

Crecimiento, Complejidad Económica y Emisiones de CO_2 : Un Análisis para Colombia

Paula Vanessa Sosa*, Diana Milena Navarro

Facultad de Economía, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia

Abstract

Las emisiones de CO_2 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, 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 utiliza 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.

Keywords: Emisiones de CO_2 , PIB per cápita, Complejidad Económica, ANFIS

1. Introducción

El cambio climático es uno de los problemas más preocupantes en la actualidad, dadas las consecuencias en la degradación ambiental (Seneviratne et al., 2017). 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 en las últimas décadas es el Dióxido de Carbono (CO_2) (de Vries et al., 2016). Este compuesto es vital para el Ciclo del Carbono, pero en exceso es nocivo, generando concentraciones excesivas en la atmósfera, por consiguiente alterando la capacidad de absorción del CO_2 de la tierra y el océano (Siegenthaler and Sarmiento, 1993), lo que produce variaciones en la temperatura de la biósfera (Friedlingstein et al., 2001).

*Corresponding author

Email address: paulasosa@usantotomas.edu.co (Paula Vanessa Sosa)

Aunque pueden ser diversas las causas de dicho fenómeno, una de ellas se puede atribuir a las actividades económicas de los países, por lo menos en etapas iniciales (Grossman and Krueger, 1995). Desde esta perspectiva la emisión de CO_2 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 and Olomola, 2017; Özokcu and Özdemir, 2017).

En la literatura económica se ha realizado una descripción 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 hace los niveles de contaminación, de manera decreciente, 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 and Khan, 2013) y, en donde el crecimiento económico no implica a largo plazo menor degradación ambiental (Jusmet and 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 CO_2 (Đokić and 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 tradicional-

mente es la correcta en relación con las emisiones de CO_2 . 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 la degradación ambiental puede ser más importante analizar la complejidad de la producción que el volumen de la misma. 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, dado 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 tendrá 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 dicha hipótesis de CAK para Colombia. Este trabajo contribuye 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 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: la presente introducción; en la sección 2, se proporcionará la revisión de la literatura; en la sección 3, se aborda los aspectos metodológicos; en la sección 4, los datos empleados; en la sección 5, se presentan los resultados encontrados y el análisis; en la sección 6, se brindará información concluyente que sirva para generar políticas públicas encaminadas a mitigar esta problemática y por último, en la sección 7, se muestra el código empleado.

2. Revisión de 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, 2017). Por ejemplo, recientemente autores como Can and Gozgor (2017) y Apergis and 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 repercuten 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 et al., (2014) evidenciaron que para Malasia durante el período de 1970-1980, las emisiones de CO_2 per cápita mostraron una disminución junto con un aumento del PIB per cápita, pero esto cambió drásticamente desde 1980 hasta 2009, en donde las emisiones de CO_2 per cápita aumentaron y reflejaron un incremento en el ingreso per cápita (Begum et al., 2014). Por lo que se concluyó que la hipótesis ambiental de kuznets para esta economía no se cumplía.

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 repercuta sobre la degradación ambiental, sino por el contrario, estas se pueden evidenciar la manera en que producen las economías, puesto que esta puede afectar significativamente los aumentos o disminuciones de los niveles de contaminación. Recientemente algunos autores han empe-

zando a emplear medidas alternativas de producción (Fleurbaey and Blanchet, 2013). Entre estas medidas se encuentra el Índice de Complejidad Económica, elaborado por Hausmann and Hidalgo (2011), el cual, 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, la cual se basa en los estudios de Hidalgo et al., (2007) en 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 and Teodoru, 2019).

No obstante, la literatura alrededor del análisis entre el Índice de Complejidad Económica y la emisión de CO_2 es limitada y se concentra mayoritariamente en países desarrollados (Can and Gozgor, 2017, Gozgor et al., 2018, Liu et al., 2019).

Sin embargo, existen investigaciones que pretenden validar la CAK, según las mediciones convencionales del PIB. Autores como Jin and Kim, (2019) muestran que el panorama latinoamericano es alentador pues ha logrado conseguir un crecimiento económico significativo como en 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, como es el caso de México, el cual presenta el mayor nivel de ineficiencia de carbono (Jin and Kim, 2019). Dado ese rezago, en Latinoamérica no se cumple la hipótesis medioambiental de Kuznets (Correa, 2007).

Asimismo, (Sánchez and Caballero, 2019) realiza el estudio 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. En este determinó que para las emisiones de CO_2 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, y así conseguir estabilizar las emisiones de CO_2 , y en consecuencia disminuir la contaminación y degradación ambiental.

Además, Saravia, (2002) 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 SO_2 y CO_2 , mediante un análisis de datos panel. En este estudio, se encontró una relación positiva entre CO_2 y el $PIB_{per\acute{c}apita}$, luego, esta relación se vuelve negativa ante incrementos de $PIB_{per\acute{c}apita}$, 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 et al., (2005) emplean la CAK, tomando como variable dependiente la emisión de CO_2 y SO_2 y las independientes el PIB per cápita, coeficiente GINI y toman 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 Gonzalez Morales and 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 CO_2 , los cuales se reducen considerablemente hasta alcanzar un determinado nivel de PIB, empero a partir de un incremento en el nivel de PIB las emisiones CO_2 crecen nuevamente (Gonzalez Morales and 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 CO_2 y PM_{10} . 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 CO_2 y el parque automotor entre 1921-2010 y 1960-2010, respectivamente. Sin embargo, el tercer modelo, no permitió comprobar la relación entre el PIB y las emisiones de CO_2 , por el contrario, mostró una relación inversa entre la emisión de PM_{10} 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. Análisis sobre las repercusiones que ocasionan conjuntamente las emisiones de CO_2 , el consumo de energía, crecimiento y la complejidad económica para Colombia no se han utilizado.

Dada la importancia de estas variables hay investigaciones que aseguran que el aumento en la emisión de CO_2 es producto del crecimiento económico sostenido, puesto que existe una mayor demanda sobre todo en el área urbana de consumo de energía (Onuonga, 2012) (Mahalik and Mallick, 2014). Esto acompañado de un aumento en la tasa demográfica, la cual genera mayor contaminación inicialmente, es decir, que existe repercusión del consumo de energía sobre la emisión de dióxido de carbono (Salahuddin and 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 relación que tienen estas variables sobre el CO_2 .

De igual forma, este documento pretende implementar una nueva metodología conocida como ANFIS, la cual fue propuesta por Jang, (1993) y la define como un proceso de aprendizaje que se presenta mediante un sistema neuro-difuso, 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 de funciones no-lineal que permite identificar componentes no lineales, prediciendo una serie de eventos caóticos de importantes resultados como se puede observar para el caso colombiano (Jang, 1993).

3. Metodología

Para evidenciar la hipótesis de Kuznets se implementarán dos tipos de métodos. El primero, conocido como ANFIS, sirve particularmente en casos en los cuales los modelos presentan características no-lineales. En este caso, analizar si el ICE es un factor influyente en las emisiones de CO_2 y, si la relación entre ellas tiene forma de U-invertida. Posterior a este análisis se realiza el mismo procedimiento para el PIB per cápita. Luego, como análisis de robustez, se emplearán técnicas econométricas para evaluar esta relación. Específicamente, se emplearán los siguientes modelos de series de tiempo: DOLS, FMOLS y CCR, las cuales han sido empleados tradicionalmente en la literatura (Jalil and Mahmud, 2009; Saboori et al., 2012; Robledo and Olivares, 2013). Para cada serie la prueba de raíz unitaria será empleada para identificar estacionariedad que permita utilizar los modelos señalados.

3.1. ANFIS

El sistema de inferencia adaptativo neuro-difuso (ANFIS), el cual 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 también por medio de comparaciones con otras medidas como el error cuadrático medio y desviaciones estándar del pronóstico.

De igual modo, este 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 compararse con otros modelos de redes neuronales y/o 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.

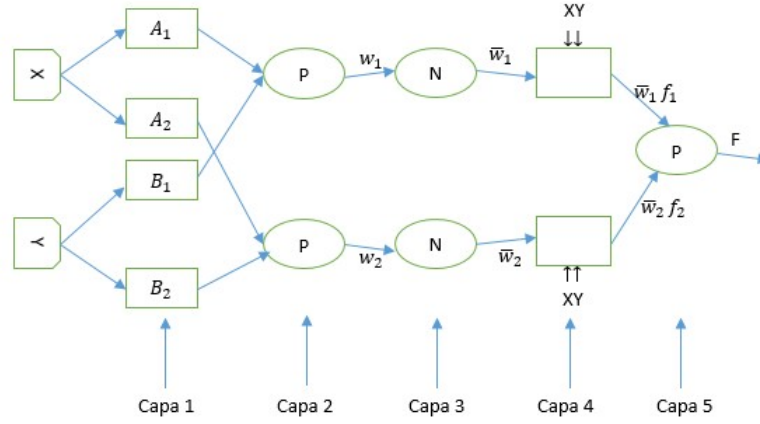


Figura 1. Arquitectura modelo ANFIS, basado en (Jang, R. 1993)

Para evidenciar la arquitectura presentada en este modelo se toman 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 ó Y le corresponden dos términos lingüísticos, para X es ($A_1 = ALTO$ Ó $A_2 = BAJO$) 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, R. 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:

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

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

Esta capa puede tomar un máximo de 1 y 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 sólo 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.

$$O_i^2 = \mu_{Ai}(X) * \mu_{Bi}(Y), \text{ para } i = 1, 2 \quad (3)$$

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.

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

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 et al., 2010)

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

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.

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

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).

3.2. Análisis de Cointegración

Tradicionalmente en la literatura, para evaluar la hipótesis de CAK se emplean modelos de cointegración (Jalil and Mahmud, 2009; Saboori et al., 2012; Robledo and 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 $\ln(CO_2)$ 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 $\alpha_5 < 0$, 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. Así mismo, la prueba Dickey-Fuller (1981), que muestra la existencia de raíz unitaria como hipótesis nula, además se empleó la prueba Choi (2001), el 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 (1993), además de incorporar el modelo FMOLS propuesto por Phillips y Hansen (1990) y el modelo CCR planteado por Park (1992). 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, endogeneidad y proveen resultados no sesgados en muestras pequeñas (Ahmad et al., 2017).

4. Datos

Los datos abarcan el periodo comprendido entre 1971 a 2014 para Colombia. 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 CO_2 per cápita (kt), tomado de (<https://data.worldbank.org/indicator>); PIB per cápita a PPP actuales (en mil.2011US"") y el consumo de energía per cápita en (Kwh) tomado de UPME, el ICE basados en el índice propuesto por Hidalgo y Hausman del Observatorio de Complejidad Económica (OEC) del MIT para Colombia (<http://atlas.media.mit.edu/en/>) y la población urbana tomada del DANE.

Para el modelo de ANFIS se toman las variables en log-log, y para los modelos FMOLS, DOLS y CCR en log-log, población urbana no se toma pues distorsiona los resultados. Posteriormente, la red ANFIS empleada tiene cuatro entradas (es decir, PIB per cápita, PIB per cápita cuadrado, población y consumo de energía) y un producto (es decir, la variable dependiente de emisiones de CO_2). Además, se empleó otro modelo de red ANFIS que emplea cuatro entradas (es decir, ECI, ECI al cuadrado, población y consumo de energía) y el mismo producto (es decir, emisiones de CO_2).

5. Resultados y Discusión

A partir del modelo ANFIS, se presentan los resultados en la tabla 1, (la precisión de las predicciones son evaluadas a través de los errores: Error cuadrático medio (MSE) y su raíz cuadrada (RMSE) y el error medio de porcentaje absoluto (SMAPE). Se divide la muestra en dos criterios: el primero muestra la relación de CO_2 con PIB y la segunda CO_2 con 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.

Cuadro 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

Nota: Resultados basados en un modelo ANFIS con la ayuda del paquete "frbs" de R,

Los resultados señalan que probablemente ICE tendrá un comportamiento lineal. Entonces, y de acuerdo a la hipótesis, las economías a medida que 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 CO_2 . Este escenario donde no es necesario pasar por la fase de contaminación sino la existencia cada vez más creciente en términos de complejidad económica, suprime los niveles de emisiones de CO_2 . 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, se procede a realizar las tres pruebas de raíz unitaria: la prueba aumentada de Dickey-Fuller (ADF), GLS Dickey Fuller (ERS) y la prueba de Phillips-Perron (PP) (Phillips y Perron, 1988), tanto para el nivel como para las primeras diferencias de todas las variables sin tendencia e intercepto (Ver cuadro 2). Esta

estacionariedad tiene en cuenta que las variables no varían en función del tiempo, es decir, en la serie la varianza no cambia, lo cual generalmente mejora la estimación.

Asimismo, la hipótesis nula de dichas pruebas afirma que la variable contiene raíz unitaria. En el mismo cuadro, se realiza el procedimiento con tendencia. Como se observa, las variables son estacionarias en primera diferencia.

Cuadro 2: Pruebas de raíz unitaria con y sin tendencia

Prueba	LnPIB		LnICE		LnEnergía		LnCO2	
	Estadístico	Probabilidad	Estadístico	Probabilidad	Estadístico	Probabilidad	Estadístico	Probabilidad
Maddala y Wu (ADF - Fisher Chi-Square)	0.427	0.982	-2.486	0.126	-1.230	0.653	-2.091	0.249
(GLS Dickey-Fuller (ERS))	1.343	0.187	-2.282	0.027	1.010	0.318	-1.448	0.154
Choi (PP - Fisher Chi-Square)	0.008	0.954	-2.518	0.028	-1.252	0.643	-2.077	0.255
Con diferencia								
Prueba	LnPIB		LnECI		LnEnergía		LnCO2	
	Estadístico	Probabilidad	Estadístico	Probabilidad	Estadístico	Probabilidad	Estadístico	Probabilidad
Maddala y Wu (ADF - Fisher Chi-Square)	-3.976	0.004	-5.597	0.000	-6.566	0.000	-6.892	0.000
(GLS Dickey-Fuller (ERS))	-3.240	0.002	-5.533	0.000	-5.056	0.000	-6.973	0.000
Choi (PP - Fisher Chi-Square)	-3.981	0.004	-5.599	0.000	-6.564	0.000	-6.904	0.000
CON TENDENCIA								
Prueba	LnPIB		LnECI		LnEnergía		LnCO2	
	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
(GLS Dickey-Fuller (ERS))	-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	LnPIB		LnECI		LnEnergía		Co2	
	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
(GLS Dickey-Fuller (ERS))	-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.

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.

El cuadro 3 muestra los resultados de estos modelos, sin incluir ningún tipo de control y separando el efecto del PIB e 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.

Cuadro 3: Resultados de los modelos de Regresión para evaluar los efectos sobre las emisiones de CO_2

	DOLS	FMOLS	CCR	DOLS	FMOLS	CCR
ln(PIB)	16.398 (10.458)	16.933** (8.022)	14.882* (7.634)			
ln(PIB ²)	-0.439 (0.320)	-0.456* (0.244)	-0.396* (0.234)			
ECI				-0.640*** (0.211)	-0.674*** (0.158)	-0.570*** (0.134)
Tendencia	-0.037*** (0.006)	-0.038*** (0.005)	-0.035*** (0.004)	0.000 (0.002)	0.001 (0.002)	0.001 (0.002)
Constante	-148.874* (85.524)	-153.110** (65.978)	-135.755*** (62.304)	0.476*** (0.043)	0.468*** (0.049)	0.462*** (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 CO_2 . Los rezagos máximos fueron escogidos bajo el criterio de Schwert; la varianza de largo plazo de las series de tiempo fueron calculadas usando Quadratic Spectral kernel.

Aunque estos resultados se muestran prometedores, no son concluyentes. En el cuadro 4, se incluye al mismo tiempo tanto al PIB y al ICE como controles para observar la robustez de los resultados del cuadro 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 CO_2 (Gozgor et al., 2018), evidenciando así una relación positiva, es decir que ante incrementos en el consumo de energía mayor será los niveles de contaminación, y en consecuencia al incorporar el consumo de energía, las variables pierdan su significancia. Por tanto, no es pertinente afirmar que en el caso colombiano se comple la hipótesis medioambiental de Kuznets en el *PIB* y el *ICE*.

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 and 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 7.600 dólares aproximadamente para llegar al punto más alto de la curva y conseguir

Cuadro 4: Resultados de los modelos de Regresión para evaluar los efectos sobre las emisiones de CO_2

	DOLS	FMOLS	CCR
ln(PIB)	-3.442 (13.074)	-2.684 (8.317)	-3.269 (8.224)
ln(PIB ²)	0.150 (0.395)	0.120 (0.250)	0.136 (0.247)
ECI	-0.083 (0.177)	0.003 (0.074)	-0.006 (0.084)
Energía	0.401** (0.186)	0.436*** (0.133)	0.432*** (0.143)
Tendencia	-0.031*** (0.008)	-0.030*** (0.004)	-0.028*** (0.005)
Constante	14.895 (107.602)	10.337 (68.538)	15.667 (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 fueron calculadas usando Quadratic Spectral kernel.

estabilizar las emisiones contaminantes que generan la degradación ambiental.

Asimismo, Correa et al., (2005) evidenció 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 Gonzalez Morales and 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 un 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 que este trabajo de investigación tiene como valor agregado la aplicación de una nueva metodología, así como variables diferentes a las estudiadas, las cuales permiten inferir una relación distinta en el mediano plazo. Estas 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 relacionado con el PIB per cápita.

6. 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) entre el PIB y las emisiones de CO_2 . Además, se consiguió obtener los resultados esperados del no cumplimiento de dicha hipótesis para ICE, dado su comportamiento lineal. Por lo que, se definió inicialmente que el efecto del PIB sobre las emisiones de CO_2 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, 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 CO_2 .

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 debe 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

- [1] Ahmad, N., Du, L., Lu, J., Wang, J., Li, H.-Z., and Hashmi, M. Z. (2017). Modelling the co2 emissions and economic growth in croatia: is there any environmental kuznets curve? *Energy*, 123:164–172.
- [2] Aiyetan, I. R. and 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).
- [3] Apergis, N. and Ozturk, I. (2015). Testing environmental kuznets curve hypothesis in asian countries. *Ecological Indicators*, 52:16–22.
- [4] Begum, R. A., Sohag, K., Abdullah, S. M. S., and Jaafar, M. (2015). Co2 emissions, energy consumption, economic and population growth in malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41:594–601.
- [5] Calvo, L. (2013). Medición de la relación entre crecimiento económico y emisiones de co2 y pm10 en colombia.
- [6] Can, M. and Gozgor, G. (2017). The impact of economic complexity on carbon emissions: evidence from france. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(19):16364–16370.
- [7] Catalán, H. (2014). Curva ambiental de kuznets: implicaciones para un crecimiento sustentable. *Economía Informa*, 389:19–37.
- [8] Correa, F. (2007). Crecimiento económico, desigualdad social y medio ambiente: evidencia empírica para américa latina. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 6(10):12–30.
- [9] Correa, F., Vasco Ramírez, A. F., and Pérez Montoya, C. (2005). La curva medioambiental de kuznets: evidencia empírica para colombia. grupo de economía ambiental (gea). *Semestre económico*, 8(15):13–30.
- [10] de Vries, W., Du, E., Butterbach-Bahl, K., Schulte-Uebbing, L., and Dentener, F. (2016). Human nitrogen fixation and greenhouse gas emissions: a global assessment. In *7th International Nitrogen Initiative 2016*.
- [11] Dinda, S. (2004). Environmental kuznets curve hypothesis: a survey. *Ecological economics*, 49(4):431–455.
- [12] Fleurbaey, M. and Blanchet, D. (2013). *Beyond GDP: Measuring welfare and assessing sustainability*. Oxford University Press.
- [13] Friedlingstein, P., Bopp, L., Ciais, P., Dufresne, J.-L., Fairhead, L., LeTreut, H., Monfray, P., and Orr, J. (2001). Positive feedback between future climate change and the carbon cycle. *Geophysical Research Letters*, 28(8):1543–1546.
- [14] Gómez Vargas, E., Obregón Neira, N., and Socarras Quintero, V. (2010). Application of neuro-fuzzy anfis model vs neural network, to the predictive monthly mean flow problem in the bogotá river in villapinzón. *Tecnura*, 14(27):18–29.
- [15] Gonzalez Morales, C. C. and Pinzón Rico, D. M. (2018). Curva de kuznets ambiental: evidencia empírica

para colombia 1971-2014.

- [16] Gozgor, G., Lau, C. K. M., and Lu, Z. (2018). Energy consumption and economic growth: New evidence from the oecd countries. *Energy*, 153:27–34.
- [17] Grossman, G. M. and Krueger, A. B. (1995). Economic growth and the environment. *The quarterly journal of economics*, 110(2):353–377.
- [18] Hausmann, R. and Hidalgo, C. A. (2011). The network structure of economic output. *Journal of Economic Growth*, 16(4):309–342.
- [19] Hausmann, R., Hidalgo, C. A., Bustos, S., Coscia, M., Simoes, A., and Yildirim, M. A. (2014). *The atlas of economic complexity: Mapping paths to prosperity*. Mit Press.
- [20] Hidalgo, C. A., Klinger, B., Barabási, A.-L., and Hausmann, R. (2007). The product space conditions the development of nations. *Science*, 317(5837):482–487.
- [21] Jalil, A. and Mahmud, S. F. (2009). Environment kuznets curve for co2 emissions: a cointegration analysis for china. *Energy policy*, 37(12):5167–5172.
- [22] Jang, J.-S. (1993). Anfis: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 23(3):665–685.
- [23] Jang, J.-S. (1996). Input selection for anfis learning. In *Proceedings of IEEE 5th International Fuzzy Systems*, volume 2, pages 1493–1499. IEEE.
- [24] Jin, T. and Kim, J. (2019). A comparative study of energy and carbon efficiency for emerging countries using panel stochastic frontier analysis. *Scientific reports*, 9(1):6647.
- [25] Jusmet, J. R. and 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.
- [26] Karsch, N. M. (2019). Examining the validity of the environmental kuznets curve. *Consilience*, (21):32–50.
- [27] Kuznets, S. (1955). Economic growth and income inequality. *The American economic review*, 45(1):1–28.
- [28] Liu, H., Kim, H., and Choe, J. (2019). Export diversification, co 2 emissions and ekc: panel data analysis of 125 countries. *Asia-Pacific Journal of Regional Science*, 3(2):361–393.
- [29] Mahalik, M. K. and Mallick, H. (2014). Energy consumption, economic growth and financial development: exploring the empirical linkages for india. *The Journal of Developing Areas*, pages 139–159.
- [30] Neagu, O. and 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.
- [31] Đokić, A. and 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.

- [32] Onuonga, S. M. (2012). The relationship between commercial energy consumption and gross domestic income in kenya. *The Journal of Developing Areas*, pages 305–314.
- [33] Özokcu, S. and Özdemir, Ö. (2017). Economic growth, energy, and environmental kuznets curve. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72:639–647.
- [34] Renner, S. (2018). Poverty and distributional effects of a carbon tax in mexico. *Energy Policy*, 112:98–110.
- [35] Rishbeth, H. (1990). A greenhouse effect in the ionosphere? *Planetary and Space Science*, 38(7):945–948.
- [36] Robledo, J. C. and 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.
- [37] Saboori, B., Sulaiman, J., and Mohd, S. (2012). Economic growth and co₂ emissions in malaysia: a cointegration analysis of the environmental kuznets curve. *Energy policy*, 51:184–191.
- [38] Salahuddin, M. and Khan, S. (2013). Empirical link between economic growth, energy consumption and co₂ emission in australia. *The Journal of Developing Areas*, pages 81–92.
- [39] Sánchez, L. and 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):41.
- [40] Saravia, A. (2002). América latina y el caribe: Efectos de equidad e institucionalidad en la curva ambiental de kuznets. *Universidad Mayor de San Simón*, (23).
- [41] 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*. CEPAL.
- [42] Seneviratne, S. I., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C. M., Kanae, S., Kossin, J., Luo, Y., Marengo, J., McInnes, K., Rahimi, M., et al. (2017). Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment.
- [43] Siegenthaler, U. and Sarmiento, J. L. (1993). Atmospheric carbon dioxide and the ocean. *Nature*, 365(6442):119.