



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

La curva de Kuznets para el CO₂ y otras variables
de control en el caso de Alemania

Autor

Martín Larroy Cenis

Director

Majed Atwi Saab

FACULTAD DE ECONOMÍA Y EMPRESA
AÑO 2018

Autor: Martín Larroy Cenis

Director: Majed Atwi Saab

Título del trabajo: La curva de Kuznets para el CO₂ y otras variables de control en el caso de Alemania / The Kuznets curve for CO₂ and other control variables in Germany's case.

Resumen: La relación entre la degradación medioambiental y el crecimiento económico es uno de los temas más utilizados en la actualidad. Debido a ello, muchos son los autores que han tratado de averiguar qué variables definen la contaminación de cada economía. Nuestro estudio se centra en la obtención de un modelo econométrico que explique el comportamiento de las emisiones de CO₂ de Alemania en función de distintas variables de control para una serie de datos de 1971 a 2015, obteniendo nuestros resultados más concluyentes para datos de 1991 a 2015. A partir de la hipótesis de la Curva Ambiental de Kuznets (CAK) hemos elaborado distintos modelos que explican la relación entre el CO₂ variables clave como los servicios, agricultura, manufacturas, electricidad o PIB con el CO₂, así como la forma funcional que dibuja cada modelo, contrastando si la hipótesis de la CAK es válida para Alemania. Nuestros resultados han sido: una clara relación negativa entre PIB y servicios hacia el CO₂, y una relación claramente positiva entre electricidad, agricultura y manufacturas.

Abstract: The relationship between environmental degradation and economic growth is one of the most used topics nowadays. So, many authors have tried to find out which variables define pollution on each economy. Our study focuses on obtaining an econometric model which explains Germany's CO₂ emissions behaviour based on different control variables for data series from 1971 to 2015, obtaining our most conclusive results for data from 1991 to 2015. From the Environmental Kuznets Curve Hypothesis (EKC) we have elaborated different models that explain the relationship between key variables as services, agriculture, manufacturing, electricity or GDP with CO₂, as well as functional shape that each model draws, contrasting if EKC hypothesis is valid for Germany. Our results have been: clear negative relationship between GDP and services towards CO₂, and a clearly positive relationship between electricity, agriculture and manufacturing.

ÍNDICE

1.Introducción	1
2. Caso de estudio: Alemania.....	4
2.1 Estructura económica	4
2.2 Estructura energética	6
3. Análisis empírico	8
3.1 Datos. PIB, CO ₂ y otras variables de control.....	8
3.2 El modelo econométrico	10
3.3 Resultados	11
3.3.1. Modelo 1	11
3.3.2. Modelo 2.....	16
4. Conclusiones e implicaciones	20
5. Bibliografía y webgrafía.	22

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Curva Ambiental de Kuznets	3
Figura 2. Evolución del consumo energético en Alemania.....	7
Figura 3. Evolución histórica de la energía primaria por fuentes de energía en Alemania 1970-2014.....	7
Figura 4. Evolución histórica del Producto Interior Bruto per cápita (GDPpc). 1971-2015.....	8
Figura 5. Evolución histórica de las emisiones de CO2 per cápita (CO2pc). 1971-2015.....	9
Figura 6. Correlograma de los residuos modelo 1	13
Figura 7. Variable estimada y observada contra l_GDPpc modelo 1.....	15
Figura 8. Correlograma de residuos del modelo 2	19

ÍNDICE CUADROS

Cuadro 1. PIB Nominal, 2017 en millones de dólares.....	5
Cuadro 2. Variación estructura económica Alemania.....	6
Cuadro 3. Definición de variables utilizadas en el trabajo.....	10
Cuadro 4. El Modelo 1 estimado por MCO.....	12
Cuadro 5. Contrastes modelo 1.....	13
Cuadro 6. El Modelo 1 estimado por MCO con desviaciones típicas robustas a autocorrelación	14
Cuadro 7. Modelo estimado por MCO modelo 2.....	17
Cuadro 8. Contrastes modelo 2.....	17
Cuadro 9. Contrastes modelo alternativo.....	18

1. Introducción

La contaminación medioambiental es uno de los tópicos más utilizados en nuestros días. La creciente preocupación por el ecosistema y la mayor concienciación de la población es signo de ello. Se trata de un tema globalizado que ha concluido en grandes tratados y protocolos de protección medioambiental, entre los que podemos destacar como los más importantes: Carta mundial de la naturaleza (1982 por la Asamblea General de las Naciones Unidas), Cumbre de la Tierra (Río de Janeiro, 2012), Protocolo de Kyoto (1997) y Cumbre del Clima de París (2015) entre otros.

Esta preocupación por nuestro ecosistema se debe a numerosos estudios científicos, que vienen demostrando el efecto que nuestras acciones están generando sobre el medioambiente. Gran parte de estos estudios vienen realizados por el IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos en el Cambio Climático) constituido en 1988, y que en su informe “Cambio Climático 2014. Impactos, adaptación y vulnerabilidad” destaca como principales consecuencias de la degradación: Deshielo, inundaciones, sequías, cambios en ecosistemas terrestres y marinos, etc.

Muchas son las noticias dadas y la frustración que conllevan los comentarios y políticas de nuestros representantes y altos cargos cuando sus intenciones resultan contrarias a estos tratados o simplemente no concuerdan con la actitud eco-proteccionista de grandes sectores de la población. Un gran ejemplo de esto puede ser un artículo difundido por el diario.es (08/07/2017), titulado “Todo lo que el Gobierno de Trump ha hecho contra la protección del medio ambiente”. Sin entrar en detalles de qué medidas está tomando el presidente de los Estados Unidos, sí debemos preguntarnos, ¿Por qué esas actitudes contrarias a un gran sector de la población? ¿Qué puede ganar un gobierno tomando medidas contrarias a la protección medioambiental? La respuesta podemos verla en el propio artículo, donde se cita al inicio del mismo “*Los retrocesos en materia medioambiental se justifican con la protección de puestos de trabajos y el crecimiento económico*”.

La realidad es simple, existe una relación entre crecimiento económico y calidad medioambiental. Éste, es el que será nuestro tema de estudio a lo largo del trabajo. En concreto, centramos nuestro análisis en la búsqueda de relaciones entre el crecimiento económico y las emisiones de CO₂ en Alemania, intentando encontrar una relación econométrica que explique hasta qué punto el crecimiento económico influye en el comportamiento de las emisiones de

CO₂. Para ello, seguiremos los pasos de otros tantos economistas que han intentado encontrar esta relación. La mayoría de ellos han utilizado modelos econométricos basados en la hipótesis de la Curva de Kuznets (1955) que postula que la relación funcional entre crecimiento económico y desigualdad en la distribución de la renta tiene una forma de U invertida. Esta hipótesis se justifica de la siguiente manera:

Al inicio un país pobre apenas tiene desigualdad entre sus habitantes, pero en el momento en el que el crecimiento económico llega a un país, ésta empieza a crecer. Uno de los principales motivos es que el aprovechamiento de las oportunidades de crecimiento, casi siempre, es únicamente posible para aquellos con capacidades monetarias más elevadas. Seguidamente, se llega a un punto crítico en el que la desigualdad deja de crecer conforme al crecimiento del país, y se invierte, dando lugar a esa forma de U invertida. En este caso, el principal argumento es que una vez se ha creado suficiente riqueza, generalmente aprovechada por las empresas, la generación de empleo también comienza, y con ella la reducción de la desigualdad. Por último, las políticas de distribución de la riqueza de cada país deberían tender a la reducción de la desigualdad.

Kuznets (1955) estableció la hipótesis de que sí existe una relación entre estas dos variables, pero no pudo demostrar el cumplimiento de esta función con forma de U invertida, ya que, dependiendo del país, a veces se cumplía y otras tantas no. Esto es debido básicamente a las diferencias estructurales, culturales, políticas y geográficas distintivas de cada país, que hace que esta forma no sea generalizable.

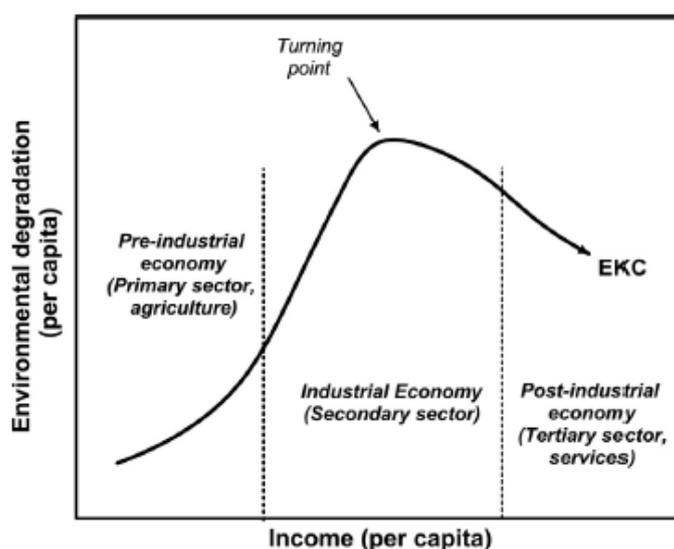
Como comentábamos anteriormente, nuestro estudio no va enfocado a la contrastación de esta curva de desigualdad, pero sí va muy ligada a ella. En nuestro caso, como decíamos, la relación a buscar está entre el crecimiento económico y la contaminación. La similitud existente entre un estudio y otro ha llevado a los economistas a nombrar esta curva como la Curva Ambiental de Kuznets (CAK), que es la que nosotros trataremos de contrastar.

La Curva Ambiental de Kuznets también *“postula una relación en forma de U invertida entre los diferentes contaminantes y el ingreso per cápita, es decir, la presión ambiental aumenta hasta un cierto nivel a medida que los ingresos aumentan; después de eso, disminuye”* Soumyananda Dinda (2004). Las bases de esta curva subyacen en la siguiente explicación: Al inicio, un país únicamente cuenta con economías de subsistencia, es decir, agrarias. En lo que empieza la industrialización y con ella las grandes empresas, el crecimiento económico del país se dispara. Estos países, que podemos denominar en crecimiento, utilizan como principal fuente

de energía combustibles fósiles, es decir, los más contaminantes entre los existentes. Por tanto, la relación existente entre el crecimiento del PIB y su contaminación es positiva y claramente creciente. Más tarde, con la globalización del país y sus mejoras en todos los sectores, empiezan a encontrarse nuevas formas de energía, que van ralentizando el deterioro medioambiental. Cuando ya podemos empezar a hablar de que el país está dejando de ser un país en crecimiento y se está convirtiendo en un país maduro, el acercamiento hacia un punto crítico en el que se empieza a mantener estable la contaminación se hace claro. Una vez alcanzado este punto, la concienciación pública, las medidas políticas de proteccionismo medioambiental y la suma de los países a los tratados internacionales comentados al inicio, empieza a generar el decremento de las emisiones de contaminantes, mientras que el crecimiento del país sigue su curso. Uno de los principales motivos de este cambio es el argumento dado por “Grossman y Krueger (1991)” en su trabajo sobre “Los efectos del NAFTA en el medioambiente” en donde vienen a decir principalmente, que cuando la industria (uno de los sectores generador de más residuos) ha alcanzado su máximo, el cambio infraestructural de los países tiende hacia el sector servicios, generando con ello un mantenimiento del crecimiento económico y una bajada de los contaminantes. Con ello, la fase decreciente de esta curva se hace visible y comienza a verse la forma de U invertida.

Ejemplarizando, la siguiente figura sacada del artículo de Kaika y Zervas (2013), muestra el resultado gráfico de este modelo teórico (CAK):

Figura 1. Curva Ambiental de Kuznets



Fuente. Kaika y Zervas (2013)

El planteamiento teórico parece relativamente simple y claro, pero ¿Realmente se cumple? ¿Es esto generalizable a todos los países y todos los contaminantes? La realidad es, como ocurría en el caso de la Curva de Desigualdad, que cada país tiene sus condicionantes, sus leyes, culturas, costumbres y shocks que hacen variar esta función.

OBJETIVOS

Por ello es que nuestro estudio va a ir ligado a la contrastación empírica de esta teoría, enfocándonos en un país en concreto, Alemania, con el objetivo de satisfacer las siguientes preguntas que nos planteamos:

- ¿La Curva Ambiental de Kuznets es generalizable a Alemania?
- ¿Realmente existe una relación entre crecimiento y contaminación?
- ¿Qué otras variables afectan a la contaminación alemana?
- De existir esa relación, ¿Qué forma toma para Alemania?
- ¿En qué punto se encuentra el “Turning point”?

2. Caso de estudio: Alemania

2.1 Estructura económica

El país que vamos a analizar es Alemania. Esta decisión se fundamenta tanto en la importancia económica del país a nivel mundial, como en su importancia y posible similitud para/con la economía europea.

Previamente al comienzo de la búsqueda de un modelo econométrico concreto para este país, debemos ponernos en situación. Para ello, debemos hacernos una breve idea de la situación actual alemana con respecto a su economía y estructura energética.

Según los datos del FMI de 2017, Alemania es la 4ª potencia mundial a nivel de PIB. Y como menciona el artículo “El secreto de Alemania para ser la economía más sólida del mundo” de BBC Mundo, *Alemania ha estado entre los tres primeros exportadores mundiales en las últimas décadas.*

Cuadro 1. PIB Nominal, 2017 en millones de dólares

País	PIB Nominal
EEUU	19417.14
China	11795.30
Japón	4841.22
Alemania	3423.29
Reino Unido	2454.46
India	2420.44
Francia	2140.94
Brasil	2140.94
Italia	1807.43
Canadá	1600.27
Rusia	156.71
Corea	1498.07
Australia	1359.72
España	1232.44
Indonesia	1020.52

Fuente. Datos FMI publicados en Expansión.

Mientras el comercio mundial está dominado por multinacionales que representan un 60% de todos los intercambios globales, en Alemania las Mittelstand (PYMES) conforman un 68% de las exportaciones.

El sector automotriz, de maquinarias, de equipos electrónicos y medicamentos se encuentran entre sus principales reclamos.

La generación de su PIB, se compone según la “Guía de País Alemania elaborada por la oficina económica y comercial de España en mayo de 2007” en un 1,1% de actividades relacionadas con el sector primario. En cuanto al sector secundario, *la participación total del sector en el PIB ha descendido de un 36,6% en 1991 a un 29,1% en 2004*. Por último, el sector servicios alcanza el 70% aproximadamente del PIB.

Existe un gran cambio estructural en la economía alemana, desde 1970 hasta la actualidad tal y como se refleja en la guía antes mencionada (3.3 sector terciario). Hemos querido elaborar un cuadro para una visión más clara de este hecho:

Cuadro 2. Variación estructura económica Alemania

Sector	1970	2005
Primario	4%	1%
Secundario	48%	29%
Terciario	48%	70%

Fuente. Elaboración propia a partir de Guía de país Alemania, 2007.

2.2 Estructura energética

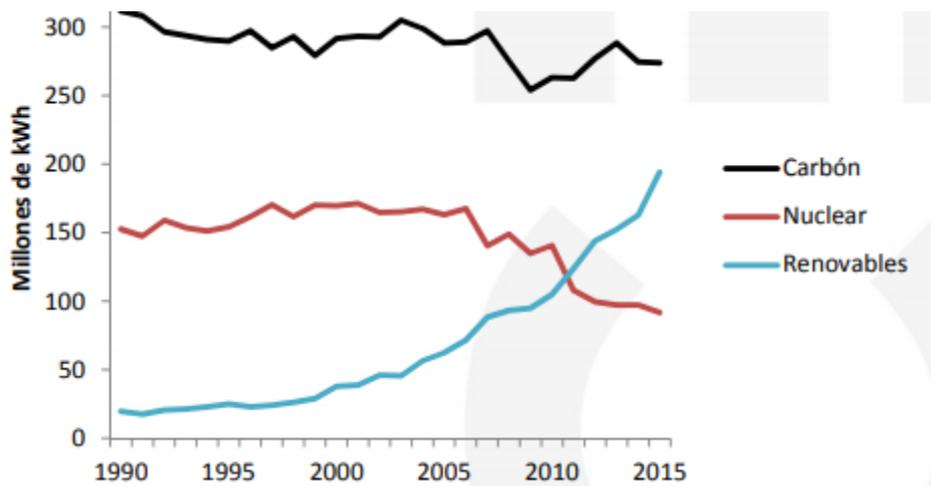
En cuanto a su estructura energética debemos comentar que Alemania se encuentra en plena transición, conocida como la transición energética alemana o “Energiewende” en su lengua.

En el año 2000 nació la EGG (Ley de Energías Renovables), que posteriormente vino siendo modificada. Pero tal como cuentan Álvarez y Ortiz (2016) es en 2010 cuando se fecha el comienzo de esta transición que tuvo como objetivos principales el aumento del uso de energías renovables y la reducción de las energías más contaminantes, fijando para 2050 que el consumo total de electricidad provenga al menos en un 80% de fuentes renovables.

Esta ley y protocolos como el de Kioto, han venido favoreciendo el cambio energético-estructural del país germano.

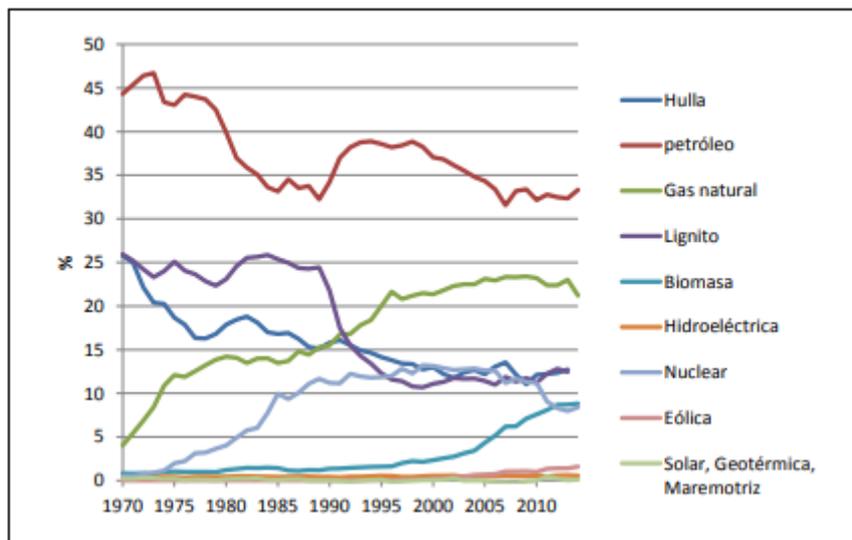
Tal y como podemos apreciar en la Figura 2, las energías renovables están creciendo a grandes niveles desde el año 2000. En cambio, el consumo de carbón, si bien parece haber descendido con respecto a 1990, no parece estar variando en gran medida. Por otro lado, la reducción de la energía nuclear alemana se hace muy clara a partir de 2010, aunque también debemos mencionar la catástrofe de Fukushima (2011) como importante motivo de la caída.

Figura 2. Evolución del consumo energético en Alemania



Fuente. La transición energética en Alemania. Energiewende. Diciembre 2016.

Figura 3. Evolución histórica de la energía primaria por fuentes de energía en Alemania 1970-2014.



Fuente. La transición energética en Alemania. Energiewende. Diciembre 2016.

Ligado con el gráfico anterior la Figura 3 podemos observar que el aumento de las energías renovables viene en gran parte por vía de la energía eólica, mientras que otras como la solar o a hidroeléctrica no están teniendo un gran crecimiento.

Por tanto, a grandes rasgos podemos dar por sentado que Alemania es una economía líder a nivel mundial, que superó hace tiempo la fase de economía en desarrollo y que actualmente fundamenta la mayoría de su PIB con el sector servicios. Este hecho, junto con las acciones tomadas por el gobierno alemán para avanzar en la protección medioambiental está generando un cambio en la estructura energética del país.

Esta situación debería verse reflejada en nuestros datos como crecimiento del PIB y descenso de las emisiones contaminantes.

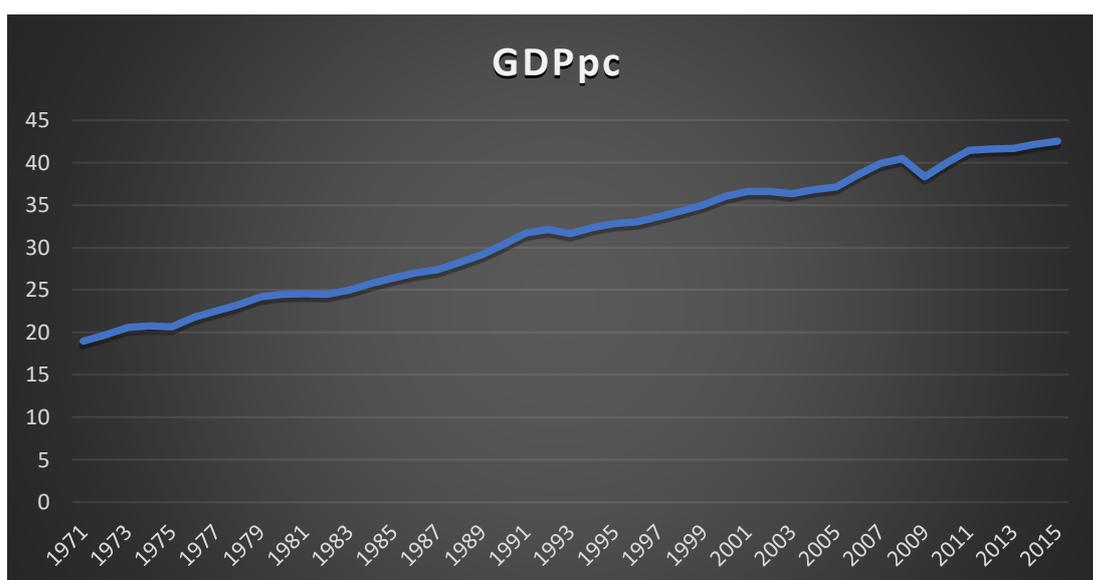
3. Análisis empírico

3.1 Datos. PIB, CO2 y otras variables de control

Las fuentes de la base de datos de que disponemos se encuentran anexadas en este documento. Todas las variables han sido tomadas conforme a las bases teóricas de la Curva de Kuznets o conforme a las sospechas propias de posible importancia para nuestro modelo, ya que *“Tal como se ha puesto de manifiesto en numerosas investigaciones, las emisiones encuentran su origen en múltiples factores, tales como la población, el crecimiento económico, la estructura económica o la intensidad energética entre otros”* (Balsarrobe, Álvarez, Olaya y Cantos).

Como venimos comentando, nuestras variables básicas y objeto de estudio son el CO2pc y el PIBpc. Es necesario, antes de lanzarnos a establecer un modelo, analizar la evolución histórica y tendencia de nuestras principales variables. A partir de nuestra base de datos, elaboramos las siguientes gráficas:

Figura 4. Evolución histórica del Producto Interior Bruto per cápita (GDPpc). 1971-2015

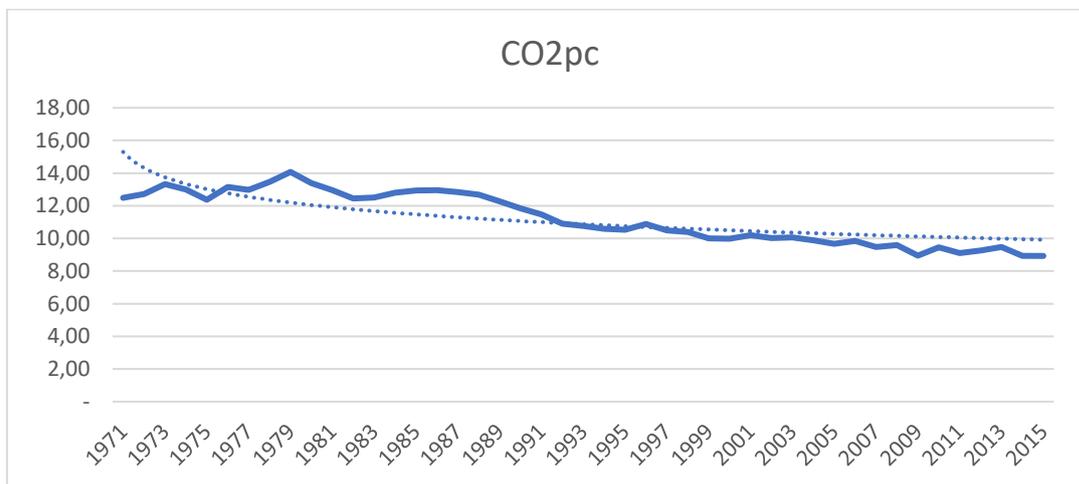


Fuente. Elaboración propia a partir de los datos International Energy Agency

Comenzando por el PIBpc (GDPpc en nuestros datos), podemos observar una clara tendencia creciente con alguna alteración para fechas muy concretas. Este es el caso del periodo 1991-93 como consecuencia de la caída del muro de Berlín y su transición, del 2001-04 con la creación de la moneda única y la gran crisis de 2008 como mayor perturbación.

En cualquier caso, queda muy marcada la tendencia creciente de la economía alemana tal y como refleja su PIB poblacional, dato que no debe sorprendernos en absoluto, pues es representativo de la realidad actual, siendo una de las economías de mayor peso a nivel mundial.

Figura 5. Evolución histórica de las emisiones de CO₂ per cápita (CO₂pc). 1971-2015



Fuente. Elaboración propia a partir de los datos International Energy Agency

En cuanto a la variable CO₂pc lo que encontramos es una tendencia decreciente, aunque también más plana. Es decir, si bien las emisiones de CO₂ han ido en descenso, parece que en las últimas fechas ese decremento se está volviendo menos pronunciado, tal y como hemos querido reflejar añadiendo una línea de tendencia logarítmica (línea discontinua).

Poniendo ambas gráficas en relación, parece que el crecimiento del PIB puede estar afectando al decremento de las emisiones de CO₂. Esto significaría que, según la Curva Ambiental de Kuznets, nos encontraríamos en la segunda parte de la curva, donde el “Turning Point” ya ha sido superado y los incrementos en PIB suponen disminuciones de CO₂.

Esta suposición concordaría con nuestras explicaciones anteriores. Alemania es una economía más que desarrollada, donde los sectores industriales y más contaminantes han ido perdiendo peso en favor del sector servicios e industrias menos contaminantes.

En el cuadro 3 exponemos variables que se han utilizado a lo largo del trabajo.

Cuadro 3. Definición de variables utilizadas en el trabajo

Variable	Definición	Unidad de medida	Fuente
CO2pc	Toneladas de CO ₂ por habitante	toneladas/cápita	International Energy Agency
GDPpc	PIB por habitante	miles de millones/cápita	International Energy Agency
Elepc	Electricidad consumida por habitante	Kwh/cápita	Banco mundial
Trade	Sumatorio de las importaciones y exportaciones	miles de millones	Banco mundial
Man	Facturación del sector manufacturero	miles de millones	Banco mundial
Serv	Facturación del sector servicios	miles de millones	Banco mundial
Agri	Porcentaje de valor añadido sobre PIB	%	Banco mundial

Fuente. Elaboración propia.

3.2 El modelo econométrico

Como comentábamos, la forma de U invertida de la curva ambiental no es generalizable. Se ha venido demostrando empíricamente por diversos autores y estudios que la curva en muchos casos toma formas distintas. Shafik y Bandyopadhyay (1992) encontraron una relación únicamente creciente; Moomaw y Unruh (1997) encontraron relaciones en forma de N; Roberts y Grimes (1997) encontraron diferencias en formas entre los países ricos (U invertida) y no tan ricos o pobres (Relación creciente) y autores como Egli (2002) o Pauli (2003) no encontraron conclusiones claras.

Por todo ello, se especifica un modelo econométrico en términos logarítmicos tal que:

$$\ln Y_t = \beta_0 + \beta_1 \ln X_t + \beta_2 \ln X_t^2 + \beta_3 \ln X_t^3 + u_t$$

Con $t = 1971, \dots, 2015$, y u_t término error del modelo que engloba otras variables que no aparecen explícitamente en el modelo pero pueden afectarlo.

La variable endógena Y representa el CO₂ per cápita y la exógena X la renta per cápita. β representa los coeficientes de las variables que afectan a Y, donde β_0 representa el término constante.

De esta manera, todas las anteriores opciones serán posibles dependiendo de los signos que tomen nuestros parámetros.

Seguidamente, a partir del programa econométrico “Gretl”, se procede a estimar el modelo especificado. El modelo irá cambiando en función de nuestros resultados hasta que finalmente lleguemos a una forma definida.

3.3 Resultados

3.3.1. Modelo 1

El primer modelo que hemos estimado es el siguiente:

$$\ln_CO2pc = -2.66 + 1.42*\ln_GDPpc - 0.316*\ln_GDPpc^2 + 0.452*\ln_elepc - 0.0418*D$$

donde:

\ln_CO2pc : logaritmo neperiano de CO₂ per cápita.

\ln_GDPpc : Logaritmo neperiano de PIB per cápita.

\ln_GDPpc^2 : Logaritmo neperiano de PIB per cápita al cuadrado.

\ln_elepc : Logaritmo neperiano de electricidad consumida per cápita.

D: Variable ficticia con valor 1 para $t > 1991$ y 0 en caso contrario.

Como mencionábamos anteriormente la aproximación al modelo comenzaba con una base tal que:

$$\ln Y_t = \beta_0 + \beta_1 \ln X_t + \beta_2 \ln X_t^2 + \beta_3 \ln X_t^3 + u_t$$

Con $X=PIBpc$ e $Y=CO2pc$ y u el término error.

El primer problema que hemos detectado, mediante el contraste RESET, es la inadecuada especificación del modelo. Es por ello que empezamos a introducir una serie de variables de control con el fin de obtener una especificación adecuada, como el comercio (trade), la electricidad per cápita consumida, las inversiones directas extranjeras, el total de energía primaria suministrada (TPES) o las importaciones y exportaciones.

Por tanto, cambiamos el enfoque. No parece existir el término cúbico así que decidimos descartarlo, así como introducir la variable ficticia “D”, que marca la diferencia entre los datos entre 1971-90 y 1991-2015. Esta variable es introducida debido a que hemos

encontrado una ruptura estructural en la muestra ya que los datos no están tratados por igual en los dos periodos, es decir, antes y después de la caída de Muro de Berlín que condujo a una Alemania unificada como la de hoy.

También hemos ido introduciendo las variables de control antes mencionadas, esta vez en función logarítmica. La variable “l_trade” así como las que incluyen las exportaciones e importaciones no resultan significativas para el modelo. En cambio, la variable “l_elepc” resulta muy significativa. Se trata de un modelo que sí que cumple con el supuesto de una especificación adecuada y cuyas variables son además significativas individual y conjuntamente. También cumple con el contraste de heterocedasticidad de White.

Sin embargo, hemos detectado que el modelo tiene problemas de autocorrelación de orden 3 y 4, como podemos ver de manera más visual en el correlograma de los residuos del modelo 1 (Figura 6).

Cuadro 4. El Modelo 1 estimado por MCO

	<i>Coefficiente</i>	<i>Desv. Típica</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>valor p</i>
Const	-2.66465	0.941989	-2.829	0.0073
l_GDPpc	1.41978	1.00330	1.415	0.1648
lGDPpc2	-0.316057	0.134522	-2.349	0.0238
l_elepc	0.452143	0.148270	3.049	0.0041
D	-0.0417614	0.0260173	-1.605	0.1163
R ²	0.969937			

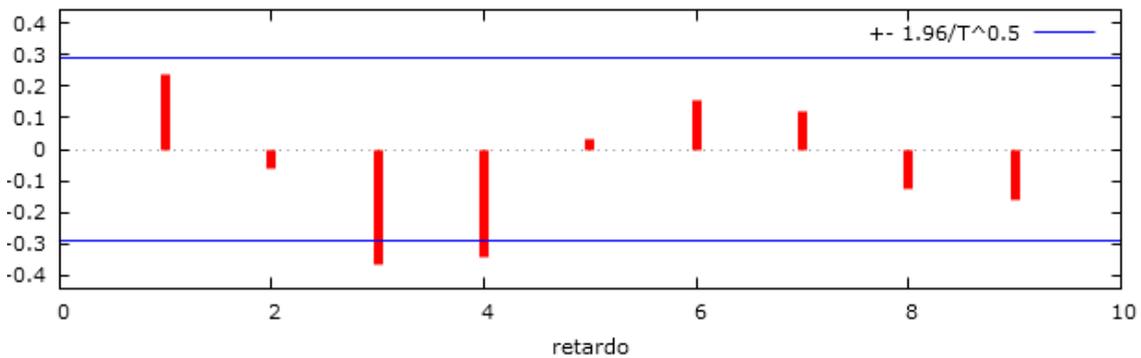
(Datos extraídos del modelo a partir de Gretl)

Cuadro 5. Contrastes modelo 1

Contraste	Valor del estadístico	P-valor	Valor crítico al 5%
Forma funcional – RESET			
H ₀ : Especificación adecuada	F(2, 38)	0.45564	0.802539
Ha: Especificación inadecuada			
Contraste heterocedasticidad – White			
H ₀ : Modelo homocedástico	LM	0.564467	4.84019
Ha: Existe heterocedasticidad			
Contraste heterocedasticidad - Breusch-Pagan			
H ₀ : Modelo homocedástico	LM	0.862804	1.29157
Ha: Existe heterocedasticidad			
Contraste de normalidad			
H ₀ : El error se distribuye normalmente	Chi-cuadrado(2)	0.00165624	12.8064
Ha: El error no se distribuye normalmente			

Fuente. Elaboración propia Excel y datos Gretl.

Figura 6. Correlograma de los residuos modelo 1



Fuente. Programa Gretl.

Llegamos a la conclusión de que debido a la naturaleza de nuestros datos (series temporales), debemos estimar el modelo con mínimos cuadrados ordinarios con desviaciones típicas robustas a autocorrelación. De esta forma podremos eludir los problemas de autocorrelación que nos limitan a la hora de realizar inferencias estadísticas.

Cuadro 6. El Modelo 1 estimado por MCO con desviaciones típicas robustas a autocorrelación

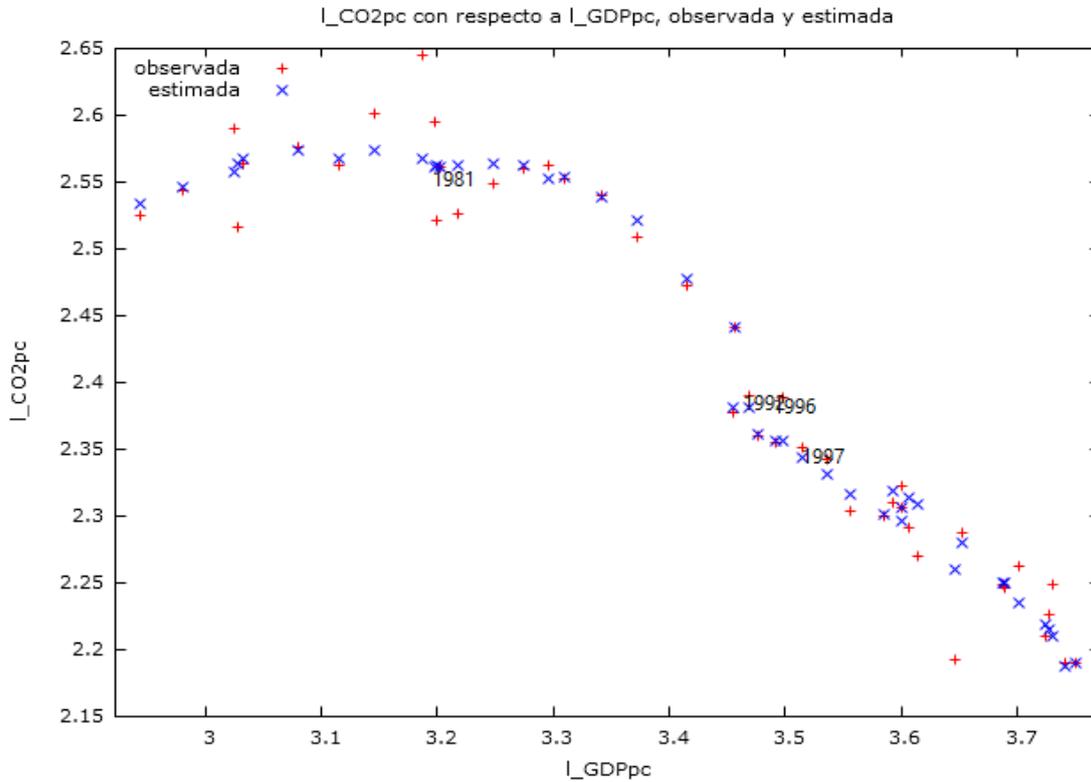
	<i>Coefficiente</i>	<i>Desv. Típica</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>valor p</i>
Const	-2.66465	0.600828	-4.435	7.02e-05
l_GDPpc	1.41978	0.656127	2.164	0.0365
lGDPpc2	-0.316057	0.0871440	-3.627	0.0008
l_elepc	0.452143	0.108452	4.169	0.0002
D	-0.0417614	0.0156752	-2.664	0.0111
R ²	0.969937			

Fuente. Programa Gretl.

$$l_CO2pc = -2.66 + 1.42 * l_GDPpc - 0.316 * l_GDPpc2 + 0.452 * l_elepc - 0.0418 * D$$

Como puede apreciarse, el cambio obtenido gracias al cálculo con desviaciones típicas robustas se encuentra en el estadístico t, habiendo conseguido con ello que nuestras variables sí sean significativas individualmente. En cuanto a nuestros contrastes, apenas existe variación y por tanto seguimos obteniendo los mismos resultados, solo que en este caso, eludimos los problemas de autocorrelación. Además, tal y como mostramos en el siguiente gráfico, parece que el modelo con la variable ficticia se ajusta bien a los datos, recogiendo el cambio estructural en el término independiente (es decir, en las emisiones autónomas) en torno a los periodos de 1971-1990 y 1991 a 2015. A primera vista, se puede apreciar una forma funcional parabólica para el primer tramo y una más lineal para el segundo.

Figura 7. Variable estimada y observada contra l_GDPpc modelo 1.



Fuente. Elaboración propia con Gretl.

Turning Point

A partir de un cierto nivel crítico de la renta per cápita, la degradación medioambiental es una función decreciente de la renta, es decir, mayores niveles de renta provocan mejoras en la calidad medioambiental. A continuación, procederemos a calcular el *Turning point*: Cabe destacar que conocemos la existencia de este punto crítico debido a la forma funcional especificada y los signos de los parámetros de nuestro modelo. Como comentábamos al inicio de este trabajo, el hecho de tener un $\beta_1 > 0$ y un $\beta_2 < 0$ hace de la función una parábola con forma de “U” invertida. De ahí que la anterior imagen ya nos de a entender esta forma.

Para el cálculo nos valemos de las derivadas. A partir de la primera derivada parcial de nuestra función en función del neperiano del PIBpc, obtenemos la siguiente ecuación:

$$\frac{dl_{CO2pc}}{dl_{GDPpc}} = \beta_1 + 2\beta_2 l_{GDPpc}$$

Despejando y sustituyendo los parámetros por los valores estimados obtenemos que el óptimo se encuentra en $l_GDPpc^* = 2,24683$. Comprobando con la segunda derivada obtenemos un valor tal que $-0,632 < 0$ luego sí y solo sí, $l_GDPpc=2,24683$ es máximo de nuestra función. Comprobando nuevamente en la última gráfica mostrada podemos comprobar que el punto de giro calculado se encuentra fuera de nuestro rango muestral. Este máximo que hemos encontrado es inferior al nivel de renta per cápita mínimo de nuestra muestra ($l_GDPpc^*=2,24683 < l_GDPpc(\min) 2,9431$ que corresponde a 1971).

Esto quiere decir no solo que Alemania ya ha superado ese punto crítico en el que su PIB favorece el medioambiente sino que fue para fechas incluso anteriores a nuestros datos disponibles. Estos datos confirman nuestras sospechas por la gráfica anterior (parece claramente decreciente), que Alemania ha superado su punto de giro y con ello cada aumento de PIB supondría una mejora de sus emisiones contaminantes.

3.3.2. Modelo 2

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, hemos decidido estimar un nuevo modelo a partir de los datos del segundo periodo (1991 a 2015), que si bien constaremos de menos datos para su estimación sí podemos confiar en que se tratan de datos más sólidos y consistentes, ya que para estas fechas ya podemos hablar de una Alemania unida.

Primeramente, debemos decir que a primera vista se aprecia claramente una forma funcional lineal decreciente como ya sospechábamos anteriormente. La mayoría de los modelos intentados con formas cuadráticas no cumplían con la mayoría de los contrastes, por no hablar ya de las significatividades de las variables.

Para este caso, hemos querido introducir nuevas variables de control (servicios, agricultura y manufacturas) con el fin de analizar los efectos de los citados sectores productivos sobre las emisiones de CO₂ en Alemania. Estas variables han resultado significativas para la mayoría de nuestros modelos, pero debido a problemas de multicolinealidad no hemos podido elaborar un modelo que contenga las 3 variables a la vez.

El nuevo modelo que proponemos es el siguiente:

$$l_CO2pc = 5.58 - 0.407 * l_GDPpc - 0.429 * l_Serv + 0.109 * l_Agri$$

Con: l_Serv logaritmo neperiano del sector servicios.

l_Agri logaritmo neperiano del sector agrario.

Los resultados de la estimación del modelo por MCO son los siguientes (Cuadro 7):

Cuadro 7. Modelo estimado por MCO modelo 2

	Coeficiente	Desv. Típica	Estadístico t	valor p
Const	558.080	0.651871	8.561	2.73e-08
I_GDPpc	-0.406588	0.0728909	-5.578	1.55e-05
I_Serv	-0.429096	0.175906	-2.439	0.0237
I_Agri	0.109221	0.0367240	2.974	0.0072
R ²	0.928043			

Fuente. Programa Gretl.

A continuación, mediante el Cuadro 8 y la Figura 8, exponemos los resultados de los contrastes realizados y el correlograma de residuos del modelo 2:

Cuadro 8. Contrastes modelo 2

Contraste	Valor del estadístico	P-valor	Valor crítico al 5%
Forma funcional – RESET			
H ₀ : Especificación adecuada	F(2, 19)	0.412328	0.928561
Ha: Especificación inadecuada			
Contraste heterocedasticidad – White			
H ₀ : Modelo homocedástico	LM	0.103663	14.5629
Ha: Existe heterocedasticidad			
Contraste heterocedasticidad – B.P.			
H ₀ : Modelo homocedástico	LM	0.216002	4.45873
Ha: Existe heterocedasticidad			
Contraste de normalidad			
H ₀ : El error se distribuye normalmente	Chi-cuadrado(2)	0.305309	0.199515
Ha: El error no se distribuye normalmente			
Contraste de cambio estructural – Chow			
H ₀ : No hay cambio estructural	F(4, 17)	0.0580427	2.81999
Ha: Existe cambio estructural			

Fuente. Elaboración propia Excel y datos Gretl.

Como puede observarse, el modelo cumple con todos los contrastes a un nivel de confianza del 95%. Además, no parece existir problemas de autocorrelación atendiendo al correlograma de los residuos y al contraste de Breusch-Godfrey de autocorrelación. Por último, debemos comentar que las variables utilizadas constan de p-valores muy cercanos a cero, por lo que se entiende que son significativas individualmente.

Vemos también que añadiendo la variable de manufacturas y eliminando la de servicios, obtenemos un nuevo modelo igualmente válido tal y como muestran sus contrastes y la significatividad individual y conjunta de sus coeficientes.

$$l_CO2pc = 3.17 - 0.458 * l_GDPpc + 0.252 * l_Man + 0.105 * l_Agri$$

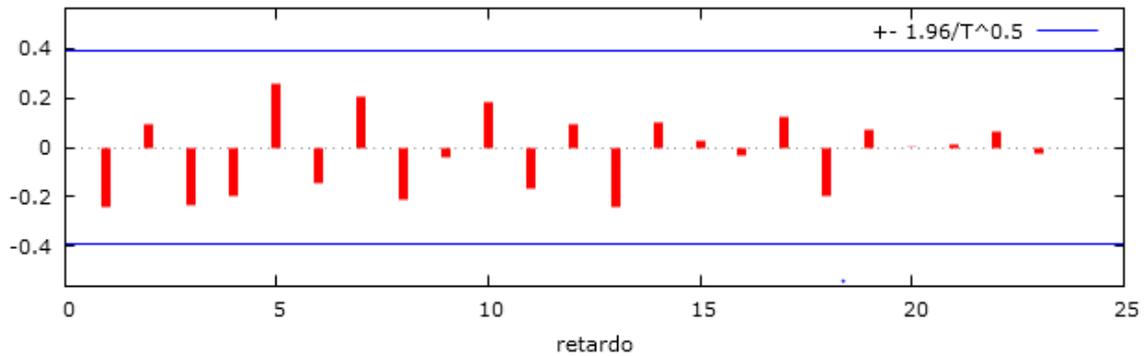
Cuadro 9. Contrastes modelo alternativo

Contraste	Valor del estadístico	P-valor	Valor crítico al 5%
Forma funcional – RESET H ₀ : Especificación adecuada Ha: Especificación inadecuada	F(2, 19)	0.420506	0.907024
Contraste heterocedasticidad – White H ₀ : Modelo homocedástico Ha: Existe heterocedasticidad	LM	0.656843	6.81049
Contraste heterocedasticidad – B.P. H ₀ : Modelo homocedástico Ha: Existe heterocedasticidad	LM	0.579789	1.96459
Contraste de normalidad H ₀ : El error se distribuye normalmente Ha: El error no se distribuye normalmente	Chi-cuadrado(2)	0.864133	0.292058
Contraste de cambio estructural – Chow H ₀ : No hay cambio estructural Ha: Existe cambio estructural	F(4, 17)	0.404294	1.0644

Fuente. Elaboración propia Excel y datos Gretl.

Como podemos observar, no existen problemas de cambio estructural, de normalidad, heterocedasticidad ni de forma funcional. Tampoco parecen existir problemas de autocorrelación para ningún orden:

Figura 8. Correlograma de residuos del modelo 2



Fuente, Gretl.

Como preveíamos, parece que para los datos a partir de 1991 la curva de Kuznets ambiental tiene una forma lineal y decreciente. Esto significaría, tal y como sospechábamos e intentábamos confirmar en el primer modelo con el cálculo del Turning Point, que Alemania como economía desarrollada y puntera en Europa aporta reducción en las emisiones de CO₂ conforme aumenta su economía.

En esta ocasión no podemos calcular un máximo o punto de giro debido a que nuestro modelo, como decimos, es lineal. Pero sí debemos confirmar matemáticamente y por derivadas nuevamente, que la pendiente ($\frac{dl_{CO2pc}}{dl_{GDPpc}} = \beta_2 = -0.458 < 0$) es decreciente.

Si bien como decimos la relación entre PIB y CO₂ es negativa, la diferencia del modelo 2 sobre el otro modelo igualmente válido, estriba en las demás variables que lo componen. Para ambos casos, las variables obtienen signos, o relaciones con el CO₂, esperados. El sector servicios tiene una relación inversa debido a su naturaleza poco contaminante, y en cambio el manufacturero y el agrario obtienen signos positivos por su habitual uso de energías más contaminantes.

Teniendo en cuenta que todas las variables han resultado coherentes en cuanto a signos con la base teórica, podemos observar que el efecto de la variable servicios tiene mayor peso en el modelo en comparación con los efectos de las variables manufacturas y

agricultura. Esto puede verse de manera clara en sus valores estimados, siendo para servicios de 0.43 y para manufacturas de 0.25 y agricultura de 0.11.

4. Conclusiones e implicaciones

Para Alemania todos los modelos calculados parecen confirmar nuestras sospechas iniciales. Alemania es una economía que por cada incremento de PIB consigue reducir sus emisiones de CO₂. Existe por tanto un claro efecto del crecimiento económico sobre la contaminación. Del mismo modo y como podía ser previsible, variables de control como el sector servicios están claramente relacionados de forma negativa con las emisiones. Por el contrario, variables como la agricultura o el sector manufacturero tienen relaciones positivas.

Para nuestro modelo 1 (con la muestra completa de 1971 a 2015), existen claros indicios de formas funcionales parabólicas y convexas. Desafortunadamente, tal y como hemos estado viendo durante el desarrollo del mismo, no podemos afirmar con rotundidad la representatividad de nuestro modelo. Existen posibles errores causados tanto porque el error parece no distribuirse normalmente, como una posible quiebra en la permanencia estructural de los parámetros.

Por todo ello, y tal y como le ocurrió a Egli (2002) en su trabajo sobre la CAK de Alemania para datos de 1966-1998 de serie temporal, no podemos establecer una conclusión clara en cuanto a la forma que toma nuestro modelo (parabólico o lineal).

En cambio, para nuestro modelo 2 (datos de 1991 a 2015) es diferente.

Esta diferencia en la representatividad de nuestros modelos se encuentra en los propios datos que hemos utilizado. El gran problema con Alemania está en que hasta su unificación nunca existieron datos conjuntos. Es por ello que muchos de los datos existentes y anteriores a fechas de 1991 generalmente han sido tratados, es decir, se ha intentado unificar datos de dos Alemaniases.

De este segundo, podemos extraer las siguientes conclusiones: Alemania tiene una relación entre PIB y CO₂ decreciente, de manera que cada mejora en el crecimiento del país le supone una mejora en cuanto a sus emisiones contaminantes. Podemos afirmar también que esta relación toma una forma funcional lineal. Debemos tener en cuenta que la linealidad de la ecuación no tiene por qué significar la inexistencia de puntos de giro donde la contaminación sea máxima o se minimice. Es muy probable que para otra serie

de datos de mayor amplitud puedan existir modelos igualmente válidos y con distinta forma. De hecho, en el modelo 1 hemos encontrado el máximo fuera de nuestro rango muestral, antes de 1971)

Por consiguiente y respondiendo a los objetivos que nos fijábamos al inicio, no podemos considerar la CAK como una función generalizable. Para cada país y economía la curva dependerá de factores o variables específicas que lo condicionen, y por ello, cada curva puede tomar una función econométrica distinta y una forma diferente.

5. Bibliografía y webgrafía.

¿Cuáles son los tratados internacionales del medio ambiente? [online] Disponible en: <http://www.abogados-derecho-ambiental.com/cuales-son-los-tratados-internacionales-del-medio-ambiente/> [Acceso 2 Junio 2018].

Álvarez Pelegrý (2016). [online] Pacteindustrial.org. Disponible en: <http://www.pacteindustrial.org/public/docs/news/84b0a61a9727793fcb973e7db2fbc073.pdf> [[Acceso 4 Agosto 2018].

Álvarez Pelegrý y Ortiz Martínez (2016). La transición energética en Alemania (Energiewende) Política, Transformación Energética y Desarrollo Industrial. [online] Orkestra.deusto.es. Disponible en: http://www.orkestra.deusto.es/images/investigacion/publicaciones/cuadernos/La_transici%C3%B3n_energ%C3%A9tica_en_Alemania_Energiewende_-_Versi%C3%B3n_web.pdf [Acceso 4 Agosto 2018].

Anon, (2016). La transición energética en Alemania. Energiewende. [online] Disponible en: <http://file:///C:/Users/Carlos%20Larroy/Downloads/DOC2016682073.pdf> [Acceso 9 Junio 2018].

Balsalobre, Álvarez-Herranz, Olaya y Cantos, La Curva Medioambiental de Kuznets y la innovación energética en países de la OCDE. Data. [online] Disponible en: https://editorialexpress.com/cgi-bin/conference/download.cgi?db_name=EEP2016&paper_id=23.

Comercio.es. (2007). Guía País Alemania. [online] Disponible en: <http://www.comercio.es/tmpDocsCanalPais/B8D8CE2CF9D99829C00B2FEB1CD4F1DA.pdf> [Acceso 18 Julio 2018].

Datos.bancomundial.org. (n.d.). Área selvática (kilómetros cuadrados) | Data. [online] Disponible en: <https://datos.bancomundial.org/indicador/AG.LND.FRST.K2?locations=DE&view=chart> [Acceso 12 Junio 2018].

Datos.bancomundial.org. (n.d.). Indicators | Data. [online] Disponible en: <https://datos.bancomundial.org/indicador> [Acceso 12 Junio 2018].

Datos.bancomundial.org. (n.d.). Investigadores dedicados a investigación y desarrollo (por cada millón de personas) | Data. [online] Disponible en: <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.SCIE.RD.P6?locations=DE&view=chart> [Acceso 12 Junio 2018].

Datos.bancomundial.org. (n.d.). Producción de energía eléctrica renovable (% de la producción total de electricidad) | Data. [online] Disponible en: <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.ELC.RNEW.ZS?locations=DE&view=chart> [Acceso 12 Junio 2018].

E.S.Mazo, P. and S.L., U. (2017). España, relegada en el ránking mundial: será la 15º economía. [online] Expansion.com. Disponible en:

<http://www.expansion.com/economia/2017/05/25/59035fd7268e3e80638b459b.html> [Acceso 5 Junio 2018].

Egli H., (2002). Are Cross-Country Studies of the Environmental Kuznets Curve Misleading? New Evidence from Time Series Data for Germany. Fondazione Eni Enrico Mattei (Nota di lavoro 25.2002).

eldiario.es. (2017). Todo lo que el Gobierno de Trump ha hecho contra la protección del medio ambiente. [online] Disponible en: https://www.eldiario.es/theguardian/alarmando-retroceso-proteccion-medioambiental-Trump_0_662134445.html [27 Septiembre 2018].

Grossman y Krueger (1991). Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement. Disponible en: <http://www.nber.org/papers/w3914.pdf>.

Grupo de trabajo II, Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambio climático 2014. Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Disponible en: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_es.pdf.

Jiménez, J. (2017). El fracaso energético alemán: Cómo seguir quemando carbón en nombre de las energías renovables. [online] Xataka.com. Disponible en: <https://www.xataka.com/energia/el-fracaso-energetico-aleman-como-seguir-quemando-carbon-en-nombre-de-las-energias-renovables> [Acceso 8 agosto 2018].

Kaika y Zervas (2013). The Environmental Kuznets Curve (EKC) theory—Part A: Concept, causes and the CO₂ emissions case. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421513007970>.

Knoema. (n.d.). Alemania | Datos y estadísticas - knoema.com. [online] disponible en: <https://knoema.es/atlas/Alemania> [Acceso 5 Junio 2018].

Kuznets (1955). Economic Growth and Income Inequality.

Marcelo Justo (2016). El secreto de Alemania para ser la economía más sólida del mundo. [online] BBC News Mundo. Disponible en: https://www.bbc.com/mundo/noticias/2016/01/160127_economia_modelo_alemania_mj [Acceso 9 Junio 2018].

Mendaza (2015), La Curva Medioambiental de Kuznets: ¿Un modelo fiable sobre la degradación medioambiental?, Universidad de la Rioja. disponible en: https://biblioteca.unirioja.es/tfe_e/TFE000956.pdf.

MOOMAW, W., & UNRUH, G. (1997). Are environmental Kuznets curves misleading us? The case of CO₂ emissions. *Environment and Development Economics*, 2(4), 451-463. doi:10.1017/S1355770X97000247

Pauli (2003). Environmental Kuznet Curve Investigation Using a Varying Coefficient AR-Model.

Roberts y Grimes (1997) Carbon intensity and economic development 1962–1991: A brief exploration of the environmental Kuznets curve. *World development* 25 (2), 191-198.

Shafik y Bandyopadhyay (1992), Economic Growth and Environmental Quality. Time series and Cross Country Evidence. Policy Research Working Paper no. 904, World Development Report 1992, The World Bank.

Soumyananda Dinda (2004), Environmental Kuznets Curve Hypothesis: A Survey. Data. [online] Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800904001570>.