

Crecimiento, complejidad económica y emisiones de CO₂: un análisis para Colombia*

Growth, economic complexity
and CO₂ emissions:
An analysis for Colombia

Paula Vanessa Sosa**
Diana Milena Navarro***

Recibido: 10 de febrero de 2020

Revisado: 17 de marzo de 2020

Aprobado: 6 de mayo de 2020

* Cómo citar: Sosa, P. V. y Navarro, D. M. (2020). Crecimiento, complejidad económica y emisiones de CO₂: un análisis para Colombia. *Revista CIFE: Lecturas de Economía Social*, 22(37), 21-41. doi: <https://doi.org/10.15332/22484914/6039>

** Economista. Universidad Santo Tomás. Correo electrónico paulasosa@usantotomas.edu.co

*** Economista. Universidad Santo Tomás. Correo electrónico diananavarro@usantotomas.edu.co

Resumen

Las emisiones de CO₂ a nivel mundial representan un problema de primer orden, particularmente por sus efectos en el calentamiento del planeta. Este documento intenta validar la hipótesis medioambiental de Kuznets para Colombia, no solo a través de la medida tradicional empleada en este tipo de análisis (es decir, producto interno bruto —PIB—), sino incorporando un nuevo índice de producción conocido como índice de complejidad económica. Dadas las relaciones no lineales de las variables, se decide emplear un modelo ANFIS. Además, como análisis de robustez, se utilizan algunas técnicas de series de tiempo tradicionales (FMOLS, DOLS y CCR). El estudio realizado indica que los resultados no son concluyentes para la hipótesis ambiental de Kuznets, por lo que esta no puede ser validada para Colombia.

Palabras clave: emisiones de CO₂, PIB per cápita, complejidad económica, ANFIS.

Clasificación JEL: O40, O47, O56.

Abstract

Global CO₂ emissions represent a major problem, particularly due to its effects on global warming. This document tries to validate the Kuznets environmental hypothesis for Colombia, not only through the traditional measure used in this type of analysis (that is, gross domestic product —GDP—), but incorporating a new production index known as the economic complexity index. Given the nonlinear relationships of the variables, it was decided to use an ANFIS model. In addition, as robustness analysis, some traditional time series techniques (FMOLS, DOLS y CCR) are used. The study carried out indicates that the results are not conclusive for the Kuznets environmental hypothesis, therefore it cannot be validated for Colombia.

Keywords: CO₂ emissions, GDP per capita, economic complexity, ANFIS

JEL Classification Codes: O40, O47, O56.

Introducción

El cambio climático es uno de los problemas más preocupantes en la actualidad, dadas las consecuencias en la degradación ambiental (Seneviratne et al., 2012). Una de las causas de este fenómeno son los gases efecto invernadero (GEI) (Rishbeth, 1990), de los cuales el que más ha presentado aumento en sus emisiones durante las últimas décadas es el dióxido de carbono (CO₂) (de Vries, Du, Butterback-Bahl, Schulte-Uebbing, & Dentener, 2016). Este compuesto es vital para el ciclo del carbono, pero en exceso es nocivo, generando concentraciones excesivas en la atmósfera y, por consiguiente, alterando la capacidad de absorción del CO₂ de la tierra y el océano (Siegenthaler & Sarmiento, 1993), lo que produce variaciones en la temperatura de la biósfera (Friedlingstein et al., 2001).

Aunque las causas de dicho fenómeno pueden ser diversas, una de ellas es atribuible a las actividades económicas de los países, por lo menos en etapas iniciales (Grossman & Krueger, 1995). Desde esta perspectiva, la emisión de CO₂ es generada por el aumento en la quema de productos fósiles (petróleo, carbón, gas natural y gas licuado del petróleo, entre otros), empleados para el desarrollo del sector industrial y agrícola (Schuschny, 2007). Algunos autores han señalado al consumo cada vez más elevado de energía no renovable a nivel mundial, el aumento demográfico y la continuidad del uso de los combustibles fósiles como los causantes de la degradación ambiental (Aiyetan & Olomola, 2017; Özokcu & Özdemir, 2017).

En la literatura económica se ha realizado una descripción de la relación entre crecimiento económico y degradación ambiental, conocida como la Curva Ambiental de Kuznets (CAK). Según esta teoría, la relación entre estas dos variables se presenta en una especie de “U” invertida, señalando que en la medida en que los países van aumentando sus niveles de desarrollo también lo hacen los niveles de contaminación, hasta que se alcanza un cierto nivel en el que la degradación comienza a descender paulatinamente. Sin embargo, la verificación de esta hipótesis ha arrojado resultados no concluyentes (Karsch, 2019). De hecho, existen estudios que muestran que la CAK no se cumple (Salahuddin & Khan, 2013) y, en donde el crecimiento económico no implica, a largo plazo, menor degradación ambiental (Jusmet & Padilla, 2003).

Por otra parte, los niveles de contaminación no necesariamente dependen de los volúmenes de producción sino de la manera en cómo se producen. Autores como Hausmann et al. (2014) han diseñado un nuevo indicador que permite caracterizar la estructura productiva de los países, conocido como el Índice de Complejidad Económica (ICE). Este indicador ha permitido evidenciar que los países que tienen mayor complejidad económica en su producción podrían reducir gradualmente sus niveles de degradación ambiental en emisiones de CO₂ (Đokić & Jović, 2017).

La evidencia empírica no es definitiva sobre la hipótesis ambiental de Kuznets (Catalán, 2014), por lo que se considera necesario indagar dicho análisis y la forma en que se aborda. De esta manera es pertinente cuestionarse si la medida de producción empleada tradicionalmente es la correcta en relación con las emisiones de CO₂. Aunque el PIB permite evidenciar el volumen de producción, esta medida puede esconder importantes conexiones que se dan cuando se tiene en cuenta la estructura productiva de los países. Para el estudio de la degradación ambiental puede ser más importante analizar la complejidad de la producción que el volumen de esta. Por ejemplo, sectores donde la complejidad de sus productos es baja con mínimos valores agregados pueden estar inmersos en tecnologías altamente contaminantes. En cambio, aquellas economías con productos altamente complejos, dada su inversión en I+D, pueden emplear tecnologías más limpias.

Ahora, estas dinámicas también tienen consecuencias sobre el nivel de desarrollo (vía remuneración de los factores) y la contaminación ambiental; sectores con productos complejos jalonan mano de obra calificada y remuneran mejor a sus trabajadores, por lo cual tendrán un impacto significativo sobre indicadores de pobreza, desempleo, etc., lo que a su vez reduce, aún más, los niveles de contaminación (Renner, 2018).

El presente trabajo buscará validar la hipótesis de CAK para Colombia, así como contribuir a la literatura en dos puntos. En primer lugar, se extiende el análisis incorporando las características de la producción. En este sentido, no solo se busca encontrar la relación entre volumen de producción (PIB) y niveles de degradación ambiental, sino también incorporar la complejidad económica de esta producción, dado que los estudios que tienen en cuenta el ICE para abordar la hipótesis CAK son escasos o inexistentes para el caso colombiano. En segundo lugar, se pretende evaluar dicha hipótesis empleando una técnica no convencional (modelo ANFIS) para explorar la relación no lineal entre las dos variables. Este modelo es una técnica no paramétrica que ha mostrado, en otras disciplinas, su alta capacidad para tratar problemas complejos y no lineales.

La organización de este documento será la siguiente: en la primera parte se proporcionará la revisión de la literatura; en la segunda, se abordan los aspectos metodológicos; en la tercera, los datos empleados; en la cuarta, se presentan los resultados encontrados y el análisis; en la quinta, se brindará información concluyente que sirva para generar políticas públicas encaminadas a mitigar esta problemática y por último, en la séptima sección, se muestra el código empleado.

Revisión de la literatura

Originalmente la hipótesis de Kuznets (1955) se estableció para predecir la relación entre el ingreso per cápita y la desigualdad de ingresos en una curva con forma de “U” invertida. Sin embargo, esta se ha popularizado en aplicaciones medioambientales.

Dicha relación ha sido llamada la hipótesis de la curva ambiental de Kuznets (CAK). Según esta, las repercusiones ambientales aumentan en el corto plazo hasta un punto de inflexión en el que una economía alcanza su máximo nivel de ingreso y, progresivamente, refleja una disminución considerable en la degradación ambiental, mediante el uso de energías limpias.

Desde entonces, diversos estudios han mostrado la relación entre el nivel de degradación ambiental y el ingreso per cápita (Dinda, 2004). Por ejemplo, recientemente autores como Can y Gozgor (2017) y Apergis y Ozturk (2015) han mostrado que esta relación se cumple para el caso de Francia y para algunos países asiáticos, respectivamente, puesto que no solo el volumen de producción de estos países repercute en la degradación ambiental, sino que, además, las energías tanto renovables como no renovables juegan un papel importante en el crecimiento de estas economías, que a su vez se relacionan con los altos grados de contaminación.

Adicionalmente, Begum, Sohag, Abdullah y Jaafar (2015) evidenciaron que en Malasia, durante el período comprendido entre 1970 y 1980, las emisiones de CO₂ per cápita mostraron una disminución junto con un aumento del PIB per cápita, pero esto cambió drásticamente entre 1980 y 2009, cuando las emisiones de CO₂ per cápita aumentaron y se reflejó un incremento en el ingreso per cápita. Así, se concluyó que la hipótesis ambiental de Kuznets no se cumplía para esta economía.

Por lo anterior, es relevante destacar la importancia que tienen las mediciones convencionales del PIB per cápita para validar la evaluación empírica de la CAK. Para varios autores los volúmenes de producción no necesariamente tienen que ser el factor que repercute sobre la degradación ambiental, sino que, por el contrario, esta se puede evidenciar en la manera en que producen las economías, puesto que puede afectar significativamente los aumentos o disminuciones de los niveles de contaminación. Recientemente algunos autores han empezado a emplear medidas alternativas de producción (Fleurbaey & Blanchet, 2013). Entre estas medidas se encuentra el Índice de Complejidad Económica, elaborado por Hausmann e Hidalgo (2011), que se describe como una medida de complejidad de los países y de los productos presentes en el mercado internacional. Asimismo, es un análisis holístico, que pretende encontrar el nivel de profundidad y acumulación de información entre diferentes eslabones de producción, los cuales interactúan entre sí para conformar un mercado.

A su vez, este índice tiene como factor clave la estructura productiva, que se basa en los estudios de Hidalgo, Flinker, Barabási y Hausmann (2007), donde se modela, a partir de la teoría de redes, el impacto que tiene el espacio o la distancia entre los productos a exportar en la cadena de producción. Los hallazgos de dicha investigación muestran que la complejidad de estos productos depende de su cercanía, en esta medida la complejidad disminuye a medida que aumenta la distancia y su baja diversificación en las

exportaciones. Por lo tanto, se ha considerado al ICE para explicar la relación entre producción y degradación ambiental (Neagu & Teodoru, 2019).

No obstante, la literatura alrededor del análisis de las relaciones entre el Índice de Complejidad Económica y la emisión de CO₂ es limitada y se concentra mayoritariamente en países desarrollados (Can & Gozgor, 2017; Gozgor, Lau, & Lu, 2018; Liu, Kim, & Choe, 2019).

Sin embargo, existen investigaciones que pretenden validar la CAK según las mediciones convencionales del PIB. Autores como Jin y Kim (2019) muestran que el panorama latinoamericano es alentador, pues ha logrado conseguir un crecimiento económico significativo en países como Brasil, Chile, Perú, Colombia y México. En contraste, muestra su rezago frente al primer mundo debido a que existe un escaso consumo de energías limpias. En el consumo de energía no renovable, es mayor respecto a los países desarrollados, tal es el caso de México, el cual presenta el mayor nivel de ineficiencia de carbono (Jin & Kim, 2019). Dado ese rezago, en Latinoamérica no se cumple la hipótesis medioambiental de Kuznets (Correa, 2007).

Asimismo, Sánchez y Caballero (2019) realizan el estudio de la relación entre el cambio climático y la actividad económica en América Latina y el Caribe, empleando como método de estudio la CAK. De acuerdo con los resultados obtenidos a través de un panel de cointegración de variables no estacionarias, se determinó que para las emisiones de CO₂ indica la existencia de U-invertida y la presencia de relaciones de cointegración entre las variables involucradas a largo plazo. Igualmente, se evidenció que es necesario alcanzar un punto mayor a 10 134 dólares per cápita (a precios de 2010) para alcanzar el punto de inflexión, conseguir estabilizar las emisiones de CO₂ y, en consecuencia, disminuir la contaminación y degradación ambiental.

Además, Saravia (s. f.) analiza la validez de la CAK en 17 países de Latinoamérica dadas las relaciones entre el crecimiento económico y la calidad ambiental, esta última bajo emisiones de SO₂ y CO₂ mediante un análisis de datos panel. En este estudio, se encontró una relación positiva entre el CO₂ y el PIB per cápita luego, esta relación se vuelve negativa ante incrementos de PIB per cápita, lo que la autora analiza como una invalidez argumentativa de CAK.

Por otra parte, en Colombia la literatura se ha concentrado en validar la hipótesis de CAK empleando el PIB. Por ejemplo, Correa, Vasco Ramírez y Pérez Montoya (2005) emplean la CAK, tomando como variable dependiente la emisión de CO₂ y como independientes el PIB per cápita, el coeficiente Gini y, adicionalmente, la tasa de alfabetización. En este análisis se evidenció que Colombia aún se encuentra en una etapa creciente, la cual está acompañada de una concentración del ingreso per cápita, por lo cual genera un mayor deterioro ambiental. Se concluyó que Colombia se encuentra en una primera

fase de contaminación, sin embargo, esto no permite inferir la validez de la hipótesis para el país.

Al analizar dicha hipótesis bajo la luz de otras técnicas como series de tiempo no estacionarias con un modelo VEC, empleado por González Morales y Pinzón Rico (2018), se comprobó la existencia de curva medioambiental de Kuznets para Colombia. Asimismo, los hallazgos permiten evidenciar que los incrementos en el PIB per cápita generan incrementos equivalentes en las emisiones de CO₂, los cuales se reducen considerablemente hasta alcanzar un determinado nivel de PIB; sin embargo, a partir de un incremento en el nivel de PIB, las emisiones de CO₂ crecen nuevamente (González Morales & Pinzón Rico, 2018).

Igualmente, Calvo (2013) examinó la existencia de CAK, teniendo en cuenta variables que, posiblemente, afectan a la calidad del medio ambiente como las emisiones de CO₂ y PM₁₀. En este estudio, se emplearon diversos modelos con varios periodos de prueba para validar esta hipótesis. Los dos primeros modelos indicaron la existencia de CAK entre el PIB, las emisiones de CO₂ y el parque automotor en los periodos comprendidos entre 1921 a 2010 y 1960 a 2010, respectivamente. Sin embargo, el tercer modelo no permitió comprobar la relación entre el PIB y las emisiones de CO₂, por el contrario, mostró una relación inversa entre la emisión de PM₁₀ y la participación del sector exterior en el PIB, a su vez, el autor destacó la importancia de las variables que son omitidas en estos estudios, resaltando el comercio exterior.

Por lo anterior, es pertinente destacar que para el caso colombiano existe un vacío en la literatura conforme a las variables empleadas en este estudio. No se han utilizado análisis sobre las repercusiones que ocasionan conjuntamente las emisiones de CO₂, el consumo de energía, y el crecimiento y la complejidad económica para Colombia.

Dada la importancia de estas variables hay investigaciones que aseguran que el aumento en la emisión de CO₂ es producto del crecimiento económico sostenido, puesto que existe una mayor demanda de consumo de energía, sobre todo, en el área urbana (Mahalik & Mallick, 2014; Onuonga, 2012). Esto acompañado de un aumento en la tasa demográfica, lo cual genera, inicialmente, mayor contaminación, es decir, que existe repercusión del consumo de energía sobre la emisión de dióxido de carbono (Salahuddin & Khan, 2013). A partir de esta evidencia se toma el consumo de energía, la población urbana, el PIB per cápita y el ICE de Colombia para medir la incidencia que tienen estas variables sobre el CO₂.

De igual forma, este documento pretende implementar una nueva metodología conocida como ANFIS, la cual fue propuesta por Jang (1993), quien la define como un proceso de aprendizaje que se presenta mediante un sistema neurodifuso, implementando un marco de redes adaptativas que puede construir un mapa de entrada y salida. Basado

en el conocimiento humano y relacionado con la entrada y salida de datos. Además, se presenta como un modelo no lineal de funciones que permite identificar componentes no lineales, prediciendo una serie de eventos caóticos de importantes resultados como se puede observar para el caso colombiano.

Metodología

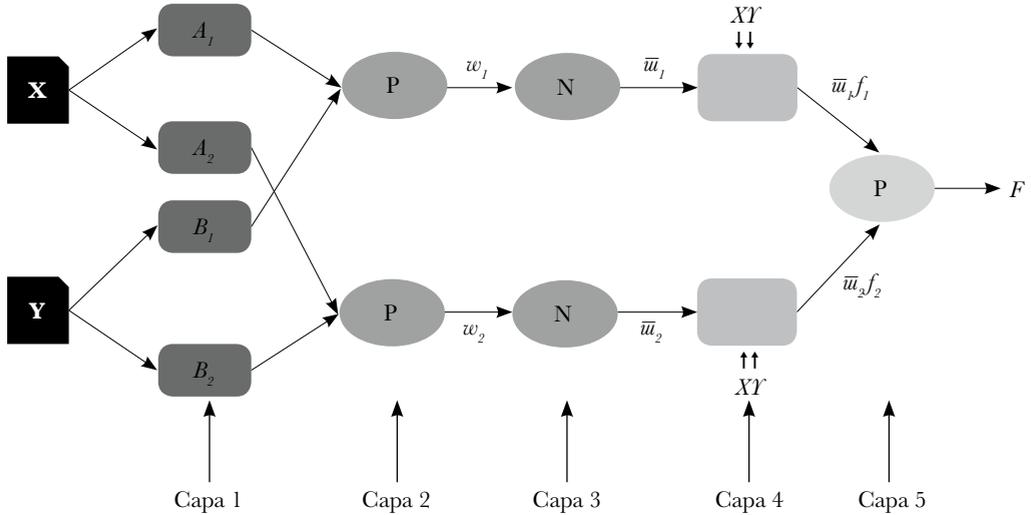
Para evidenciar la hipótesis de Kuznets se implementarán dos tipos de métodos. El primero, conocido como ANFIS, sirve particularmente en casos en los que los modelos presentan características no-lineales. En este caso, analizar si el ICE es un factor influyente en las emisiones de CO₂ y si la relación entre ellas tiene forma de “U” invertida. Luego de este análisis se realiza el mismo procedimiento para el PIB per cápita. Posteriormente, como análisis de robustez, se emplearán técnicas econométricas para evaluar esta relación, específicamente, se usarán los siguientes modelos de series de tiempo: DOLS, FMOLS y CCR, los cuales han sido empleados tradicionalmente en la literatura (Jalil & Mahmud, 2009; Saboori et al., 2012; Robledo & Olivares, 2013). Para cada serie la prueba de raíz unitaria será empleada para identificar la estacionariedad que permita utilizar los modelos señalados.

ANFIS

El Sistema de Inferencia Adaptativo Neuro-Difuso (ANFIS, por sus siglas en inglés) será empleado gracias a su precisión en el pronóstico de series de tiempo, en donde la complejidad y la no linealidad de los modelos no se pueden tratar con precisión mediante otras técnicas. La metodología combina redes neuronales y lógica difusa, en las cuales se definen la cantidad y tipo de funciones de pertenencia de las variables de entrada, es decir, que posibilita predicciones efectivas gracias al método de cálculo de los errores residuales y por medio de comparaciones con otras medidas como el error cuadrático medio y desviaciones estándar del pronóstico.

De igual modo, este sistema se encarga de predecir el valor en el tiempo $x = t + P$ de la serie desde el punto $x = t$, a partir de entradas, resultado del mapeo de puntos en la serie apartados o rezagados en un espacio de tiempo Δ , allí utiliza una red neuronal elaborada con una arquitectura determinada arbitrariamente (Jang, 1993). Estas predicciones permiten su comparación con otros modelos de redes neuronales u otras metodologías estadísticas regresivas tales como ARMA o ARIMA (Jang, 1996). Esta estructura de red neuronal de retroalimentación consiste en cinco capas, las cuales se representan en la figura 1. En esta, los nodos fijos se visualizan a través de círculos, mientras que los cuadrados son los nodos adaptativos.

Figura 1. Arquitectura del modelo ANFIS



Fuente: adaptado de Jang (1993)

Para evidenciar la arquitectura presentada en este modelo se adoptan dos reglas principales basadas en un tipo de modelo difuso de Takagi-Sugeno de primer orden, en donde se toman dos entradas (X y Y), a las que les corresponde una salida (f_i), lo que supone que a cada entrada le corresponden dos conjuntos difusos (Jang, 1993), es decir, a cada conjunto de entrada X o Y le corresponden dos términos lingüísticos: para X es ($A_1 = ALTO$) o ($A_2 = BAJO$). A continuación, se presentan las dos reglas de análisis difuso:

Regla 1: Si (X es A_1) y (Y es B_1) entonces $f_1 = p_1 X + q_1 Y + r_1$

Regla 2: Si (X es A_2) y (Y es B_2) entonces $f_2 = p_2 X + q_2 Y + r_2$

Donde p_i, q_i y r_i son parámetros consecuentes, los cuales corresponden a las constantes que caracterizan las funciones que activan los conjuntos difusos y que se determinan durante el proceso de entrenamiento del modelo (Jang, 1993). A continuación, se presentan las funciones de cada capa:

- Capa 1.** En esta sección, los nodos generan los valores de entrada. En donde X y Y sean los nodos de entrada A y B (Jang, 1993); asimismo, estas funciones de pertenencia que determina el grado de ambigüedad de cada variable están determinadas por μ_{A_i} y μ_{B_i} . Las salidas de los nodos se muestran a continuación:

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x), \text{ para } i = 1, 2 \quad (1)$$

$$O_{i+1}^1 = \mu_{B_i}(Y), \text{ para } i = 3, 4 \quad (2)$$

Esta capa puede tomar un máximo de 1 y un mínimo de 0.

- **Capa 2.** Los nodos están nombrados por P , el cual es un operador AND , que se conoce como un condicional "Y", es decir que puede ser activado solo si se cumplen las dos condiciones propuestas en el sistema difuso. Esta capa lleva el nombre de producto, es decir que en la función de cada nodo se genera como salida el producto de todas las entradas.

$$O_i^2 = \mu_{A_i}(x) * \mu_{B_i}(Y), \text{ para } i = 1, 2 \quad (3)$$

- **Capa 3.** En esta se evidencia que el conjunto de elementos normalizados que se pueden considerar como salidas, las cuales se calculan mediante una relación entre la fuerza de disparo del i -ésimo nodo, junto con la suma de todas las reglas de fuerza de disparo.

$$O_i^3 = \bar{w}_i = \frac{\bar{w}_i}{\bar{w}_1 + \bar{w}_2}, \text{ para } i = 1, 2 \quad (4)$$

- **Capa 4.** En esta capa la función de un nodo fijo w_i se emplea con el fin de normalizar las funciones de entrada, con el fin de minimizar la redundancia de los datos (Gómez Vargas, Obregón Neira & Socarras Quintero, 2010).

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i X + q_i Y + r_i), \text{ para } i = 1, 2 \quad (5)$$

- **Capa 5.** En este punto ya concluyen las etapas. Esta última contiene un nodo fijo, el cual determina la salida general del modelo, es decir, la suma de todas las señales entrantes de la capa anterior mediante la siguiente ecuación.

$$O_i^5 = f(\text{salida}) = f_i \bar{w}_i, \text{ para } i = 1, 2 \quad (6)$$

Para saber el éxito de predicción del modelo se emplearán los errores cuadrático medio, la raíz cuadrada de la varianza y el error porcentual de la media absoluta simétrica (SMAPE).

Análisis de cointegración

Tradicionalmente en la literatura, para evaluar la hipótesis de CAK se emplean modelos de cointegración (Jalil & Mahmud, 2009; Saboori, Sulaiman & Mohd, 2012; Robledo & Olivares, 2013). En este documento se evalúa esta hipótesis a través de estos métodos, pero incorporamos la variable de complejidad económica en la especificación de los modelos. En particular, el modelo empírico está determinado por la siguiente ecuación:

$$\ln(CO_{2t}) = \alpha_1 + \alpha_2 PIBper_t + \alpha_3 PIBper_{t-2} + \alpha_4 ENGper_t + \alpha_5 ICE_t + \varepsilon_t \quad (7)$$

donde $\ln(CO_{2t})$ son el logaritmo de las emisiones de CO_2 en el tiempo t ; $PIBper_t$ es el PIB per cápita y su cuadrado; $ENGper_t$ es el consumo de energía; ICE_t es el índice de complejidad

económica y, ε_t es el término de error. La hipótesis de Kuznets plantea que $\alpha_2 > 0$ y $\alpha_3 < 0$. Adicionalmente, se trata de probar la incidencia que tiene ICE sobre los niveles de contaminación, para esto se altera la ecuación (7) en una forma lineal y una forma cuadrática de dicha variable.

Si la relación de estas dos variables se presenta de forma lineal, entonces se esperaría que el coeficiente $\alpha_3 < 0$, dado que sugeriría que, en la medida en que el país se haga más complejo, ayudaría a reducir los niveles de contaminación.

Como se mencionó anteriormente para utilizar los modelos de cointegración es necesario, en primera instancia, saber si las series son estacionarias. Para esto se emplean las siguientes pruebas de raíz unitaria: Maddala y Wu (1999), las cuales permiten verificar la existencia de heterogeneidad de las variables; la prueba Dickey-Fuller, que muestra la existencia de raíz unitaria como hipótesis nula y la prueba Choi, la cual supone diversos tipos de componentes estocásticos, para determinar la nulidad de estacionariedad y la cointegración. Por ende, si se encuentra estacionariedad en todas las variables, se procede a realizar la estimación de mínimos cuadrados dinámicos ordinarios (DOLS) y Watson, además de incorporar el modelo FMOLS propuesto por Phillips y Hansen (1990) y el modelo CCR planteado por Park. Dichos métodos emplean una correlación semiparamétrica, y son asintóticamente insesgados, lo que permite realizar pruebas estándar de Wald, usando inferencia estadística asintótica en chi cuadrado. Estos estimadores están libres de problemas de correlación serial y endogeneidad, y proveen resultados no sesgados en muestras pequeñas (Ahmad et al., 2017).

Datos

Los datos para Colombia abarcan el periodo comprendido entre 1971 y 2014. Con el fin de predecir estas variables, se construyó una base de datos que permite visualizar la información pertinente. Para DOLS, FMOLS y CCR, se emplearon las siguientes variables: *emisión de CO₂ per cápita* (kt) (Banco Mundial, 2019); *PIB per cápita a PPA actuales* (en millones de dólares estadounidenses a precio de 2011 -2011US\$-); *el consumo de energía per cápita* en kWh; el *ICE* basados en el índice propuesto para Colombia por Hidalgo y Hausman (2014) y, finalmente, las *cifras de población urbana*.

Para el modelo de ANFIS se toman las variables en *log-log*, y para los modelos FMOLS, DOLS y CCR en *log-log*, no se toma población urbana, pues distorsiona los resultados. Posteriormente, la red ANFIS empleada tiene cuatro entradas (PIB per cápita, PIB per cápita al cuadrado, población y consumo de energía) y un producto (la variable dependiente de emisiones de CO₂). Además, se empleó otro modelo de red ANFIS que emplea cuatro entradas (ECI, ECI al cuadrado, población y consumo de energía) y el mismo producto, es decir, emisiones de CO₂.

Resultados y discusión

A partir del modelo ANFIS, se presentan los resultados en la tabla 1. La precisión de las predicciones es evaluada a través de los siguientes errores: error cuadrático medio (MSE), su raíz cuadrada (RMSE) y el error medio de porcentaje absoluto (SMAPE). Se divide la muestra en dos criterios: el primero, muestra la relación del CO₂ con el PIB, y la segunda, del CO₂ con el ICE para evidenciar la posible relación de “U” invertida con los niveles de desarrollo del país. Por tanto, se puede observar que para el PIB se cumple la hipótesis ambiental de Kuznets de “U” invertida, puesto que el modelo predice mejor con “U” que sin esta, aunque las diferencias entre los errores no son muy significativas.

Por otro lado, al analizar el ICE, el modelo más apropiado es sin “U”, lo que significa que posiblemente la complejidad económica no se comporta igual que el PIB, es decir que las ganancias en reducciones de contaminación no se producen bajo una hipótesis de “U invertida.

Tabla 1. Resultados para predecir complejidad económica y PIB per cápita

		Con U	Sin U
lnPIB	MSE	0.011	0.011
	RMSE	0.104	0.104
	SMAPE	4.649	4.718
lnICE	MSE	0.012	0.007
	RMSE	0.111	0.084
	SMAPE	4.397	3.559

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados basados en un modelo ANFIS con la ayuda del paquete "fuzzy" de R.

Los resultados señalan que probablemente ICE tendrá un comportamiento lineal. Entonces, y de acuerdo con la hipótesis, a medida que las economías se hacen más complejas no tienen esa transición de CAK sino que, por el contrario, tendrán una relación negativa directa, donde a mayor complejidad, menores emisiones de CO₂. Este escenario, donde no es necesario pasar por la fase de contaminación, sino que se da el crecimiento en términos de complejidad económica, suprime los niveles de emisiones de CO₂. Los resultados del modelo ANFIS, también permiten observar que el principal factor de contaminación está dado por los volúmenes de producción.

Por otra parte, con el fin de hacer un análisis de robustez y complementariedad de los resultados presentados previamente, se adicionan las estimaciones econométricas. En primer lugar, probamos la estacionariedad de las variables y se procede a realizar las tres pruebas de raíz unitaria: la prueba aumentada de Dickey-Fuller (ADF), la prueba DF-GLS (ERS) (Elliott, Rothenberg & Stock) y la prueba de Phillips-Perron (PP) (Phillips y Perron), tanto para el nivel como para las primeras diferencias de todas las variables sin tendencia e intercepto (tabla 2).

Esta estacionariedad tiene en cuenta que las variables no varían en función del tiempo, es decir, la varianza no cambia en la serie, lo cual generalmente mejora la estimación. Asimismo, la hipótesis nula de dichas pruebas afirma que la variable contiene raíz unitaria. En la misma tabla, se presentan los resultados de la realización del procedimiento con tendencia. Como se observa, las variables son estacionarias en primera diferencia.

Por tanto, dado que las series no cumplen la estacionariedad en las pruebas de raíz unitaria, permiten emplear los modelos de FMOLS y CCR. Estos brindan mayor robustez al cointegrar dichas variables no estacionarias logrando, a largo plazo, series con errores estacionarios. Al emplear dichos modelos se logra corregir la estimación en torno a los sesgos de simultaneidad y autocorrelación de las variables que afectan usualmente un modelo de MCO, además de corregir la endogeneidad, heterogeneidad, adelantos y retrasos de la primera diferencia de los regresores evidenciados en las pruebas de cointegración.

La tabla 3 muestra los resultados de estos modelos, sin incluir ningún tipo de control y separando el efecto del PIB y del ICE. Como se observa, el PIB en DOLS no es significativo (lo que era de esperarse dado que las series son $I(1)$) mientras que, para FMOLS y CCR, está variable es significativa. En estos dos últimos modelos se cumple la relación de “U” invertida en el largo plazo, dada la existencia de $PIB > 0$ y $PIB^2 < 0$.

Por su parte, ICE se muestra altamente significativa para los tres métodos, mostrando una relación negativa. Es decir, el país se beneficia de reducciones en contaminación, en la medida en que su producción se haga más compleja.

Aunque estos resultados se muestran prometedores, no son concluyentes. En la tabla 4 se incluye, al mismo tiempo, al PIB y al ICE como controles para observar la robustez de los resultados presentados en la tabla 3. Como se observa, al incluir estas variables las relaciones se pierden por completo. Esto se puede explicar por una posible correlación directa de consumo de energía junto con CO₂ (Gozgor et al., 2018), evidenciando así una relación positiva, es decir que, ante incrementos en el consumo de energía, mayores serán los niveles de contaminación y, en consecuencia, que al incorporar el consumo de energía, las variables pierdan su significancia. Por tanto, no es pertinente afirmar que en el caso colombiano se cumple la hipótesis medioambiental de Kuznets en el PIB y el ICE.

Tabla 2. Pruebas de raíz unitaria

Prueba	Ln _{pib}		Ln _{ice}		LnEnergía		LnCO ₂	
	Estadístico	Probabilidad	Estadístico	Probabilidad	Estadístico	Probabilidad	Estadístico	Probabilidad
Maddala y Wu (ADF)	0.427	0.982	-2.486	0.126	-1.230	0.653	-2.091	0.249
Dickey y Fuller; ERS (GLS)	1.343	0.187	-2.282	0.027	1.010	0.318	-1.448	0.154
Choi (pp)	0.008	0.954	-2.518	0.028	-1.252	0.643	-2.077	0.255
Con diferencia								
Prueba	Ln _{pib}		Ln _{ice}		LnEnergía		LnCO ₂	
	Estadístico	Probabilidad	Estadístico	Probabilidad	Estadístico	Probabilidad	Estadístico	Probabilidad
Maddala y Wu (ADF)	-3.976	0.004	-5.597	0.000	-6.566	0.000	-6.892	0.000
Dickey y Fuller; ERS (GLS)	-3.240	0.002	-5.533	0.000	-5.056	0.000	-6.973	0.000
Choi (pp)	-3.981	0.004	-5.599	0.000	-6.564	0.000	-6.904	0.000
Con tendencia								
Prueba	Ln _{pib}		Ln _{ice}		LnEnergía		LnCO ₂	
	Estadístico	Probabilidad	Estadístico	Probabilidad	Estadístico	Probabilidad	Estadístico	Probabilidad
Maddala y Wu (ADF)	-1.897	0.639	-2.356	0.396	-1.800	0.687	-2.060	0.553
Dickey y Fuller; ERS (GLS)	-2.125	0.040	-2.428	0.020	-1.515	0.137	-1.881	0.067
Choi (pp)	-1.766	0.704	-2.356	0.396	-1.796	0.689	-2.046	0.560
Con diferencia								
Prueba	Ln _{pib}		Ln _{ice}		LnEnergía		LnCO ₂	
	Estadístico	Probabilidad	Estadístico	Probabilidad	Estadístico	Probabilidad	Estadístico	Probabilidad
Maddala y Wu (ADF)	-3.997	0.016	-5.593	0.000	-6.625	0.000	-6.797	0.000
Dickey y Fuller; ERS (GLS)	-3.735	0.001	-5.724	0.000	-6.087	0.000	-6.831	0.000
Choi (pp)	-3.997	0.016	-5.606	0.000	-6.634	0.000	-6.806	0.000

Nota. Se utiliza un rezago para las tres pruebas. Los resultados son robustos en la primera variación, tanto en tendencia como sin tendencia.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Resultados de regresión para evaluar los efectos sobre las emisiones de CO₂

	DOLS	FMOLS	CCR	DOLS	FMOLS	CCR
ln(PIB)	16.398	16.933**	14.882*			
	-10.458	-8.022	-7.634			
ln(PIB2)	-0.439	-0.456*	-0.396*			
	(0.320)	(0.244)	(0.234)			
ECI				-0.640***	-0.674***	-0.570***
				(0.211)	(0.158)	(0.134)
Tendencia	-0.037***	-0.038***	-0.035***	0.000	0.001	0.001
	(0.006)	(0.005)	(0.004)	(0.002)	(0.002)	(0.002)
Constante	-148.874*	-153.110**	-135.755***	0.476***	0.468***	0.462***
	(-85.524)	(-65.978)	(-62.304)	(0.043)	(0.049)	(0.049)
Observaciones	41	43	43	41	43	43
R ²	0.100	0.649	0.825	0.504	0.000	0.708

Nota. *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01. Variable dependiente variable es emisiones de CO₂. Los rezagos máximos fueron escogidos bajo el criterio de Schwert; la varianza de largo plazo de las series de tiempo fue calculadas usando el *kernel Quadratic Spectral*.

De acuerdo con los hallazgos que se desprendieron de la investigación, es pertinente realizar un contraste con investigaciones previamente mencionadas. En el estudio de cointegración de Sánchez y Caballero (2019) los resultados coinciden con los hallazgos preliminares del presente trabajo, puesto que se halló que países como Colombia, y otros de la región, están aún distantes de la curva de inflexión, en especial para el caso colombiano, el cual necesita de 7600 dólares, aproximadamente, para llegar al punto más alto de la curva y conseguir estabilizar las emisiones contaminantes que generan la degradación ambiental.

Tabla 4. Resultados de regresión para evaluar los efectos sobre las emisiones de CO₂

	DOLS	FMOLS	CCR
ln(PIB)	-3.442	-2.684	-3.269
	-13.074	-8.317	-8.224
ln(PIB2)	0.150	0.120	0.136
	(0.395)	(0.250)	(0.247)
ECI	-0.083	0.003	-0.006
	(0.177)	(0.074)	(0.084)
Energía	0.401**	0.436***	0.432***
	(0.186)	(0.133)	(0.143)
Tendencia	-0.031***	-0.030***	-0.028***
	(0.008)	(0.004)	(0.005)

	DOLS	FMOLS	CCR
Constante	14.895	10.337	15.667
	-107.602	-68.538	-67.611
Observaciones	41	43	43
R^2	0.853	0.749	0.830

Nota. * $p < 0.1$; ** $p < 0.05$; *** $p < 0.01$. Variable dependiente variable es emisiones de CO_2 . Los rezagos máximos fueron escogidos bajo el criterio de Schwert; la varianza de largo plazo de las series de tiempo fue calculada usando *kernel Quadratic Spectral*.

Asimismo, Correa et al. (2005) evidenciaron que Colombia aún se encuentra en una etapa creciente. A su vez, presenta fuertes concentraciones del ingreso per cápita, que genera un mayor deterioro ambiental, es decir, el país se encuentra en una primera fase de contaminación, así como de crecimiento. No obstante, este estudio no infiere la validez de la CAK, que presenta una relación mayor con los hallazgos encontrados por el estudio para Colombia.

En contraste, algunos estudios como los de González Morales y Pinzón Rico (2018) y Calvo (2013), que emplean otras metodologías para Colombia, han encontrado la validez de la hipótesis medioambiental de Kuznets, puesto que al emplear metodologías como VEC y diferentes líneas de tiempo respectivamente, comprobaron la existencia de la curva medioambiental de Kuznets, dando como resultado una relación entre la degradación ambiental por las altas emisiones de CO_2 producto del crecimiento económico.

Sin embargo, estos estudios demostraron que los resultados pueden estar sesgados por la no inclusión de variables de gran importancia como: emisiones de PM_{10} u otros elementos contaminantes, el comercio exterior, etc. Por lo anterior, este trabajo de investigación tiene como valor agregado la aplicación de una nueva metodología, así como variables diferentes a las estudiadas tradicionalmente, las cuales permiten inferir una relación distinta en el mediano plazo. Los resultados de esas investigaciones son similares a los resultados que se obtuvieron del modelo ANFIS en el presente estudio. Esto solo coincide para la complejidad económica, no necesariamente relacionada con el PIB per cápita.

Conclusiones

Esta investigación tenía como objetivo proporcionar un análisis comparativo de la incidencia de la producción económica sobre los efectos de las emisiones de CO_2 y, a su vez, la relación de ésta con la complejidad económica.

Los hallazgos encontrados a partir de la metodología ANFIS, la validó preliminarmente la hipótesis ambiental de Kuznets (“U” invertida) sobre la relación entre el PIB y las

emisiones de CO₂. Además, se obtuvieron los resultados esperados del no cumplimiento de dicha hipótesis para el ICE, dado su comportamiento lineal. Por lo tanto, se definió inicialmente que el efecto del PIB sobre las emisiones de CO₂ era más alto al compararlo con el ICE que mostraba mayor complejidad económica y menor degradación ambiental.

Además, estos resultados estuvieron respaldados con el modelo de cointegración (DOLS, FMOLS y CCR), el cual brinda mayor robustez al modelo y, en consecuencia, a la investigación. Inicialmente, este también arrojó los resultados esperados para el PIB, en donde posiblemente se cumplía la hipótesis de “U” invertida de Kuznets, y la relación lineal del ICE. Sin embargo, al adicionar controles como el consumo de energía en el modelo, la relación de las variables se vuelve inexistente, por lo que los resultados no son concluyentes. Por lo tanto, no se puede afirmar que para Colombia se cumpla la hipótesis medioambiental de Kuznets.

Dados los resultados y las investigaciones en regiones como la Unión Europea, Asia y Latinoamérica, entre otros, se puede afirmar que para una disminución considerable de GEI es necesario que se creen los incentivos tanto para consumidores como productores. Esto con el fin de lograr disminuir las excesivas emisiones de CO₂.

Finalmente, aunque los hallazgos no sean concluyentes, es pertinente analizar la necesidad de generar políticas públicas encaminadas a mitigar la problemática medioambiental colombiana. Por tanto, se debe mejorar gradualmente la innovación tecnológica con el fin de generar una transición a energías más limpias. De igual forma, se deben fortalecer las instituciones encargadas de otorgar las licencias ambientales para proyectos dentro del territorio, donde estas estén encaminadas a salvaguardar la biodiversidad de los ecosistemas y garantizar el balance general de la tierra y del cambio climático.

Referencias

- Ahmad, N., Du, L., Lu, J., Wang, J., Li, H.-Z., & Hashmi, M. Z. (2017). Modelling the CO₂ emissions and economic growth in Croatia: Is there any environmental Kuznets curve? *Energy*, 123, 164-172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.106>
- Aiyetan, I. R. & Olomola, P. A. (2017). Environmental degradation, energy consumption, population growth and economic growth: Does Environmental Kuznets curve matter for Nigeria? *Economic and Policy Review*, 16(2), 1-14.
- Apergis, N. & Ozturk, I. (2015). Testing Environmental Kuznets Curve hypothesis in Asian countries. *Ecological Indicators*, 52,16-22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.11.026>

- Banco Mundial. (2019). *Emisión de CO₂ per cápita (kt)*, Recuperado de <https://data.worldbank.org/indicator>.
- Begum, R. A., Sohag, K., Abdullah, S. M. S., & Jaafar, M. (2015). CO₂ emissions, energy consumption, economic and population growth in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 594-601. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.205>
- Calvo, L. (2013). *Medición de la relación entre crecimiento económico y emisiones de CO₂ y PM₁₀ en Colombia* (tesis de maestría). Recuperado de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/12101/CalvoGarciaLeonardoAlexis2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Can, M. & Gozgor, G. (2017). The impact of economic complexity on carbon emissions: evidence from France. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(19), 16364-16370. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9219-7>
- Catalán, H. (2014). Curva ambiental de Kuznets: implicaciones para un crecimiento sustentable. *Economía Informa*, 389,19-37. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0185-0849\(14\)72172-3](https://doi.org/10.1016/S0185-0849(14)72172-3)
- Correa, F. (2007). Crecimiento económico, desigualdad social y medio ambiente: evidencia empírica para América Latina. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 6(10), 12-30.
- Correa, F., Vasco Ramírez, A. F., & Pérez Montoya, C. (2005). La curva medioambiental de Kuznets: evidencia empírica para Colombia. Grupo de Economía Ambiental (GEA). *Semestre Económico*, 8(15), 13-30.
- de Vries, W., Du, E., Butterbach-Bahl, K., Schulte-Uebbing, L. & Dentener, F. (2016). *Human nitrogen fixation and greenhouse gas emissions: a global assessment*. Trabajo presentado en la 7th International Nitrogen Initiative 2016, Melbourne. Resumen recuperado de <https://research.wur.nl/en/publications/human-nitrogen-fixation-and-greenhouse-gas-emissions-a-global-ass>
- Dinda, S. (2004). Environmental Kuznets Curve Hypothesis: A Survey. *Ecological Economics*, 49(4), 431-455. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.02.011>
- Fleurbaey, M. & Blanchet, D. (2013). *Beyond GDP: Measuring Welfare and Assessing Sustainability*. New York: Oxford University Press. DOI: <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199767199.011.0001>
- Friedlingstein, P., Bopp, L., Ciais, P., Dufresne, J.-L., Fairhead, L., Le Treut, H., ... Orr, J. (2001). Positive feedback between future climate change and the carbon cycle. *Geophysical Research Letters*, 28(8), 1543-1546. DOI: <https://doi.org/10.1029/2000gl012015>

- Gómez Vargas, E., Obregón Neira, N., & Socarras Quintero, V. (2010). Aplicación del modelo neurodifuso ANFIS vs redes neuronales, al problema predictivo de caudales medios mensuales del río Bogotá en Villapinzón. *Tecnura*, 14(27), 18-29.
- González Morales, C. C. & Pinzón Rico, D. M. (2018). *Curva de Kuznets ambiental: evidencia empírica para Colombia 1971-2014* (tesis de pregrado). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Gozgor, G., Lau, C. K. M., & Lu, Z. (2018). Energy consumption and economic growth: New evidence from the OECD countries. *Energy*, 153, 27-34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.158>
- Grossman, G. M. & Krueger, A. B. (1995). Economic growth and the environment. *The Quarterly Journal of Economics*, 110(2), 353-377. DOI: <https://doi.org/10.2307/2118443>
- Hausmann, R. & Hidalgo, C. A. (2011). The Network Structure of Economic Output. *Journal of Economic Growth*, 16(4), 309-342. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10997-011-9071-4>
- Hausmann, R., Hidalgo, C. A., Bustos, S., Coscia, M., Simoes, A. & Yildirim, M. A. (2014). *The Atlas of Economic Complexity: Mapping Paths to Prosperity*. Cambridge, MA: The MIT Press. DOI: <https://doi.org/10.7551/mitpress/9647.001.0001>
- Hidalgo, C. A., Klinger, B., Barabási, A.-L., & Hausmann, R. (2007). The Product Space Conditions the Development of Nations. *Science*, 317(5837), 482-487. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1144581>
- Jalil, A. & Mahmud, S. F. (2009). Environment Kuznets curve for CO₂ emissions: A cointegration analysis for China. *Energy policy*, 37(12), 5167-5172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.07.044>
- Jang, J.-S. (1993). ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 23(39), 665-685. DOI: <https://doi.org/10.1109/21.256541>
- Jang, J.-S. (1996). Input selection for ANFIS learning. En *Proceedings of IEEE 5th International Fuzzy Systems* (Vol. 2, pp. 1493-1499). IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/FUZZY.1996.552396>
- Jin, T. & Kim, J. (2019). A comparative study of energy and carbon efficiency for emerging countries using panel stochastic frontier analysis. *Scientific Reports*, 9(1), 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43178-7>

- Jusmet, J. R. & Padilla, E. (2003). Emisiones atmosféricas y crecimiento económico en España: la curva de Kuznets ambiental y el protocolo de Kyoto. *Economía Industrial*, (351), 73-86.
- Karsch, N. M. (2019). Examining the Validity of the Environmental Kuznets Curve. *Consilience*, (21), 32- 50. DOI: <https://doi.org/10.7916/consilience.v0i21.5727>
- Kuznets, S. (1955). Economic Growth and Income Inequality. *The American Economic Review*, 45(1), 1- 28.
- Liu, H., Kim, H., & Choe, J. (2019). Export diversification, CO₂ emissions and EKC: panel data analysis of 125 countries. *Asia-Pacific Journal of Regional Science*, 3(2), 361-393.
- Mahalik, M. K. & Mallick, H. (2014). Energy Consumption, Economic Growth and Financial Development: Exploring the Empirical Linkages for India. *The Journal of Developing Areas*, 48(4), 139-159. DOI: <http://dx.doi.org/10.1353/jda.2014.0063>
- Maddala, G. S., & Wu, S. (1999). A comparative study of unit root tests with panel data and a new simple test. *Oxford Bulletin of Economics and statistics*, 61(S1), 631-652.
- Neagu, O. & Teodoru, M. C. (2019). The Relationship between Economic Complexity, Energy Consumption Structure and Greenhouse Gas Emission: Heterogeneous Panel Evidence from the EU Countries. *Sustainability*, 11(2), 497. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11020497>
- Dokić, A. & Jović, S. (2017). Evaluation of agriculture and industry effect on economic health by ANFIS approach. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 479, 396-399. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.03.022>
- Onuonga, S. M. (2012). The Relationship Between Commercial Energy Consumption and Gross Domestic Income in Kenya. *The Journal of Developing Areas*, 46(1), 305-314. DOI: <https://doi.org/10.1353/jda.2012.0022>
- Özokcu, S. & Özdemir, Ö. (2017). Economic growth, energy, and environmental Kuznets curve. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 639-647. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.059>
- Renner, S. (2018). Poverty and distributional effects of a carbon tax in Mexico. *Energy Policy*, 112, 98- 110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.011>
- Rishbeth, H. (1990). A greenhouse effect in the ionosphere? *Planetary and Space Science*, 38(7), 945-948. DOI: [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(90\)90061-T](https://doi.org/10.1016/0032-0633(90)90061-T)

- Robledo, J. C. & Olivares, W. (2013). Relación entre las emisiones de CO₂, el consumo de energía y el PIB: el caso de los CIVETS. *Semestre Económico*, 16(33), 45-66.
- Saboori, B., Sulaiman, J., & Mohd, S. (2012). Economic growth and CO₂ emissions in Malaysia: A cointegration analysis of the Environmental Kuznets Curve. *Energy policy*, 51, 184-191. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.08.065>
- Salahuddin, M. & Khan, S. (2013). Empirical Link Between Economic Growth, Energy Consumption and CO₂ Emission in Australia. *The Journal of Developing Areas*, 47(2), 81-92. DOI: <https://doi.org/10.1353/jda.2013.0038>
- Sánchez, L. & Caballero, K. (2019). La curva de Kuznets ambiental y su relación con el cambio climático en América Latina y el Caribe: un análisis de cointegración con panel, 1980-2015. *Revista de Economía del Rosario*, 22(1), 101-142. DOI: <http://dx.doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/economia/a.7769>
- Saravia, A. (s.vf.). *América latina y el caribe: Efectos de equidad e institucionalidad en la curva ambiental de Kuznets*. Recuperado de <https://www.bcb.gob.bo/webassets/file/2doEncuentroDeEconomistas/America%20Latina20y%20El%20Caribe.%20Efectos%20de%20equidad%20e%20institucionalidad%20en%20la%20curva%20ambiental%20de%20Kuznets.pdf>
- Schuschny, A. R. (2007). *El método DEA y su aplicación al estudio del sector energético y las emisiones de CO₂ en América Latina y el Caribe*. Santiago: CEPAL.
- Seneviratne, S. I., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C. M., Kanae, S., Kossin, J., Luo, Y., Marengo, J., ... Zhang, X. (2012). Changes in Climate Extremes and their Impacts on The Natural Physical Environment. En C. B. Field (Ed.), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* (pp. 109-230). New York: Cambridge university Press.
- Siegenthaler, U. & Sarmiento, J. L. (1993). Atmospheric carbon dioxide and the ocean. *Nature*, 365(6442), 119-125. DOI: <https://doi.org/10.1038/365119a0>
- UPME (2019). *El consumo de energía per cápita* (en kWh). Tomado de: Unidad de Planeación Minero-Energetica. DOI: <https://doi.org/10.2307/2118443>

