

# La innovación y la sustitución energética como medidas de corrección medioambiental en países de la OCDE

DANIEL BALSALOBRE LORENTE <sup>a</sup>, AGUSTÍN ÁLVAREZ-HERRÁNZ <sup>a</sup>, JOSÉ BAÑOS TORRES <sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Universidad de Castilla-La Mancha, Facultad de Ciencias Sociales, Avda. de los Alfares, 44, 16071 Cuenca, España. E-mail: Daniel.Balsalobre@uclm.es; Agustin.Alvarez@uclm.es; Jose.Banos@uclm.es*

## RESUMEN

El presente estudio aborda la corrección producida en el nivel de emisiones de gases efecto invernadero (GEI) a través del papel que, junto al crecimiento económico, juegan tanto la innovación en tecnología energética como el patrón de consumo energético por fuentes de origen renovable; donde además se incorpora al análisis, a través de una variable moderadora, el impacto que el nivel de renta ejerce sobre la sustitución energética en dicho proceso de corrección medioambiental.

Para tal fin, se ha utilizado el argumento metodológico que propone la Curva de Kuznets Ambiental -CKA-, a través del diseño de un modelo econométrico con datos de panel de efectos fijos para 24 países de la OCDE en el periodo 1992-2010. Con las limitaciones de alcance propias de los datos utilizados, hemos obtenido evidencia de que el esfuerzo de las administraciones en innovación y sustitución energética se asocia con la reducción en el nivel de emisiones GEL.

*Palabras clave:* Curva de Kuznets Ambiental, Crecimiento económico, I+D+i energético.

## Innovation and Energy Substitution as Measures of Environmental Correction in OECD Countries

### ABSTRACT

The main objective of this study is to analyze the correction of the emissions of greenhouse gases (GHGs) because of both the role economic growth and innovation in technology and the substitution of renewable energy sources in this process.

As a methodological basis, it has resorted to empirical model proposed by the Environmental Kuznets Curve -EKC-, designing an econometric panel data model with fixed effects for 24 OECD countries in the period 1992-2010. Despite the limitations of range, typical of the used data, the results obtained have allowed to present evidence that the budget of the administrations in energy innovation and energy substitution seem positively associated with the reduction in GHG emissions.

*Keywords:* Environmental Kuznets Curve, Economic growth, Energy RDD.

Clasificación JEL: Q41, Q55, Q56, 032

Artículo recibido en abril de 2015 y aceptado en noviembre de 2015

Artículo disponible en versión electrónica en la página [www.revista-eea.net](http://www.revista-eea.net), ref. e-34102

## 1. INTRODUCCIÓN

La energía es considerada como componente fundamental en el desarrollo y transformación de los sistemas económicos, siendo numerosos los estudios que, tomando como piedra angular el papel del consumo energético (Wackernagel *et al.*, 1999; Turner y Hanley, 2011; UK Climate Change Committee, 2008), la innovación energética o la eficiencia industrial (Dooley, 1998; Johansson y Kristom, 2007; Mendiluce, *et al.*, 2010), avalan este comportamiento. Esta serie de estudios plantean, de una u otra manera, la necesidad de abordar medidas de innovación energética encaminadas a la sostenibilidad económica y la corrección medioambiental. Ya en la década de los años setenta, el Club de Roma planteaba la necesidad de adquirir conciencia sobre la necesidad de preservar la sostenibilidad medioambiental dentro de los sistemas económicos (Meadows *et al.*, 1972). No sería, sin embargo, hasta comienzos de los noventa cuando esta problemática adquiere una mayor relevancia a través de estudios como el realizado por Groosman y Krueger (1991), donde se analiza la relación entre el crecimiento económico y la degradación medioambiental por medio de una función en forma de U-invertida, en lo que posteriormente vendría a denominarse la Curva de Kuznets Ambiental -CKA- (Panayotou, 1993).

En los últimos años ha surgido un mayor consenso sobre la necesidad de mejorar la sostenibilidad medioambiental por medio de las políticas de ahorro, de sustitución de fuentes o de mejora de la eficiencia energética<sup>1</sup>. Estas actuaciones han llevado a las administraciones a adoptar medidas en este ámbito (Comisión Europea, 2008)<sup>2</sup>. Conscientes de la importancia de la energía como input productivo básico, el modelo energético predominante en el mundo durante la mayor parte del siglo pasado, basado en la sobreexplotación de recursos fósiles contaminantes y limitados, parece estar reorientándose hacia un modelo más sostenible, a juzgar por lo que se desprende de los foros internacionales que dieron lugar al “Protocolo de Kyoto” de 1997, o a los diversos Consejos Europeos que han abordado el tema<sup>3</sup>. Este nuevo panorama energético va a suponer

---

<sup>1</sup> Diversos estudios arrojan evidencia sobre el efecto positivo que las medidas de eficiencia en el sector industrial (Sinton y Fridley, 2000), o de gasto público en I+D+i energético (Fisher-Vanden *et al.*, 2004) han ejercido sobre la reducción de la intensidad energética (definida como consumo por unidad de producto interior bruto) y, por extensión, en la mejora de la eficiencia energética y en la reducción en el nivel de emisiones de gases efecto invernadero.

<sup>2</sup> Algunas de las directrices comunitarias establecen la aplicación de ayudas estatales en favor del medio ambiente, tales como 2008/C 82/01, o DOUE C de 1/4/2008, que vienen a sustituir a las vigentes hasta entonces (2001/C 37/03, DOCE C de 3.2.2001).

<sup>3</sup> En el Consejo Europeo de Diciembre de 2008 se establecieron una serie de objetivos medioambientales para la U.E en 2020: *la triple apuesta del 20* al prever un aumento del 20% en la eficiencia energética, una reducción del 20% en las emisiones de gases de efecto invernadero, y alcanzar una cuota del 20% de energías renovables sobre el consumo total de energía, a la vez

una mayor implicación pública en los problemas medioambientales (Jones, 2010).

Junto al problema del potencial agotamiento de las fuentes energéticas de origen fósil, las emisiones de gases efecto invernadero -GEI- adquieren importancia como condicionante de la sostenibilidad medioambiental en las economías avanzadas. En los últimos años, un aspecto muy vinculado a la actividad económica han sido las cuestiones medioambientales, debido a los efectos negativos que sobre el medio ambiente están provocando las actividades de consumo y de producción. Entre estos efectos negativos se encuentra el aumento de la concentración de GEI en la atmósfera, lo que está generando importantes alteraciones climatológicas<sup>4</sup>. Actualmente, desde múltiples ámbitos, se ha producido un consenso sobre la necesidad de aplicar medidas correctoras sobre las causas del cambio climático (IPCC, 2007). En este sentido, numerosos estudios apuntan al hecho de que las emisiones GEI implican un deterioro tanto medioambiental como económico, cuyos efectos generan externalidades negativas<sup>5</sup> (Esteban, *et al.*, 2011; Cámaras *et al.*, 2013). A este respecto, las fuentes energéticas de origen fósil ejercen un impacto negativo sobre el medioambiente, siendo necesaria la aplicación de medidas que estimulen la incorporación de fuentes energéticas de origen renovable, así como innovaciones en el sector energético, a fin de reducir el nivel de emisiones GEI per capita. Partiendo de esta hipótesis, el presente estudio analiza empíricamente, para 24 países de la OCDE durante los años 1992 y 2010, cuál ha sido el impacto que sobre el nivel de emisiones GEIpc han tenido, tanto el incremento en los niveles de renta, como las medidas de innovación energética y la promoción de fuentes renovables. De los resultados, que se desprendan de las estimaciones realizadas, se persigue obtener evidencia sobre la necesidad seguir potenciando las inversiones relacionadas con el sector energético, en innovación y sustitución energética, a fin de corregir los niveles de contaminación medioambiental.

---

que se perseguía alcanzar una cuota del 10% de biocarburantes en el transporte para esa misma fecha.

<sup>4</sup> Los efectos asociados a fenómenos de cambio climático son diversos, entre los que destacan aquellos relacionados alteraciones climatológicas o fenómenos meteorológicos extremos (IPCC, 2007).

<sup>5</sup> La existencia de externalidades así como las dificultades socio-políticas relacionadas con el establecimiento de una valoración económica de las emisiones de GEI (Newell, 2010), hace necesario el empleo de medidas regulatorias, tales como sistemas públicos de promoción de tecnologías bajas en emisiones de GEI, a fin de contrarrestar estos fallos de mercado (Newell y Fischer, 2008; Kemfert y Diekmann, 2009).

## 2. LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA Y LA SUSTITUCIÓN ENERGÉTICA EN LOS PROCESOS DE CORRECCIÓN MEDIOAMBIENTAL

Está plenamente aceptado que en el análisis del crecimiento económico, el progreso tecnológico se erige como un elemento clave en el largo plazo (Romer, 1990), dada la existencia de economías externas, capaces de seguir generando innovación y difusión de los conocimientos adquiridos. Este hecho supone que los beneficios sociales derivados de la inversión en I+D+i van a superar ampliamente a los beneficios privados obtenidos en la misma (Griliches, 1992).

Bajo esta premisa y asumiendo que la contaminación medioambiental constituye una externalidad negativa, que no puede ser totalmente corregida por el mecanismo de mercado, se hace necesaria la intervención pública que permita corregir tales disfunciones. En este sentido, la evidencia empírica reconoce la existencia de una relación positiva entre la mejora en la calidad medioambiental y los esfuerzos en innovación energética (Carrión-Flores e Innes, 2010; Balsalobre *et al.*, 2015). A este respecto, la aplicación de medidas de regulación medioambiental orientadas a la innovación en el sector energético, podrían resultar de gran utilidad en los procesos de corrección medioambiental (Heyes y Kapur, 2011)<sup>6</sup>.

Para la consecución de un escenario de crecimiento económico sostenible, se exigen mejoras sobre la productividad en actividades de innovación vinculadas al sector energético (De Castro, 2009). Sin embargo, esta hipótesis requiere de unos rendimientos crecientes a escala que, a largo plazo, permitirán ligar el crecimiento económico con unos niveles de contaminación medioambiental cada vez menores (Torras y Boyce, 1998). En consecuencia, puede afirmarse que un crecimiento económico sostenible implica la existencia de rendimientos constantes o crecientes a escala que, en buena parte, deberán estar soportados por actividades de innovación energética.

Fomentar procesos de sustitución energética, hacia fuentes renovables, precisa de una intervención pública, que deberá tener en cuenta las limitaciones asociadas al grado en que una sociedad se encuentra capacitada para internalizar el coste de la contaminación medioambiental (Alfranca, 2009); dado que cualquier regulación medioambiental en esta dirección supone un coste inicial que debe de ser asumido por la sociedad en su conjunto (Agostini y Padilla, 2010).

Algunos autores señalan que el ciclo económico se encuentra íntimamente ligado a la promoción de energías renovables, y que las actuaciones medioambientales en un escenario de elevado crecimiento económico pueden resultar

---

<sup>6</sup> Cuando se acometen actividades de innovación orientadas a la corrección medioambiental, el desarrollo de tecnologías limpias favorece la reducción en los niveles de polución medioambiental (Aghion y Howitt, 1992).

insuficientes siempre y cuando no existan las contribuciones de I+D+i a tales medidas (Sevilla, *et al.*, 2013). Dicho de otro modo, en el corto plazo la promoción de energías renovables puede generar un impacto negativo sobre el coste final de la energía y, en consecuencia, sobre el sistema económico, al margen de su contribución positiva a la descarbonización (Del Río *et al.*, 2009), por lo que deben de ser las medidas de innovación energética las que soporten dicha situación en pro de un crecimiento económico sostenible. Aun así, los resultados esperados de la innovación en sus etapas más tempranas pueden resultar lentos y costosos para los sistemas económicos, sobre todo al considerar la incertidumbre que acarrea este proceso (Wang *et al.*, 2012a). Además, el progreso técnico, en sí, no es garante de la corrección medioambiental si no viene acompañado de un impulso del crecimiento económico relacionado con el mismo (Shen *et al.*, 2012; He y Zhang, 2012).

### 3. EL MARCO TEÓRICO DE LA CKA Y SU VINCULACIÓN CON EL PROGRESO TECNOLÓGICO

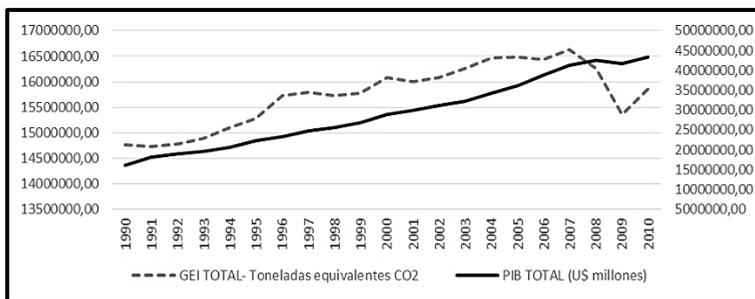
Al observar las circunstancias que inciden sobre la evolución de las emisiones de GEI, suele contarse con variables tan diversas como la población, el crecimiento económico, la estructura económica o la intensidad energética (Yong, *et al.*, 2000; Velthuisen y Worrel, 2002; Shi, 2003). Otra serie de aportaciones, como las realizadas por Cantos y Balsalobre (2011) o López Peña, *et al.* (2012), analizan cómo la modificación del patrón de consumo energético hacia las energías renovables ha influido sobre la reducción en el nivel de emisiones de GEI. Si observamos la evolución de estas emisiones en la OCDE, entre 1990 y 2010, se aprecia una evolución ascendente hasta el inicio de la última crisis económica y financiera internacional.

Tal y como se observa en la Figura 1, a partir de 2008 se produce cierta corrección en el nivel de emisiones GEI, como consecuencia de la generalización de la crisis. Este cambio de tendencia, interpretado a la luz de la hipótesis empírica de la curva de Kuznets Ambiental (CKA), nos permite intuir un importante influjo del crecimiento económico sobre el nivel de emisiones GEI.

De manera complementaria al efecto que el crecimiento económico ejerce sobre la corrección en el nivel de emisiones GEI (Groosman y Krueger, 1991), la innovación energética también contribuiría a la consecución de este objetivo medioambiental (Fisher-Vanden *et al.*, 2004). Este planteamiento viene siendo avalado por diferentes estudios o informes, como el realizado por Shafik y Bandyopadhyay (1992), donde se evidencia un impacto positivo de las tecnologías vinculadas a la calidad ambiental sobre el control en el nivel de emisiones GEI. A este respecto, Andreoni y Levinson (1998) respaldan este hecho dentro de un modelo CKA, afirmando que el crecimiento económico, por sí solo, resulta insuficiente para resolver los problemas de contaminación medioambien-

tal. Esta circunstancia es debida a que, ante la ausencia de regulaciones, la trayectoria ‘nivel de ingresos/contaminación medioambiental’, aun acoplándose a la hipótesis planteada por la CKA, puede llevar a que la reducción en el nivel de emisiones GEI se alcance para un nivel de ingresos excesivo e innecesariamente elevado. Por su parte, en Dinda (2000) se avala esta suposición, al obtener que el esfuerzo público en I+D+i energético repercute positivamente sobre la corrección medioambiental. Estudios más recientes confirman que tanto el progreso tecnológico como el crecimiento económico, van a influir positivamente sobre la calidad medioambiental dentro del esquema de la CKA (Dinda *et al.*, 2004; Cantos y Balsalobre, 2013; Yin *et al.*, 2015).

**Figura 1**  
Evolución Emisiones GEI y PIB en la OCDE



Notas: Eje principal (izda) GEI (Gases Efecto Invernadero); eje secundario (dcha.) PIB (Producto Interior Bruto).

Fuente: OCDE (2013).

Smulders y Bretschger (2000) construyen un modelo de crecimiento, dentro del esquema CKA, en el que apuntan a que la evolución de la relación crecimiento económico y calidad medioambiental se apoya en tres pilares básicos: el cambio técnico, los cambios sectoriales y los cambios en materia de regulación medioambiental. En este sentido la corrección medioambiental va a precisar de mejoras en materia de innovación energética que permitan reestructurar a las economías hacia sectores menos contaminantes.

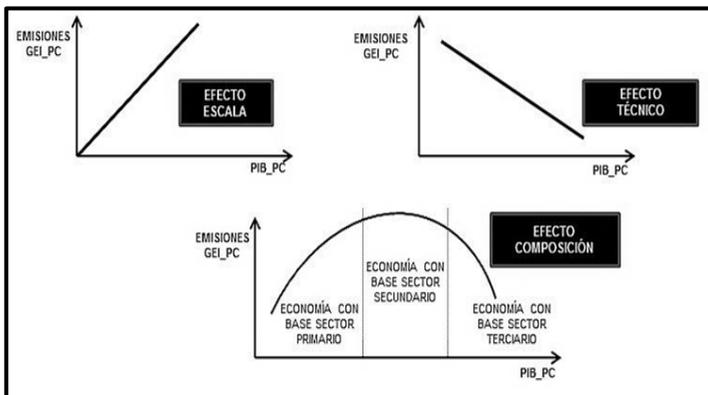
Expuestos los planteamientos teóricos que reconocen efectos positivos de la innovación energética y del tránsito hacia fuentes renovables sobre la corrección medioambiental, en este estudio partimos de la hipótesis de que el progreso técnico es una variable condicional en la configuración de la CKA (Wang y Zhang, 2012), donde la innovación energética y la promoción de las energías renovables complementarían al crecimiento económico en la consecución de una reducción en el nivel de emisiones GEI.

#### 4. MODELO EMPÍRICO DE LA CURVA DE KUZNETS AMBIENTAL

El modelo CKA parte de la existencia de una relación en forma de U-invertida entre la calidad medioambiental y el crecimiento económico (Groosman y Krueger, 1991; Panayotou, 1993; Shafik, 1994; Selden y Song, 1994). En un primer momento, conforme las economías experimentan unas tasas positivas de crecimiento económico, los niveles de contaminación medioambiental aumentan hasta alcanzar un determinado nivel de renta -punto de quiebra-; a partir de ese momento, las economías experimentan una corrección en los niveles de polución medioambiental. Algunos estudios señalan a que en etapas tempranas de crecimiento económico se produce un *efecto composición* (Jaffe *et al.*, 2003)<sup>7</sup>, que coincide con el momento en que las economías transitan desde un sistema de base industrial y elevados niveles de polución, hacia otro con predominio del sector servicios y con industrias menos contaminantes y energéticamente más eficientes (Lindmark, 2002; Munasinghe, 1999).

Si se acepta que una sociedad con un mayor nivel de renta demanda mejoras en el nivel de calidad medioambiental, entonces es probable que se exijan a los gobiernos disposiciones regulatorias encaminadas a la corrección medioambiental (Bruvoll *et al.*, 2003). De la aplicación de dichas medidas regulatorias surgirá un *efecto técnico* caracterizado por la obtención de recursos energéticos más eficientes (Turner y Hanley, 2011).

**Figura 2**  
Efectos Escala, Técnico y Composición



Fuente: Elaboración propia, a partir de Halkos (2011).

<sup>7</sup> El efecto composición refleja el tránsito de una buena parte de la actividad económica desde el sector industrial (con actividades intensivas en consumo de energía y emisiones tóxicas) hacia el sector servicios, lo que implica una reducción en el nivel de emisiones contaminantes (Rothman, 1998; Hettig *et al.*, 2000;).

Cuando se descompone el efecto total que surge de la relación crecimiento económico/calidad medioambiental (Figura 2), el *efecto técnico*<sup>8</sup> es considerado como el factor que mayor peso tiene en dicha relación (Andreoni y Levinson, 1998; Deacon y Norman, 2006; Markandya *et al.*, 2006), donde el desgaste u obsolescencia técnica conducirá a niveles de contaminación ascendentes una vez que el *efecto escala* sobrepase al *efecto composición* y al *técnico* (Johansson y Kristrom, 2007).

A partir del trabajo de Grossman y Krueger (1991), numerosos estudios han analizado la relación entre el crecimiento económico y la calidad medioambiental, arrojando diferentes patrones del comportamiento de la CKA. En el presente estudio se presta especial atención al patrón en forma de N -Figura 3, patrón 5- (Grossman y Krueger, 1995; Shafik y Bandyopadhyay, 1992; Selden y Song, 1994; Moomaw y Unruh, 1997; Panayotou, 1997)<sup>9</sup>. Este patrón de comportamiento de la CKA va a permitir, dentro del modelo de estudio que proponemos, extender conclusiones a largo plazo en materia de economías de escala y de obsolescencia tecnológica, al poder analizar el retorno hacia un nivel de emisiones ascendente una vez que las economías han conseguido obtener tasas de contaminación negativas. Al hacer referencia a la existencia de efectos a largo plazo, es preciso tener en cuenta que un continuado incremento en los niveles de renta llevará a las economías a un incremento de las emisiones, consecuencia de unas mejoras tecnológicas transitorias, que en largo plazo podrán agotarse o quedar obsoletas (Grossman and Krueger, 1995; Stagl, 1999 y De Bruyn *et al.*, 1998; De Bruyn *et al.*, 1998)<sup>10</sup>.

---

<sup>8</sup> Los procesos de innovación tecnológica inducidos por la regulación administrativa ofrecen una explicación adicional que reconoce que el cambio en el comportamiento de la relación 'nivel de ingresos/calidad medioambiental' se debe, en buena parte, a la mejora en los procesos de producción derivada del cambio tecnológico. Además, el progreso tecnológico puede incrementar la capacidad de sustitución de los recursos altamente contaminantes por otros más eficientes (Gradus y Smulders, 1993; Bergh y Nijkamp, 1994; Bovenberg y Smulders, 1995; Smulders y De Nooij, 2003).

<sup>9</sup> La CKA muestra un fenómeno recurrentemente observado, consistente en una asociación positiva entre el nivel de actividad económica y la contaminación, hasta un determinado nivel de renta crítico, a partir del cual un mayor nivel de renta se asocia a niveles de calidad ambiental progresivamente mayores, siguiendo de manera estandarizada un patrón en forma de U-invertida (Grossman y Krueger, 1991). Por otro lado numerosos estudios reconocen la existencia de un patrón en forma de N que considera que en una primera etapa, la degradación medioambiental aumenta con el crecimiento económico. En una segunda etapa, se sucesivos aumentos en el nivel de renta vendrán asociados con una mejora de la calidad medioambiental; y por último, en una tercera etapa, se producirán retornos hacia niveles de contaminantes ascendentes (Shafik y Bandyopadhyay, 1992; World Bank, 1992; Panayotou, 1993; Selden y Song, 1994; Grossman y Krueger, 1995; Moomaw y Unruh, 1997).

<sup>10</sup> De Bruyn *et al.* (1998) consideran que una vez que las mejoras en la eficiencia técnica para el uso de recursos o las posibilidades de reducción se hayan agotado, o resulten demasiado caras, mayores crecimientos en la renta tendrán como resultado una degradación medioambiental

Partiendo del esquema teórico expuesto en Grossman y Krueger, (1995), el modelo cúbico de la CKA que relaciona gráficamente la calidad medioambiental y el nivel de ingresos en forma de N (Figura 3, patrón 5), podría expresarse de este modo:

$$EP_{it} = \alpha_i + \beta_1 Ypc_{it} + \beta_2 Ypc_{it}^2 + \beta_3 Ypc_{it}^3 + \sum_{j=1}^k \delta_j Z_{jit} + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

Donde  $EP_{it}$  es la polución o contaminación medioambiental del país  $i$  en el año  $t$ ;  $Ypc$  es el nivel de renta per capita del país “ $i$ ” en el año “ $t$ ”;  $Z_{jit}$  determina las otras “ $j$ ” variables de influencia sobre la presión ambiental del país “ $i$ ” en el año “ $t$ ”. El coeficiente  $\alpha_i$  representa el promedio de polución medioambiental medio a lo largo del tiempo en el país “ $i$ ” para un valor cero de la renta y del resto de variables de la ecuación (1). Los coeficientes  $\beta$  y  $\delta$  representan la importancia relativa de las variables exógenas en el país “ $i$ ” en el año  $t$ , y la variable  $\varepsilon_{it}$  es el término de error, que se distribuye como una normal de media cero y varianza constante.

La Figura 3 recoge los diferentes patrones de comportamiento que puede adoptar la CKA en función del valor que adopten los coeficientes  $\beta$ , de la ecuación 1. En este trabajo prestamos especial atención al patrón en forma de N (Figura 3, patrón 5). De acuerdo con Torras y Boyce (1998), una vez que las economías han alcanzado su frontera tecnológica, retornan a una senda de contaminación ascendente debido a un *efecto escala* que logra superar a la acción conjunta del *efecto composición* y del *efecto técnico*.

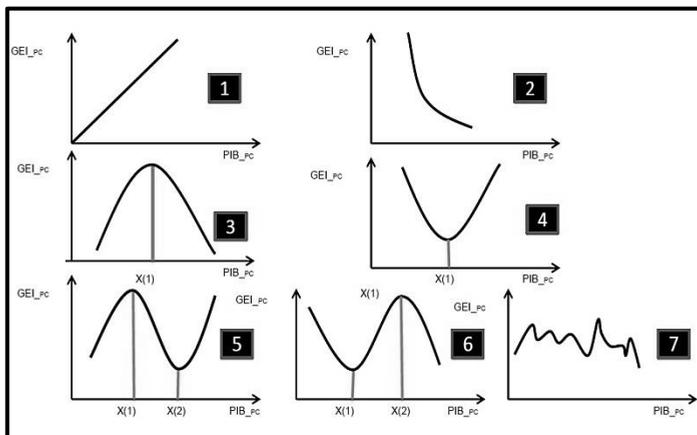
En este estudio incorporamos como variables exógenas la innovación energética (medida a través del gasto público en I+D+i energético), la sustitución en el patrón de consumo energético (consumo de energía renovable frente a consumo final de energía) y el efecto interacción entre el crecimiento económico y la sustitución energética, a fin de evidenciar cómo, junto con el crecimiento económico, el esfuerzo en innovación y la sustitución energética tienen un efecto positivo sobre la reducción de emisiones GEI per capita<sup>11</sup>.

---

neta. A este respecto, la curva en forma de N sugiere que los beneficios alcanzados, en cuanto a la disminución de emisiones de GEI, provocados a un mayor crecimiento económico y un aumento en la eficiencia tecnológica resultan ser transitorios (Torras y Boyce, 1998). Por este motivo, sin las regulaciones apropiadas las opciones de reducción de emisiones se agotarán, o bien sus costos tenderán a incrementarse, y en consecuencia no permitirían logran reducciones significativas en la degradación ambiental.

<sup>11</sup> Neumayer, (1998), Anderson y Cavendish (2001), Pizer y Popp (2008) y Cantos y Balsalobre (2013), encuentran evidencia sobre la existencia de una relación positiva entre el cambio tecnológico respecto de la descontaminación, concluyendo que el progreso técnico resulta clave en la reducción de emisiones GEI.

**Figura 3**  
Patrones de la Curva de Kuznets Ambiental



Patrones de comportamiento de la CKA a partir del signo que adopten los coeficientes  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  y  $\beta_3$  de la ecuación 1:

- (1) Si  $\beta_1 > 0$ ,  $\beta_2 = \beta_3 = 0$ , relación monótona creciente, en la que altos niveles de ingreso están asociados con altos niveles de emisiones.
- (2) Si  $\beta_1 < 0$ ,  $\beta_2 = \beta_3 = 0$ , relación monótona decreciente, en la que altos niveles de ingreso están asociados con niveles decrecientes de emisiones.
- (3) Si  $\beta_1 > 0$ ,  $\beta_2 < 0$ ,  $\beta_3 = 0$ , relación cuadrática en forma de U-invertida, representando la CKA e indicando que altos niveles de ingreso están asociados a niveles decrecientes de contaminación una vez que ha sido alcanzado cierto nivel de ingresos.
- (4) Si  $\beta_1 < 0$ ,  $\beta_2 > 0$ ,  $\beta_3 = 0$ , relación cuadrática en forma de U, inversa a la CKA.
- (5) Si  $\beta_1 > 0$ ,  $\beta_2 < 0$ ,  $\beta_3 > 0$ , polinomio cúbico, representando la forma de N, donde se cumple la hipótesis U-invertida de CKA hasta cierto nivel, a partir del cual la contaminación vuelve a aumentar.
- (6) Si  $\beta_1 < 0$ ,  $\beta_2 > 0$ ,  $\beta_3 < 0$ , polinomio cúbico, inverso a la forma de N.
- (7) Si  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$ , comportamiento plano, indicando que las emisiones no son influenciadas por el nivel de ingresos.

Fuente: Elaboración propia.

La ecuación propuesta para analizar la hipótesis planteada es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 GEIpc_{it} = & \alpha_i + \beta_1 PIBpc_{it} + \beta_2 PIBpc_{it}^2 + \beta_3 PIBpc_{it}^3 + \delta_1 RDETPc_{it-3} \\
 & + \delta_2 PRENEW_{it} + \delta_3 PIBpc_{it} * PRENEW_{it} \\
 & + \varepsilon_{it}
 \end{aligned} \quad (2)$$

Donde:

- $GEIpc_{it}$  = nivel de emisiones de gases efecto invernadero per capita, medido en kilogramos equivalentes de  $CO_2$ , en términos per capita para el país “i” y el año “t” (OCDE, 2013).
- $PIBpc_{it}$  = nivel de renta, en términos per capita, en millones de dólares corrientes en paridad de poder de compra (US\$ millions current PPPs), para el país “i” y el año “t”, y dividido por la población del país “i” en el pe-

riodo “ $t$ ”. En su expresión cúbica trata de verificar que la CKA presenta forma de N, para los países y periodo analizado (OCDE, 2013).

- $RDETPc_{it-3}$  = Gasto Público en I+D+i energético en términos per capita, medido en millones de dólares corrientes en paridad de poder de compra (US\$ millions current PPPs), para el país “ $i$ ” y el año “ $t-3$ ”, y dividido por la población del país “ $i$ ” en el periodo “ $t-3$ ” (OCDE, 2013). Esta variable presenta un retardo de tres periodos, justificado por el hecho de que las medidas adoptadas innovadoras de esta naturaleza requieren de un periodo de madurez y ensayo para ejercer su efecto sobre la corrección medioambiental.
- $PRENEW_{it}$  = Participación porcentual de las energías renovables al consumo de energía final del país “ $i$ ” durante el periodo “ $t$ ” (OECD, 2013).
- $PIBpc_{it} * PRENEW_{it}$  = Variable que hace referencia a la interacción entre las variables  $PIBpc_{it}$  y  $PRENEW_{it}$ . Esta variable mide el efecto supresión que el  $PIBpc_{it}$  provoca de manera causal entre la variable independiente o exógena  $PRENEW_{it}$  y la variable dependiente o endógena,  $GEIpc_{it}$ .

**Tabla 1**  
Estadísticos descriptivos

Estadístico	GEIpc	PIBpc	PRENEW	RDETPc
Media	12584,40	25524,23	11,63294	8997,974
Mediana	11439,70	24602,95	6,250000	7466,917
Maximo	26070,00	61344,83	54,30000	55772,89
Minimo	3393,129	5832,287	0,300000	0,000000
Desv.típica	5277,982	9420,860	11,36411	8573,069
Asimetría	0,967064	0,422402	1,382875	1,158672
Asim. Error típico	0,109	0,109	0,109	0,109
Curtosis	0,328	0,303	1,572	2,106
Curt. Error típico	0,217	0,217	0,217	0,217

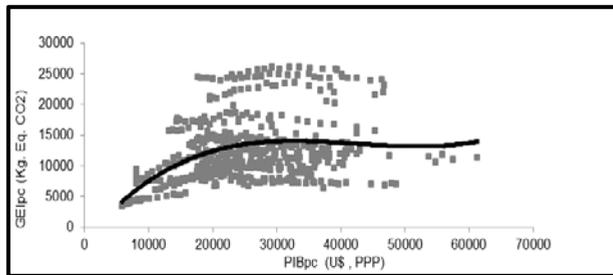
Fuente: OCDE (2013).

Tal y como puede verse en la Figura 4, la nube de puntos que describe la relación entre las emisiones  $GEIpc$  y el  $PIBpc$  arroja una línea de tendencia polinomial cúbica que nos hace sospechar de un comportamiento en forma de N de la relación entre el crecimiento económico y el nivel de emisiones  $GEIpc$ .

Para la estimación del modelo econométrico que se plantea en la ecuación (2), se ha optado por aplicar el método de estimación con datos de panel con efectos fijos, el cual resulta apropiado para la naturaleza de la variable dependiente, donde además se atenúan los problemas de heterogeneidad individual inobservable y los sesgos provocados por errores de especificación. Cabe destacar en dicha ecuación la inclusión de una variable de supresión

( $PIB_{pc_{it}} * PNEW_{it}$ ), la cual supone una contribución innovadora dentro de la metodología aplicada en el estudio de la CKA<sup>12</sup>.

**Figura 4**  
Relación entre el PIBpc y las emisiones GEIpc para los 24 países de la OCDE (1994-2010)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos OCDE (2013).

Una vez que se intuye la posible existencia de un efecto supresor en la relación causal establecida entre una variable independiente X (en este caso, la variable  $PNEW_{it}$ ) y la variable endógena Y (representada por  $GEI_{pc_{it}}$ ), se ha de mostrar el papel desempeñado por una tercera variable Z, llamada “supresora”, que en nuestro caso suponemos que es la variable  $PIB_{pc_{it}}$ .

La Figura 5 recoge el diagrama de ruta (Kenny, 1979) en el que se representan varios supuestos en los que se incorpora una tercera variable Z en la relación causal entre una variable explicativa X y la variable endógena Y.

El diagrama D de la Figura 5 representa el *efecto supresor* que se emplea para probar hipótesis causales (Wu y Zumbo, 2008:370). Para ello, se realiza una estimación del efecto de una variable Z de supresión sobre la relación  $X \rightarrow Y$ , que se traduce en una ecuación de regresión múltiple que se incluye junto con las variables X y Z, la interacción variable de  $X * Z$ .

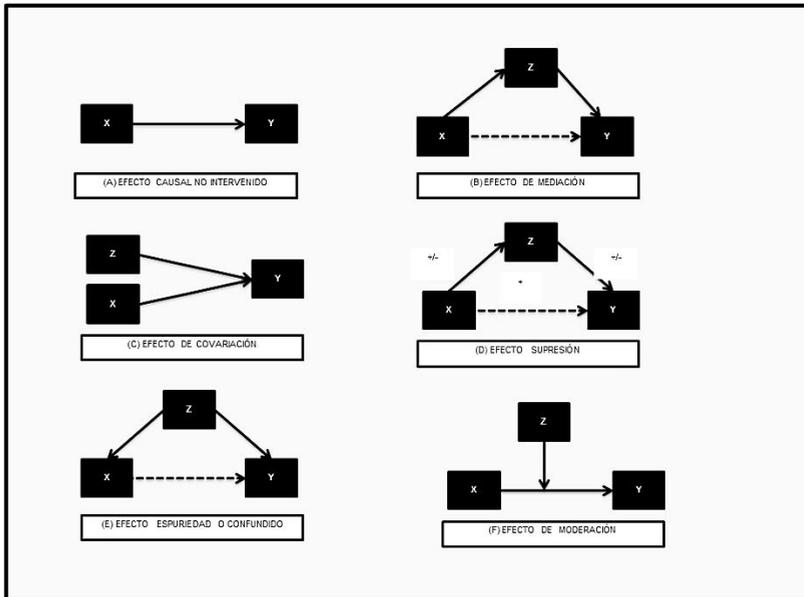
$$Y = a + bX + cZ + dXZ + \varepsilon \quad (3)$$

donde el término XZ es el producto de la multiplicación de la variable X y Z, el coeficiente “d” mide el *efecto supresor* y el coeficiente “b” captura el efecto de X cuando  $Z = 0$ . Una simple modificación en los términos de la ecuación (3) lleva al siguiente modelo

$$Y = (a + cZ) + (b + dZ)X + \varepsilon \quad (4)$$

<sup>12</sup> La hipótesis de supresión, cuyos efectos también son denominados efectos de interacción, pretende determinar bajo qué condiciones una relación se hace más fuerte, más débil, desaparece o cambia de sentido. La variable supresora puede ser cualitativa o cuantitativa, y afecta a la magnitud y/o el sentido de una relación entre una variable independiente (explicativa) y una variable dependiente (explicada) (Cohen, 2003).

**Figura 5**  
Diagrama de Ruta de las Relaciones que incorpora una Tercera Variable



Fuente: Kenny (1979).

Esta manera de presentar el análisis de regresión múltiple se llama regresión de moderación (Aguinis, 2004), ya que incluye el efecto supresor de Z. Si no hay anomalías, el rechazo de la hipótesis de que  $d = 0$  permite concluir que hay un efecto supresor de Z sobre la relación  $X \rightarrow Y$ .

En este sentido, una variable de supresión altera la magnitud y/o la dirección de la relación existente entre X e Y, invirtiendo el efecto causal entre X e Y, a la vez que recoge por lo general alguna característica conductual o contextual estable.

Para analizar el papel de supresor de la variable  $PIBpc_{it}$  sobre la variable  $PRENEW_{it}$ , vamos a estimar un modelo de regresión lineal en dos etapas, donde la variable dependiente es  $GEIpc_{it}$ . En una primera fase, incluimos sólo efectos directos del  $PIBpc_{it}$  en su versión cúbica (modelo 1), mientras que en una segunda fase incorporamos el resto de variables exógenas:  $RDETPc_{it-3}$ ,  $PRENEW_{it}$ , y el efecto supresor  $PIBpc_{it} * PRENEW_{it}$  (modelo 2):

Fase 1: Modelo 1

$$GEIpc_{it} = \alpha_i + \beta_1 PIBpc_{it} + \beta_2 PIBpc_{it}^2 + \beta_3 PIBpc_{it}^3 + \varepsilon_{it} \tag{5}$$

Fase 2: Modelo 2

$$\begin{aligned}
 GEIpc_{it} = & \alpha_i + \beta_1 PIBpc_{it} + \beta_2 PIBpc_{it}^2 + \beta_3 PIBpc_{it}^3 \\
 & + \delta_1 RDETPc_{it-3} + \delta_2 PRENEW_{it} + \delta_3 PIBpc_{it} \\
 & * PRENEW_{it} + \varepsilon_{it}
 \end{aligned} \quad (6)$$

## 5. ESTIMACIÓN Y RESULTADOS DEL MODELO

Para la estimación del modelo 1 (ecuación 5) se han utilizado datos de panel para una muestra de 24 países de la OCDE entre los años 1994-2010, donde solo se incluyen las variables:  $PIBpc_{it}$ ,  $PIBpc_{it}^2$  y  $PIBpc_{it}^3$  a fin de verificar que se cumple el patrón en forma de N para la CKA (Figura 3, patrón 5). En una segunda fase se ha estimado el modelo 2 (ecuación 2), incorporando junto a la versión cúbica del  $PIBpc_{it}$  el resto de variables exógenas:  $RDETPc_{it-3}$ ,  $PRENEW_{it}$  y  $PIBpc_{it} * PRENEW_{it}$ .

La ecuación ha sido estimada por Mínimos Cuadrados Ponderados (MCP), corrigiendo la autocorrelación de tipo AR(1), al ser  $\varepsilon_{it} = \phi\varepsilon_{it-1} + u_{it}$ , donde  $\phi$  es el coeficiente estimado que aparece en la Tabla 2. Los coeficientes  $\beta_1 > 0$ ,  $\beta_2 < 0$ ,  $\beta_3 > 0$  de los modelos 1 y 2, permiten verificar que el modelo CKA analizado responde de forma significativa a un patrón de comportamiento en forma de N (Figura 3, patrón 5). Por su parte, el modelo 2 presenta una mejor bondad en el ajuste (R-cuadrado corregido)<sup>13</sup>, lo que revela que las variables explicativas asociadas a la sustitución e innovación energética mejoran el modelo básico (ecuación 5).

Tal como se ha expuesto previamente, con un patrón de comportamiento de la CKA en forma de N, en una primera etapa de crecimiento económico va a existir un incremento en el nivel de emisiones GEIpc hasta que las economías alcancen un determinado nivel de renta, a partir del cual el nivel de emisiones comenzará a remitir. Posteriormente, conforme las economías siguen creciendo, y se alcanzarán niveles de renta superiores (segundo punto de quiebra), dichas economías volverán a una senda de emisiones GEIpc ascendentes.

En relación con la estimación del modelo 2 (ecuación 2), junto a la verificación del patrón en forma de N ( $\beta_1 > 0$ ,  $\beta_2 < 0$ ,  $\beta_3 > 0$ ), los coeficientes  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  y  $\delta_3$  informan de la relación que las variables  $RDETPc_{it-3}$ ,  $PRENEW_{it}$  y  $PIBpc_{it} * PRENEW_{it}$  tienen con la variable  $GEIpc_{it}$ .

Respecto al papel que la innovación energética ejerce sobre el nivel de emisiones GEIpc, el coeficiente  $\delta_1 < 0$ , del modelo 2 (ecuación 2), indica que el gasto público en I+D+i energético ( $RDETPc_{it-3}$ ) tiene un efecto positivo sobre la corrección medioambiental, induciendo a una reducción de emisiones GEIpc.

<sup>13</sup> Atendiendo a la bondad de los modelos, se observa que el modelo 2 (0.996248) tiene un mejor R-cuadrado corregido que el modelo 1 (0.992291).

En otros términos, este resultado arroja evidencia sobre la existencia de una relación directa entre la corrección de la polución medioambiental y la innovación energética.

Por su parte, el patrón de sustitución energética ( $PRENEW_{it}$ ) asociado al consumo de origen renovable respecto del consumo de energía final, presenta un coeficiente  $\delta_2 < 0$ , lo que indica una relación positiva entre la sustitución energética por fuentes renovables y la reducción en el nivel de emisiones  $GEI_{pc}$ .

**Tabla 2**  
Estimación Modelo 1 y Modelo 2

Variable dependiente: $GEI_{pc}$			
Método: Mínimos cuadrados Panel			
Sample (adjusted): 1994 2010 Periods included: 17			
Corte transversales incluidos: 24. Total panel (balanced) observations: 408			
Estimación lineal con matriz ponderada.			
Mínimos Cuadrados Ponderados (MCP) (de corte transversal)			
Modelo 1		Modelo 2	
Variable	Coefficientes	Variable	Coefficientes
C	9593.311 (6,472332)	C	13269,62 (19,24703)
PIB <sub>PC</sub>	0,375359*** (3,001553)	PIB <sub>PC</sub>	0,153926*** (2,684257)
PIB <sub>PC</sub> <sup>2</sup>	-1,25E-05*** (-3,623361)	PIB <sub>PC</sub> <sup>2</sup>	-5,54E-06*** (-2,997917)
PIB <sub>PC</sub> <sup>3</sup>	1,13E-10*** (3,6766451)	PIB <sub>PC</sub> <sup>3</sup>	4,33E-11* (1,863179)
		RDETPC(-3)	-0,009571** (-1,983327)
		PRENEW	-186,0425*** (-11,29969)
		PRENEW*PIBPC	0,002299*** (2,851211)
AR(1)	0,742925*** (21,25279)	AR(1)	0,782116*** (34,49777)
R <sup>2</sup> ajustado	0,992291	R <sup>2</sup> ajustado	0,996248
Test de Jaccard para variable supresora (Dampening variables)			
Test Jaccard <i>et al.</i> (1990) <sup>14</sup>	Statistic	Prob.	
F(3, 400)	142,848921	0.0000	

Nota: Nivel de significación \*\*\* 0,99; \*\* 0,95; \* 0,90; el valor entre paréntesis de refiere al estadístico t-Student.

Fuente: Elaboración propia.

<sup>14</sup> Según Jaccard *et al.* (1990), para corroborar si la interacción PIB<sub>pcit</sub> \* PRENEW<sub>it</sub> aumenta el poder explicativo de un modelo que sólo incorpora los efectos directos, es necesario estimar si su poder se incrementa con la siguiente prueba

$$F: F(k_2 - k_1, N - k_2 - 1) = \frac{(R_2^2 - R_1^2) / (k_2 - k_1)}{(1 - R_2^2) / (N - k_2 - 1)}$$

donde  $R_2^2$  es el coeficiente de determinación del modelo que incluye el efecto amortiguador con  $k_2$  variables, y  $R_1^2$  es el coeficiente de determinación del modelo que sólo incluye efectos directos con  $k_1$  variables.

Por último el coeficiente  $\delta_3 > 0$ , asociado al efecto supresión ( $\text{PRENEW}_{it} * \text{PIBpc}_{it}$ ), nos sugiere que cuando las economías presentan tasas positivas en el crecimiento económico se produce cierta supresión o reducción en el efecto que las energías renovables tienen sobre el nivel de emisiones. La explicación, a esta situación, reside en el hecho de que el crecimiento económico requiere de mayores consumos energéticos que suprimen parte del efecto positivo que ejercen las fuentes renovables sobre el nivel de emisiones GEIpc, debido a que unas mayores necesidades energéticas impone recurrir en mayor medida a fuentes de origen fósil, que son más contaminantes. Una solución adecuada a este problema pasa por que los sistemas económicos adopten un mix energético donde la participación de las fuentes de origen renovable sea cada vez mayor.

Un paso adicional en el análisis de resultados consiste en comparar los modelo 1 y 2 a partir del cálculo de sus puntos de quiebra (turning points)<sup>15</sup>, obtenidos del valor de los coeficientes  $\beta_1 > 0$ ,  $\beta_2 < 0$ ,  $\beta_3 > 0$ . Estos puntos de quiebra permiten analizar el efecto que la incorporación de medidas de innovación energética y de sustitución de fuentes, tienen sobre la corrección medioambiental.

**Tabla 3**  
Estimación de los Turning Points de los Modelo 1 y Modelo 2

<b>Modelo 1</b>	X1= US\$20.986,8109	X2= US\$ 52.759,5018
<b>Modelo 2</b>	X3= US\$ 19.772,51	X4= US\$ 65.523,87

Fuente: Elaboración propia.

Los puntos de quiebra de ambos modelos (Tabla 3) indica cuáles son los requerimientos de renta necesarios para que se produzca un cambio en la relación crecimiento económico/nivel de emisiones. Tal y como hemos señalado, los modelos 1 y 2 responden a un patrón de comportamiento de la CKA en forma

<sup>15</sup> La estimación de los puntos de quiebra (turning points) para el modelo cúbico se ha realizado utilizando la siguiente expresión (Diao *et al.*, 2008):

$$X_j = \frac{-\beta_2 \pm \sqrt{\beta_2^2 - 3\beta_1\beta_3}}{3\beta_3}, \forall j = 1, 2;$$

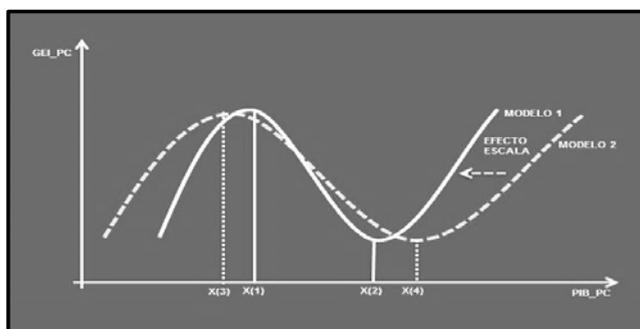
donde el  $X_1$  representa el primer punto de quiebra y  $X_2$  el segundo. A partir de éste último, el crecimiento económico volvería a producir un incremento de la degradación medioambiental.

Para las estimación de los puntos de quiebra del modelo 2 ha sido necesario realizar una modificación en el coeficiente  $\beta_1$ , ya que los puntos de quiebra en los que la función alcanza el máximo y mínimo depende también del valor de PRENEW, ya que al entrar multiplicando con el PIBpc en el modelo, esto afectará al coeficiente del primer grado. Por lo tanto, el coeficiente  $\beta_1^* = (\beta_1 + \delta_3 * \text{PRENEW})$ , coge como valor de PRENEW su mediana (6,25), justificado por la distribución asimétrica de dicha variable. Por lo tanto, los puntos de quiebra del modelo va a haber que estimarlos a partir de un coeficiente  $\beta_1^* = (0,153926 + 0,002299 * 6,25) = 0,16829475$ .

de  $N$  que evidencia a largo plazo una relación positiva entre el crecimiento económico y el nivel de emisiones  $GEI_{pc}$ . En un primer tramo, el nivel de emisiones  $GEI_{pc}$  aumenta hasta alcanzar un determinado nivel de renta -punto de quiebra 1- ( $X_1 = US\$20.986,8109$  para el modelo 1 y  $X_3 = US\$19.772,51$  para el modelo 2). En un segundo tramo, partiendo del punto anterior se inicia la reducción en el nivel de emisiones, cuya relación inversa entre crecimiento económico y nivel de emisiones se va a mantener hasta que las economías alcancen un nuevo punto de quiebra 2 ( $X_2 = US\$ 52.759,5018$ , para el modelo 1, y  $X_4 = US\$ 65.523,87$ , para el modelo 2) en el que las economías van a volver a retomar un nivel de emisiones  $GEI_{pc}$  ascendente (Figura 6).

**Figura 6**

Modelo Cúbico CKA en forma de  $N$ , a partir de los resultados de la estimación de los Modelos 1 Y 2



*Modelo 1:*  $GEI_{PCt} = 9593,311 + 0,3753598 * PIB_{PCt-1} - 2,25E-05 * PIB_{PCt-2} + 1,13E-10 * PIB_{PCt-3}$  [AR(1) = 0,742925].

$X_1 = US\$ 20.986,8109$  ;  $X_2 = US\$ 52.759,5018$

*Modelo 2:*  $GEI_{PCt} = 13.269,62 + (0,153926 + 0,002299 * 6,25) * PIB_{PCt-5} - 5,54E-06 * PIB_{PCt-2} + 4,33E-11 * PIB_{PCt-3} - 0,009571 * RDETPC_{t-3} - 186,0425 * PRENEW_{it} + 0,002299 * PRENEW_{it} * PIB_{PC}$  [AR(1) = 0,782116].

$X_3 = US\$ 19.772,51$  ;  $X_4 = US\$ 65.523,87$

*Fuente:* Elaboración propia.

En la Figura 6 se puede observar que, en un primer tramo de la curva, el modelo 1 alcanza el punto de quiebra para unos requerimientos de renta superiores que el modelo 2 ( $X_1 > X_3$ ), debido al hecho de que las medidas de I+D+i energética y de sustitución de fuentes reducen los requerimientos de renta necesarios para alcanzar la corrección medioambiental. Por otro lado, el modelo 1 alcanza el segundo punto de quiebra en  $X_2 = US\$52.759,5018$ , mientras que el modelo 2 lo hace para unos requerimientos de renta superiores,  $X_4 = US\$65.523,87$ . Al analizar este segundo punto de quiebra, en el que se retoman los incrementos en el nivel de emisiones con tasas positivas de crecimiento económico, resulta que cuando se incorporan medidas correctoras de innovación y de sustitución energética se produce un alejamiento -mayores requerimientos de renta- en el re-

torno a un tramo de contaminación ascendente ( $X_4 > X_2$ ). Esta situación viene a evidenciar la existencia de un *efecto técnico* que habría superado al *efecto escala*, retrasando la frontera u obsolescencia tecnológica, en los términos descritos por Torras y Boyce (1998).

El modelo desarrollado en el presente estudio pone de manifiesto que tanto la adopción de medidas en materia de innovación, como de sustitución energética favorecen, por un lado, que las economías alcancen con menores requerimientos de renta el primer tramo de reducción en el nivel de emisiones y, por otro lado, que como consecuencia de una corrección de la obsolescencia técnica, a partir de procesos de innovación, se retrase el retorno a un nivel de emisiones ascendente, todo ello dentro del patrón de comportamiento en forma de N de la CKA.

**Tabla 4**  
Clasificación de países, a partir de los puntos de quiebra del modelo 2

Etapa 1 US\$19.772,51	Etapa 2 Entre US\$19.772,51 y US\$ 65.523,87	Etapa 3 Más de US\$65.523,87
Relacion nivel de renta/ emisiones ascendente	Relacion nivel de renta/ emisiones descendente	Relacion nivel de renta/ emisiones ascendente
Turkey (US\$15.775,42)	Hungary (US\$20.625,12)	
	Portugal (US\$25.621,68)	
	Greece (US\$27.539,14)	
	Korea (US\$28.828,80)	
	New Zealand (US\$29.316,82)	
	Spain (US\$ 31.573,45)	
	Italy (US\$32.340,58)	
	Japan (US\$34.088,02)	
	France (US\$35.413,59)	
	United Kingdom (US\$35.827,11)	
	Finland (US\$36.032,09)	
	Germany (US\$37.680,13)	
	Belgium (US\$37.834,02)	
	Canada (US\$39.050,29)	
	Sweden (US\$39.247,01)	
	Austria (US\$40.410,97)	
	Denmark (US\$40.616,16)	
	Ireland (US\$41.038,30)	
	Australia (US\$41.068,27)	
	Netherlands (US\$41.673,19)	
	United States (US\$46.614,91)	
	Switzerland (US\$48.700,59)	
	Norway (US\$57.454,48)	

*Nota:* Se ha realizado una agrupación por países en función de la etapa de la CKA en que se encuentran, a partir de los puntos de quiebra calculados en el modelo 2.

*Fuente:* Elaboración propia, a partir OCDE (2013).

Por último, si agrupamos a los países en relación a la etapa de la relación crecimiento económico/ nivel de emisiones en el que se encuentran (Tabla 4), se observa que prácticamente la totalidad de los países, salvo Turquía, se encuentran en la segunda etapa de la relación crecimiento económico/ nivel de emisiones, lo que indica que todos ellos se encontrarían en un tramo de contaminación descendente.

Por otro lado, los países que aún no han alcanzado el nivel de renta necesario para que aparezca una reducción en los niveles de contaminación ( $X_3 = \text{US\$}19.772,51$ ), deberían centrar sus esfuerzos en una reestructuración hacia sectores menos contaminantes (Shafic y Bandyopadhyay, 1992; Hettige *et al.*, 2000). Adicionalmente el efecto supresión sugiere que las economías deben transitar hacia un modelo energético predominado por las energías no emisoras de gases efecto invernadero, a fin de que mayores requerimientos energéticos, afines con el crecimiento económico, no conlleven acarreada una mayor demanda energética contaminante, al ser haberse producido una conversión hacia un modelo energético con escasa participación en el mix energético de fuentes energéticas de origen fósil.

## 6. CONCLUSIONES

En principal objetivo de este trabajo ha sido tratar de verificar empíricamente que los esfuerzos en innovación energética y sustitución hacia fuentes renovables, tienen, junto con el crecimiento económico, un efecto positivo sobre la corrección en el nivel de emisiones GEIpc; utilizando como herramienta de análisis la hipótesis empírica de la CKA, la cual ha sido ampliamente utilizada en la literatura económica para el estudio de la relación crecimiento económico y degradación medioambiental.

El modelo utilizado parte de la premisa de que la corrección medioambiental surge en función, no solo del crecimiento económico, sino de la aplicación de políticas activas que fomentan la innovación tecnológica en materia energética y que promueven la sustitución hacia fuentes energéticas renovables. Los resultados obtenidos avalan la hipótesis de partida, de modo que tanto la sustitución energética hacia las fuentes renovables, como la innovación energética, contribuyen positivamente a la reducción en el nivel de emisiones de gases efecto invernadero.

Asimismo, la incorporación de un efecto supresor, entre la variable nivel de renta y la variable “patrón de consumos energéticos” respecto de la variable “emisiones contaminantes”, resulta interesante, ya que nos permite interpretar que ante una situación de expansión del crecimiento económico, las economías siguen recurriendo a las energías convencionales -contaminantes-, donde el efecto positivo de las fuentes renovables sobre la corrección medioambiental se ve disminuido en etapas de elevados requerimientos de energía. Dicho de otro

modo, este efecto supresor hace que el peso de las energías renovables en el mix energético se vea rebajado cuando se produce un mayor requerimiento energético, como consecuencia incrementos en la demanda energética, característica del propio proceso de crecimiento económico. De los resultados obtenidos se puede apuntar, a modo de recomendación en materia de política energética, la necesidad combinar el tránsito hacia fuentes energéticas renovables, con el incremento de los esfuerzo en innovación energética, capaces de reducir la intensidad energética sobre el consumo energético final.

Finalmente, nuestro estudio encuentra evidencia sobre el hecho de que los procesos de innovación y de sustitución energética contribuyen positivamente a la reducción en el nivel de emisiones de gases efecto invernadero en los países de la OCDE, esto refuerza la hipótesis de que el *efecto técnico* es capaz de contrarrestar el impacto negativo del crecimiento económico puede ejercer sobre la contaminación, cuando las economías se encuentran próximas a recuperan un tramo de contaminación ascendente, consecuencia de la obsolescencia técnica. Ante el hecho de que las economías se encuentran limitadas por la existencia de barreras tecnológicas, la intervención por parte de las administraciones en materia de I+D+i energético puede provocar estímulos que provoquen mejoras en la corrección medioambiental. A este respecto, el presente estudio abre el debate respecto de la propia eficiencia de las medidas públicas adoptadas, siendo necesarios nuevos estudios sobre su eficiencia económica y sobre la distribución de los costes de estas políticas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- AGHION, P. y HOWITT, P. (1992). "A Model of Growth Trough Creative Destruction". *Econometrica*, n. 60(2), pp. 323-351.
- AGUINIS, H. (2004): *Regression Analysis for Categorical Moderators*. Guilford Press: New York.
- AGOSTINI, L.; y PADILLA, J. (2010). "La promoción de las energías renovables: La experiencia española". En MOSELLE B.; PADILLA, J.; y SCHMALENSSEE, R. (ed.): *Electricidad Verde: Energías Renovables y Sistema Eléctrico* (pp. 517-541). Madrid: Marcial Pons.
- ALFRANCA, O. (2009). "Regulación ambiental e innovación". *Clim .economía: Revista económica de Castilla-La Mancha*, n. 15, pp. 9-31.
- ANDERSON, D., y CAVENDISH, W., (2001). "Dynamic simulation and environmental policy analysis: beyond comparative statistics and the environmental Kuznets curve". *Oxford Economic Papers* n. 53(4), pp. 721-746.
- ANDREONI, J. y LEVINSON, A. (1998). "The Simple Analytics of the Environmental Kuznets Curve". *NBER Working Papers*, n. 6739.
- BALSALOBRE, D. ÁLVAREZ-HERRANZ, A. CANTOS, J.M. (2015). "Public Budget for

- Energy RD&D and the effects on energy intensity and pollution levels". *Environmental Science and Pollution Research*, n. 22, pp. 4881-4892.
- BERGH, J.C.J.M. VAN DEN y P. NIJKAMP, (1994). "An Integrated Model for Economic Development and Natural Environment: An Application to the Greek Sporades Islands". *The Annals of Operations Research*, Vol. 54: 143-174.
- BOVENBERG, A.I., y SMULDERS, S. (1995). "Environmental quality and pollution-augmenting technological change in a two-sector endogenous growth model". *Journal of Public Economics*, n. 57, pp. 369-391.
- BRUVOLL A., FAEHN, T. y STROM, B. (2003). "Quantifying central hypotheses on Environmental Kuznets Curves for a rich economy". *Scottish Journal of Political Economy*, n. 50, pp.149-173.
- CÁMARA, A.; FLORES, M. FUENTES, P. (2013). "Análisis de las emisiones asociadas al sector energético en España". *Estudios de Economía Aplicada*, vol. 31 (1) pp. 151-170.
- CANTOS, J.M.; y BALSALOBRE, D. (2011). "Las energías renovables en la Curva de Kuznets Ambiental: Una aplicación para España". *Estudios de Economía Aplicada*, vol. 29 (2), pp. 32.
- CANTOS, J.M., BALSALOBRE, D. (2013). "Incidencia del gasto público en I+D+i energético sobre la corrección medioambiental en España". *Estudios de Economía Aplicada*, vol. 31(1), pp. 93-126.
- CARRIÓN-FLORES, C. y INNES, R. (2010). "Environmental innovation and environmental performance". *Journal of Environmental Economics and Management*, n. 59(1), pp.27-42.
- COHEN, J. (2003). *Applied Multiple Regression-Correlation Analysis for Behavioral Sciences*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.
- COMISIÓN EUROPEA (2001). Directrices comunitarias sobre ayudas estatales en favor del medio ambiente (2001/C 37/03), (DOCE C de 3.2. 2001).
- COMISIÓN EUROPEA (2008). Directrices comunitarias sobre ayudas estatales en favor del medio ambiente (2008/C 82/01), (DOUE C de 1.4.2008).
- DE BRUYN, S.M., J.C.J.M. BERGH Y J.B. OPSCHOOR (1998). "Economic growth and emissions: reconsidering the empirical basis of environmental Kuznets curve". *Ecological Economics*, n. 25, pp. 161-175.
- DE BRUYN, S.M. (1999). "Economic growth and the environment: an empirical analysis". Timbergen Institute, *Timbergen Institute Research Series*, book n. 216, Amsterdam, cap. 5-7.
- DE BRUYN, S.M., VAN DEN BERGH, J.C.J.M. y OPSCHOOR, J.B. (1998). "Economic Growth and Emissions. Reconsidering the Empirical Basis of Environmental Kuznets Curves". *Ecological Economics*, n. 25, pp. 161-175.
- DE CASTRO, L.M. (2009). "Crecimiento Económico y Medioambiente". *Economía y Medio Ambiente*, n. 847, pp. 93-110.
- DEACON, R.T. y NORMAN, C.S. (2006). "Does the environmental Kuznets curve describe how individual countries behave?". *Land Economics*, n. 82, pp. 291-315.
- DEL RÍO, P.; LABANDEIRA, X.; y LINARES, P. (2009). "La interacción del sistema europeo de comercio de emisiones con otros instrumentos de política". *Papeles de Economía Española*, n. 121, pp. 211-223.
- DIAO, X., ZENG, S., TAM, C. y TAM, V (2008). "EKC analysis for studying economic growth and environmental quality: a case study in China". *Journal of Cleaner Produc-*

- tion, n. 17(5), pp. 541-548.
- DINDA, S. (2004). "Environmental Kuznets Curve Hypothesis: a survey". *Ecological Economics*, n. 49, v. 4, pp. 431-455.
- DOOLEY, J.J., (1998). "Unintended consequences: energy R&D in aderegulated market". *Energy Policy*, n.26(7), pp.547-555.
- ESTEBAN, L.; FEIJOO, M.; HERNÁNDEZ, J. M. (2003). "Eficiencia energética y regulación de la industria española ante el cambio climático". *Estudios de Economía Aplicada*, vol. 21(2), pp. 259-282.
- EUROPEAN COMMISSION (2007). *Directive 2003/87/EC*.
- EUROSTAT (2012). Eurostat database. [www.epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/.../search\\_database](http://www.epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/.../search_database).
- FISHER-VANDEN, K, JEFFERSON, G, LIU, H y TAO, Q. (2004). "What is driving China's decline in energy intensity?". *Resource and Energy Economics*, n. 26, pp. 77-97.
- FISHER-VANDEN, K. y MUN S. HOB (2010). Technology, development, and the environment". *Journal of Environmental Economics and Management*, Volume 59, Issue 1, January 2010, pp. 94-108.
- GRADUS, R.; y SMULDERS, S. (1993). "The trade-off between environmental care and long term growth pollution in three prototype growth models". *Journal of Economics*, n. 58, pp. 25-51.
- GRILICHES, Z. (1992). "The Search for R&D Spillovers". *Scandinavian Journal of Economics*, n. 94 (Supplement), pp. 29-47.
- GROSSMAN, G.; y KRUEGER, E. (1995). "Economic growth and the environment". *Quarterly Journal of Economics*, v. 110, n. 2, pp. 353-377.
- GROSSMAN, G.; y KRUEGER, E. (1991). "Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement". *NBER Working Paper*, n. 3914.
- HALKOS, G. (2011). "Environment and economic development: determinants of an EKC hypothesis". *Journal of Applied Economic Sciences (JAES)* n. 2(16)/2011, pp. 148-159.
- HE, XIAOGANG, ZHANG, YAOHUI, (2012). The influence factors of carbon emissions of Chinese industry and the reorganization effects of CKC-an empirical research on the dynamic panel data of different industries based on the STIRPAT model. *China Ind. Econ.* 1, 26-35 (in Chinese).
- HETTIGE, H.; MANI, M. y WHEELER, D. (2000). "Industrial Pollution in Economic Development: Kuznets Revisited". En *Banco Mundial, Grupo de investigaciones sobre el desarrollo, Documento de trabajo*, n. 1876.
- HEYES, A., y KAPUR, S. (2011). "Regulatory Attitudes and Innovation in a Model Combining Internal and External R&D". *Journal of Environmental Economics & Management*, n. 61(3). pp. 327-340.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report especial del Grupo Intergubernamental de Cambio Climático*, Ginebra.
- IPCC (2011). *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Informe especial del Grupo Intergubernamental de Cambio Climático*, Ginebra.
- JACCARD, J., TURRISI, R. & WAN, C.K. (1990). "Interaction Effects in Multiple Regressions". *University Paper Series on Quantitative Applications in the Social Sciences*,

- n. 72. Newbury Park, Sage Publications.
- JAFFE, A., NEWELL, y STAVINS, R. (2003). "Technological change and the environment". *Handbook of Environmental Economics*. North-Holland.
- JOHANSSON, P. y KRISTROM, B. (2007). "On a Clear Day you Might see an Environmental Kuznets Curve". *Environmental and Resource Economics*, n. 37, pp. 77.
- JONES, C. (2010). "Políticas de la UE para el desarrollo de las energías renovables". pp. 391-424. En Moselle, B. y otros (2010): *Electricidad Verde. Energías renovables y sistema eléctrico*. Madrid: Marcial Pons.
- KENNY, D. (1979). *Correlation and causality*. New York: Wiley.
- KEMFERT, C., DIEKMANN, J (2009). "Emissions Trading and Promotion of Renewable Energy-We Need Both". *German Institute for Economic Research*, Weekly Report n.14/2009 (5).
- KWANG, I.H., CHIHIRO, W., (2002). "Dynamic process of technology spillover: a transfer function approach". *Technovation* n.22, pp. 437-444.
- LINDMARK M. (2002). "An EKC-pattern in historical perspective: carbon dioxide emissions, technology, fuel prices and growth in Sweden 1870-1997". *Ecological Economics*, n. 42, pp. 333-347.
- LÓPEZ-PEÑA, PÉREZ-ARRIAGA. I.J. y LINARES, P. (2012). "Renewables vs. energy efficiency: the cost of carbon emissions reduction in Spain". *Energy Policy*. November 2012, vol. 50, pp. 659-668.
- MARKANDYA, A., GOLUB, A. y PEDROSA- GALLINATO, A. (2006). "Empirical analysis of national income and SO2 emissions in selected European countries". *Environmental and Resource Economics*, n. 35, pp. 221-257.
- MEADOWS, D.L., MEADOWS, D.H., RANDERS, J. y BEHRENS, W., (1972). *The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Man*. New York: Universe Books.
- MENDILUCE, M., PÉREZ-ARRIAGA, I. y OCAÑA, C. (2010). "Comparison of the evolution of energy intensity in Spain and in the EU15. Why is Spain different?". *Energy Policy*, n. 38, pp. 639-645.
- MOOMAW, W. y UNRUH, G. (1997). "Are environmental Kuznets curves misleading us? The case of CO2 emissions". *Environment and Development Economics*, vol. 2, pp. 451-463.
- MUNASINGHE, M. (1999). "Is Environmental Degradation an Inevitable Consequence of Economic Growth: Tunneling Through the Environmental Kuznets Curve". *Ecological Economics* n. 29(1), pp. 89-109.
- NEUMAYER, E. (1998). "Is Economic Growth the Environment's Best Friend?". *Zeitschrift für Umweltpolitik und Umweltrecht*, n.21 (2), pp.161-176.
- NEWELL, R.G. (2010). "The role of markets and policies in delivering innovation for climate change mitigation". *Oxford Review of Economic Policy* n. 26, pp. 253-269.
- NEWELL, R.G., FISCHER, C. (2008). "Environmental and technology policies for climate mitigation". *Journal of Environmental Economics and Management*, n. 55, pp. 142-162.
- OECD (2013). *IEA Energy Technology RD&D Statics*, <http://www.oecd.org/statics>.
- ORDOÑEZ, S. (2009). "Después de Hubbert. Los Combustibles Fósiles". *Boletín de la Real Sociedad Geográfica*, vol. CXLV, pp. 9-48.
- PANAYOTOU, T. (1993). "Empirical test and policy analysis of environmental degrada-

- tion at different stages of economic development". *Working Paper*, n. 238, Technology and Environment Programme, International Labour Office, Geneva.
- PIZER, W. A., y POPP, D. (2008). "Endogenizing technological change: Matching empirical evidence to modeling needs". *Energy Economics*, n. 30, pp. 2754-2770.
- ROMER, P.M. (1990). "Are Non convexities Important for Understanding Growth?". *AEA Papers and Proceedings*, v. 80, n. 2, pp. 97-103.
- ROTHMAN, D.S. (1998). "Environmental Kuznets curves-real progress or passing the buck? A case for consumption-based approaches". *Ecological Economics* n. 25, pp. 177-194.
- RUIZ, M.J. (2010). "Análisis del impacto dela I+D pública sobre la intensidad energética en la UE-15". *Cim. Economía*, n. 16, pp. 381-399.
- SELDEN, T.; y SONG, D. (1994). "Environmental Quality and Development: Is There a Kuznets Curve for Air Pollution Emissions?". *Journal of Environmental Economics and Management*, n. 27, v. 2, pp. 147-162.
- SEVILLA JIMÉNEZ, M.; EMILIO GOLF LAVILLE, E. y DRIH; O.M. (2013). "Las energías renovables en España". *Estudios de Economía Aplicada*, n. 31(1), pp. 35-58.
- SHEN, MENG, LI, KAIJIE, QU, RUXIAO, 2012. Technological progress, economic development and CO2 emissions: theoretical and empirical research. En *J. World Econ.* 7, 83-100 (in Chinese).
- SHAFIK, N.; y BANDYOPADHYAY, N. (1992). "Economic Growth and Environmental Quality: Time-series and Cross-Country Evidence". *WorldBank Working Papers*, n. 904, pp. 1-6. Washington D.C.
- SHI, A. (2003). "The impact of population pressure on global carbon dioxide emissions 1975-1996: evidence from pooled cross-country data". *Ecological Economics*, n. 44, pp.29-42.
- SINTON, J.E. y FRIDLEY, D.G. (2000). "What Goes Up: Recent Trends in China's Energy Consumption". *Energy Policy*, n.28, pp.671-687.
- SMULDERS, S., BRETSCHEGER, L., (2000). "Explaining environmental Kuznets curves: how pollution induces policy and new technologies". *Center Discussion Paper*, v.2000-95. Tilburg: Macroeconomics. Available at: (<https://pure.uvt.nl/portal/files/536997/95.pdf>).
- SMULDERS, S.; y DE NOOJ, M. (2003). "The Impact of energy conservation on technology and economic growth". *Resources and Energy Economics*, n. 25, pp. 59-79.
- STAGL, S. (1999). "Delinking economic growth from environmental degradation? A literature survey on the environmental Kuznets curve hypothesis". *Wirtschaftsuniversitat Wien. Working Paper Series*.
- TORRAS, M.; y BOYCE, J. (1998). "Income, inequality, and pollution: a reassessment of the Environmental Kuznets Curve". *Ecological Economics*, n. 25, pp. 147-160.
- TURNER, K, y HANLEY, N. (2011). "Energy efficiency, rebounds and the environmental Kuznets curve". *Energy Economics*, n. 33, pp.709-720.
- UK CLIMATE CHANGE COMMITTEE (2008). *Building a low carbon economy: the UK's contribution to tackling climate change*. London: UK CCC.
- VELTHUIJSEN, J.W., y WORRELL, E. (2002). "The economics of energy". In Van den Bergh, J.C.J.M. (Ed.): *Handbook of Environmental and Resource Economics*. Edward Elgar, Cheltenham, UK, pp. 177-94.
- VENCE, X. (1995). "Economía de la Innovación y del Cambio Tecnológico". Capítulo 7.

- Las teorías Evolucionistas de la Innovación. pp. 216-270. Siglo XXI. Madrid, 1995.
- WACKERNAGEL, M., ONISTO, L., BELLO, P., CALLEJAS, A. LÓPEZ, I., MÉNDEZ J., y SUÁREZ A., SUÁREZ, M.A. (1999). "National natural capital accounting with the ecological footprint concept". *Ecological Economics*, n. 29, pp. 375-390.
- WANG, ZHAOHUA, ZHANG, BIN, (2012). "Determinants of public acceptance of tiered electricity price reform in China: evidence from four urban cities". *Appl. Energy* 91, 235–244.
- WANG, ZHAOHUA, YIN, FANGCHAO, ZHANG, YIXIANG, ZHANG, XIAN, (2012a). "An empirical research on the influencing factors of regional CO2 emission: evidence from Beijing City, China". *Appl. Energy* 107, 451-463.
- WANG, ZHAOHUA, ZENG, HUALIN, WEI, YIMING, ZHANG, YIXIANG, (2012b). "Regional total factor energy efficiency: an empirical analysis of industrial sector in China". *Appl. Energy* n. 97, pp.115-123.
- WORLD BANK (1992). "Development and the environmental". *Oxford University Press USA*. pp. 9-1.
- WU, A.D. & ZUMBO, B.D. (2008). "Understanding and using mediators and moderators". *Social Indicators Research*, n.87, pp. 367-392.
- YONG, T., LEBRE, E., GAJ, H., SHUKLA, P. y ZHOU, D. (2000). "Structural changes in developing countries and their implications for energy-related CO2 emissions". *Technological Forecasting and Social Change*, n. 63, pp.111-136.

