



**RELACIÓN ENTRE LAS EMISIONES DE CO<sub>2</sub>, EL CONSUMO DE ENERGÍA Y EL  
PIB PARA COLOMBIA, BRASIL Y CHILE 1971 - 2014**

**RELATIONSHIP BETWEEN CO<sub>2</sub> EMISSIONS, ENERGY CONSUMPTION AND GDP  
FOR COLOMBIA, BRAZIL AND CHILE 1971 - 2014**

Christian Camilo Burgos Delgado  
ccburgosd@libertadores.edu.co

Luis Guillermo Torres Enríquez  
lgtorrese@libertadores.edu.co

Fundación Universitaria Los Libertadores

**RESUMEN**

Con este trabajo se busca comprobar si existe una relación en el aumento de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), con el incremento del Producto Interno Bruto (PIB) y el consumo de energía (Kw h) en Colombia, Brasil y Chile durante el periodo de 1971 - 2014. La metodología usada para comprobar esta relación fue el panel de datos, además de la comprobación de la existencia de la Curva de Kuznetz Ambiental (CKA) y el pronóstico las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para Colombia con un modelo univariado. Los resultados obtenidos muestran que a largo plazo el consumo de energía es decisivo en el incremento de del dióxido de carbono. Igualmente, se evidencia de forma empírica la existencia de una Curva de Kuznetz Ambiental, lo cual indica que el aumento del PIB y Kw h incrementan las emisiones del CO<sub>2</sub>.

**Palabras clave:** Panel de datos, Curva de Kuznetz Ambiental.

**ABSTRACT**

The objective of this study is to verify if there is a relationship between the increase in carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions, with the increase in Gross Domestic Product (GDP) and energy consumption (Kw h) in Colombia, Brazil and Chile during the period from 1971 to 2014. The



methodology used to verify this relationship was the data panel, in addition to the verification of the existence of the Environmental Kuznetz Curve (EKC) and the forecast of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions for Colombia with a univariate model. The results obtained show that in the long-term energy consumption is decisive in increasing carbon dioxide. Likewise, the existence of an Environmental Kuznetz Curve is empirically evidenced, which indicates that the increase in GDP and Kw h increase CO<sub>2</sub> emissions.

**Keywords:** Data panel, Environmental Kuznetz Curve.

## INTRODUCCIÓN

Cada día se hace más y más latente que los países de primer mundo, es decir, aquellos con gran poder económico, realizan grandes inversiones a través de multinacionales a países pobres o menos desarrollados, como son catalogados (Gómez, 2010). No es desconocido que estas inversiones se realizan principalmente al sector primario y un ejemplo de ello es Colombia, que durante el 2016 “los sectores de electricidad, gas y agua fueron los que recibieron mayor cantidad de recursos, los cuales representaron el 53,1% del total de la inversión extranjera directa” (Procolombia).

“El crecimiento económico de Latinoamérica al recibir dichas inversiones va en aumento, por ejemplo, para el 2018 se incrementó en un 1.6 % y para el 2019 un 0.6%” (Fernández Noemy, 2020). Pero ¿este crecimiento se ve reflejado en la disminución de la pobreza y el aumento de la asequibilidad a la educación superior? O más aun ¿estamos condenando el bienestar de nuestros hijos y futuros habitantes de nuestros países?

Bajo este último interrogante se abre la necesidad indagar si las actividades aceleradas en el sector primario que se están desarrollando no solo en Colombia, sino en diferentes países de Latinoamérica, como lo son Chile y Brasil, están aumentando los índices de contaminación y por ende la disminución de los recursos ambientales de cada país y la salud de sus habitantes.

Una forma de plantear una relación entre el crecimiento económico, en este caso representado por el PIB (Producto Interno Bruto), la contaminación, representado por el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el consumo de energía representado por Kilovatios hora (Kw h), es a través de la Curva de Kuznets Ambiental (CKA), “la cual se basa en la hipótesis de que, en las primeras etapas de



crecimiento económico de un país, tiende a contaminar más, hasta alcanzar un punto de inflexión en el que la degradación ambiental comienza a disminuir” (Parra María, 2016, p.6). Para el desarrollo de este trabajo se obtuvieron datos de los tres países mencionados anteriormente, desde el año 1971 al 2014. El estudio se realizará contando con la metodología de datos de panel que combinan una dimensión temporal (series de tiempo) con una transversal (corte transversal). Además, se busca establecer cuál de las variables tiene un mayor impacto y realizar un pronóstico univariado, el cual, busca obtener valores futuros de la variable principal, contaminación (CO<sub>2</sub>) para Colombia.

Uno de los objetivos de este estudio es que las principales organizaciones decisorias de cada país y porque no, cada individuo, tomen conciencia y exploren nuevos mecanismos alternos, para reducir el consumo de energía y los índices de contaminación, sin impactar de forma negativa la economía y desarrollo de cada familia y/o país.

## **REFERENTES TEORICOS**

Numerosos investigadores han buscado establecer la relación del producto interno bruto (PIB) y las diferentes variables que permiten establecer los efectos negativos sobre el medio ambiente, tanto en Colombia y como en Latino América. Para el desarrollo de este trabajo se revisaron varios artículos y trabajos relacionados. A continuación, se presentarán los más destacados.

Campo y Olivares (2013) realizan un análisis de datos internacionales en un grupo de países conocidos como los CIVETS (Colombia, Indonesia, Vietnam, Egipto, Turquía y Sudáfrica), en el periodo de 1985 a 2007. En dicho estudio buscan establecer la relación existente entre las emisiones del CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), el consumo de energía y el PIB. En dicho trabajo se utiliza la metodología de datos de panel no estacionarios, acompañado de raíces unitarias y cointegración. En este estudio se puede concluir que, a largo plazo, el crecimiento económico y el consumo de energía son determinantes en el calentamiento global a través del incremento del CO<sub>2</sub> para los países del CIVET.



Parra (2016) desarrolló un estudio en búsqueda de explorar el efecto del crecimiento económico medido a través del PIB per cápita, el consumo de energía eléctrica, el porcentaje de energía eléctrica proveniente de combustibles fósiles, las exportaciones, importaciones y los impuestos relacionados con el ambiente en las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en los 34 países que constituyen la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE); con el objetivo de comprobar la hipótesis de la Curva de Kuznetz Ambiental (CKA). Para lograrlo se constituyó un panel de datos para el periodo 1995- 2011. Se crearon dos modelos dinámicos, el primero, utilizando la hipótesis convencional de la CKA; y el segundo con una CKA ampliada. Entre los resultados obtenidos se obtuvo que existe un efecto significativo del consumo de energía eléctrica, la energía proveniente de combustibles fósiles, las importaciones, los impuestos relacionados con el ambiente y el PIB per cápita en la emisión de CO<sub>2</sub>, gas con mayor participación en el efecto invernadero.

Por otro lado, Rentería, Toledo, Bravo y Ochoa (2016) realizaron el trabajo de comprobar si las emisiones contaminantes son el resultado del crecimiento económico y el consumo de energía en el Ecuador para el periodo 1971-2010. La metodología se basó en econometría de series de tiempo, las mismas que incluyeron pruebas de estacionariedad, vectores autorregresivos (VAR) y cointegración de Johansen. Los resultados obtenidos permitieron concluir que la hipótesis de la Curva de Kuznets Ambiental (CKA) en forma de U invertida no se cumple para el caso ecuatoriano; sin embargo, se puede observar una relación lineal monótona creciente, la cual señala que el PIB está asociado a crecientes niveles de emisiones de CO<sub>2</sub> a largo plazo; con respecto al consumo de energía (CE) se encontró una relación inversa en el largo plazo, es decir, a medida que aumenta el consumo de energía, el PIB disminuye. Dada la relación entre degradación ambiental y el PIB para el caso ecuatoriano.

Cruz (2009), encuentra que para Colombia existe una relación de ingreso per cápita y emisiones de CO<sub>2</sub> denominada Curva de Kuznets Ambiental (CKA). De igual forma muestra que las emisiones de DBO no cumplen con la CKA, pero encuentra una relación estadísticamente significativa entre el ingreso per cápita y el DBO. Finalmente se concluye que el CKA es solo una de muchas relaciones entre contaminación y crecimiento económico.



González y Alonso (2017), pretende explicar cómo se ve afectada la desigualdad ante cambios en el crecimiento económico, la población y la tasa de cambio nominal. Siguiendo la hipótesis de la curva de Kuznetz, una desmejora del indicador de inequidad a corto plazo logra mayor igualdad a largo plazo, como efecto del crecimiento económico. El estudio se hace para Colombia, entre 1977 y 2005, con datos trimestrales. Los resultados sugieren que la hipótesis de Kuznets puede explicar la relación entre crecimiento económico y distribución del ingreso en este país.

Gómez (2010) estudia el crecimiento económico, consumo de energía y emisiones contaminantes en la economía mexicana. Utilizó una metodología de ciclos económicos reales, vectores autorregresivos (modelos VAR) y la prueba de causalidad de Granger, y obtiene como resultado que existe una relación positiva entre crecimiento económico, el consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub>, que el consumo de energía antecede al crecimiento económico, y que tanto cambios en el consumo de energía como crecimiento económico se explican por incrementos en el consumo de energía de los sectores de la economía industrial y de transporte.

## **METODOLOGÍA**

El tipo de estudio es descriptivo experimental con datos de corte transversal y longitudinal, se utilizó el enfoque mixto, es decir, cuantitativo y cualitativo dado que no se remite únicamente al modelamiento matemático sino a la búsqueda de relaciones entre las variables a analizar, la metodología está basada en la propuesta de Hurtado (2000)

Para la categorización de la información se conformó el conjunto de datos con las series extraídas del Banco Mundial, correspondientes al periodo 1970-2014 de las variables: Ingreso per cápita a precios constantes de 2005 (USD), Consumo de energía per cápita (KWh) y Emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita (Ton CO<sub>2</sub>) de Colombia, Brasil y Chile. Los análisis se realizarán con las series en logaritmo.

De acuerdo con los objetivos planteados, el tratamiento de los datos se realizó desde dos frentes:

- Modelo de serie de tiempo univariado tipo ARIMA para pronosticar la variable de CO<sub>2</sub> para Colombia. La implementación de esta metodología fue introducida por Box y Jenkins (1976)



y la cual tiene como objetivo determinar un modelo apropiado para realizar el pronóstico. Esta metodología cuenta con las siguientes fases:

- 1- **Identificación.** A través del análisis de los gráficos de autocorrelación (AFC) y autocorrelación parcial (PAFC) para determinar el proceso ARIMA (p, d, q). Este procedimiento identifica si la serie aparenta no ser estacionarias y para ello se aplica transformaciones a la serie con el fin de que cumpla con la condición de estacionariedad.
  - 2- **Estimación.** Durante esta etapa se ponen a prueba los modelos identificados y se examinan los parámetros estimados. Lo ideal es seleccionar un modelo estacionario y parsimonioso que tenga un buen ajuste, para ello se utilizan criterios como lo son: Dickey Fuller y Phillips Perron.
  - 3- **Diagnóstico.** Aquí se confirma si el modelo es idóneo o no, en este caso se debe validar si los residuos del modelo siguen un proceso de ruido blanco además de validar que la correlación de los residuales es igual a cero, provienen de una distribución normal y tienen un comportamiento de aleatoriedad, para ello se utilizan los test de L Jung Box, Jarque Bera y Runs Test. (Chang, 2019)
- Modelo de datos de panel: Dadas las limitaciones del modelo anterior para incluir a más de un individuo en el modelo, se optó por realizar el análisis con datos de panel para determinar los efectos en conjunto que tienen el PIB y el consumo de Energía sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> y la comprobación de la existencia de una Curva de Kuznets Ambiental. De este modo la verificación de la hipótesis de la CKA se realiza en 3 pasos:
    - 1- Prueba de raíces unitarias para panel de datos con las pruebas de Im, Pesaran y Shin (2003) conocida como la prueba IPS, Levin, Lin y Chu (2002), Breitung (2000), Maddala y Wu (1999) (Fisher tipo ADF) y Choi (2001) (Fisher tipo PP). Con el fin de garantizar que las series son integradas de orden I(1).
    - 2- Prueba de cointegración para el panel con el fin de hallar evidencia de una relación de las variables en el largo plazo por medio del test de Kao.



- 3- Estimación de la ecuación de cointegración con el método (FMOLS) *Fully Modified Ordinary Least Squares* (Pedroni, 2000) que da cuenta de las elasticidades relativas a la hipótesis de la CKA.

La ecuación a estimar de acuerdo con la literatura internacional de economía ambiental sigue la forma:

$$LCO2 = \beta_0 + \beta_1 LCE + \beta_2 LPIB + \beta_3 LPIB^2 + \varepsilon$$

$LCO2$  : Logaritmo de las emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita de cada país.

$LCE$  : Logaritmo del consumo de energía per cápita de cada país

$LPIB$  : Logaritmo del PIB per cápita de cada país

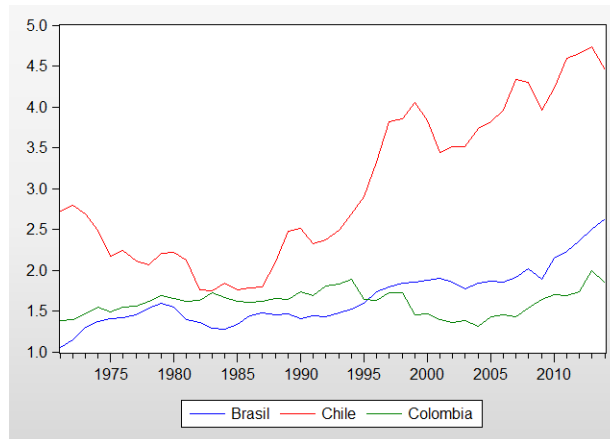
$LPIB^2$  : Variable para probar la hipótesis de la CKA

Si existe la relación descrita por la CKA se espera:  $\beta_1 > 0$ ;  $\beta_2 > 0$ ;  $\beta_3 < 0$ .

## RESULTADOS

**DATOS.** Para el desarrollo de este trabajo se tomó un conjunto de datos con las series extraídas del Banco Mundial, correspondientes al periodo 1970-2014 de Colombia, Brasil y Chile. A continuación, se muestra el comportamiento de cada una de las series de estos países.

**Gráfico 1. Emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita (toneladas CO<sub>2</sub>) 1970 - 2014**

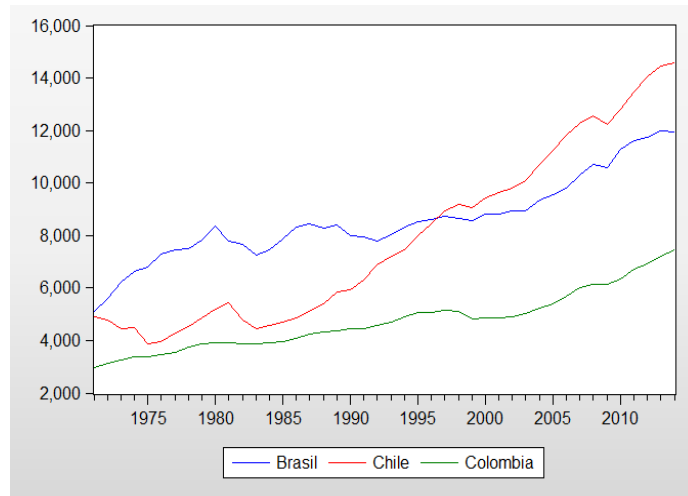


Fuente: elaboración propia



En el gráfico 1, se muestra el comportamiento de las emisiones de CO<sub>2</sub> y en el cual se evidencia que Chile es el país que tiene mayores emisiones y su incremento ha sido mayor desde 1990. Por otra parte, el comportamiento de las emisiones de Brasil y Colombia han sido más estable durante todo el periodo de análisis y con leve repunte por parte de Brasil desde el año 2003.

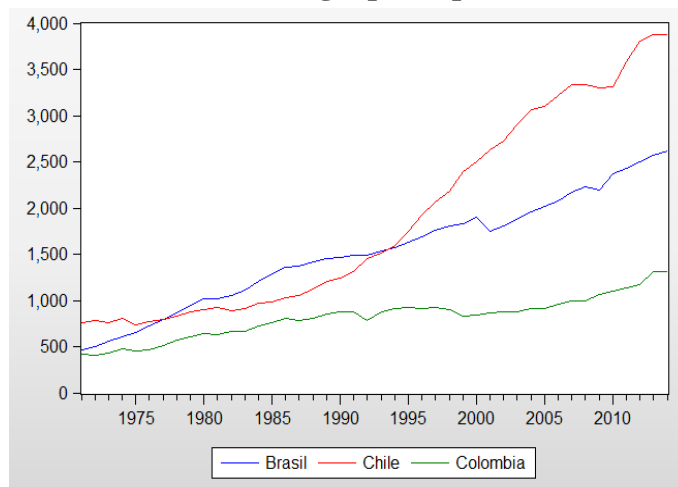
**Gráfico 2. PIB per cápita (USD) 1970 - 2014**



Fuente: elaboración propia

En la gráfica 2, se observa en el primer puesto del PIB per cápita hasta 1996 a Brasil, posteriormente se evidencia un gran repunte por parte de Chile. En cuanto los resultados colombianos se observa una pequeña tendencia positiva, pero mucho menor que los otros dos países de análisis.

**Gráfico 3. Consumo de energía per cápita (KWh) 1970 - 2014**



Fuente: elaboración propia





En la gráfica 3, se evidencia que el país que tiene un mayor consumo de energía per cápita es Chile, este lugar fue obtenido a partir del año de 1995, dejando relegado a Brasil en este ítem. Los comportamientos de los tres países en este rubro tienen una tendencia positiva, pero para Colombia, su crecimiento ha sido mucho menor.

En las siguientes tablas se presentará la estadística descriptiva de cada una de las series en estudio agrupadas por país.

**Tabla 1. Estadística descriptiva de emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita (toneladas CO<sub>2</sub>) 1970 - 2014**

Estadístico	Brasil	Chile	Colombia
Media	1,660	3,011	1,604
Mediana	1,543	2,709	1,626
Desviación estándar	0,351	0,957	0,153
Máximo	2,631	4,736	1,994
Mínimo	1,053	1,750	1,309

Fuente: elaboración propia

En la tabla 1 se puede observar que el país con mayor media es Chile, al igual que con la mayor desviación, lo que indica que es el país con mayor crecimiento de contaminación en lo referente a las emisiones del CO<sub>2</sub>.

**Tabla 2. Estadística descriptiva del PIB per cápita (USD) 1970 – 2014**

Estadístico	Brasil	Chile	Colombia
Media	8585,34	7885,09	4735,34
Mediana	8369,73	7047,24	4636,31
Desviación estándar	1598,37	3381,21	1119,93
Máximo	11993,48	14561,33	7449,09
Mínimo	5108,40	3856,04	2978,23

Fuente: elaboración propia

En la tabla 2 se puede observar que el país con mayor media es Brasil y el que tiene la mayor variación es Chile, esto último indica el gran repunte que tuvo este país en el PIB per cápita a partir de 1996 y su constante crecimiento.

**Tabla 3. Estadística descriptiva de consumo de energía per cápita (KWh) 1970 - 2014**

Estadístico	Brasil	Chile	Colombia
Media	1525,28	1888,33	812,33
Mediana	1515,83	1485,92	858,70
Desviación estándar	598,08	1082,73	226,17
Máximo	2619,96	3879,86	1312,16
Mínimo	459,89	731,19	400,37

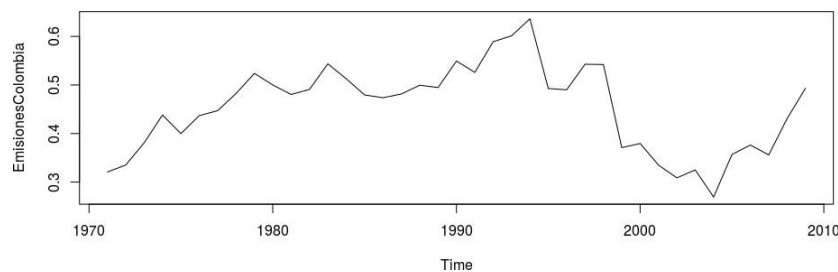
Fuente: elaboración propia

En la tabla 3 se puede observar que el país con mayor media es Chile y al igual también tiene la mayor desviación, esto último indica la solidez que ha tenido este país en el consumo de energía per cápita y su constante crecimiento.

### **MODELO DE PRONÓSTICO PARA LAS EMISIONES DE CO<sub>2</sub> PARA COLOMBIA.**

Alineado con los objetivos establecidos en este documento, en este aparte se busca pronosticar las emisiones de CO<sub>2</sub> para Colombia para los próximos 5 años a partir del año 2014. Para validar el modelo se toma inicialmente el periodo entre 1971 a 2009 y el resto de los periodos omitidos se usan para comprobar el ajuste del modelo. Esto se realizará a través de un modelo ARIMA y a continuación se observa la serie, a la cual le fue aplicada logaritmo:

**Gráfico 4. Comportamiento del logaritmo de las emisiones de CO<sub>2</sub> para Colombia**

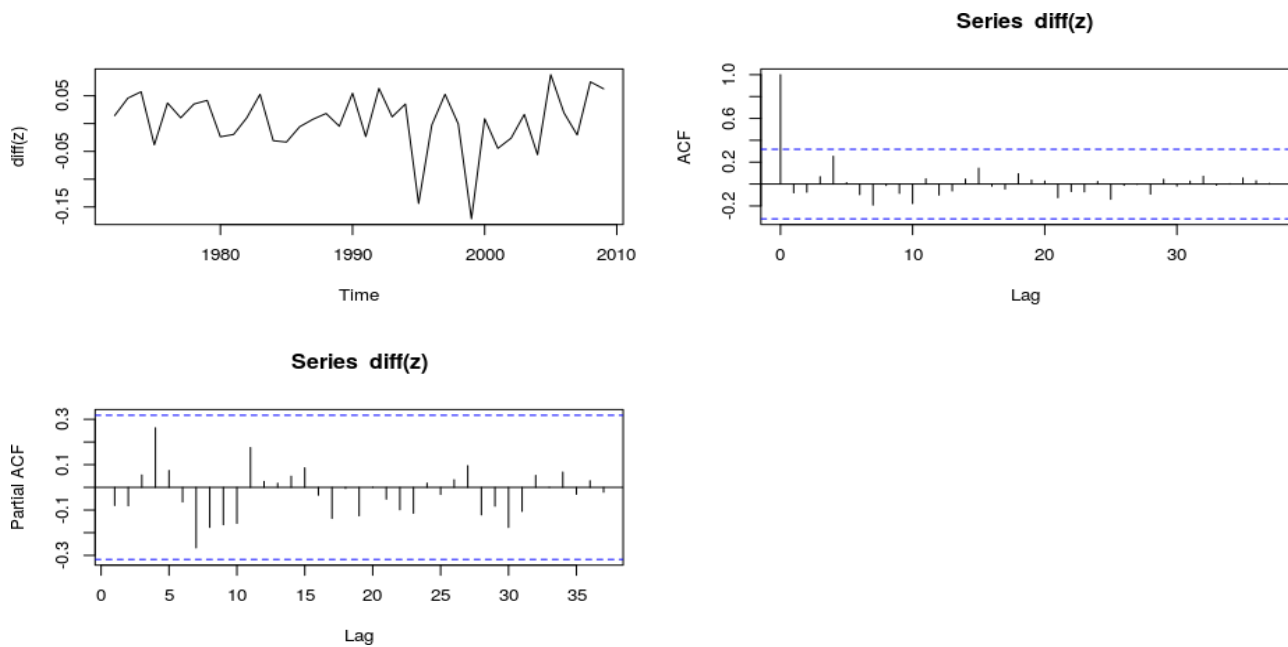


Fuente: elaboración propia

En este caso se ve el comportamiento de la serie de datos y se observa una tendencia creciente hasta 1993, posteriormente un decrecimiento gradual hasta el año 2003 y nuevamente una tendencia creciente a partir de este año.

Para iniciar con el ajuste del modelo se realiza inicialmente una diferencia de la serie de datos donde se obtienen las siguientes gráficas:

**Gráfico 5. Aplicación de una diferencia de las emisiones de CO<sub>2</sub> para Colombia**



Fuente: elaboración propia

Como se puede ver en la primera diferencia (ordinaria) no se ve estacionalidad por lo que no se hace necesario aplicar la segunda diferencia. Se observa ya un comportamiento de ruido blanco.

Ahora se procederá a realizar las pruebas de estacionariedad sobre la serie de datos:



**Tabla 4. Resumen pruebas de estacionariedad de las emisiones de CO<sub>2</sub> para Colombia**

Test	Estadístico	p-value
Dickey - Fuller	-5.001	0.01
Phillips Perron	- 39.036	0.01

Fuente: elaboración propia

En este caso al aplicar las pruebas obtenemos un p-value de 0.01 (1%) y ya que este valor es menor de 0.05 (5%) se rechaza la hipótesis H<sub>0</sub> y se toma la hipótesis alternativa (H<sub>a</sub>), es decir que la serie es estacionaria.

Estas dos pruebas permiten realizar el análisis de las gráficas AFC y PAFC (**Gráfico 5. Aplicación de una diferencia de las emisiones de CO<sub>2</sub> para Colombia**), para determinar los posibles modelos.

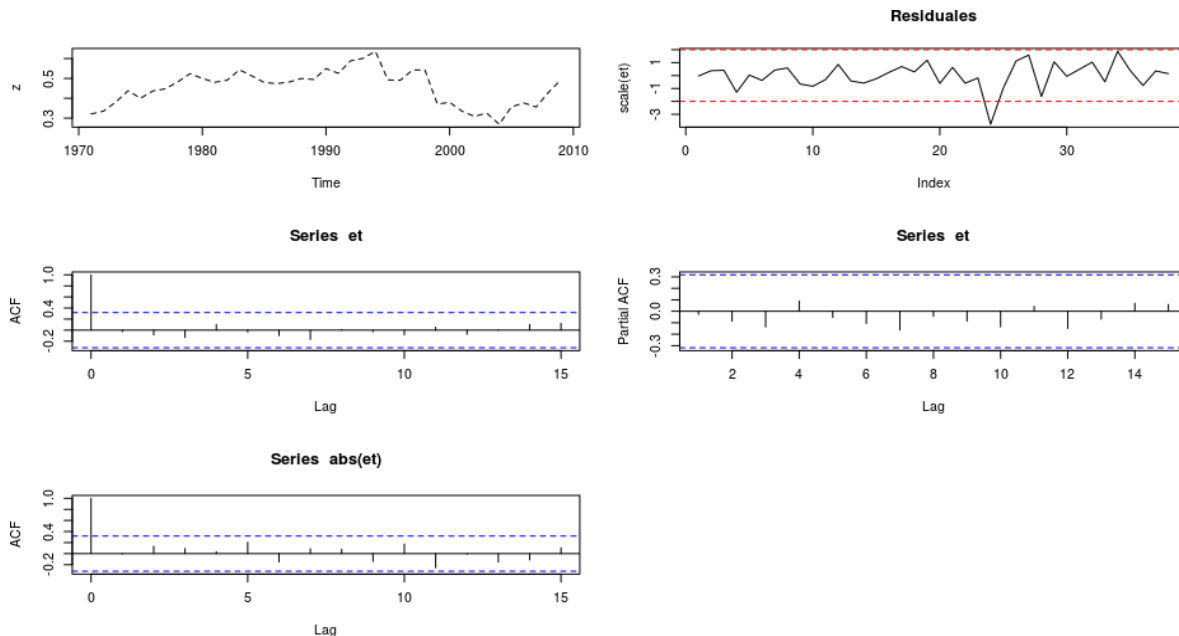
**Tabla 5. Resumen modelo seleccionado y resultados de test aplicados de las emisiones de CO<sub>2</sub> para Colombia**

Ítem	Coeficientes				Pruebas		
	MA 1	MA 2	MA 3	MA 4	L Jung Box	Jarque Bera	Runs Test
Significancia	2.403 X e-06	1.084 X e-01	6.475 X e-02	4.604 X e-01			
Coeficientes Estimados	0.1931	0.2128	0.2093	0.2195			
P value					0.975	0.164	0.687
BIC	-94.99						

Fuente: elaboración propia

En la tabla anterior se observan los resultados de las pruebas para al modelo seleccionado (ARIMA 0, 1, 4) para una diferencia ordinaria. Para que el modelo tenga un buen ajuste los resultados del p-value de cada una de estas pruebas deben ser mayores a 0,05 (5%) para no rechazar la hipótesis  $H_0$ , es decir, en este caso, en el modelo su correlación de residuales es igual a cero, los datos provienen de una distribución normal y los residuales tienen un comportamiento de aleatoriedad. Igualmente, en la tabla se observa el BIC del modelo y los resultados de sus coeficientes.

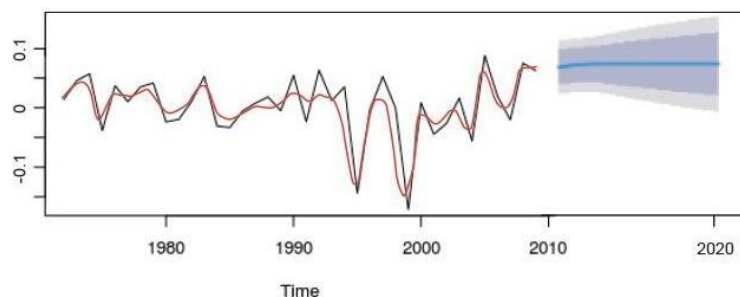
**Gráfico 6. Resultados residuales para el modelo ARIMA (0, 1, 4)**



Fuente: elaboración propia

Teniendo en cuenta la segunda gráfica de residuales solo un punto se sale de los límites y además teniendo en cuenta la gráfica a PACF y ACF las barras no se salen de los límites por lo que se puede decir que cumple con la condición de ruido blanco.

**Gráfico 7. Ajuste modelo ARIMA (0, 1, 4) de las emisiones de CO<sub>2</sub> para Colombia**



Fuente: elaboración propia



**Tabla 6. Pronósticos aplicados de las emisiones de CO<sub>2</sub> para Colombia**

Año	Dato Real	Pronóstico	95%	
			Lo	Ho
2010	1,704	1,652	1,649	1,759
2011	1,685	1,632	1,630	1,740
2012	1,74	1,673	1,685	1,795
2013	1,994	1,958	1,939	2,049
2014	1,845	1,792	1,790	1,900
2015	-	1,611	1,556	1,666
2016	-	1,741	1,686	1,796
2017	-	1,706	1,651	1,761
2018	-	1,688	1,633	1,743
2019	-	1,678	1,623	1,733

Fuente: elaboración propia

En este caso se procede a realizar el pronóstico para 10 periodos desde el año 2009 hasta 2019. En la tabla se puede observar los valores pronosticados y en la siguiente columna podemos ver los límites del pronóstico o bandas de confianza a un 95 %.

Teniendo en cuenta lo anterior se puede decir que el modelo estimado es el siguiente:

$$Y_t = \Delta Z_t + 0.1931 + 0.2093 + 0.2195 + wt$$

**PANEL DE DATOS.** Antes de iniciar con la estimación del modelo se realiza las pruebas de igualdad de medias y de varianzas como se ve en la siguiente tabla:

**Tabla 7. Pruebas de igualdad de medias y de varianza**

Prueba	Emisiones de CO <sub>2</sub>		PIB		Consumo de energía	
	Estadístico	Probabilidad	Estadístico	Probabilidad	Estadístico	Probabilidad
<b>Anova F-test</b>	371,2	0,000	196,29	0,000	464,14	0,000
<b>Bartlett</b>	59,94	0,000	36,76	0,000	64,2	0,000
<b>Levene</b>	19,57	0,000	15,64	0,000	17,0	0,000
<b>Brown-Forythe</b>	10,29	0,000	9,37	0,000	11,51	0,000

Fuente: elaboración propia

Nota. El valor de rechazo de H<sub>0</sub> es de 5% de significancia



Nota 2.  $H_0$  = Las medias de los individuos son iguales.

Nota 3.  $H_0$  = Las varianzas de los individuos son iguales.

En lo referente a la prueba de igualdad de medias (Anova F-test) se busca rechazar  $H_0$ , en este caso, los valores obtenidos de probabilidad para cada uno de los países en su respectiva serie son menores al 5%, por lo que se puede indicar que se acepta la hipótesis alternativa  $H_a$ , es decir, que las medias no son iguales.

Del mismo modo en las pruebas de igualdad de varianzas (Bartlett, Levene y Brown-Forythe) se busca rechazar  $H_0$ , en este caso, los valores obtenidos de probabilidad para cada uno de los países en su respectiva serie son menores al 5% por lo que se puede indicar que se acepta la hipótesis alternativa  $H_a$ , es decir, que las varianzas no son iguales.

Para iniciar con la estimación del modelo se debe definir inicialmente la variable dependiente, en este caso, se definió la serie de emisiones de  $CO_2$ . Con el fin de estimar las variables significativas se usa el método de Panel de Mínimos Cuadrados

**Tabla 8. Variables significativas del modelo**

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
LOG(CONSUENERG)	0.842137	0.068568	12.28169	0.0000
LOG(PIBPERCAPITA)	-0.007305	0.089835	-0.081318	0.9354
C	-5.238251	0.538572	-9.726193	0.0000

Effects Specification			
Cross-section fixed (dummy variables)			
Period fixed (dummy variables)			
R-squared	0.964527	Mean dependent var	0.668864
Adjusted R-squared	0.944679	S.D. dependent var	0.352990
S.E. of regression	0.083025	Akaike info criterion	-1.864067
Sum squared resid	0.579022	Schwarz criterion	-0.815775
Log likelihood	171.0284	Hannan-Quinn criter.	-1.438089
F-statistic	48.59544	Durbin-Watson stat	0.427094
Prob(F-statistic)	0.000000		

Fuente: elaboración propia

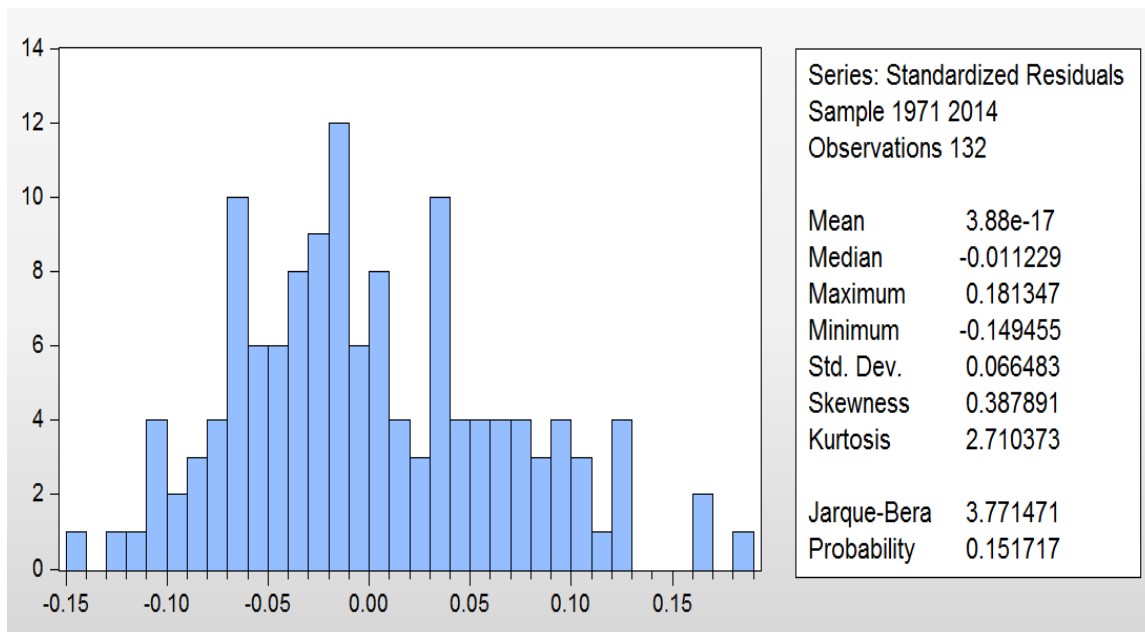
En la tabla 8 se puede observar que las variables significativas del modelo son el consumo de energía y C, ya que son los que tienen un resultado menor de probabilidad. Igualmente se puede



indicar que el modelo tiene una buena calidad para explicar los resultados y expresa en un 96% (R-squared) la varianza de la variable dependiente (emisiones de CO<sub>2</sub>).

Para continuar con la definición del modelo se busca validar la normalidad de los residuos, como se muestra a continuación:

**Gráfico 8. Normalidad de los residuos**



Fuente: elaboración propia

Nota. El valor de rechazo de  $H_0$  es de 5% de significancia.

Nota 2.  $H_0$  = Los residuos del modelo tienen una distribución normal.

En este caso se busca no rechazar  $H_0$  y los valores obtenidos de probabilidad para Jarque – Bera son mayores al 5% (15,17%) por lo que se puede indicar que se acepta  $H_0$ , es decir, los residuos tienen un comportamiento de normalidad y se puede seguir con las pruebas del modelo.





**Tabla 9. Prueba de efectos fijos de las estaciones y dependencia de residuales**

Prueba de Efectos		Estadístico	Probabilidad
Efectos fijos	Cross-Section/Period F	18.34	0,000
	Cross-Section/Period Chi-square	314.4	0,000
Dependencia de los residuos	Breusch-Pagan LM	32.54	0,000
	Pesaran scaled LM	13.28	0,000
	Bias-corrected scaled LM	13.25	0.000
	Pesaran CD	-5.62	0.000

Fuente: elaboración propia

Nota.  $H_0 =$  efecto ind  $i =$  efecto ind  $j$  Para todo  $i \neq j$ . Para la prueba de efectos fijos

Nota 2.  $H_0 =$  No hay correlación o dependencia de los residuales. Para la prueba de dependencia

Nota 3. El valor de rechazo de  $H_0$  es de 5% de significancia

En la tabla 9 se puede observar en primera instancia la prueba de efectos fijos cuyos resultados de probabilidad son menores al 5%, es decir, que se rechaza  $H_0$  por lo que se puede afirmar que los efectos de cada individuo son diferentes. Igualmente se evidencia la prueba de dependencia de los residuos cuyos resultados de probabilidad son menores al 5%, lo que indica, que se rechaza  $H_0$  y en este caso se puede concluir que hay dependencia de los residuos obtenidos. Con estos resultados se puede seguir con la construcción del modelo.

**Tabla 10. Prueba de Heterocedasticidad**

Method	df	Value	Probability
Bartlett	4	1.243546	0.8709
Levene	(4, 127)	0.712692	0.5847
Brown-Forsythe	(4, 127)	0.669359	0.6144

Fuente: elaboración propia

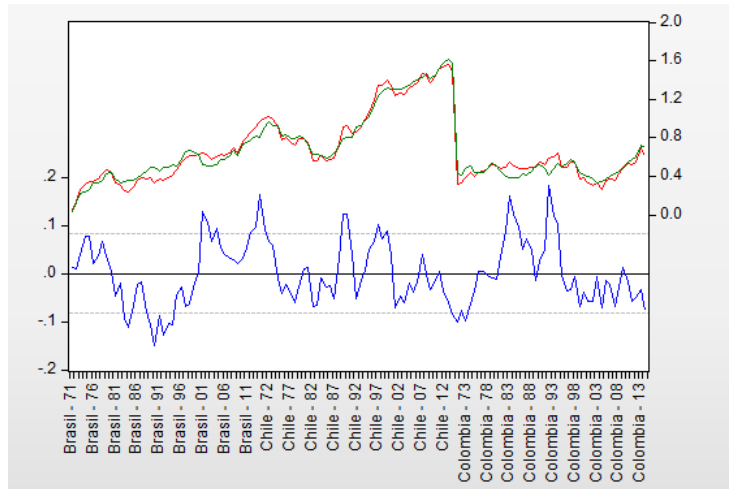
Nota.  $H_0 =$  indica Homocedasticidad  $H_1 =$  indica Heterocedasticidad

Nota 2. El valor de rechazo de  $H_0$  es de 5% de significancia



En la tabla 10 se puede observar tres métodos para comprobar la existencia de heterocedasticidad en el modelo, en este caso, no se rechaza  $H_0$ , por lo que se puede decir que existe Homocedasticidad.

**Gráfico 9. Estimación del modelo**



Fuente: elaboración propia

En el gráfico 9 se puede observar en azul los residuos, en rojo los datos actuales con la aplicación de logaritmo y en verde el comportamiento del modelo estimado. En este caso se puede observar que existe un buen ajuste del modelo Vs los datos actuales.

Una vez validado el ajuste del modelo se procede a realizar el método de efectos de individuos y de tiempo, que al igual que los coeficientes son el insumo principal para determinar la ecuación del modelo, el cual se observa a continuación:

$$\begin{aligned} \log(\text{EMICO2}) = & -5.238251 + 0.842137 \log(\text{CONSUENERG}) - 0.007305 \log(\text{PIBPERCAPITA}) - \\ & 0.304507 d1 + 0.143155 d2 + 0.161352 d3 + 0.4818 F_{71} + 0.5001 F_{72} + 0.5044 F_{73} + 0.4516 F_{74} + \\ & 0.4184 F_{75} + 0.39 F_{76} + 0.3238 F_{77} + 0.2815 F_{78} + 0.2724 F_{79} + 0.2120 F_{80} + 0.1498 F_{81} + 0.0726 F_{82} \\ & + 0.0478 F_{83} - 0.0134 F_{84} - 0.0595 F_{85} - 0.0765 F_{86} - 0.0665 F_{87} - 0.0464 F_{88} - 0.0334 F_{89} - 0.0407 \\ & F_{90} - 0.0855 F_{91} - 0.0603 F_{92} - 0.0817 F_{93} - 0.0629 F_{94} - 0.1103 F_{95} - 0.0723 F_{96} - 0.0305 F_{97} - \\ & 0.0341 F_{98} - 0.0791 F_{99} - 0.1195 F_{00} - 0.1635 F_{01} - 0.1961 F_{02} - 0.2359 F_{03} - 0.2589 F_{04} - 0.2266 \\ & F_{05} - 0.2455 F_{06} - 0.2416 F_{07} - 0.2084 F_{08} - 0.2502 F_{09} - 0.2027 F_{10} - 0.2069 F_{11} - 0.2049 F_{12} - \\ & 0.1778 F_{13} - 0.2136 F_{14} \end{aligned}$$



## VALIDACIÓN DE LA CURVA DE KUZNETZ AMBIENTAL (CKA)

Las series insumo para la comprobación de la hipótesis de la Curva de Kuznetz Ambiental conforman un panel de datos con un número de individuos mayor al de observaciones, de este modo se debe garantizar que exista cointegración en las variables, que implique una relación a largo plazo entre las mismas, con el objetivo de evitar obtener resultados y relaciones espurias. Phillips y Moon (1999), así, es necesario determinar el orden de integración de las series de tiempo y probar la cointegración de las series.

### Pruebas de Raíces Unitarias para el panel:

En primera instancia se valida la no estacionariedad del panel con las pruebas de raíz unitaria para variables en niveles:

**Tabla 11. Raíz unitaria para variables en niveles**

Prueba	Emisiones CO2		Consumo de energía		PIB per cápita	
	Estadístico	Probabilidad	Estadístico	Probabilidad	Estadístico	Probabilidad
Im, Pesaran and Shin (Estadístico W)	1.13711	0.8723	-1.34878	0.0887	-1.3381	0.0904
ADF - Fisher (Chi-cuadrado)	2.53129	0.865	10.7724	0.0957	10.8091	0.0945
PP - Fisher (Chi-cuadrado)	2.98866	0.8103	9.27891	0.1585	10.9221	0.0908
Levin, Lin & Chu (t)	0.9713	0.8343	-3.12336	0.0009	-0.48152	0.3151
Breitung (Estadístico t)	-1.10605	0.1344	1.39767	0.9189	-1.47009	0.0708

Fuente: elaboración propia

Las cinco pruebas de raíces unitarias comprueban que, para las tres variables en niveles, en ningún caso existe evidencia estadística suficiente para rechazar la hipótesis nula de raíz unitaria, lo que permite concluir que las series no son estacionarias.

Para verificar el orden de integración y verificar que sea de orden I(1) con sólo una raíz unitaria, se realizan las pruebas a las series con una diferencia ( $\Delta$ ), obteniendo en la tabla 12 los estadísticos y las probabilidades que confirman el rechazo de la hipótesis nula y por tanto la estacionariedad de las series con una diferencia.



**Tabla 12. Raíz unitaria para variables en niveles**

Prueba	$\Delta$ Emisiones CO2		$\Delta$ Consumo de energía		$\Delta$ PIB per cápita	
	Estadístico	Probabilidad	Estadístico	Probabilidad	Estadístico	Probabilidad
Im, Pesaran and Shin (Estadístico W)	-4.51566	0.000	-3.32944	0.0004	-3.4223	0.0003
ADF - Fisher (Chi-cuadrado)	29.9365	0.000	21.9627	0.0012	21.9917	0.0012
PP - Fisher (Chi-cuadrado)	47.0231	0.000	53.959	0.000	31.5631	0.000
Levin, Lin & Chu (t)	-4.66494	0.000	-4.05455	0.000	-4.19033	0.000
Breitung (Estadístico t)	-2.89	0.0019	-3.67198	0.0001	-2.54759	0.0054

Fuente: elaboración propia

La tabla 12 muestra los resultados de la estimación de la cointegración basada en la prueba de *Kao Residual Cointegration Test*. Se observa que el estadístico de prueba permite rechazar la hipótesis nula de no cointegración y por tanto se concluye que hay suficiente evidencia estadística para aceptar la hipótesis alternativa referente a la existencia de una relación de cointegración entre las variables.

**Tabla 13. Prueba de cointegración de panel de Kao**

		t-Statistic	
ADF		-1.646174	
Residual variance		0.000475	
HAC variance		0.000505	
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic
RESID (-1)	-0.108964	0.037625	-2.896087
D (RESID (-1))	0.191237	0.089420	2.138641
R-squared	0.080145	Mean dependent var	
Adjusted R-squared	0.072727	S.D. dependent var	
S.E. of regression	0.021916	Akaike info criterion	
Sum squared resid	0.059557	Schwarz criterion	
Log likelihood	303.6117	Hannan-Quinn criter.	
Durbin-Watson stat	1.966860		

Fuente: elaboración propia



La tabla 13 muestra los resultados de la estimación de la ecuación de cointegración con todos los coeficientes estadísticamente significativos al 0,05 conservando el signo que comprueba la hipótesis de CKA.

**Tabla 14. Estimación de ecuación de cointegración**

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic
CONSUENERG	0.529980	0.186841	2.836523
PIBPERCAPITA	18.04439	4.974422	3.627434
PIBPERCAPITACUAD	-2.299760	0.663890	-3.464069
R-squared	0.963350	Mean dependent var	
Adjusted R-squared	0.959904	S.D. dependent var	
S.E. of regression	0.030462	Sum squared resid	
Long-run variance	0.002008		

Fuente: elaboración propia

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la tabla 14 la Ecuación de Cointegración sería la siguiente:

$$LCO_2 = 0.531 LCE + 18.044 LPIB - 2.29 LPIB^2$$

**Los resultados de la ecuación señalan que la elasticidad panel de LCE:**

Un incremento del 1% del consumo de energía genera en el largo plazo un incremento en 0,53% de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el panel de datos de los tres individuos analizados.

**Los resultados de la ecuación señalan que la elasticidad panel de PIB:**

$$18.044 LPIB - 2.29 LPIB^2$$

$$\frac{\partial LCO_2}{\partial LPIB} = 18,044 - (2 * 2,29LPIB) = 0$$

$$\frac{\partial LCO_2}{\partial LPIB} = 18,044 - 4,58LPIB = 0$$



$$LPIB = 18,044 / 4,58 = 3.94$$

El punto de inflexión sucede cuando el PIB alcanza los 3,94 logaritmos (8,710 US\$). Este resultado confirma la existencia de una CKA, el nivel de emisiones de CO<sub>2</sub>, primero se incrementa con el aumento del PIB, después se estabiliza para luego decrecer



## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el desarrollo del panel de datos indican que para los tres individuos (Colombia, Chile y Brasil), existe una relación a largo plazo entre las emisiones del CO<sub>2</sub> y el consumo de energía per cápita, no así con el PIB.

También se puede indicar que existe una relación de causalidad del consumo de energía a las emisiones de CO<sub>2</sub>, en este caso con efecto positivo, es decir el aumento del consumo de energía aumenta las emisiones de CO<sub>2</sub> para los tres individuos en estudio (Colombia, Chile y Brasil).

El modelo ARIMA (0, 1, 4) para las emisiones de CO<sub>2</sub> permite pronosticar por 5 años un incremento marginal de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Se confirma la hipótesis de la CKA para el panel conformado por Colombia, Brasil y Chile en el periodo 1971-2014.

Los resultados de esta investigación confirman una relación a largo plazo entre las emisiones de CO<sub>2</sub> el consumo de energía y el PIB.

La elasticidad del PIB sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> será mayor Cuando el PIB per cápita es menor a 3.72 Logaritmos, en el largo plazo las emisiones de CO<sub>2</sub> son inelásticas al consumo de energía y elásticas el PIB si este es inferior a 3.72 e inelásticas si el PIB es mayor a 3.72.

La confirmación de la hipótesis de CKA en el panel indica que el crecimiento económico incrementa el nivel de emisiones de CO<sub>2</sub>, este incremento se estabiliza para luego reducirse debido al incremento en la eficiencia de los procesos productivos.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ballesteros-Ballesteros, V. (2016). Panorama mundial de las energías renovables e importancia de la energía solar fotovoltaica. *Revista Científica*, 26, 194-203. Recuperado a partir de <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/revcie/article/view/15348>
- Ballesteros-Ballesteros, V., & Gallego-Torres, A. (2019). Model of Education in Renewable Energies from the Public Engagement and the Energetic Attitude. *Revista Facultad de Ingeniería*, 28(52), 27-42. <https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n52.2019.9652>
- Breitung, J. (2000). The local power of some unit root tests for panel data. En: *Advances in Econometrics*, Vol. 15, pp. 161-177.
- Campo, J. y Olivares, W. (2013). Relación entre las emisiones de CO<sub>2</sub>, el consumo de energía y el PIB: el caso de los CIVETS. Medellín, Colombia: *Revista Científica Semestre Económico*.
- Choi, I. (2001). Unit root test for panel data. En: *Journal of International Money y Finance*, Vol. 20, pp. 249-272.
- Cruz, D. (2009). Aproximación de una curva de Kuznets ambiental para Colombia. Bogotá, Colombia.
- Fernández, N. (2020). El crecimiento económico de América Latina aumentará gradualmente en los próximos dos años: BBVA. Recuperado de <https://www.bbva.com/es/el-crecimiento-economico-de-america-latina-aumentara-gradualmente-en-los-proximos-dos-anos/>
- Gómez, C. (2010). Crecimiento económico, consumo de energía y emisiones contaminantes en la economía mexicana. Guanajuato, México: *Revista Fuente*.
- González, A. y Alonso, J. (2017). Evaluación de la hipótesis de Kuznets para Colombia 1977 - 2005. Cali, Colombia. *Revista apuntes del Cenes*.
- Im, K.; Pesaran, M. y Shin, Y. (2003). Testing for unit roots in heterogeneous panels. En: *Journal of Econometrics*, Vol. 115, pp. 53-74.
- Levin, A.; Lin, C. y Chu, J. (2002). Unit root in panel data: Asymptotic and finite simple Properties. En: *Journal of Econometrics*, Vol. 108, N.º 1, pp. 1-24
- Maddala, G. y Wu, S. (1999). A comparative study of unit root test with panel data and a new simple test. En: *Oxford Bulletin of Economics y Statistics*, Vol. 61, pp. 631-652.





- Parra, M. (2016). La curva de Kuznets ambienta para los países de la ODEC a través de un modelo de datos de panel. Veracruz, México.
- Parra, M. (2016). La curva de Kuznets ambienta para los países de la ODEC a través de un modelo de datos de panel. Veracruz, México.
- Pedroni, P. (2000). Fully modified OLS for heterogeneous cointegrated panels .EconomeEconometrics, Vol. 15, pp. 93-130.
- Phillips, P. y Moon, H. (1999). Linear regression limits theory for nonstationary panel data. En: Econométrica, Vol. 67, pp. 1057-1111.
- Rentería, V. Toledo E. Bravo, D. y Ochoa D. (2016). Relación entre emisiones contaminantes, crecimiento económico y consumo de energía. El caso de Ecuador 1971 – 2010. Loja, Ecuador. Revista politécnica.
- Salamanca Céspedes, J. E. (2019). La educación en energías renovables no convencionales en la formación de ingenieros electrónicos. Noria Investigación Educativa, 2(4), 11-18. <https://doi.org/10.14483/25905791.16331>
- Zúñiga González , L. (2019). El rol de la universidad en la educación en energías renovables para frenar el cambio climático. Noria Investigación Educativa, 2(4), 44-56. <https://doi.org/10.14483/25905791.16336>