelo de U invertida, aun cuando el punto de inflexión se eleva, señalando que gran parte de los países se encuentra en la primera fase de esta curva y que a mediados de la década de 2030 se comenzarán a observar mejoras en niveles de contaminación, situación que se comienza a visualizar incluso en el consumo de recursos y la polución de grandes potencias, como es el caso de China (Zheng; Huai y Huang, 2015; Zheng y Kahn, 2017). Al Sayed y Kun (2013) enfoca su análisis para la detección de la curva ambiental de kuznets en cuarenta países en vías de desarrollo y desarrollados en su investigación, utilizando datos panel sus resultados evidencian que la curva se presenta en la mayoría de los países, a su vez los países desarrollados tienen un punto de inflexión más alto que los países en vías de desarrollo.

Sin embargo, Yang; Zhou y Abbaspour (2010), así como Karsch (2019), sostienen que el crecimiento económico no es una condición suficiente ni vinculante frente a la degradación ambiental. En este sentido, Pontarollo y Mendieta (2020) encuentran evidencia de una CMK convexa, en donde mejoras en el nivel de bienestar de la población ha significado un aumento en el consumo de tierras, presionando los ecosistemas y la regeneración del medioambiente, lo que demuestra que el crecimiento económico sin una conducción legislativa que minimice sus externalidades negativas tiende a incrementar el daño medioambiental (Victor; Akwasi, Taiwo y Oluwatoyin, 2021). Es por ello, es que se necesita que los países lleven a cabo transformaciones productivas y normativas tanto para el uso de tecnologías limpias como eficiencias en los procesos, de modo de *forzar* el cumplimiento de la CMK en los países.

Desde el punto de vista de la apertura comercial, Salman; Sethi, Aslam y Kahloon (2018), investigaron la incidencia que tiene sobre el medioambiente los tratados comerciales firmados por Pakistán entre 1980 y 2014, determinando una relación positiva entre aumento en el PIB, consumo de energía y emisiones; sin embargo, estas últimas variables presentan una relación negativa frente a la apertura económica, lo que implica un uso más eficiente de los recursos conforme más relaciones comerciales se tienen entre los países. Como forma de ampliar el análisis a Latinoamérica, Correa (2007) estudia a doce países integrando variables como es el caso del PIB per cápita, densidad poblacional y el coeficiente de Gini, obteniendo que frente a un mayor nivel de ingresos disminuyen los contaminantes, aunque no se evidencia una CMK dado que estos países están en etapa creciente de la curva, situación que Zambrano et al. (2018) comprueban de forma particular para el caso peruano entre 1980 y 2011, además de Pablo-Romero y De Jesús (2016), quienes investigan veintidós economías de Latinoamérica y el Caribe. Para Correa (2007), una disminución en las emisiones contaminantes se produce a un nivel de PIB per cápita entre USD\$ 24 914 a USD\$ 27 000, nivel que no alcanza ninguno de los países de la región.

Catalán (2014) estima la curva para un total de 144 países entre 1990 al 2010, en donde a través un modelo de datos panel obtiene resultados que muestran un patrón de la CMK en forma de N, por lo que concluye que los países que lograron la forma de U invertida con el tiempo vuelven a incrementar su emisión de contaminantes. Este comportamiento anómalo es también verificado por Hui y Junheng (2021), quienes concluyen en su investigación realizada sobre países en distintos estados de desarrollo, que si bien la Curva Medioambiental de Kuznets es una generalidad, existen diferencias en su comportamiento, en especial al interior de los bloques regionales, situación vinculada con las formas del uso de los distintos factores productivos y el uso de la tecnología en los procesos, incluso la inequidad en la distribución del ingreso afecta en la dinámica de la presencia de la CMK en las economías (Ridzuan, 2019).

Farhani; Mzirak, Chaibi y Rault (2014) utilizaron dos modelaciones para la CMK aplicada en diez países de Medio Oriente y África del norte desde 1990 a 2010. El primer modelo utiliza la variable dióxido de carbono per cápita como variable dependiente y como independiente las variables PIB real per cápita, consumo de energía per cápita, apertura comercial, valor agregado de manufactura e Índice de Desarrollo Humano (IDH) modificado el cual no incluye el PIB. Por otra parte, en el segundo modelo se relaciona el GS negativo per cápita con las variables independientes IDH, consumo de energía per cápita, apertura comercial, valor agregado de fabricación y el estado de derecho, como control de la gobernanza sobre la corrupción, concluyendo que la inversión en variables como el desarrollo humano se tiende a mejorar la perspectiva de estos países para alcanzar un desarrollo sustentable, dado que al fortalecer las instituciones, las capacidades de crecimiento son mayores como también el compromiso con la sustentabilidad, así mismo un control de la corrupción potenciaría instituciones que favorezcan el crecimiento, dando sentido a que ninguna entidad está por sobre la ley.

METODOLOGÍA

En el estudio se utilizan veintitrés países (ver Tabla 1), los cuales fueron seleccionados y categorizados con base en el Índice de Desarrollo Humano (IDH), estableciendo grupos diferenciados sobre la base de su nivel de desarrollo económico, siendo estos analizados por un período de 56 años, entre 1960 y 2015.

Considerando la naturaleza de la investigación, sumado a las características de los datos utilizados, se utilizará una metodología de análisis econométrico basado en tres etapas. En la primera de ellas, se considera la aplicación de un modelo de panel para evaluar el comportamiento transversal de los contaminantes de los veintitrés países considerados, seguidos de una evaluación segmentada por el estado de desarrollo de cada uno de los países. En la segunda etapa, se analizará de forma individual cada una de las economías a través de regresiones lineales, manteniendo como criterio de agrupación el estado de desarrollo de los países. Finalmente en la tercera etapa, y como forma de identificar los períodos en los cuales se llevan a cabo los cambios estructurales en las series de tiempo, así como las condicionantes económicas asociadas, se llevará a cabo el test de Bai-Perrón, el cual a través de un algoritmo que minimiza la suma global de los errores al cuadrado de un grupo de regresiones, mezclando en la programación cambios puros y parciales dentro de las series, establece puntos de quiebres en los comportamientos de las series de tiempo.

Tabla 1. Países estudiados según estado de desarrollo

Clasificación de países	Países
Países desarrollados	Australia Canadá Estados Unidos Japón Noruega Nueva Zelanda Suecia Suiza
Países en vías de desarrollo	Argelia Brasil Chile China Colombia India Sudáfrica Turquía Uruguay
Países subdesarrollados	Haití Mozambique Nepal Nicaragua Sudán Tanzania

Como forma de evaluar el daño medioambiental por parte de los países, se consideran las emisiones de CO₂ medidas en toneladas como variable dependiente en los modelos por utilizar para el análisis de los datos. Para establecer la evolución económica de los países, se utiliza como variable independiente el Producto Interno Bruto (PIB) per cápita medido en dólares con base en el año 2011, en este sentido, y como forma de estudiar la dinámica de los contaminantes en función de las distintas etapas del desarrollo y tomando en consideración la literatura empírica, es que esta variable es evaluada tanto a nivel, como al cuadrado (PIB²), esperando un signo negativo considerando que las propuestas de CMK, tanto teóricas como empíricas,

sostienen que existe una disminución de las emisiones tras un cierto nivel de crecimiento económico. De forma adicional, y considerando las nuevas propuestas teóricas como hallazgos empíricos, se considera el PIB al cubo (PIB³), dado que se ha establecido que, tras una fase de disminución de las emisiones, tras un cierto nivel de PIB se vuelve a la senda de crecimiento en la emisión de contaminantes, esperando en este sentido que la variable tenga un signo positivo. Como forma de establecer el efecto de las variables demográficas y de bienestar, se incluyen a la medición el Consumo de Combustibles Fósiles (CCF) y la Población Rural (PR). Para unificar las mediciones y la interpretación de los resultados, todas las variables fueron transformadas

en su base logarítmica, quedando un modelo general establecido de la siguiente manera:

$$CO2_{it} = C_{it} + \beta \log PIB_{it} + \gamma \log PIB_{it}^2 + \delta PIB_{it}^3 + \vartheta CCF_{it} + \pi PR_{it} + \varepsilon_{it}$$

Donde:

- i corresponde al país sometido a estudio.
- t corresponde al tiempo de la medición.
- ε el error de la medición.

Como forma de determinar la presencia de efectos fijos o aleatorios dentro de los modelos propuestos, se utilizarán los test de Hausman y el de efectos fijos redundantes, estableciendo de manera iterativa la combinación más eficiente para las modelaciones. No obstante, y como metodología para mantener la uniformidad en las mediciones y resultados, al determinar la combinación óptima en el primer modelo general, se establecerá la misma combinación para las modelaciones derivadas.

RESULTADOS

Los resultados del modelo general de los países, como los agrupados por nivel de desarrollo (Tabla 2), muestran que los signos de las variables relativas al crecimiento económico son concordantes con la presencia de la CMK. Para el caso de la población rural, los signos positivos no son concordantes con la teoría ni la evidencia empírica, al igual que el signo negativo obtenido en el consumo de combustible fósil.

Tabla 1. Resultados del análisis de panel general

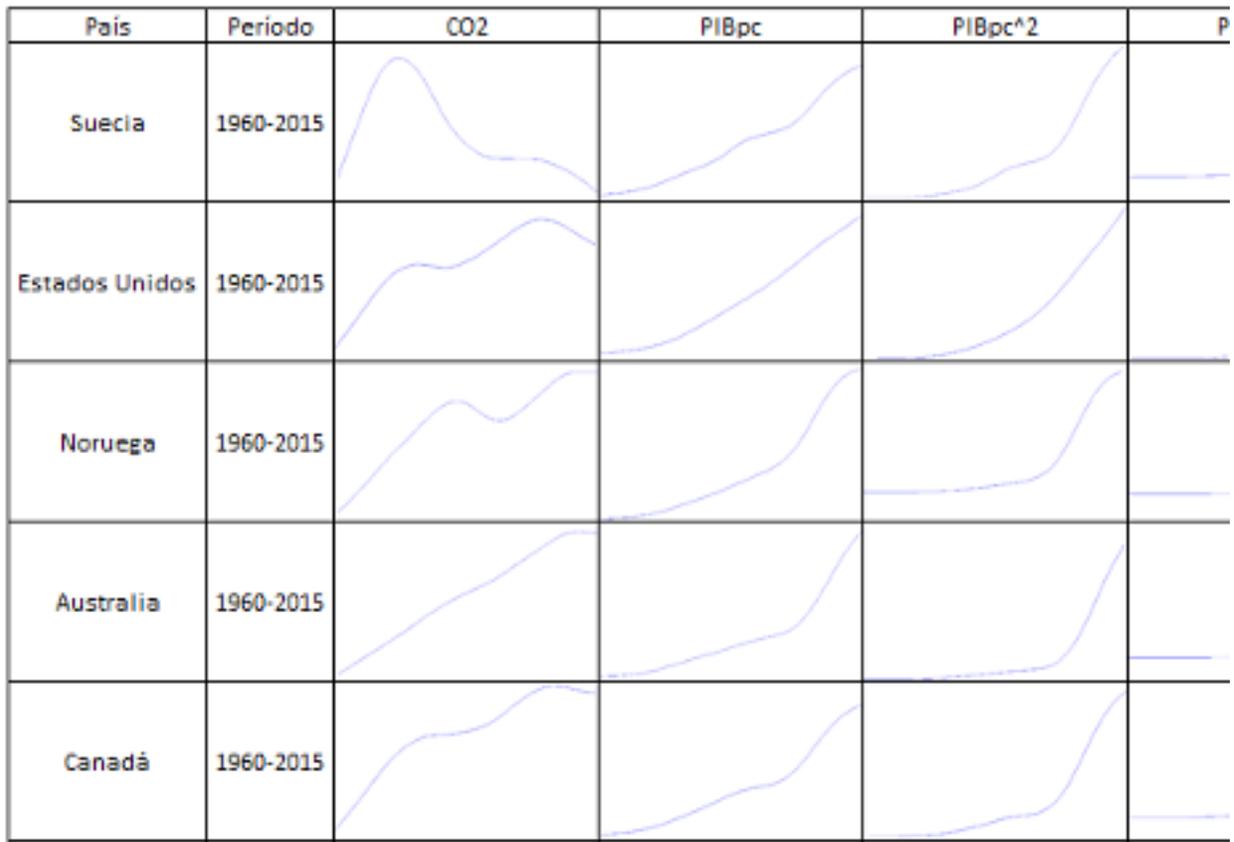
Variables	General	Países desarro- llados	Países en desa- rrollo	Países pobres
C	342831***	-6902359***	-417382.7	1807.79***
PIBpc_USD	43.944***	225.52***	24.162	3.712***
PIBpc_USD^2	-0.0009**	-0.004***	-0.022	-6.19E-05***
PIBpc_USD^3	3.62E-09	1.77E-08*	7.12E-07	3.70E-10***
POB_R	6.19E-07**	57006***	21379.68***	-4.26E-09**
CCFOSIL	-0.014***	52746.56***	3353.78	9.96E-05***
R-squared	0.073	0.361	0.298	0.906
Adjusted R-squa- red	0.030	0.262	0.203	0.888
Prob (F-statistic)	0.000	0.000	0.000	0.000
Durbin-Watson stat	0.067	0.053	0.124	0.328
Cross-section	None	None	None	None
Period	Fixed	Fixed	Fixed	Fixed

Nivel de significancia: *0,1; **0,05; ***0,01.

Al efectuar el análisis particular por grupo de países, se observa en la Imagen 1 que muestra la tendencia de las emisiones de CO₂, consumo de combustible fósil, población rural y las tres aplicaciones del PIB¹ en los países desarrollados, en donde la CMK tiende a cumplirse para la mayoría de los países. En este sentido, se evidencian aumentos en la emisión de contaminantes conforme crecen los países, los cuales, tras ciertos umbrales de PIB, tienden a estabilizarse, e incluso a disminuir la emisión de CO₂, para luego volver a escalar. Por el lado de la población rural, se observa un continuo descenso en sus niveles, mientras que, para el consumo de combustible fósil, el comportamiento

1. Para obtener las tendencias de ambas variables se aplicó el filtro de Hodrick-Prescott el cual se repite en los siguientes gráficos de tendencia.

Imagen 1. Tendencia de las variables en países desarrollados



Al evaluar los países en el modelo econométrico, los resultados indican que se cumplen los principios del PIB explicados en el modelo dato panel, pero con una robustez en la captura que brinda el modelo mucho mayor, dando los indicios de la existencia de la curva en forma de N, hallazgos que ven en la misma línea de las investigaciones empíricas más recientes, las cuales han demostrado un aceleramiento de los contaminantes tras ciertos niveles de desarrollo de los países. En cuanto a las anomalías que presenta el modelo, se puede observar que ellas se concentran en la evolución que presenta la población rural y su relación con la emisión de contaminantes, teniendo en algunos países un signo positivo, lo que está en contra de lo esperado para la variable, sumado a la exclusión del modelo de alguno de los países por desvirtuar su presencia a los resultados generales.

Tabla 3. Modelos de regresión lineal de países desarrollados

Variables	Países							
	Suecia	Estados Unidos	Noruega	Australia	Canadá	Japón	Suiza	Nueva Zelanda
C	37366,61**	-14145177**	-37045,70	-516280.2***	-111110.1	-697932,1	112151,7***	-26333,67***
PIBpc_USD	1,801775***	330,4896***	1,617823***	12,81639***	25,55566***	75,15725***	0,674237***	0,811879***
PIBpc_USD 2	-4,72E-05***	-0,008943***	-2,85E-05***	-0,000199***	-0,000648***	-0,002128***	-5,80E-06***	-9,11E-06**
PIBpc_USD 3	3,53E-10**	7,44E-08***	1,54E-10***	9,98E-10**	5,11E-09***	1,99E-08***	4,02E-12	1,03E-10**
POB_R	-2961,885***	-272657,3***	--	3771,054	-16874,75***	--	-4515,567***	-1021,583***
CCFOSIL	1195,679***	252539,1***	933,8892**	6110,580***	9020,331***	11835,40**	517,6334***	853,0689***
R-squared	0,958073	0,952600	0,758975	0,981762	0,975747	0,863697	0,904273	0,961409
Adjusted R-squared	0,953880	0,947859	0,740071	0,979938	0,973321	0,853007	0,894089	0,957304
Prob (F-statistic)	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
Durbin-Watson stat	1,271286	0,439612	0,453889	0,944360	0,582358	0,183412	0,871881	0,734420

Nivel de significancia: *0,1; **0,05; ***0,01

Como forma de establecer los momentos en los cuales se evidencian cambios en el comportamiento de las emisiones, se aplicó el test de quiebres estructurales, en donde los resultados mostrados en la tabla 4 dan cuenta que los países presentan entre 2 y 4 puntos de inflexión. En la tabla 5, se muestra el PIB per cápita que tenía el país en cuestión en el año en donde se produce el punto de inflexión. Para el caso del primer punto de inflexión, se tiene que en promedio los países lo experimentan a un nivel de los 4998 dólares per cápita, mientras que el segundo lo hacen a los 14 498 dólares. El tercer quiebre, que lo presentan siete de los ocho países estudiados en este segmento, evidencian el quiebre a un promedio de 32 074 dólares per cápita, mientras que el cuarto punto de inflexión, que solo lo presentan cuatro de los ocho países, lo experimentan a los 47 701 dólares. Cabe desatacar, que algunos de estos puntos de inflexión reflejan tanto cambios en el ritmo de aceleración en la emisión de contaminantes, como en el signo de la pendiente de la curva.

Tabla 2. Resultados del test de Bai-Perrón para países desarrollados

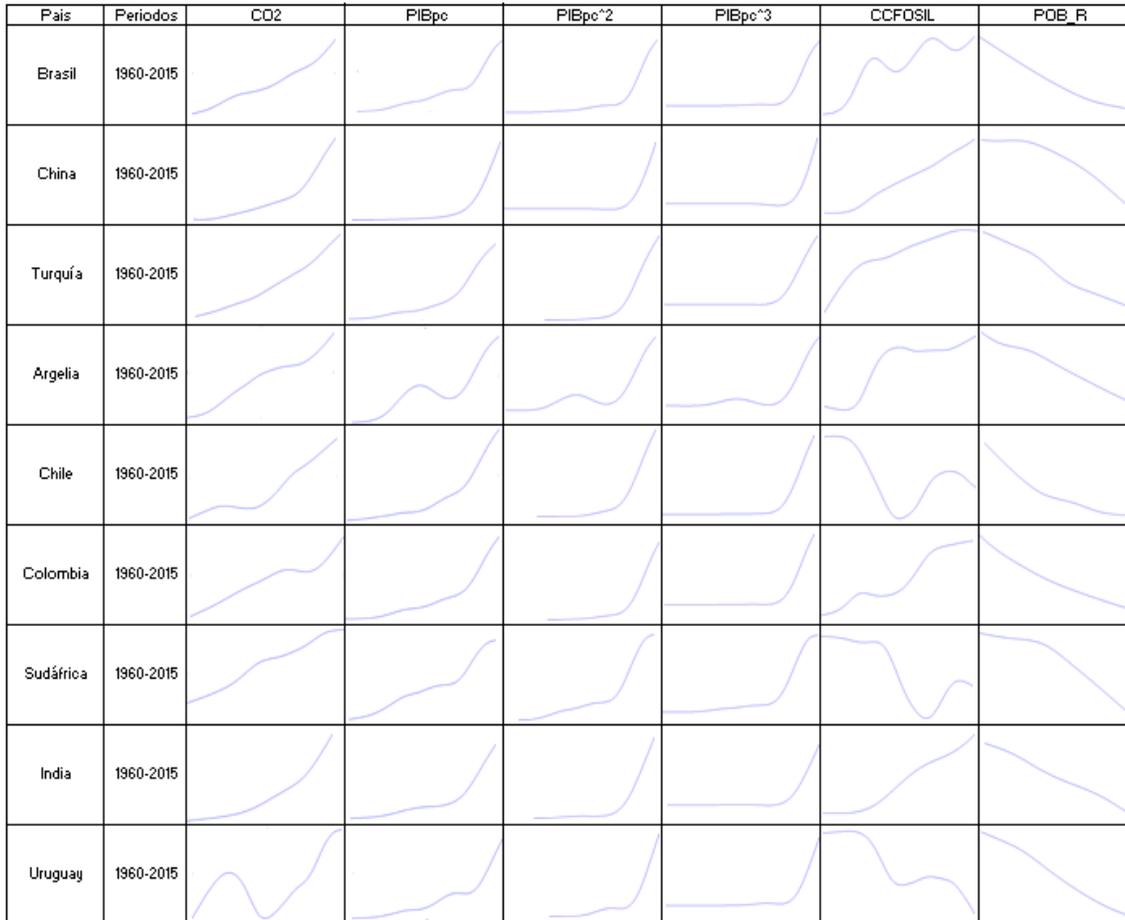
Punto de inflexión	Suecia	Estados Unidos	Noruega	Australia	Canadá	Japón	Suiza	Nueva Zelandia
1	1971	1971	1974	1968	1973	1974	1973	1968
2	1980	1981	1990	1983	1982	1982	1981	1978
3	1990	2006	-	1991	1990	1997	1995	2006
4	2005	-	-	-	2008	2005	2007	-

Tabla 5. PIB per cápita en el año de inflexión.

Punto de inflexión	Suecia	Estados Unidos	Noruega	Australia	Canadá	Japón	Suiza	Nueva Zelandia	Promedio
1	5.133	5609	6.812	2720	5.839	4.354	7.628	1.885	4.998
2	17.098	13.976	28.243	11.519	12.482	9.578	17.153	5.937	14.498
3	30.594	46.299	-	18.822	21.448	35.022	48.662	26.671	32.074
4	43.437	-	-	-	46.595	37.218	63.555	-	47.701

Para el caso de los países en vías de desarrollo, la imagen 2 muestra el comportamiento de las variables en donde nuevamente se evidencia que el CO₂ posee una relación directa con el PIBpc, la cual también se cumple en su mayoría con el consumo de combustible fósil, del cual observamos que gran parte de los países presentan una tendencia al alza. Por otro lado, la población rural presenta una tendencia a la baja en todas sus naciones potenciando aún más este crecimiento en la contaminación a través del tiempo.

Imagen 2. Tendencia de las variables en países en vías de desarrollo



Al igual que el anterior grupo de países, los resultados econométricos (tabla 6) presentan indicadores que los robustecen y que siguen los mismos patrones de comportamiento que son desarrollados en la teoría de la CMK, además de la evidencia empírica desarrollada. En este grupo de países subdesarrollados, Uruguay se escapa del comportamiento grupal al presentar signos para la variable PIB que no se condicen con lo esperado. En resumen, se tiene que cuatro países poseen el PIB en forma de N, t en forma ascendente, y solo uno debería presentar la forma de U invertida, pero observando el gráfico no se da el caso. La población rural es significativa para todos los países excepto para India y solo China e India presentan

anomalías asociadas a esta variable. Por el lado del combustible fósil se tiene que Argelia, Colombia y Turquía no presentan significancia y se observa una anomalía en el signo de Uruguay.

Tabla 6. Modelos individuales para países en vías de desarrollo

VARIABLES	Argelia	Brasil	Chile	China	Colombia	India	Sudáfrica	Turquía	Uruguay
C	-385449.6	117512.5	-61393.96***	-4776161**	68587***	-2332463***	-329219.8	309026***	-648.9016
PIBpc_USD	29.636**	17.698***	8.968***	1814***	13.255**	865.50***	137.38***	12.62***	-0.503***
PIBpc_USD^2	-0.0085**	-	-0.0006**	-0.1154***	-0.0036**	-	-0.0248***	-	7.70E-05***
PIBpc_USD^3	8.55E-07*	-	2.19E-08**	-	3.17E-07***	-	1.28E-06***	-	-2.42E-09**
POB_R	-2388***	-4664.511***	-1093.719***	303.0458	-1155.49***	19370**	-17788***	-4226***	-324.95***
CCFOSIL	5464.920	3710.243***	1314***	86762***	102.7477	23701***	14653***	-172.7785	154.77***
R-squared	0.950911	0.966148	0.972260	0.993659	0.955810	0.989941	0.963420	0.992633	0.882289
Adjusted R Squared	0.946002	0.964195	0.969486	0.993162	0.951007	0.989361	0.959528	0.992207	0.870518
Prob (F-statistic)	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Durbin-Watson stat	0.994474	0.302005	0.608388	0.809889	0.622532	0.902253	0.643748	0.940829	0.719232

Nivel de significancia: *0,1; **0,05; ***0,01.

En las tablas 7 y 8 se muestran los puntos de inflexión para la emisión de contaminantes y el PIB asociado para los países en vías de desarrollo estudiados, donde se evidencian entre uno a tres cambios en su comportamiento. El primer punto de inflexión se presenta a un promedio de 1126 dólares, mientras que el segundo lo hace a los USD\$ 4289. El tercer quiebre es solo evidenciado por una sola economía, y se encuentra en los 4924 dólares. En cuanto al comportamiento en la curva, los puntos de inflexión dan cuenta de un aceleramiento en la emisión de contaminantes. Para el caso de Chile, que constituye la excepción a este comportamiento, experimenta una etapa en donde los niveles de emisiones se estabilizan, para luego crecer nuevamente.

Tabla 7. Test de Bai-Perrón para países en vías de desarrollo

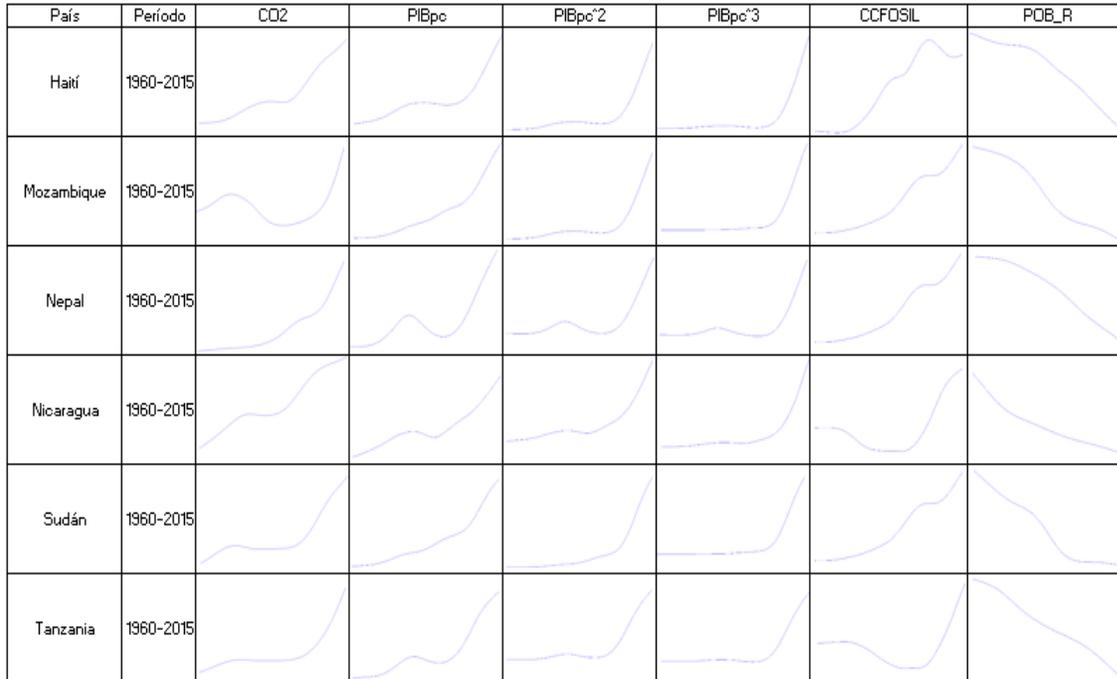
Punto de inflexión	Argelia	Brasil	Chile	China	Colombia	India	Sudáfrica	Turquía	Uruguay
1	1972	1981	1974	2006	1975	1995	1968	1987	1968
2	1999	2008	1996		1995	2008	1990	2006	1981
3	2008	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 8. PIB per cápita en el año de inflexión en países en vías de desarrollo

Punto de inflexión	Argelia	Brasil	Chile	China	Colombia	India	Sudáfrica	Turquía	Uruguay	Promedio
1	442	2.133	1.554	2.099	544	374	711	1.706	574	1.126
2	1.588	8.831	5.350	-	2.540	999	3.140	8.102	3.765	4.289
3	4.924	-	-	-	-	-	-	-	-	4.924

Para el caso de las economías subdesarrolladas, las tendencias de las variables incluidas en el modelo que se observan en la Imagen 3, dan cuenta que el contaminante presenta un comportamiento ligado directamente con el crecimiento económico lo que se mantiene en la línea de los resultados obtenidos en los grupos anteriores. Además, se puede identificar una tendencia alcista marcada en cada uno de los países respecto del consumo de combustibles fósiles, lo cual es un comportamiento típico de su propia etapa del desarrollo en que se encuentra.

Imagen 3. Tendencia de las variables en países sub-desarrollados



Los resultados econométricos mostrados en la Tabla 9, tanto la variable PIB como el consumo de combustibles fósiles resultan estar en la misma línea de los planteamientos de la CMK, situación que se encuentra reforzada por la no incidencia de las otras medidas del PIB que dado el nivel de desarrollo de estas economías no resultan ser significantes a los modelos, dejando en evidencia que estos países se encuentran en la etapa primaria de la curva. Para el caso de la población rural, los signos obtenidos son, en algunos casos, disimiles a los esperados, situación que puede responder al mismo nivel de desarrollo de los países que hace que tengan comportamientos ambivalentes o incluso una menor rigurosidad en la elaboración de las estadísticas oficiales.

Tabla 9. Modelos individuales para países subdesarrollados

VARIABLES	Haití	Mozambique	Nepal	Nicaragua	Sudán	Tanzania
C	774,8482	-13328***	-12270**	5795***	5343	11640***
PIBpc_USD	2,364***	1,778***	0,756***	0,947***	0,550***	0,055**
PIBpc_USD^2	-0.001***	-0.0003***	-	-	-	-
PIBpc_USD^3	-	1,27E-08**	-	-	-	-
POB_R	-14,287**	130,20***	117,50*	-131,57***	-121,37**	-166,32***
CCFOSIL	37,80***	264,36**	443,51***	62,05***	452,63***	557,02***
R-squared	0,955693	0,713605	0,934858	0,956129	0,932492	0,953671
Adjusted R-squared	0,952001	0,683772	0,931026	0,953598	0,928359	0,950834
Prob (F-statistic)	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
Durbin-Watson stat	0,516720	0,626421	0,550909	0,608377	0,746076	0,826066

Nivel de significancia: *0,1; **0,05; ***0,01.

En la aplicación del test de quiebres estructurales para los países subdesarrollados, la Tabla 10 muestra que los países muestran de uno a tres puntos de inflexión. Pero al ser contrastados con el PIB per cápita asociado (Tabla 11) se establece una gran dispersión entre las economías; sin embargo, es coincidente con los planteamientos de la CMK, bajo los niveles propios de estos países. Por otra parte, y contrastando estos resultados con las gráficas de la Imagen 3, se puede establecer que cada uno de estos quiebres responde a procesos de aceleramiento en los niveles de contaminantes conforme aumenta el producto interno bruto.

Tabla 10. Test de Bai-Perrón para países subdesarrollados

Punto de inflexión	Haití	Mozambique	Nepal	Nicaragua	Sudán	Tanzania
1	2002	1973	1994	1979	1975	1977
2		1981	2008	1998	2004	2008
3		2008				

Tabla 11. PIB per cápita en USD en el año de inflexión en países subdesarrollados

Punto de inflexión	Haití	Mozambique	Nepal	Nicaragua	Sudán	Tanzania	Prome-dio
1	364	13	8	482	17	9	149
2		9	10	944	20	10	206
3		7					7

CONCLUSIONES

Con la metodología empleada y los resultados obtenidos se corrobora la hipótesis central de la CMK, en donde la emisión de contaminantes depende del nivel de crecimiento económico, existiendo puntos de inflexión en los cuales se presenta cambios en el comportamiento en los niveles de en qué es emitido el CO₂ por parte de los países. Sin embargo, pese a que se cumple la hipótesis inicial de la teoría de la curva, el comportamiento que presentan los países no es uniforme, identificando patrones variados entre ellos. En este sentido, los resultados obtenidos muestran que en quince de las veintitrés economías estudiadas, la contaminación tiende a estabilizarse o presenta una leve disminución tras alcanzar un cierto umbral de producto interno bruto, pero nuevamente se incrementa, haciéndolo incluso con mayor rapidez, situación que se podría denominar como un comportamiento de la curva de tipo *escalonada ascendente* en la emisión de contaminantes en función del crecimiento económico. Por el lado de las variables de población rural y consumo de combustibles fósiles, los resultados dan cuenta de forma preliminar, la aceleración en los niveles de

contaminación conforme aumenta el nivel de desarrollo de los países. En este sentido, mientras mayor crecimiento evidencian las economías, en general, la población rural disminuye y el consumo de combustibles fósiles aumenta, dado los nuevos niveles de vida la población, que son más altos, situación que se encuentra en la línea de un comportamiento de la curva medioambiental de tipo escalonada ascendente. Si bien, la presencia de una curva de tipo escalonada ascendente evidenciada en esta investigación ofrece una perspectiva distinta de la Curva Medioambiental de Kuznets, no se encuentra alejada de postulados teóricos y empíricos desarrollados con anterioridad, de hecho, se encuentra en la misma línea de lo establecido en la curva en forma de N, situación que abre la posibilidad de abrir nuevas líneas de investigación dentro de la temática, en especial en lo relativo a la categorización de las economías, como se efectuó en este estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ajanaku, B. y Collins, A. (2021). Economic growth and deforestation in African countries: Is the environmental Kuznets curve hypothesis applicable? *Forest Policy and Economics*, 129, 102488.
- Al Sayed, A. y Kun, S. (2013). Environmental Kuznets Curve: Evidences from Developed and Developing Economies. *Applied Mathematical Sciences*, 7(22), 1081-1092.
- Badeeb, R.; Lean, H. y Shahbaz, M. (2020). Are too many natural resources to blame for the shape of the environmental Kuznets Curve in resource-based economies? *Resources Policy*, 68.
- Catalán, H. (2014). Curva ambiental de Kuznets: implicaciones para un crecimiento sustentable. *Economía Informa*, 389, 19-37.
- Coase, R. (1960). The Problem of Social Cost. *The Journal of Law & Economics*, 3, 1-44.
- Correa, F. (2007). Crecimiento económico, desigualdad social y medioambiente: evidencia empírica para América Latina. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 6(10), 11-30.
- Daly, H. (1974). The Economics of the Steady State. *The American Economic Review*, 62(2), 15-21.
- Farhani, S.; Mrizak, S, Chaibi, A. y Rault, C. (2014). The environmental Kuznets curve and sustainability: A panel data analysis. *Energy Policy*, 71, 189-198.
- Filippidis, M.; Tzouvanas, P. y Chatziantoniou, I. (2021). Energy poverty through the lens on the energy-environmental Kuznets curve hypothesis. *Energy Economics*, 100.
- González, E. (2004). *Apuntes sobre Historia del Pensamiento Económico*. Sevilla, España: Tres.
- Grossman, G. y Krueger, A. (1995). Economic growth and environment. *Quarterly Journal of Economics*, 110, 353-377.
- Halliru, A.; Loganathan, N., Golam, A., Mardani, A. y Kamyab, H. (2020). Re-examining the environmental kutnetz curve hypothesis in the economic community of West African states: A panel quantile regression approach. *Journal of Cleaner Production*, 276, 1-11.
- Hui, Y. y Junheng, M. (2021). Correlation analysis between regional economics differences and environmental pollution based on Kuznets curve model. *Environmental Technology & Innovation*, 22, 101444.
- Karsch, N. (2019). Examining the Validity of the Environmental Kuznets Curve. *Counsillence*, 21, 32-50.
- Lawson, L.; Martino R. y Nguyen-Van, P. (2020). Environmental convergence and environmental Kuznets curve: A unified empirical framework. *Ecological Modelling*, 437, 109289.
- Marshal, A. (1922), *Principles of Economics*, 80a edition, Macmillan, Londres.
- Mill, J. (1948). *Principios de Política Económica*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Pablo-Romero, M. y De Jesús, J. (2016). Economic growth and energy consumption: The Energy-Environmental Curve for Latin America and the Caribbean. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1343-1350.
- Panayotou, T. (1993). Empirical Tests and Policy Analysis of Environmental Degradation at Different Stages of Economic Development. ILO Working Paper 992927783402676. Organización Internacional del Trabajo.
- Pontarollo, N. y Mendieta, R. (2020). Land consumption and income in Ecuador: A case of an inverted environmental Kuznets curve. *Ecological Indicators*, 108, 105699.
- Ridzuan, S. (2019). Inequality and the environmental Kuznets curve. *Journal of Cleaner Production*, 228, 1472-1481.

- Salman, A.; Sethi, B., Aslam, F. y Kahloon, T. (2018). Free trade agreements and environmental nexus in Pakistan. *Pluto Journals*, 15(3), 179-195.
- Selden, T. y Song D. (1994). Environment Quality and Development: Is There a Kuznets Curve for Air Pollution Emissions? *Journal of Environmental Economics and Management*, 27, 147-162.
- Vásquez, F. (2014). ¿Es el medioambiente un producto de lujo? *Cienciorama*, 367.
- Victor, F.; Akwasi, B., Taiwo, S. y Oluwatoyin, M. (2021). Beyond the environmental Kuznets in E7 economies: Accounting for the combined impacts of institutional quality and renewables. *Journal of Cleaner Production*, 314, 127924.
- Waqih, M.; Bhutto, N., Ghumro N. y Salam, M. (2019). Rising environmental degradation and impact of foreign direct investment: An empirical evidence from SAARC region. *Journal of Environmental Management*, 243, 472-480.
- Yang, H.; Zhou, Y. y Abbaspour, K. (2010). An analysis of economic growth and industrial wastewater pollution relations in China. *Consilience*, 4, 60-79.
- Yáñez, J. (2017). Impuesto Pigouviano. *Revista de Estudios Tributarios*, 17, 159-198.
- Zambrano, M.; Silva, C., Dávalos, J., Zambrano, A. y Ruano M. (2018). Testing environmental Kuznets curve hypothesis in Peru: The role of renewable electricity, petroleum, and dry natural gas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 4170-4178.
- Zheng, H.; Huai, W. y Huang, L. (2015). Relationship between pollution and economic growth in China: Empirical evidence from 111 cities. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 9(1), 22-31.
- Zheng, S. y Kahn, M. (2017). A new era of pollution progress in urban China? *The Journal of Economics Perspectives*, 31(1), 71-92.