

La contribución de la actividad económica y del consumo energético a las emisiones de CO₂ en la Unión Europea, países asiáticos y BRICS

The contribution of economic activity and energy consumption to CO₂ emissions in the European Union, Asian countries and BRICS

Touria ABDELKADER-BENMESAUD CONDE

Universidad Nacional de Educación a Distancia (ESPAÑA)

tabdelkader@madrid.uned.es

Fernando BARREIRO PEREIRA

Universidad Nacional de Educación a Distancia (ESPAÑA)

fbarreiro@cee.uned.es

Recepción: Mayo 2019

Aceptación: Junio 2019

RESUMEN

Los elementos contaminantes que en mayor grado contribuyen a la degradación medioambiental son las emisiones de dióxido de carbono y las partículas en suspensión PM10. En 41 años, desde 1971 a 2012, las emisiones de gases de efecto invernadero se han duplicado, constituyendo el CO₂ las dos terceras partes de las emisiones de los gases de efecto invernadero. El objetivo de esta investigación es analizar en qué medida el exceso de emisiones de CO₂ está asociado directamente al consumo de energía, o bien, se debe a la existencia de imperfecciones en los procesos productivos. Para efectuar este análisis se ha llevado a cabo una especificación microeconómica cuya aplicación se ha efectuado en el período 1995-2015 sobre 6 países de la Unión Europea más 14 países, con una población total equivalente al 61 % de la población mundial. La aplicación se ha llevado a cabo mediante técnicas econométricas que incluyen datos de panel y los resultados indican que, en general, las imperfecciones en los procesos productivos contribuyen a las emisiones en mayor grado que el consumo de energía, lo que sugiere el deber de mejorar estos procesos.

Palabras clave: Emisiones, Dióxido de carbono, Consumo energético, Gases de efecto invernadero, Producción, Productividad de la energía.

Clasificación JEL: D21, Q41, Q51.

ABSTRACT

The pollutants that contribute most to environmental degradation are carbon dioxide emissions and PM10 suspended particles. In 41 years, from 1971 to 2012, greenhouse gas emissions have doubled, with CO₂ accounting for two thirds of greenhouse gas emissions. The aim of this research is to analyse to what extent the excess of CO₂ emissions is directly associated with energy consumption or are due to imperfections in production processes. In order to carry out this analysis, a microeconomic specification has been carried out, which has been applied in the period 1995-2015 on 6 countries of the European Union plus 14 countries, whose total population is equivalent to 61% of the world population. The application has been carried out using econometric techniques that include panel data and the results indicate that imperfections in production processes generally contribute to emissions to a greater degree than energy consumption, suggesting a duty to improve these processes.

108

Keywords: Emissions, Carbon dioxide, Energy consumption, Greenhouse gases, Production, Energy productivity.

JEL Classification: D21, Q41, Q51.



1. INTRODUCCIÓN

Desde la última década del siglo XX, regiones y países han hecho hincapié en los efectos negativos que, sobre el medioambiente, supone mantener patrones de consumo de energía que en muchas ocasiones causan emisiones de gases y otras partículas contaminantes asociadas también a la actividad económica y al crecimiento económico. El dióxido de carbono (CO₂) en proporciones naturales no es perjudicial, pero como resultado de la combustión de combustibles fósiles, la concentración de este gas en la atmósfera ha estado aumentando hasta convertirse en un gas de efecto invernadero (*greenhouse gases*, GHG), es decir, induce a una mayor absorción de la radiación infrarroja que escapa de la tierra y termina causando un aumento de la temperatura en la atmósfera y en la superficie terrestre. El aumento de la producción genera externalidades, muchas de ellas negativas, que se suman a excesos en el uso de los recursos ambientales con los que se abastece el consumo energético y la producción. Muchos de los resultados de las investigaciones realizadas sobre la relación entre el consumo de energía y el producto interior bruto (PIB) indican que los patrones de consumo de energía inciden positivamente sobre las emisiones de CO₂. Se considera que las emisiones de CO₂ son las principales responsables del calentamiento global, puesto que el CO₂ es el gas de efecto invernadero más abundante. En diversos informes del Banco Mundial se mantiene que desde 1971 a 2012 las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial se han duplicado, siendo la contribución del CO₂ el 67 % de las emisiones totales de gases GHG. Otros gases causantes de efecto invernadero, los cuales no afectan sólo a la salud, sino que además promueven la degradación ambiental son: i) Monóxido de carbono (CO), principalmente asociado con el tráfico y el transporte; ii) Dióxido de azufre (SO₂), asociado a la combustión de carbón y productos derivados del petróleo; iii) Óxidos de nitrógeno (NO_x), asociados con la combustión de combustibles fósiles, y iv) Hidrocarburos (CH_x), sustancias que contienen solo hidrógeno y carbono e influyen en la formación de smog fotoquímico. Por último, también son altamente contaminantes el Plomo (Pb), en suspensión o diluido en agua, y las partículas suspendidas llamadas aerosoles, que son partículas de diferentes tamaños que influyen en la formación de smog sulfuroso. El polvo, la fibra, el hollín, los humos, la neblina y el smog, sobrecargan el medio ambiente de forma que estas partículas terminan afectando en mayor o menor grado no solo a la salud de las personas, sino también a la degradación ambiental. Dentro de los aerosoles más contaminantes, las PM₁₀ (*Particulate Matter*) son pequeñas partículas sólidas o líquidas de polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento o polen dispersos en la atmósfera. El tamaño de las partículas PM₁₀ es de menos de 10 micras. El valor límite diario para la protección de la salud humana es de 50 microgramos por m³ de PM₁₀, que no debería superarse más de 7 veces al año, siendo el límite anual para la protección de la salud humana de 20 µg / m³. Exceder el límite admisible de PM₁₀ resulta muy perjudicial para la salud y revela una tecnología de producción poco desarrollada. Los

países con mayor índice de PM10 son Pakistán, Bangladesh, Nigeria, Egipto, India, China, Arabia Saudí, Emiratos Árabes Unidos y Kuwait, relacionado en este último caso con la producción y distribución de combustibles. En la Tabla 1 se encuentran recogidas las concentraciones de PM10 en las 44 aglomeraciones del mundo de más de 9 millones de habitantes (Megaciudades) y aparecen sombreadas las que traspasan el límite diario admisible, las cuales en su mayoría son megaciudades asiáticas y africanas. La contaminación del aire es un fenómeno que se agudiza cuando la densidad de población es elevada. La densidad de población es muy alta en países como Bangladesh, Corea del Sur, India, Japón o Bahrein y, en el caso de mega ciudades, en Manila, Lagos, Delhi, Bangalore, Cairo, Dhaka o Teherán. Parece evidente que es a nivel local donde el control de la contaminación debe ser más decisivo. Por estas razones su regulación es muy importante para los gobiernos de países y ciudades, y desde el protocolo de Kioto (1997) a los acuerdos de París¹ (2015) se han fijado como objetivos reducir la contaminación y los gases de efecto invernadero.

Tabla 1.- Nivel de PM10 en las megaciudades del mundo (2016)

Aglomeraciones ordenadas por población	Población 2016 (millones)		Aglomeraciones ordenadas por población	Población 2016 (millones)	
	PM10			PM10	
TOKYO-YOKOHAMA	35	37.126	BANGKOK	41	14.566
CHONGQUING	77	29.101	BUENOS AIRES	22	14.300
JAKARTA	82	28.019	ISTANBUL	55	13.855
GUANGZHOU	56	25.800	TEHRAN	72	13.500
SHANGHAI	59	25.700	LAGOS	122	13.400
SEOUL	31	25.600	TIANJIN	103	13.266
MEXICO	34	24.178	RIO JANEIRO	35	12.700
DELHI	292	23.500	LAHORE	198	12.500
MUMBAI	104	22.376	PARIS	14	11.950
KARACHI	290	22.100	KOLN-RUHR	22	11.215
NEW YORK	21	22.000	CHENGDU	105	11.001
METRO-MANILA	118	21.951	IZMIR	29	10.046
BEIJING	92	21.900	NAGOYA	30	10.027
SAO PAULO	45	21.100	WUHAN	92	10.020
CAIRO	169	20.384	HARBIN	74	9.874
LOS ANGELES	34	18.100	CHICAGO	25	9.800
OSAKA-KOBE	39	17.550	JOHANNESBURG	85	9.616
MOSKOW	40	17.000	KINSHASA	40	9.518
KOLKATA	136	15.835	LIMA	58	9.400
DHAKA	134	15.414	CHENNAI	80	9.182
SHENZHEN	42	15.250	BANGALURU	96	9.044
LONDON	17	15.211	BOGOTA	40	9.009

Megaciudades sombreadas indica que en ellas se superan los límites admisibles de PM10.

Fuente: elaboración propia basada en datos de la International Energy Agency 2016.



Por otra parte, también todos estos elementos contaminantes pueden terminar siendo fuente de conflictos entre países vecinos, regiones e incluso entre ciudades vecinas, debido a las emisiones de gases tóxicos sobre áreas, en principio menos contaminadas.

En volumen, los contaminantes más importantes son las emisiones de CO₂ y las partículas en suspensión PM10. En la presente investigación se analizan únicamente las emisiones de CO₂ causadas por el consumo de energía y por los procesos de producción de bienes y servicios. La relación entre las emisiones y el consumo de energía, así como la relación entre el consumo de energía y el output, o el crecimiento del output, ha sido ampliamente analizada desde el trabajo de Kraft y Kraft (1978), del que se derivan una gran cantidad de investigaciones sobre este tema, pero todavía no hay un consenso preciso en cuanto a la relación que existe entre consumo de energía y crecimiento económico. En este sentido, se pueden identificar dos posturas opuestas: la primera mantiene que cambios en el consumo energético no tiene un efecto claro sobre el crecimiento económico y, la segunda, que existe alguna relación entre el consumo de energía y el nivel de producción. Bastantes estudios han intentado probar empíricamente esta relación en economías como Estados Unidos (Abosedra y Baghestani, 1989), Gardner y Joutz (1996) y Soytaş, Sari y Ewing (2007); Canadá (Ghali, 2004); México (Caballero y Galindo, 2007) y Gómez (2010); América Central y países del Caribe (Apergis y Payne, 2009). Estudios en los países asiáticos se han llevado a cabo por Razzaqi, et al. (2011); específicamente en Bangladesh (Alam, et al., 2012); China (Zhang y Cheng, 2009) en el período 1960-2007; Taiwán (Cheng, 1997) sobre el período 1980-2007; Pakistán (Siddiqui, 2004); Iran (Zamani, 2007); India (Mallick, 2009); Turquía (Jobert y Karanfil, 2007) y Halicioglu (2009) para el período 1960-2005; y Ang (2007a) examina la relación entre el PIB, las emisiones contaminantes y el consumo de energía en Malasia entre 1971 y 1999. En África, Belloumi (2009) examina la relación causal entre el consumo de energía per cápita y PIB per cápita en Túnez, para el período 1971-2004. Estudios en países europeos han sido llevados a cabo en Francia (Ang, 2007b), Grecia (Tsani, 2010), Rusia (Zhang, 2011) y en España (Labandeira et al. 2017). Otros análisis llevados a cabo en grupos de países, han sido realizados por Medlock y Soligo (2001), sobre 28 países de diferentes niveles de desarrollo, Pao y Tsai (2010) que examinan las relaciones entre las emisiones de CO₂, el consumo de energía, y el PIB en los países BRICS durante el período 1990-2005; Mehrara (2007), que examina la causalidad entre consumo de energía per cápita y PIB per cápita mediante datos de panel sobre once países exportadores de petróleo; Luzzati y Orsini (2009), que estudian la relación entre consumo de energía y PIB per cápita en 113 países para el período 1971-2004 y Farhani y Ben Rejeb (2012) que realizaron un estudio para 90 países. Otras investigaciones mantienen que aumentos en el PIB incrementan la contaminación hasta que el país alcanza una determinada renta per cápita, a partir de la cual comienza a decrecer la contaminación (Hettige, Mani y Wheeler, 2000). Además de todos estos autores, Srivivasan y Siddanth (2015) también encontraron relaciones entre el consumo de energía y el nivel de producción, lo que no sucede en las investigaciones de Yu y Choi (1992) y Altinay y Karagol (2004).

El propósito del presente artículo es analizar en qué medida las emisiones de CO₂ están asociadas directamente al consumo de energía o bien a imperfecciones en el proceso productivo de bienes y servicios. El análisis se lleva a cabo a lo largo de 20 países durante el período 1995-2015 con datos anuales provenientes de la International Energy Agency (2016). Los países sobre los que se hace el análisis suponen en 2018 el 61 % de la población mundial y pertenecen a cuatro continentes. Por parte de la Unión Europea (UE) figuran Irlanda, Reino Unido, Francia, Alemania, Portugal y España. Además figura Islandia como país europeo. Los países asiáticos analizados en esta investigación son: India, Indonesia, Arabia Saudí, Irán, Japón y China. También figura Rusia. Los países americanos tratados son Estados Unidos, Brasil y México. Y los países africanos que figuran en este análisis son Marruecos, Sudáfrica y Nigeria. Los cinco países emergentes más importantes considerados en este análisis están encuadrados en el bloque BRICS. Ciertas particularidades energéticas de algunos de los países y bloques que se analizan en esta investigación son expuestas a continuación.

Los países de la UE considerados en este análisis tienen en 2018 el 53,7% de la población de la UE. Estos países tienen un alto producto interior bruto per cápita, y un PIB conjunto que representa el 59% del de la UE y un 10% del PIB mundial. En Alemania, la producción de energía está basada en la obtención de carbón, biofuel y tratamiento de residuos, energía nuclear y energía renovable, destacando la eólica, solar e hidráulica. En España, la producción de energía está basada en la obtención de energía nuclear y energía renovable, destacando la eólica, solar, biofuel y tratamiento de residuos e hidráulica. En Francia, la producción de energía está basada en la obtención de energía nuclear, biofuel y tratamiento de residuos, hidráulica y energía renovable, destacando la eólica y solar. En Irlanda, la producción de energía está basada en la obtención de gas natural, carbón y energía renovable, destacando la eólica. En Portugal, la producción de energía está basada en la obtención de biofuel, tratamiento de residuos y energía renovable, en especial, eólica e hidráulica. En Reino Unido, la producción de energía está basada en la obtención de petróleo, gas natural, energía nuclear, biofuel y tratamiento de residuos, energía renovable, destacando la eólica, solar e hidráulica. En cuanto a Islandia, la energía geotérmica proporciona el 66,3 % de la energía primaria, la hidroeléctrica el 19,1 % y los combustibles fósiles el 14,6 %.

Brasil, Rusia, India, China y Sudáfrica, forman los países denominados BRICS y componentes de la asociación económico-comercial entre estas cinco economías emergentes. Todas estas naciones tienen en común una gran población, estimada en 2019 en más del 40% de la población mundial. Brasil en las últimas décadas ha destacado en la producción de petróleo, biocombustibles y residuos, gas natural, energía nuclear y carbón, por este orden. Es la tercera potencia hidroeléctrica más grande del mundo y el consumo energético mayoritario proviene del gas natural, productos derivados del petróleo y biocombustibles. En cuanto a las energías renovables, a pesar de su gran potencial, solo se han desarrollado la energía eólica y la solar. Rusia produce gas natural,



petróleo, carbón, energía nuclear e hidroeléctrica, en este orden, siendo su consumo mayoritario el gas natural y productos derivados del petróleo. La gran extensión de Rusia permite el desarrollo de energías renovables, siendo la energía geotérmica la más desarrollada, seguida por la energía solar y la eólica. India es considerada como la potencia energética del tercer mundo, y produce carbón, biocombustibles y residuos, petróleo y gas natural. La mayor parte de su consumo energético proviene de biocombustibles, derivados del petróleo, carbón y gas natural. China es hoy la primera potencia energética del mundo, sobre todo en el desarrollo de energías renovables. La producción de carbón, petróleo, biocombustibles, hidroeléctrica y nuclear sigue siendo muy importante, pero también posee energía eólica, solar fotovoltaica y térmica, geotérmica y energías marinas. El consumo proviene del carbón, productos derivados del petróleo, gas natural, biocombustibles y renovables. Sudáfrica es el último país agregado al grupo BRIC, es productor de carbón y biocombustibles, y el consumo se realiza principalmente con productos derivados del petróleo, carbón y biocombustibles.

La estructura de este artículo es la siguiente: Las modelizaciones de las ecuaciones que tratan de explicar la relación causal entre el consumo de energía y la producción y entre las emisiones de CO₂ y el consumo de energía se llevan a cabo en la sección 2. En la sección 3 se encuentran los resultados obtenidos a partir de las estimaciones de las ecuaciones obtenidas en la sección segunda para los 20 países de la muestra y finalmente, en la sección 4 están contenidas las conclusiones más relevantes de esta investigación.

113

2. RELACIÓN CONSUMO DE ENERGÍA, PRODUCCIÓN Y EMISIONES

La energía es un bien de consumo para los consumidores y, al mismo tiempo, un factor de producción para las empresas. Podemos suponer una economía en equilibrio donde hay un pequeño número F de empresas en competencia imperfecta, en régimen de oligopolio, a cargo del suministro de energía a una población de H consumidores y a un gran número N de empresas productoras de bienes de consumo, que por simplicidad suponemos en competencia perfecta. En ausencia de intervenciones políticas o gubernamentales, llamando e a la cantidad de energía y c y R respectivamente a los bienes de consumo y factores de producción distintos de la energía, siendo p_e , p_c y p_R los respectivos precios unitarios, la función de utilidad, por simplicidad tipo Cobb-Douglas, que proponemos para los consumidores cuando eligen entre consumo de energía y resto de bienes de consumo tendrá la siguiente expresión, con $0 < \alpha < 1$:

$$U(e, c) = e^{\alpha} c^{1-\alpha} \quad (1)$$

Demanda de energía de los consumidores: Los consumidores maximizan su utilidad condicionada a su restricción presupuestaria. Llamando m a la renta disponible monetaria per cápita del consumidor, el comportamiento de los agentes individuales en cada período será entonces el siguiente:

$$\text{Max}\langle U(e, c) = e^\alpha c^{1-\alpha} \rangle \text{ sujeto a: } e p_e + c p_c = m \quad (2)$$

Resolviendo esta maximización tenemos que: $m = \frac{p_e}{\alpha} e$; si no consideramos impuestos,

entonces: $H m = Y$ (renta monetaria de la economía), es decir: $Y = \frac{p_e}{\alpha} H \cdot e$. Por lo tanto,

la demanda agregada de energía por parte de los consumidores, como bien de consumo, será:

$$H \cdot e = \frac{\alpha Y}{p_e} \quad (3)$$

114

Demanda de energía de las empresas que producen los bienes de consumo c: En la economía existen N empresas en régimen de competencia perfecta, que producen los bienes de consumo c maximizando el beneficio. Suponemos que los bienes c son, por simplicidad, producidos a partir de una función de producción tipo Cobb-Douglas en base a una serie de factores de producción (R), más la energía (e), que en este caso funciona como un factor de producción (e_0). Es decir:

$$c = A e_0^\beta R^{1-\beta} \quad (4)$$

con $0 < \beta < 1$. A es el coeficiente de progreso técnico o tecnología que suponemos neutral en el sentido de Hicks. El objetivo de cada una de estas empresas es maximizar el beneficio $B = p_c c - p_e e_0 - p_R R$. La demanda de energía como factor de producción es una demanda derivada de la maximización del beneficio. Es decir:

$$\text{Max} B = \text{Max}\langle p_c A e_0^\beta R^{1-\beta} - p_e e_0 - p_R R \rangle \quad (5)$$

Suponemos que los mercados de bienes de consumo c y factores R están en competencia perfecta, por lo que los precios p_e y p_R aparecen como dados. Con respecto a los precios de la energía, en principio suponemos que las F empresas que suministran energía a consumidores y empresas tienen entre sí una competencia no colusiva en precios tipo Bertrand (1883), lo que implica que, aunque formen un oligopolio, su equilibrio es similar al de competencia perfecta (para las F empresas que producen energía se debe cumplir: $p_e = C'_e$ puesto que el producto que ofrecen (energía) es homogéneo. La demanda derivada de energía se obtiene maximizando B respecto a e_0 :



$B'_{e_0} = 0 = \beta \cdot p_c \cdot A \cdot e_0^{\beta-1} \cdot R^{1-\beta} - p_e$, de donde la demanda de energía de cada empresa es:

$e_0 = \frac{\beta \cdot p_c \cdot c}{p_e}$; y para las N empresas la demanda será:

$$e_0 N = \frac{\beta \cdot (p_c \cdot c \cdot N)}{p_e} \quad (6)$$

Demanda de energía de las empresas que suministran energía: Las F empresas que suministran el bien energía también usan una parte de ella como factor de producción (e_0), según una determinada función de producción que por simplicidad suponemos tipo Cobb-Douglas y cuyos argumentos son la energía (e_0) y el resto de los factores de producción R :

$$e = A e_0^\beta R^{1-\beta} \quad (7)$$

donde e es la energía producida y suministrada a empresas y consumidores. La demanda de energía se deriva de la maximización de beneficios por parte de cada una de las F empresas: $Max B = Max \langle p_c A e_0^\beta R^{1-\beta} - p_e e_0 - p_R R \rangle$ cuyo resultado, considerando que el

115

precio p_e viene dado por el equilibrio de Bertrand, es: $e_0 = \frac{\beta \cdot p_c \cdot e}{p_e}$; y para las F empresas la demanda será:

$$e_0 F = \frac{\beta \cdot (p_c \cdot e \cdot F)}{p_e} \quad (8)$$

Sabiendo que en una economía en equilibrio el ingreso de los vendedores es igual al gasto de los consumidores y que la renta nominal total anual de la economía (Y) es la suma de los ingresos anuales de todas las empresas: $Y = (p_c c)N + (p_e e)F$, la demanda derivada total de energía como factor de producción por parte de las empresas, teniendo en cuenta

(6) y (8) será: $N \cdot e_0 + F \cdot e_0 = \frac{\beta}{p_e} [(p_c c)N + (p_e e)F] = \frac{\beta}{p_e} Y$. Y la demanda total de

energía (E_D) de empresas y consumidores, teniendo en cuenta (3), (6) y (8), será:

$$E_D = H \cdot e + N \cdot e_0 + F \cdot e_0 = (\alpha + \beta) \frac{Y}{p_e} \quad (9)$$

La oferta de energía: Hemos supuesto que cada una de las F empresas suministradoras de energía producen según una función de producción Cobb-Douglas del tipo: $e = A e_0^\beta R^{1-\beta}$, con una función de costes del tipo $C = p_e e_0 + p_R R$, donde e_0 es la dotación de energía como factor de producción, R otros factores de producción diferentes de la energía pero necesarios para producirla, A es el coeficiente de progreso técnico o

tecnología y e la cantidad de energía producida y suministrada. A la función de producción Cobb-Douglas mencionada (7) le corresponde una función de costes variables dependiente de e , que se obtiene minimizando la función de costes C sujeta a la función de producción:

$$\text{Min}\langle C(e_0, R) = p_e e_0 + p_R R \rangle \text{ sujeto a: } e = Ae_0^\beta R^{1-\beta} \quad (10)$$

Minimizando por Lagrange considerando como dados los precios de los factores, se establece una relación entre los dos factores de producción que permite poner cada uno de ellos en función del output e . Una vez sustituidos estos resultados en la expresión de los costes (C) podemos obtener la expresión de los costes variables (C_v) en función de e , correspondientes a la función de producción (7):

$$C_v = \left(\frac{p_e}{\beta} \right)^\beta \left(\frac{p_R}{1-\beta} \right)^{1-\beta} \frac{e}{A} \quad (11)$$

a la que corresponde la siguiente función de costes marginales (C') respecto de e :

$$C'_e = \frac{1}{A} \left(\frac{p_e}{\beta} \right)^\beta \left(\frac{p_R}{1-\beta} \right)^{1-\beta} \quad (12)$$

Función que en este caso resulta ser constante para las F empresas, porque no depende de la cantidad de energía e .

Equilibrio y consumo de energía: Cuando las F empresas oligopolistas suministradoras de energía mantienen una competencia tipo Bertrand, compitiendo en precios, en el equilibrio igualarán el precio de venta de la energía al coste marginal ($p_e = C'_e$) en un único mercado. Si después las F empresas terminan coludiendo entonces el precio de equilibrio ya no será competitivo sino monopolístico, es decir, $p_e = \mu C'$, donde μ es un *mark-up* sobre los costes marínales tal que si $\mu=1$ el equilibrio es Bertrand y si $\mu>1$ hay colusión entre las F empresas. Por lo tanto, en el caso más general, el equilibrio del mercado en precios a partir de (9 y 12) se puede expresar como:

$$p_e = (\alpha + \beta) \frac{Y}{e} = \frac{\mu}{A} \left(\frac{p_e}{\beta} \right)^\beta \left(\frac{p_R}{1-\beta} \right)^{1-\beta} \quad (13)$$

de donde podemos obtener el consumo total de energía en el equilibrio del mercado:



$$e = (\alpha + \beta)\beta^\beta(1 - \beta)^{1-\beta} \frac{A \cdot p \cdot y}{\mu \cdot p_e^\beta \cdot p_R^{1-\beta}} \quad (14)$$

donde se ha desglosado la renta monetaria Y en sus componentes, nivel general de precios p y renta real y ($Y = p \cdot y$), donde y es ahora el ingreso real o PIB a precios constantes. Lo que se indica en la expresión (14) es que el consumo de energía depende directamente de la renta real en inversamente del precio de la energía y de los precios del resto de factores de producción. Llamando λ_0 al término $\log_e [(\alpha + \beta)\beta^\beta(1 - \beta)^{1-\beta}/\mu]$ y tomando logaritmos neperianos en (14), podemos obtener una primera expresión lineal explicativa del consumo de energía en una economía:

$$\log_e e = \lambda_0 + \log_e A + \log_e y + \log_e p - \beta \log_e p_e - (1 - \beta) \log_e p_R$$

Si regresamos esta ecuación a lo largo de una base de datos, muy probablemente el coeficiente λ_0 sería altamente significativo, manifestando la existencia de variables omitidas. Una de ellas puede estar relacionada con el nivel de población (PO) de la economía ya que parece evidente que a mayor población puede corresponder mayor consumo energético, por lo una más completa especificación econométrica de la ecuación anterior a regresar podría ser:

$$\log_e e = \lambda_0 + \lambda_1 \log_e A + \lambda_2 \log_e y + \lambda_3 \log_e p + \lambda_4 \log_e p_e + \lambda_5 \log_e p_R + \lambda_6 \log_e PO + \varepsilon \quad (15)$$

donde ε es una perturbación aleatoria. A esta expresión habría que añadir los determinantes del consumo de energía a muy largo plazo: Si por simplicidad dejamos al margen consideraciones relativas a la sustituibilidad de los factores de producción y suponemos que la función de producción agregada que rige el crecimiento a largo plazo de una economía, cerrada y sin sector público, es del tipo $y = (AL)^{1-\eta} K^\eta$, con un coeficiente de progreso técnico neutral en Harrod para asegurar la existencia de un estado estacionario distinto de cero, y denotamos por L el factor trabajo y K el capital físico, si consideramos la tecnología A como exógena y creciente a una tasa constante g , entonces a muy largo plazo, en el estado estacionario, se deberá cumplir: $s \cdot y = (n + g + \delta) \cdot K$, donde n y g son respectivamente las tasas constantes de crecimiento de la población y la tecnología respectivamente mientras que s y δ son, también respectivamente, las tasas de ahorro y de depreciación del capital. Aunque la energía es un factor de producción no estrictamente acumulable, hoy día es el uso del capital quien causa el consumo de energía como factor de producción. Por tanto podemos suponer que $e = \phi K$. Sustituyendo esta expresión en la ecuación del estado estacionario obtenemos que el consumo de energía

en él será: $e = \frac{\varphi \cdot s \cdot y}{(n + g + \delta)}$, por lo que $\log_e e = \log_e \varphi + \log_e s + \log_e y - \log_e (n + g + \delta)$.

Es decir, $\lambda_7 \log_e s + \lambda_8 \log_e (n + g + \delta)$ son los términos relativos al largo plazo que habría que añadir al segundo miembro de la especificación (15). No se ha considerado explícitamente el consumo de energía en transporte.

Emisiones: Los procesos de producción y consumo de energía conllevan emisiones de gases y partículas. Asumimos que un determinado porcentaje de emisiones contaminantes (Em) son subproducto del proceso de consumo de energía, de forma que en principio podemos expresar:

$$Em = \rho e^\theta, \quad (16)$$

donde ρ y θ son parámetros. En logaritmos, tenemos que: $\log_e Em = \log_e \rho + \theta \log_e e$. Al regresar esta ecuación a lo largo de una base de datos es probable que la constante de regresión ($\log_e \rho$) resulte ser demasiado significativa, lo que puede implicar la existencia de variables omitidas. Algunas de estas variables omitidas que explican las emisiones podrían estar relacionadas con las condiciones ambientales, y en concreto con variaciones de la temperatura ambiente que afecten al consumo de calefacción, agua caliente sanitaria o refrigeración, así como también el viento o la pluviosidad pueden incidir en la dispersión de las emisiones de gases y partículas asociadas a la producción y consumo de energía.

A partir de Joule (1850) se conoce que la cantidad de calor necesaria para elevar o disminuir la temperatura de un cuerpo de masa M es: $Q = s \cdot M \cdot \Delta T$, donde Q es calor, s una constante denominada calor específico y T la temperatura en °C; al tiempo se establece que la energía acumulada por calor (E) es: $E = J \cdot Q$, donde J es una constante universal denominada equivalente mecánico de la kilocaloría. En estas condiciones, el consumo de energía extra causada por variaciones en la temperatura ambiente se puede establecer como:

$$E = J \cdot s \cdot M \cdot \Delta T \quad (17)$$

Las emisiones causadas por el consumo de energía son amplificadas o reducidas por el efecto de las condiciones ambientales. Por lo tanto la relación (16) se puede expresar más propiamente como: $Em = \rho e^\theta E^\varphi$. Donde E viene dada por (17). En logaritmos: $\log_e Em = \log_e \rho + \theta \log_e e + \varphi \log_e E$. Concentrando los términos constantes y siendo ε una perturbación aleatoria, la ecuación a regresar para explicar las emisiones, finalmente será:

$$\log_e Em = \gamma_0 + \gamma \log_e e + \gamma_1 \log_e (M \cdot \Delta T) + \varepsilon \quad (18)$$



3. DATOS Y RESULTADOS EMPÍRICOS

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo de esta investigación es determinar si las emisiones de CO₂ a la atmósfera se deben fundamentalmente al consumo de energía o bien a imperfecciones en el proceso productivo de los países, o bien a las dos cuestiones y en qué proporción. Para averiguarlo se han regresado las ecuaciones (15) y (18) a lo largo de 20 países durante el periodo 1995-2015 con datos anuales. Los 20 países seleccionados pertenecen a bloques económicos consolidados: por parte de la Unión Europea figuran Irlanda, Reino Unido, Francia, Alemania, España y Portugal. Un país europeo no perteneciente a la UE es Islandia. Por parte de los países BRICS figuran India, China, Rusia, Brasil y Sudáfrica; Otros países asiáticos que figuran son Indonesia, Japón, Arabia Saudí e Irán; Otros países americanos son Estados Unidos y México; y finalmente en la muestra hay otros países africanos como son Nigeria y Marruecos. La aplicación se ha llevado a cabo con datos de la Agencia Internacional de la Energía (*International Energy Agency*) y las ecuaciones (15) y (18) han sido adaptadas para poder realizar las regresiones de acuerdo a los datos. Para poder disponer de los suficientes grados de libertad se han soslayado los precios de bienes y factores que, junto con la tecnología, se han englobado en la constante de regresión. De este modo se ha simplificado la ecuación (15) que explica el consumo de energía (e), quedando finalmente la siguiente ecuación a estimar:

$$\log_e e = \lambda_0 + \lambda \log_e y + \lambda_1 \log_e PO + \varepsilon \quad (19)$$

donde ε es una perturbación aleatoria y e es el consumo anual de energía² medido en miles de toneladas equivalentes de petróleo ($ktoe^3$). PO es la población del país medida en millones de habitantes, y es el output real de la economía medido a paridad de poder de compra en miles de millones de US\$ constantes del año 2010.

La ecuación (18), que explica las emisiones de CO₂, se va a estimar considerando que sobre el término $M \cdot \Delta T$ se van a realizar las siguientes consideraciones: tomamos como ΔT es la diferencia de las temperaturas medias máximas y mínimas anuales medidas en °C con respecto a una temperatura idónea, que en nuestro caso se ha tomado como 19°C. M es la masa de los cuerpos que hay que calentar o enfriar. En esta investigación se ha tomado por simplicidad M como la población total (PO) del país⁴ medida en millones de habitantes. Y llamando a $PO \cdot \Delta T$ como TPO , la ecuación (18) que se regresará finalmente será:

$$\log_e Em = \gamma_0 + \gamma \log_e e + \gamma_1 \log_e (TPO) + \varepsilon \quad (20)$$

donde ε es una perturbación aleatoria, e el consumo anual de energía y Em las emisiones anuales de CO₂ vertidas por cada economía. En la Tabla 2 figuran los resultados de las

estimaciones de la relación (19) -regresiones I a XII- y de la relación (20) –regresiones XIII a XIV- para la mitad de los países de la muestra, más la regresión global sobre los 20 países con datos de panel (modelos XII y XIV):

Tabla 2. Estimaciones del consumo de energía y emisiones de CO₂ por países.

	Reino Unido	Francia	España	Portug	Rusia	India	Irán	Indones	China	Marrue	Global
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Met.	AR1	MCO	MCO	AR1	AR1	MCO	AR1	MCO	MCO	AR1	Panel Random Effects
Ln e											
Const	19.27 (23.6)	15.35 (11.5)	10.02 (2.87)	2.89 (1.00)	-26.1 (-1.0)	16.6 (2.53)	-1.22 (-1.3)	8.32 (3.67)	53.9 (1.37)	4.50 (1.55)	5.25 (3.48)
Ln y [λ]	0.43 (3.64)	0.96 (3.56)	1.55 (1.71)	0.95 (1.88)	0.40 (1.69)	0.88 (3.09)	0.38 (2.23)	0.56 (2.18)	1.03 (2.48)	0.82 (2.06)	0.53 (3.06)
Ln PO	-2.62 (-6.7)	-2.61 (-3.5)	-2.60 (-1.1)	0.67 (0.76)	6.52 (1.31)	-1.57 (-1.2)	2.41 (4.9)	-0.12 (-0.18)	-6.86 (-1.1)	0.16 (0.11)	0.35 (2.10)
DW	3.04	2.51	1.81	1.29	2.44	3.27	2.94	2.06	2.98	2.01	
R ² -aj	0.81	0.73	0.70	0.61	0.48	0.98	0.99	0.76	0.94	0.97	0.56
Lagr. Mult.											21.5 pv: 0.004
Haus											7.77 pv: 0.1
XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX	XXI	XXII	XXIII	XXIV
Met.	MCO	MCO	AR1	MCO	AR1	MCO	MCO	AR1	AR1	MCO	Panel Between
Ln Em											
Const	-15.4 (-5.3)	-14.4 (-1.4)	-5.60 (-1.9)	-3.08 (-0.54)	1.73 (0.47)	-10.1 (-7.1)	-5.50 (-3.4)	-13.7 (-14.06)	-11.3 (-6.8)	-6.10 (-7.7)	-6.62 (-5.8)
Ln e [γ]	1.73 (8.04)	1.81 (2.03)	0.77 (2.67)	0.85 (1.93)	0.36 (1.51)	1.70 (10.2)	0.91 (2.64)	1.59 (8.23)	1.20 (23.0)	0.82 (5.52)	1.03 (6.40)
Ln TPO	0.14 (1.14)	-0.21 (-0.5)	0.36 (1.23)	-0.31 (-0.24)	0.09 (0.77)	-0.49 (-1.4)	0.11 (0.13)	0.08 (0.35)	0.31 (1.67)	0.36 (1.06)	0.71 (0.47)
DW	3.16	1.21	1.51	2.34	2.35	3.01	1.46	2.38	1.76	2.78	
R ² -aj	0.94	0.67	0.65	0.66	0.50	0.99	0.98	0.97	0.99	0.99	0.90

Fuente: elaboración propia.

Nota: t-ratios entre paréntesis

De estas regresiones extraemos los coeficientes de $\log_e y$ y de $\log_e e$, respectivamente coeficientes λ y γ de las ecuaciones (19) y (20). Según las estimaciones, estos coeficientes resultan ser significativos al 99 % en general, excepto en las regresiones IV, V, VI y XVII donde la significación de los estimadores es algo menor. Las regresiones para los países se han realizado por el método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO), corrigiendo en lo posible la autocorrelación por medio de asumir que los residuos siguen un proceso autorregresivo de primer orden (AR1), aunque en algunas de las estimaciones todavía persiste autocorrelación temporal de los residuos. Todas las regresiones tienen coeficiente de determinación R²-ajustado elevado o aceptable. En la Tabla 2 no se recogen las



regresiones para toda la muestra de países, sólo para diez de ellos, pero el resto de los coeficientes λ y γ que no figuran en la Tabla 2 están recogidos más adelante en las columnas IV y V de la Tabla 4. La regresión XII de la Tabla 2 muestra la estimación por panel para los 20 países de la muestra durante el período 1995-2015 en cuanto a la relación en logaritmos entre el consumo de energía y la producción real (ecuación 19), siendo la mejor estimación por panel la de efectos aleatorios (*Random Effects*), ya que el valor-p (*p-value*) del test del multiplicador de Lagrange (Breuch y Pagan, 1980) es menor que 0.05, lo que hace rechazar la estimación por MCO-planos (*OLSQ-plains*), mientras que el p-valor del test de Hausman (1978) es mayor que 0.05, lo que rechaza la estimación por efectos fijos (*Fixed Effects*). En cuanto a la estimación por panel de la relación en logaritmos entre las emisiones de CO₂ y el consumo de energía (ecuación 20), los resultados indican que la mejor regresión por panel es la estimación entre grupos (*Between Groups*), recogida en la regresión XIV. La interpretación económica de los estimadores λ es relevante, ya que: $\lambda = \frac{\partial \log_e e}{\partial \log_e y} = \frac{\Delta e}{\Delta y} \cdot \frac{y}{e}$, es decir, son elasticidades energía-renta, a partir de las que podemos conocer lo que varía el consumo de energía cuando varía la producción del país:

121

$$\frac{\Delta e}{\Delta y} = \lambda \cdot \frac{e}{y} \quad (21)$$

El término (e/y) recibe el nombre de intensidad energética y es un indicador de la eficiencia energética de cada país. En las columnas III y IV de la Tabla 3 se muestran ordenados los países de la muestra de menor a mayor intensidad energética para datos de 2015. Una menor intensidad energética se suele corresponder en general con una mayor eficiencia energética.

Las columnas I y II de la misma tabla muestran los países ordenados por cantidades emitidas de CO₂ por cada *ktoe* de energía consumida, de menor a mayor emisión. Parece haber cierta correlación entre las dos partes de la tabla y también entre la utilización masiva de energías fósiles (columna V) en los últimos países de la columna III y la mayor proporción del uso de renovables en los primeros países de esta columna. La evolución de la intensidad energética por bloques de países de la muestra desde 1995 hasta 2015 se puede observar en el Gráfico 1.

Tabla 3. Emisiones de CO₂, Intensidades Energéticas y energías fósiles (2015)

Emisiones (Mt de CO ₂) por cada ktoe consumido (2015)		Intensidad Energética: Tn de CO ₂ por cada 10000 US\$ producidos (2015)		Consumo de energía fósil (% del total)
I	II	III	IV	V
Nigeria	655	Nigeria	0.82	18.91
Islandia	718	Irlanda	1.24	89.95
Brasil	1988	Francia	1.39	63.33
Francia	2266	Islandia	1.46	14.60
Indonesia	2734	Brasil	1.52	57.48
Portugal	2889	Reino Unido	1.57	86.34
Iran	3061	España	1.67	77.45
España	3099	Portugal	1.69	73.85
Reino Unido	3119	Indonesia	1.74	66.15
Rusia	3210	Alemania	2.09	81.60
Estados Unidos	3263	Marruecos	2.18	87.75
Alemania	3315	México	2.19	90.17
Irlanda	3332	Japón	2.44	92.24
Marruecos	3644	India	2.75	68.51
India	3668	Estados Unidos	2.95	86.70
Arabia Saudí	3688	Arabia Saudí	3.41	99.99
México	3689	Iran	4.31	98.94
Japón	3878	Rusia	4.65	90.97
China	4650	China	5.00	87.50
Sudáfrica	5835	Sudáfrica	6.14	85.60

Fuente: elaboración propia a partir de los datos de la International Energy Agency 2016

En el Gráfico 1 se puede observar que la menor intensidad energética se da en los países europeos y la mayor en los países BRICS. También se puede observar cómo va disminuyendo la intensidad energética a través del tiempo en los cuatro bloques de países probablemente debido al aumento de la eficiencia en el consumo de energía, debido a la progresiva sustitución de energía fósil por renovable. A partir de la ecuación (20) se puede deducir que $\gamma = \frac{\partial \log_e(Em)}{\partial \log_e e} = \frac{\Delta(Em)}{\Delta e} \cdot \frac{e}{Em}$, de donde podemos inferir lo que aumentan las emisiones cuando aumenta el consumo de energía:

$$\frac{\Delta Em}{\Delta e} = \gamma \cdot \frac{Em}{e} \quad (22)$$

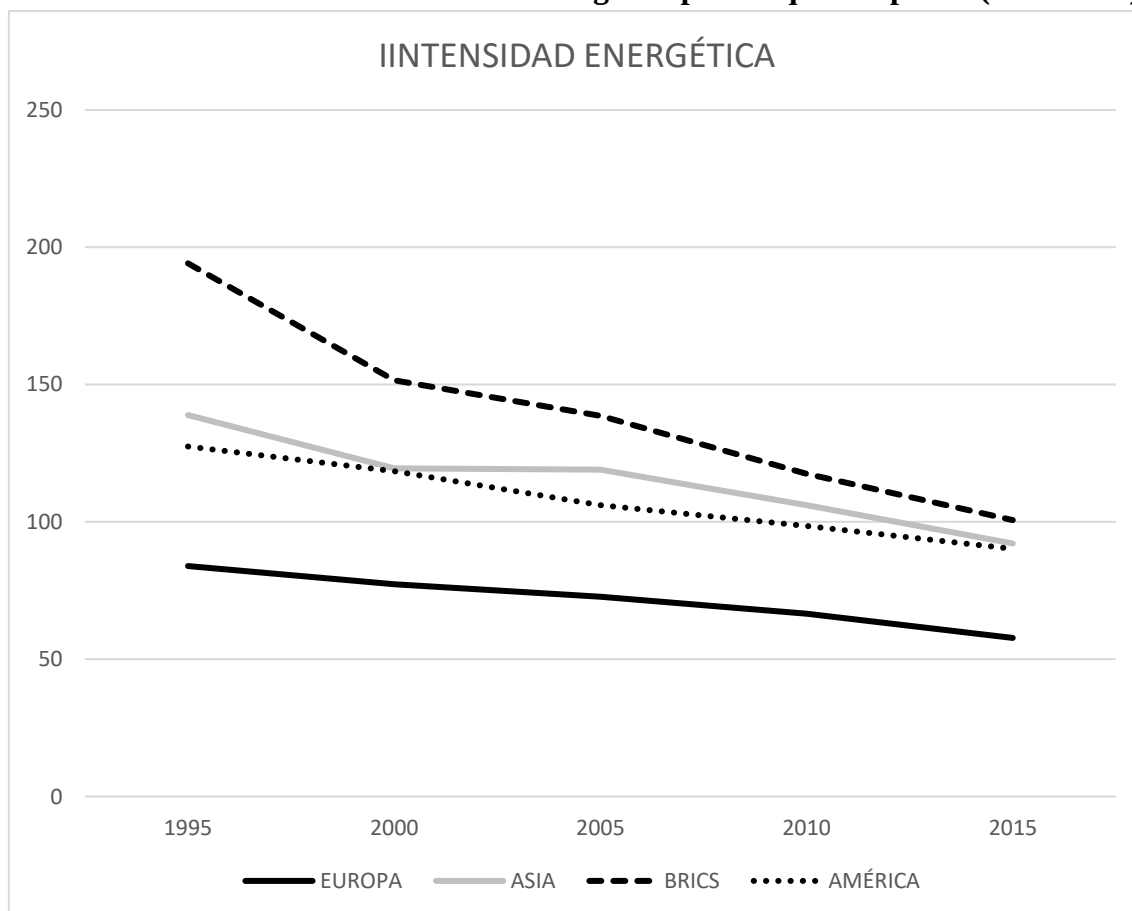
Se desea conocer en qué medida el aumento que sufren las emisiones de CO₂, cuando aumenta el consumo de energía, es mayor o menor que el aumento que sufren las emisiones de CO₂, cuando aumenta el PIB:



El producto $\lambda \cdot \gamma = \left(\frac{\partial \log_e e}{\partial \log_e y} \right) \left(\frac{\partial \log_e Em}{\partial \log_e e} \right) = \frac{\Delta Em}{\Delta y} \cdot \frac{y}{Em}$, por lo que, lo que aumentan las emisiones cuando aumenta la renta real (PIB real) es:

$$\frac{\Delta Em}{\Delta y} = \lambda \cdot \gamma \cdot \frac{Em}{y} \quad (23)$$

Gráfico 1. Evolución de la intensidad energética por bloques de países (1995-2015)



Fuente: elaboración propia basada en datos de la International Energy Agency 2016

A partir de (22) y (23) podemos ver qué emite más, si el proceso productivo de y o el proceso de consumo de energía (e), es decir, cuánto vale la diferencia $\frac{\Delta Em}{\Delta y} - \frac{\Delta Em}{\Delta e}$. Los resultados, con datos de 2015 se muestran en la columna VII de la Tabla 4.

Tabla 4. Productividad de la energía y contribución a las emisiones de CO₂ (2015)

Países	Productividad media (y/e) de la energía 2015 en miles de millones de \$ ctes (2010) / ktoe	Productividad marginal de la energía ($\Delta y/\Delta e$) 2015	$\lambda\gamma$	γ	Emisiones: Tn. de CO ₂ per capita (2015)	Contribución a las emisiones de CO ₂ : $\frac{\Delta Em}{\Delta y} - \frac{\Delta Em}{\Delta e}$
I	II	III	IV	V	VI	VII
Irlanda	0.026	0.096	0.26	0.96	7.29	0.028
Reino Un.	0.019	0.045	0.74	1.73	5.93	0.110
España	0.018	0.012	1.19	0.77	5.28	0.195
Portugal	0.017	0.017	0.80	0.85	4.53	0.132
México	0.0168	121.6	0.00017	1.27	3.54	-0.004
Marruecos	0.0167	0.020	0.67	0.82	1.54	0.142
Francia	0.0163	0.016	1.73	1.81	4.34	0.200
Japón	0.01586	-0.015	-0.47	0.47	9.10	-0.115
Alemania	0.01583	-0.076	-0.57	2.78	8.72	-0.128
Indonesia	0.0157	0.028	0.87	1.59	1.72	0.145
India	0.014	0.014	1.49	1.70	1.48	0.401
Brasil	0.012	5.0	0.0028	1.14	2.15	-0.001
Estados Un	0.011	0.011	1.02	1.02	15.04	0.297
Arabia Sa.	0.010	0.009	1.20	1.03	16.36	0.402
Sudáfrica	0.0095	-0.00008	2.21	-0.02	7.25	1.350
China	0.0093	0.009	1.23	1.20	6.54	0.607
Nigeria	0.0079	0.074	0.28	2.83	0.40	0.021
Irán	0.0071	0.018	0.34	0.91	6.79	0.143
Rusia	0.0070	0.016	0.15	0.36	9.97	0.067
Islandia	0.005	0.005	0.03	0.03	5.85	0.003
Eficiencia de e: (y/e) $\geq$ ($\Delta y/\Delta e$) > 0			Promedios:		6.19	0.165 (panel)

Fuente: Elaboración propia.

Cuando esta diferencia es positiva, el aumento de la producción emite más CO₂ que el aumento del consumo de energía, lo que indicaría la necesidad de reducir las emisiones causadas por el proceso productivo al margen del consumo de energía.

A partir de las estimaciones para los 20 países de la muestra, de las cuales para 10 de ellos se muestran en la Tabla 2, se obtienen los correspondientes estimadores de λ y γ para cada país, que se encuentran recogidos en las columnas IV y V de la Tabla 4. Utilizando las expresiones (22) y (23) con datos de 2015 obtenemos los resultados de la columna VII. Considerando los coeficientes λ y γ obtenidos en las estimaciones XII y XIV con datos de panel de la Tabla 2 obtenemos que el promedio de la diferencia $\frac{\Delta Em}{\Delta y} - \frac{\Delta Em}{\Delta e}$ es 0.165

lo que demuestra que en general $\frac{\Delta Em}{\Delta y} > \frac{\Delta Em}{\Delta e}$. Es decir, como se ve en la columna VII,

lo que aumentan las emisiones cuando aumenta el PIB real en general es más que lo que aumentan las emisiones cuando aumenta el consumo energético. Esto implica que en las



economías donde esto sucede hay procesos productivos emisores, al margen del consumo de energía, lo que sugiere que una mejora en estos procesos productivos podría causar un descenso de las emisiones hasta el nivel que tienen las emisiones asociadas al consumo energético. Sólo hay cuatro países de la muestra, México, Brasil, Japón y Alemania, en los que el aumento de las emisiones de CO₂ relacionadas con el consumo de energía son mayores que las asociadas a la actividad económica, lo que implica que la productividad marginal de la energía es mayor que uno⁵ (Brasil y México) o bien que las emisiones disminuyen cuando aumenta la producción debido al efecto Kuznets⁶ (Alemania y Japón). Los países cuya diferencia es superior al promedio suministrado por la estimación de datos de panel (0.165) deberían mejorar sus procesos productivos. Estos países aparecen sombreados en la columna VII de la Tabla 4. En la columna VI aparecen sombreados los países cuyas emisiones de CO₂ per capita son superiores al promedio de la muestra (6.19 Tn. de CO₂ per capita), a partir de lo cual, Irlanda, Japón, Alemania, Irán y Rusia deberían reducir el consumo de energía mientras que Estados Unidos, Arabia Saudí, Sudáfrica y China deberían incorporar procesos productivos menos contaminantes, comparando los resultados de las columnas VI y VII.

Las columnas II y III de la Tabla 4 están relacionadas con la eficiencia en el uso de los factores de producción, incluida la energía, en relación al año 2015. Suponiendo que las funciones de producción de las empresas de la economía son homogéneas de grado uno, como corresponde a las funciones de producción (4), cuyos argumentos son la energía como factor de producción (e_0) más una serie de factores de producción (R), alguno de los cuales suponemos fijo durante 2015, entonces si consideramos la energía como factor variable todos los factores de producción son utilizados eficientemente por la empresa cuando la producción se encuentra entre el óptimo técnico⁷ y el máximo técnico de una función de productividad donde la energía actúa como factor variable. En ese tramo la función de productividad media de la energía se sitúa por encima de la función de productividad marginal de la energía como factor de producción. Agregando las funciones de productividad de las empresas de la economía se puede deducir que la utilización eficiente de todos los factores de producción, incluida la energía, se obtiene cuando sobre la función de productividad agregada, la productividad media de la energía (Tabla 4, columna II) es igual o mayor que la productividad marginal de la energía (Tabla 4, columna III) siendo ésta no negativa: $(y/e) \geq (\Delta y/\Delta e) \geq 0$. Por tanto, los resultados sombreados de las columnas II y III pertenecen a países que probablemente no usaron eficientemente la energía como factor de producción en 2015. Según los resultados de la Tabla 4, se puede asegurar bajo el supuesto de funciones agregadas de producción de grado uno que, de los 20 países analizados sólo España, Portugal, Francia, India, Estados Unidos, Arabia Saudí, China e Islandia utilizaron los factores de producción, incluida la energía, en forma eficiente en 2015 puesto que, en relación a la energía, sus productividades medias son superiores a las marginales.

4. CONCLUSIONES

En esta investigación se ha planteado un modelo microeconómico que explica la oferta y la demanda de energía, el consumo energético de una economía en equilibrio y las emisiones que producen el consumo de energía y la actividad económica en general. El objetivo de este modelo es encontrar desde la teoría económica relaciones causales entre el consumo de energía y la actividad económica y entre las emisiones y el consumo de energía. Las emisiones de las que trata esta investigación son exclusivamente las de dióxido de carbono, que fue seleccionado por ser el gas de efecto invernadero más abundante y supuestamente el máximo responsable del calentamiento global y por tanto de la posible degradación medioambiental a largo plazo.

El propósito más importante de este trabajo es investigar qué parte de las emisiones totales de dióxido de carbono está asociada al consumo energético y qué parte está asociada con la actividad económica, al margen del consumo de energía. El modelo se ha aplicado econométricamente sobre una muestra de 20 países en el período 1995-2015 con datos de la Agencia Internacional de la Energía. Seis de estos países pertenecen a la Unión Europea y el resto de los países de la muestra pertenecen a Europa, Asia, América y a África. La población total de estos países suma el 61 % de la población mundial. Los resultados de la aplicación indican que, en general, el proceso de llevar a cabo la actividad económica, medida por el producto interior bruto en términos reales, emite más dióxido de carbono que el proceso de consumo de energía. Esto parece indicar la existencia de ciertas imperfecciones en los procesos productivos de la mayoría de los países de la muestra.

Los resultados también indican que Irlanda, Japón, Alemania, Irán y Rusia deberían poder reducir su consumo de energía mientras que Estados Unidos, Arabia Saudí, Sudáfrica y China deberían incorporar procesos productivos menos contaminantes. Las emisiones a la atmósfera de dióxido de carbono per cápita de estos nueve países son superiores a la media de la muestra. En relación a la productividad de la energía en los procesos productivos, sólo España, Portugal, Francia, India, Estados Unidos, Arabia Saudí, China e Islandia utilizaron la energía en forma eficiente en 2015, mientras que únicamente Portugal e Islandia además de aparecer eficientes energéticamente tampoco sobrepasaron las emisiones per cápita ni las emisiones de sus procesos productivos sobrepasaron en demasía sus emisiones por consumo de energía. En cuanto a la relación entre eficiencia energética y el inverso de la intensidad energética, se puede asegurar que durante el período 1995-2015 conjuntamente los países europeos de la muestra son los que manifiestan menos intensidad energética, y por tanto probablemente más eficiencia energética, seguidos de los países americanos. Después figuran los países asiáticos y por último los BRICS.



Los resultados de esta investigación podrían ser útiles para la corrección de tendencias en algunos procesos de degradación ambiental.

BIBLIOGRAFÍA

- ABOSEDRA, S. y BAGHESTANI, H. (1989): “New evidence on the causal relationship between United States energy consumption and gross national product”, *Journal of Energy Development*, Vol. 14, pg. 285-292.
- ALAM, M., BEGUM, I. y BUYASSE, J. (2012): “Energy consumption, carbon emissions and economic growth nexus in Bangladesh: cointegration and dynamic causality analysis”, *Energy Policy*, Vol. 45, pg. 217-225.
- ALTINAY, G. y KARAGOL, E. (2004): “Structure break, unit root, and the causality between energy consumption and GDP in Turkey”, *Energy Economy*, Vol. 26, pg. 985-994.
- ANG, J. (2007a): “Economic development, pollutant emissions and energy consumption in Malaysia”, *Journal of Policy Modelling*, Vol. 30, pg. 271-278.
- ANG, J. (2007b): “CO₂ emissions, energy consumption, and output in France. En: *Energy Policy*, Vol. 35, pg. 4772-4778.
- ASPERGIS, N. y PAYNE, J. (2009): “CO₂ emissions, energy usage, and output in Central America”, *Energy Policy*, Vol. 37, pg. 3282-3286.
- BELLOUMI, M. (2009): “Energy consumption and GDP in Tunisia: cointegration and causality analysis”, *Energy Policy*, Vol. 37, pg. 2745-2753.
- BERTRAND, J. (1883): “Book review of theorie mathematique de la richesse sociale and of recherches sur les principes mathematiques de la theorie des richesses”, *Journal des Savants*, Vol. 67, pg. 499-508.
- BREUSCH, T.S., y PAGAN, A.R. (1980): “The Lagrange multiplier test and its applications to model specification in econometrics”, *The Review of Economic Studies* Vol. 47-1, pg. 239-253.
- CABALLERO, K. y GALINDO, L. (2007): “El consumo de energía en México y sus efectos en el producto y los precios”, *Problemas del Desarrollo Revista Latinoamericana de Economía*, Vol. 38, pg. 127-151.

- CHENG, B. (1997): "An investigation of co-integration and causality between energy consumption and economic activity in Taiwan", *Energy Economics*, Vol. 19-4, pg. 435-444.
- FARHANI, S. y BEN REJEB, J. (2012): "Link between economic growth and energy consumption in over 90 countries", *Interdisciplinary Journal of Contemporary Research in Business*, Vol 3-11, pg. 282-297.
- GARDNER, T. y JOUTZ, F. (1996): "Economic growth, energy prices and technological innovation", *Southern Economic Journal*, Vol. 62-3, pg. 653-666.
- GHALI, K. (2004): "Energy use and output growth in Canada: A multivariate cointegration analysis", *Energy Economics*, Vol. 26-2, pg. 225-238.
- GÓMEZ, C. (2010): "Crecimiento económico, consumo de energía y emisiones contaminantes en la economía mexicana", *Revista Fuente*, Vol. 3-9, pg. 67-80.
- HALICIOGLU, F. (2009): "An econometric study of CO2 emissions, energy consumption, income and foreign trade in Turkey", *Energy Policy*, Vol. 37, pg. 1156-1164.
- HAUSMAN, J.A. (1978): "Specification Tests in Econometrics", *Econometrica*, Vol. 46-6, pg. 1251-1271.
- HETTIGE, H., MANI, M. y WHEELER, D. (2000): "Industrial pollution in economic development: the environmental Kuznets curve revisited", *Journal of Development Economics*, Vol. 62, pg. 445-476.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2016): *International Energy Outlook*, U.S. Department of Energy, Washington, DC.
- JOBERT, T. y KARANFIL, F. (2007): "Sectoral energy consumption by source and economic growth in Turkey", *Energy Policy*, Vol. 35-11, pg. 5447-5456.
- JOULE, J.P. (1850): "On the mechanical equivalent of heat", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 140, pg. 61-82.
- KRAFT, J. y KRAFT, G. (1978): "On the relationship between energy and GNP", *Journal of Energy Development*, Vol. 3, pg. 401-403.



- LABANDEIRA, X., LABEAGA, J.M. y LÓPEZ-OTERO, X. (2017): “Elasticities of transport fuels at times of economic crisis: An empirical analysis for Spain”, *Energy Economics*, Vol. 68, pg. 66-80.
- LUZZATI, T. y ORSINI, M. (2009): “Investigating the energy-environmental Kuznets curve”, *Energy*, Vol. 34, pg. 291-300.
- MALLICK, H. (2009): “Examining the linkage between energy consumption and economic growth in India”, *The Journal of Developing Areas*, Vol. 43-1, pg. 249-280.
- MEDLOCK, K. y SOLIGO, R. (2001): “Economic development and end-use energy demand”, *The Energy Journal*, Vol. 22-2, pg. 77-105.
- MEHARA, M. (2007): “Energy consumption and economic growth: The case of oil exporting countries”, *Energy Policy*, Vol. 35, pg. 2939-2945.
- PAO, H. y TSAI, C. (2010): “CO₂ Emissions, energy consumption and economic growth in BRIC countries”, *Energy Policy*, Vol. 38, pg. 7850-7860.
- RAZZAQUI, S., BILQUEES, F. y SHERBAZ, S. (2011): “Dynamic relationship between energy and economic growth: Evidence from D8 countries”, *The Pakistan Development Review*, Vol. 50-4, pg. 437-458.
- SIDDIQUI, R. (2004): “Energy and economic growth in Pakistan”. *The Pakistan Development Review*, Vol. 43-2, pg. 175-200.
- SOYTAS, U., SARI, R. y EWING, B. (2007): “Energy consumption, income, and carbon emissions in the United States”, *Ecological Economics*, Vol. 62, pg. 482-489.
- SRINIVASAN, P. y SIDDANTH, I. (2015): “Causality among energy consumption, CO₂ emission, economic growth and trade: A case of India”, *Foreign Trade Review*, Vol. 50-3, pg. 168-189.
- TSANI, S. (2010): “Energy consumption and economic growth: A causality analysis for Greece”, *Energy Economics*, Vol. 32-3, pg. 582-590.
- YU, E. y JIN, J. (1992): “Cointegration tests of energy consumption, income, and employment”, *Resources and Energy*, Vol. 14-3, pg. 259-266.
- ZAMANI, M. (2007): “Energy consumption and economic activities in Iran”, *Energy Economics*, Vol. 29-6, pg. 1135-1140.

ZHANG, X. y CHENG, X. (2009): "Energy consumption, carbon emissions, and economic growth in China", *Ecological Economics*, Vol. 68, pg. 2706-2712.

ZHANG, Y. (2011): "Interpreting the dynamic nexus between energy consumption and economic growth: Empirical evidence from Russia", *Energy Policy*, Vol. 39-5, pg. 2265-2272.

REFERENCIAS

¹ Conferencia de las Naciones unidas sobre el Cambio Climático (París, diciembre de 2015) cuyos acuerdos fueron ratificados y aprobados por el Parlamento de la Unión Europea el 4 de octubre de 2016. Esta acción europea sobre el cambio climático tiene sus antecedentes en los artículos 17, 18 y 19 de la Directiva UE 2009/28 / CE del Parlamento Europeo y Consejo del 23 / abril / 2009.

² *Total final consumption*: consumo de energía residencial, transporte, industrial, comercial y sector primario, según la base de datos de la International Energy Agency.

³ 1 ktoe = 11630000 kWh.

⁴ En rigor habría que haber multiplicado para cada país cada habitante por su masa o bien por la masa media de los habitantes pero, suponiendo que en promedio los habitantes de los países tienen similar masa se ha preferido normalizar a la unidad la masa de cada habitante.

⁵ Si $(\Delta E_m / \Delta e) > (\Delta E_m / \Delta y)$ entonces $(1 / \Delta e) > (1 / \Delta y)$, luego: $(\Delta y / \Delta e) > 1$. Véase Tabla 4, columna III.

⁶ El efecto Kuznets indica que a partir de un nivel elevado de renta per cápita, las emisiones disminuyen cuando aumenta la producción. Esto se hace manifiesto mediante la denominada curva de Kuznets.

⁷ El óptimo técnico es el máximo de la función de productividad media. El máximo técnico es el máximo de la función de productividad.