



## Trabajo Fin de Máster

**CONVERGENCIA ESTOCÁSTICA EN EMISIONES DE CO<sub>2</sub>:  
UNA APLICACIÓN PARA LOS PAÍSES INDUSTRIALIZADOS**

Autor

Rosa P. Montañés Bernal

Director

Antonio Montañés Bernal

Facultad de Economía y Empresa de Zaragoza  
Año 2012

# **CONVERGENCIA ESTOCÁSTICA EN EMISIONES DE CO<sub>2</sub>: UNA APLICACIÓN PARA LOS PAÍSES INDUSTRIALIZADOS**

Rosa P. Montañés B.

## **RESUMEN**

Este trabajo investiga la posible existencia de procesos de convergencia estocástica entre las emisiones per cápita de CO<sub>2</sub> de 23 países industrializados para la muestra comprendida entre 1950 y 2008. El uso de contrastes de raíz unitaria con diversos cambios estructurales ofrece evidencia notable a favor de la existencia de tendencias comunes, excepto para el caso de Luxemburgo. Además, nuestros resultados nos permiten mostrar que la convergencia hacia los valores medios se produce como combinación de dos fuerzas divergentes, más que por una aproximación paulatina de cada uno de las emisiones hacia la media de ellas, lo que cuestiona la eficiencia de los acuerdos medioambientales tomados por los países.

Código JEL C22;Q53

Palabras clave: Convergencia estocástica; Emisiones de CO<sub>2</sub>; Cambios estructurales; Contrastos de raíz unitaria.

## **1. Introducción**

El aumento en las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera causadas por la actividad humana—principalmente como resultado de la quema de combustibles fósiles—es para muchos analistas el principal factor responsable de la intensificación del efecto invernadero y el cambio climático resultante. Dada esta importancia, no es de extrañar que el estudio de los factores determinantes de las emisiones de CO<sub>2</sub> y su evolución haya despertado el interés de numerosos investigadores y responsables políticos. Múltiples factores influyen en estas emisiones, como desarrollos económicos y demográficos, cambio tecnológico, dotaciones de recursos, estructuras institucionales, estilos de vida y comercio internacional.

Uno de los aspectos que ha sido tratado ampliamente en la literatura es el análisis de las desigualdades internacionales de los niveles de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) a la atmósfera. Hay que tener en cuenta que, por ejemplo, esta desigualdad es una de las piezas claves para el diseño de las políticas climáticas globales. Una vez el Protocolo de Kyoto entró en vigor en Febrero de 2005, los problemas distributivos aparecen como la cuestión más importante en las negociaciones en aras de adoptar nuevos acuerdos para controlar las emisiones de gases de efecto invernadero. Tomar adecuadamente en consideración estas cuestiones distributivas en el diseño de políticas y en las negociaciones podría facilitar una amplia participación, ya que las partes solo lo harán si las acciones propuestas se perciben como justas.

Aunque los países industrializados son responsables de unas emisiones mucho mayores en términos absolutos y per cápita, las impresionantes tasas de aumento en las emisiones absolutas en algunas economías en expansión, como China e India, llevan a que cualquier solución para conseguir la estabilización de las emisiones de efecto

invernadero (como establece el mandato de la CMNUCC<sup>1</sup>) requiere de la participación tanto de los países ricos como de las economías en desarrollo para controlar las emisiones globales. Cualquier solución factible al reto de estabilizar las concentraciones globales de emisiones necesita implicar tanto a los países industrializados (incluyendo al máximo emisor, EEUU que no ha ratificado el Protocolo de Kyoto), y las economías en desarrollo (a las que el Protocolo de Kyoto no obligaba a controlar sus emisiones). El aumento de las emisiones ha sido notable en algunas economías en desarrollo. No obstante, sus emisiones per cápita están aún muy lejos de los niveles de las economías desarrolladas.

La estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero, como reza el mandato de la CMCCNU, implica establecer límites al nivel global de emisiones y distribuir este nivel entre los diferentes países. Imponer limitaciones podría implicar sacrificios económicos, ya que las emisiones son un subproducto no deseado de la actividad económica que está fuertemente ligado a la producción. Mientras que los países industrializados temen que limitar sus emisiones puede hacer peligrar su crecimiento económico, los países en vías de expansión argumentan la gran desigualdad en emisiones presentes y pasadas como argumento para no limitar sus oportunidades de desarrollo con políticas de control de emisiones. Existen múltiples enfoques sobre la distribución de los “derechos” sobre las emisiones futuras: la distribución de derechos en términos per cápita (Grubb, 1990; Agarwal y Narain, 1991; Meyer, 1995), la distribución basada en los niveles de emisiones actuales ( Pearce y Warford, 1993) y diversas combinaciones de estas reglas. Respecto a las propuestas para distribuir los costes de reducción, éstas se basan en diferentes aplicaciones del principio de “quien contamina paga” y en índices de la capacidad de pago por ejemplo Smith et al. (1993)

---

<sup>1</sup> Convención Marco sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas.

proponen un índice de “deuda ecológica”, de manera que cada país debería pagar en proporción a sus emisiones cumulativas desde una fecha específica. En línea con este argumento, la llamada Propuesta Brasileña (ver Den Elzen y Schaeffer, 2002), argumenta que las responsabilidades relativas del cambio climático se deben adscribir a los países y grupos de países en base a las emisiones históricas.

[Insertar Gráfico 1]

Si nos atenemos a los datos de evolución mundial de la emisión per cápita de CO<sub>2</sub> parece que las medidas adoptadas han podido surtir efecto, al menos hasta la mitad de la pasada década. El Gráfico 1 muestra cómo desde los 70 las emisiones per cápita de CO<sub>2</sub> parecen estabilizadas, a pesar del claro repunte que se observa al final de la muestra. La cuestión que emerge entonces es clara y se basa en saber cómo se ha producido esta estabilización de las emisiones y, sobre todo, si los acuerdos alcanzados han jugado un papel determinante. Dicho de otra manera, si se ha producido algún proceso de convergencia en las emisiones per cápita de CO<sub>2</sub>, de manera que los grandes emisores las hayan reducido y viceversa.

De una forma más concisa podemos fijar nuestro objetivo en estudiar si entre los países industrializados existe algún tipo de convergencia en la cantidad de emisiones per cápita de CO<sub>2</sub>. A tal fin, se va seguir el enfoque de series temporales propuesto en el trabajo de Carlino y Mills (1993) o Bernard y Durlauf (1995). Esta metodología permite detectar qué países convergen y cuáles no, algo que no se consigue con otras metodologías basadas en datos de corte transversal.

Con esta meta, el resto del trabajo se organiza cómo sigue. En la siguiente Sección se realiza una breve revisión de la literatura acerca de convergencia en emisiones de CO<sub>2</sub>. Después, la Sección 3 describe los conceptos de convergencia que se

van a emplear y las técnicas para detectar su presencia y calificar su tipología. Los resultados se analizan en la Sección 4 y el trabajo termina con una revisión de las conclusiones más importantes a las que se ha llegado.

## **2. Revisión de la literatura**

El creciente interés por entender y explicar las relaciones existentes entre la evolución de la contaminación medioambiental y el progreso económico ha tenido como consecuencia el notable aumento de trabajos en los que se aplican distintas técnicas de series temporales a series que miden diferentes aspectos relacionados con la ecología. Pero, después de casi una década de trabajos sobre este tema, no existe una conclusión unánime sobre la convergencia o divergencia en las emisiones de CO<sub>2</sub> de los países industrializados, tal y como se refleja perfectamente en Camarero et al (2011), donde se hace una exhaustiva revisión de estos trabajos.

Así, de un lado tenemos aquellos que apoyan la existencia de procesos convergentes, como son los de podemos considerar el trabajo de Strazicich and List (2003) como uno de los primeros trabajos en este campo. Estos autores aportan evidencia a favor de la existencia de procesos de convergencia en emisiones per cápita de CO<sub>2</sub> al analizar una muestra de 21 países de la OCDE, muy similar a la que empleamos en este trabajo, para el periodo 1960-1997. A esta misma conclusión también llegan Lee et al. (2008a), Romero-Ávila (2008) y Lee y Chang (2009), para una muestra ligeramente más amplia en el tiempo, pero con los mismos países.

Por el contrario, los trabajos de Aldy (2006), Barrasi et al. (2008), Westerlund y Basher (2008) y Lee y Chang (2008b) proporcionan evidencia a favor de la existencia de divergencia en la emisiones de CO<sub>2</sub> para muestras de tiempo y países similares a las anteriores.

Esta amalgama de resultados no es sencilla de interpretar. Las diferencias no parece que se puedan achacar ni a las fuentes de datos empleadas. Ni tampoco a las herramientas utilizadas. Las metodologías empleadas son muy similares, siempre basadas en los conceptos de Carlino y Mills (1993) y con el empleo de diferentes tipos de contrastes de raíz unitaria como elemento para dilucidar la presencia de procesos convergentes/divergentes. Simplemente es posible que, de un lado, el tipo de estimación de los elementos deterministas no sea el más apropiado y, de otro, que realmente los resultados sean muy heterogéneos. En este trabajo vamos a tratar de aportar algo de luz a este tema utilizando, de un lado, una muestra ligeramente superior a aquellas que emplean datos desde el fin de la Segunda Guerra Mundial y, de otro, métodos de estimación de la tendencia novedosos y que proporciona estimaciones más eficientes de este parámetro

### **3. Datos y Metodología**

Esta sección está dedicada a presentar los datos y la metodología que vamos a utilizar en este trabajo. En primer lugar se comenta la base de datos, para a continuación definir los procesos de convergencia estocástica que vamos a utilizar, el método empleado para comprobar su presencia y, finalmente, la manera mediante la que vamos a estimarla.

#### **3.1 Datos**

Los datos usados para el estudio son las emisiones de CO<sub>2</sub> anuales per cápita expresadas en toneladas métricas de carbón. Los países seleccionados han sido los 23 países industrializados de la OCDE que son los mismos que fueron utilizados en

Romero-Ávila (2008). Estos países son Alemania<sup>2</sup>, Australia, Austria, Bélgica, Canadá, Dinamarca, Finlandia, Francia, Grecia, Islandia, Irlanda, Italia, Japón, Luxemburgo, Países Bajos, Nueva Zelanda, Noruega, Portugal, España, Suecia, Suiza, Reino Unido y los Estados Unidos de América. La muestra es sensiblemente más amplia que la empleada en el anteriormente mencionado artículo, por cuanto abarca el periodo que va desde 1950-2008 y, además, los datos han sido obtenidos de Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC<sup>3</sup>), por lo que las series también son diferentes.

Es importante mencionar que nos hemos centrado en países industrializados y no en el conjunto total de países. Esto facilita el uso de las técnicas de series temporales que serán claves a la hora de obtener los resultados. Tal y como se indica en Bernard and Durlauf (1996) los test de convergencia de series temporales no son apropiados para aquellos países que se encuentran lejos del estado estacionario, como ocurre con este tipo de los países. Esto nos lleva a no incluir países como China, India o Brasil, a pesar del indudable interés que puede tener su análisis. Además, resulta conveniente añadir que el tamaño de la muestra para estos países es notablemente más reducido, lo que hubiera dificultado la aplicación de las técnicas y la propia interpretación de los resultados.

[Insertar Grafico 2]

---

<sup>2</sup> El año 1991 fue el primer año que se publicaron datos para Alemania unificada. Hemos combinado las estadísticas de Republica Federal Alemana y de la Republica Democrática Alemana para el periodo anterior a 1990.

<sup>3</sup> CDIAC expresa las emisiones de CO<sub>2</sub> en términos de la masa de carbono, la unidad de uso común en el ciclo de carbono. Esto se hace porque los cambios atómicos del carbono asociados muchas veces a través del curso del ciclo de carbono, pasando de CO<sub>2</sub> en la atmósfera a C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub> después de la fotosíntesis, o de ácido carbónico H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> en el océano y el carbonato de calcio formando con el tiempo, carbonato rocas y así sucesivamente. Otras fuentes de datos dan las emisiones de CO<sub>2</sub> en la masa de la molécula de dióxido de carbono. Esto tiene sentido para las agencias reguladoras y organizaciones relacionadas con el CO<sub>2</sub> atmosférico y el cambio climático. Para convertir datos de las emisiones de carbono CDIAC comparables a las emisiones de CO<sub>2</sub>, se puede multiplicar los valores CDIAC por la relación de la masa molecular del dióxido de carbono a la masa atómica de carbono.

Las series que componen nuestra base de datos se presentan en el Gráfico 2. El simple análisis visual nos lleva a considerar como bastante plausible la hipótesis de convergencia dado que las series de emisiones de CO<sub>2</sub> de cada uno de los países tienen, en general, un perfil similar al de la media de todos los valores y, además, tienden a agruparse alrededor de ésta. Existen, no obstante, excepciones notables, como es el caso de las emisiones de Luxemburgo, muy elevadas y poco relacionadas con el resto, y las de USA, Australia y Canadá que muestran cierta divergencia con respecto a la media. En todo caso, la mera inspección visual de los datos no es un método relevante, por lo que estas primeras impresiones tendrán que verse luego refrendadas por las técnicas que vamos a emplear y que se presentarán en las siguientes Secciones.

### **3.2 Definición de convergencia estocástica**

Dado el interés existente sobre la evolución de las economías y la capacidad de crecimiento de las mismas, no es de extrañar que sea muy amplia la literatura que se ocupa de explicar la presencia de procesos convergentes. Los primeros trabajos en los que se intenta determinar la existencia de este tipo de procesos son los de Barro y Sala-i-Martin (1991,1992). Su idea es la de evaluar si los países menos desarrollados crecen más deprisa que los más desarrollados, para lo cual definen dos tipos de convergencia,  $\beta$  y  $\sigma$  convergencia, y toman como medida de referencia el crecimiento del PIB de un conjunto de países. A pesar del indudable interés de estos primeros trabajos, la validez estadística de estos métodos fue cuestionada por Quah (1993), donde se demuestra que este tipo de estudios presentan un claro sesgo.

La alternativa a este tipo de trabajos la encontramos en los trabajos de Carlino y Mills (1993) y Bernard y Durlauf (1995) quienes emplean el marco de series temporales para analizar la presencia de este tipo de procesos convergentes/divergentes. Para estos

autores, la existencia de una tendencia común a largo plazo entre las variables consideradas es un hecho necesario para que se pueda hablar de convergencia. Una vez que se prueba la existencia de esta relación, se puede hablar de diversos tipos de convergencia, como es el caso del concepto de catching up y de convergencia a largo plazo. Dentro de este contexto, Li y Papell (1999), siguiendo a Carlino y Mills (1993), definen dos enfoques de convergencia empleando series temporales: una convergencia estocástica débil (contrastan su existencia fijándose en si el logaritmo de la tasa de crecimiento mantiene una tasa estacionaria), y, por otro lado, una convergencia determinista en el que las series convergen si la diferencia de sus tasas de crecimiento alcanza un nivel estacionario con media nula. En todo caso, el primer paso es siempre encontrar la presencia de una tendencia común.

Entonces, siguiendo los anteriores trabajos, para demostrar la presencia de procesos de convergencia en las emisiones per cápita de CO<sub>2</sub> de los países industrializados es necesario estudiar el orden de integración de la siguiente variable:

$$\delta_{i,t} = y_{i,t} - \bar{y}_t \quad (1)$$

donde  $y_{i,t}$  e  $\bar{y}_t$  y son el nivel de emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita en logaritmos del país i y el de referencia, en nuestro caso la media de las emisiones de los países incluidos en la muestra (ambas variables medidas en logaritmos).

El diferencial de emisiones se puede descomponer del siguiente modo:

$$\delta_{i,t} = \delta_i^e + u_{i,t} \quad (2)$$

siendo  $\delta_i^e$  el diferencial de equilibrio y  $u_{i,t}$  las desviaciones del equilibrio de largo plazo. El diferencial de equilibrio recoge las diferencias de emisiones entre dos países

con diferente industrialización debido a factores estructurales. Si la industrialización de los países son similares entonces tenemos que  $\delta_t^e = 0$  y podremos hablar de convergencia absoluta. Por el contrario, si  $\delta_t^e \neq 0$ , los países tendrán diferencias importantes y sólo se podrá alcanzar convergencia condicional. Para formular este tipo de convergencias hay que tener en cuenta que se puede descomponer  $u_{i,t}$  en una tendencia determinista lineal y un componente estocástico.

$$u_{i,t} = \varepsilon_{i,0} + \beta_i t + \varepsilon_{i,t} \quad (3)$$

Donde  $\varepsilon_{i,0}$  es la desviación inicial del equilibrio, y  $\beta_i$  es la tasa de convergencia. Sustituyendo (3) en (2) obtenemos la ecuación relevante para contrastar las condiciones de convergencia.

$$\delta_{i,t} = \mu_i + \beta_i t + \varepsilon_{i,t} \quad (4)$$

donde  $\mu_i = \delta_t^e + \varepsilon_i^0$ . Esta es la ecuación sobre la que gira todo el análisis de convergencia donde, en primer lugar, hay que demostrar que los shock  $\varepsilon$  son transitorios y, después, catalogar correctamente el tipo de proceso que está detrás de ellos. Ambas cuestiones se abordan en las siguientes Secciones.

### 3.3 Metodología Econométrica

Tal y como hemos visto, para contrastar la presencia de cualquier tipo de convergencia estocástica es condición necesaria que se rechace la existencia de raíces unitarias para la variable generada como diferencial entre la variable que queremos medir y el valor de referencia. Por ejemplo, el trabajo seminal de Carlino y Mills (1993)

emplea los estadístico de Dickey-Fuller<sup>4</sup>. Sin embargo, el uso de este estadístico puede no ser suficiente por cuanto estos autores asumen que los parámetros deterministas no cambian a lo largo del tiempo. Ahora bien, este supuesto parece poco realista, por cuanto los países están tomando continuamente decisiones en materia medioambiental, de ahí que parezca más apropiado considerar que los procesos de convergencia pueden acelerarse o ralentizarse en el tiempo y, en consecuencia, admitir la presencia de cambios estructurales en el proceso generador de los datos.

Este hecho tiene una importancia capital desde el punto de vista metodológico ya que, como se demuestra en Perron (1989) y en Montañés y Reyes (1998) la omisión de estos cambios estructurales puede cambiar el resultado del contraste. Por esta razón, muchos de los trabajos siguientes, utilizan contrastes de raíz unitaria que admiten la existencia de una ruptura en el proceso de convergencia. Este es el caso de los trabajos de como son los de Oxley y Greasley (1995) o Loewy y Papell (1996), cuando se analiza la hipótesis de convergencia en PIB, o los de Aldy (2006), Strazicich y List (2003) o Romero-Ávila (2008) para el caso que nos ocupa de las emisiones en CO<sub>2</sub>,

El problema que presentan todos estos contrastes es que están diseñados para permitir un número predeterminado de rupturas. Si el número de rupturas especificado no es el correcto estos contrastes pueden presentar los mismos serios problemas de potencia que en el caso del estadístico de Dickey-Fuller. Entones, desde nuestro punto de vista, parece más acertado utilizar un contraste de raíz unitaria que permita la existencia de un número indeterminado de rupturas, de manera que éstas no se impongan a priori. Con estas características, el estadístico elegido ha sido el

---

<sup>4</sup> Ver Dickey y Fuller (1979)

recientemente propuesto en Carrión et al. (2008), que se obtiene de la siguiente manera.

Sea  $y_t$  un proceso estocástico generado de acuerdo a:

$$y_t = d_t + u_t \quad (5)$$

donde  $u_t = \alpha u_{t-1} + v_t$   $t = 0, \dots, T$ . Siguiendo el enfoque de Carrión et al. (2009), consideramos tres modelos: Modelo 0 (“level shift” o “crash”), Modelo I (“slope change”), and Model II (“mixed change”). Si adicionalmente consideramos que  $DU_t(T_j) = 1$  y  $DT_t^*(T_j) = (t - T_j)$  para  $t > T_j$  y 0 para lo demás, con  $T_j = \lfloor T\lambda_j \rfloor$  siendo  $j$ -th la fecha de ruptura, con  $\lfloor \cdot \rfloor$  la parte entera, y  $\lambda_j \equiv T_j/T \in (0,1)$  el parámetro que mide dónde aparecen las rupturas. De acuerdo a esto, el componente determinista en la ecuación anterior vienen dado por:

$$d_t = z_t(\lambda)\Psi$$

Con  $z_t(\lambda) = [z_t(T_0), z_t(T_1), \dots, z_t(T_m)]$  y  $\Psi = (\Psi_0, \Psi_1, \dots, \Psi_m)$ , donde

$$z_t(T_j) = \begin{cases} DU_t(T_j) & \text{Modelo 0} \\ DT_t^*(T_j) & \text{Modelo I} \\ [DU_t(T_j), DT_t^*(T_j)] & \text{Modelo II} \end{cases}$$

Para  $1 \leq j \leq m$ , con  $\Psi_j = \mu_j$  en el modelo 0,  $\Psi_j = \beta_j$  en el modelo I y  $\Psi_j = (\mu_j, \beta_j)'$  en el modelo II.

Carrión et al. (2009) definen un estadístico basado en el principio de mínimos cuadrados generalizados, de forma que hace uso de las quasi-diferencias de las variables

$y_t^{\bar{\alpha}}$  y  $z_t^{\bar{\alpha}}(\lambda)$  definidas por:

$$y_t^{\bar{\alpha}} = \left( y_1, (1 - \bar{\alpha}L)y_t \right), \quad z_t^{\bar{\alpha}}(\lambda) = \left( z_1, (1 - \bar{\alpha}L)z_t(\lambda) \right)$$

Para  $t=2, \dots, T$  con  $\bar{\alpha} = 1 + \bar{c}/T$  donde  $\bar{c}$  no es un parámetro de centralización. Una vez que los datos han sido transformados, los parámetros  $\Psi$ , asociados con componentes deterministas, pueden ser estimados minimizando la siguiente función objetivo:

$$S^*(\Psi, \bar{\alpha}, \lambda) = \sum (y_t^{\bar{\alpha}} - \Psi' z_t^{\bar{\alpha}}(\lambda))^2$$

La aplicación de estos estadísticos para un máximo de 5 rupturas nos conduce a los resultados que se discuten en la siguiente Sección.

## 4. Resultados

### 4.1. ¿Existe convergencia?

Los resultados obtenidos se explican en esta sección. De acuerdo a la metodología previamente descrita, primero debemos realizar un contraste de raíces unitarias y rechazar la presencia de una raíz unitaria en la relación entre las emisiones de CO<sub>2</sub> de un país respecto a la media. El estadístico elegido es el propuesto en Carrión et al (2009) para el que sólo elegiremos el caso más general, en el que tanto la media como la pendiente del modelo pueden variar. Este modelo engloba a los anteriores y, por tanto, nos previene de los daños efectos de una mala especificación del tipo de ruptura, tal y como se estudia en Montañés et al. (2005). Los resultados obtenidos por la aplicación de estos métodos estadísticos están recogidos en el Cuadro 1.

[Insertar Cuadro 1]

El resultado más importante que emerge al analizar este Cuadro es que la incorporación de rupturas es vital para rechazar la hipótesis nula de raíz unitaria. De hecho, cuando no consideramos la existencia de cambios en los elementos deterministas del modelo, solo podemos rechazar la hipótesis nula de raíz unitaria para 6 países, (Austria, Canadá, Alemania, Islandia, Irlanda y Estados Unidos de América). Por el contrario, la incorporación de rupturas nos permite rechazar en un total de 22 países, todos menos Luxemburgo.

La simple introducción de un cambio permite que el estadístico CKP rechace la hipótesis nula de raíz unitaria para 5 más (Australia, Finlandia, Francia, Grecia y los Países Bajos). Por tanto, la consideración de un solo cambio, tal y como se hace en los trabajos precedentes, nos conduciría a que más de la mitad de los países no rechazan la hipótesis nula de raíz unitaria. Por el contrario, si admitíamos la presencia de hasta 4 cambios, podemos rechazar esta hipótesis para 22 países. La excepción es Luxemburgo, del que ya el análisis visual nos hablaba de su comportamiento anómalo con respecto al resto de los países incluidos en la muestra. De hecho, ni siquiera la inclusión de un quinto cambio permite rechazar la presencia de una raíz unitaria para el diferencial de las emisiones per cápita de Luxemburgo con respecto al de la media de los países que componen nuestra muestra.

#### **4.2. Tipo de relaciones**

Los resultados de la Sección anterior muestran que se puede rechazar la presencia de una raíz unitaria para la variable  $\delta_{it}$  para la práctica totalidad de países industrializados. Ahora bien, esto no nos garantiza la presencia de un proceso de convergencia, sino que tan sólo es una condición necesaria pero suficiente. Para estudiar

el tipo de proceso frente al que nos encontramos en cada caso es necesario estimar el siguiente modelo:

$$\delta_{it} = \sum_{j=1}^{m_i+1} \mu_{ij} D_{ijt} + \sum_{j=1}^{m_i+1} \beta_{ij} DT_{ijt} + u_{it} \quad (6)$$

Donde  $D_{i,k,t}$  y  $DT_{ijt}$  son sendas variables ficticias tales que  $D_{i,k,t} = 1$  y  $DT_{ijt} = t - TB_{j-1}^i$ , para  $TB_{j-1}^i < t \leq TB_j^i$  y 0 en otro caso, siendo  $TB_j^i$  el  $j$ -ésimo cambio estructural para la variable  $i$ -ésima, con  $j = 1, \dots, 5$ ,  $i = 1, \dots, 23$ . Además, hay que tener en cuenta que  $TB_0^i = 0$  y  $TB_6^i = T$ , para todo  $i$ .

La selección del valor del parámetro  $m_i$  se ha realizado en función de los valores del estadístico CKP, de manera que se ha elegido el número de rupturas que permitía rechazar la hipótesis nula de raíz unitaria. En aquellos casos en los que este hipótesis es rechazada por varios valores del  $m_i$  se ha elegido aquel que minimizaba el valor del estadístico SBIC, tal y como hace Carrión y Soto (2010) basándose en los resultados de Montañés et al (2005).

Bajo estas condiciones, la estimación del modelo (6) es relativamente sencilla por cuanto la variable no es integrada y, en consecuencia, la simple estimación mínima cuadrática ordinaria proporciona estimadores consistentes. Sin embargo, no es la única que tiene esta propiedad, por cuanto también es posible realizar una estimación por mínimos cuadrados generalizados o, incluso, aplicar la estimación de Tomljanovich and Vogelsang (2002), como se hace en Carrión y Soto (2010). No obstante, si tenemos en cuenta los resultados de Perron y Yabu (2009) parece que ninguno de estos métodos ofrece mejores resultados que el estimador basado en cuasi primeras diferencias definido por estos autores. En consecuencia, y en función de sus ejercicios de

simulación, este será el método elegido para estimar la ecuación (6). Los resultados se presentan en el Cuadro 2.

[Insertar Cuadro 2]

Tal y como hemos comentado, para determinar el tipo de proceso que sigue cada uno de los países es necesario estudiar los signos de los parámetros de la ecuación (6). Así, un tipo de convergencia ocurre cuando  $\mu_i > 0$  y que  $\beta_i < 0$ , ya que la posición inicial del país está por encima de la media, pero se aproxima a ésta durante el periodo considerado por cuanto el valor del parámetro  $\beta$  es negativo. A este tipo de procesos de convergencia lo denotaremos como  $C^-$ . Si, por el contrario, tenemos que  $\mu_i < 0$  y que  $\beta_i > 0$ , entonces el nivel de emisiones per cápita al comienzo del periodo está por debajo de la media, valor al que se acerca la relación al ser la pendiente positiva. Este segundo caso de convergencia lo llamaremos  $C^+$ . Si los parámetros  $\mu$  y  $\beta$  tienen el mismo signo tenemos dos tipos de procesos divergentes. Si ambos son positivos, entonces las emisiones per cápita de CO<sub>2</sub> se alejan de la media, por lo que tenemos un proceso divergente que calificaremos como  $D^+$ . Si, finalmente, ambos son negativos, la senda de emisiones estaba por debajo de la media y la pendiente la lleva todavía a distanciarse más de este valor, a lo que nos referiremos como  $D^-$ . Por último, tenemos los casos en los que alguno o los dos parámetros son 0. Si el parámetro  $\beta_i$  es 0, eso quiere decir que las emisiones no se alejan del valor  $\mu_i$  en el periodo considerado, por lo que el proceso no es ni convergente ni divergente. Simplemente, el diferencial se ha estabilizado alrededor del valor  $\mu_i$ . Si, además,  $\mu_i=0$ , entonces se ha producido un proceso de convergencia absoluta, aunque este supuesto no se observa en ningún caso para los datos disponibles. Finalmente, para facilitar la interpretación de los resultados, se ha

procedido a elaborar una serie de gráficos en los que se presentan las situaciones en las que se encuentran los diferentes países a lo largo del tiempo.

[Insertar Gráficos 3-7]

De acuerdo a los Gráficos 3-7 se puede observar que existe un comportamiento claramente diferenciado antes y después de mitad de los 80. Así, si nos fijamos en el color predominante en los Gráficos, hasta el que dibuja la situación a mediados de los 80, los colores verde y rosa aparecen de forma casi igualitaria. Esto nos dice que, como cabría esperar, la presencia de procesos de convergencia en los países, avalada por resultados previos, viene de la mano de un aumento de aquellos países que tienen menos emisiones y de la disminución de aquellos que se excedían en ellas. Todo ello se podría entonces interpretar como un avance de las políticas de concienciación del respeto al medio ambiente y de las medidas correctoras de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, a partir de esta fecha, es claro que el color dominante en los Gráficos es el verde. Por tanto, el proceso de convergencia hacia los valores medio se produce no como corrección de los excesos, sino como radicalización de ellos. Además, resulta que Australia y Canadá son dos de los países con mayores emisiones per cápita (conjuntamente con Luxemburgo y los Estados Unidos de América). Por tanto su divergencia con respecto al resto de los valores indica la ineffectividad de las posibles medidas correctoras de emisiones, al menos en términos relativos.

En términos parecidos nos podemos referir a los casos de Francia, Italia, Suecia o Suiza (también Noruega aunque en menor medida). Estos países presentan valores bajos de emisiones per cápita y sus decisiones de política medioambiental les llevan a alejarse más de los valores medios.

## **5. Conclusiones**

El objetivo de este trabajo ha sido el de analizar si las series de emisiones de CO<sub>2</sub> de los países industrializados muestran algún tipo de convergencia estocástica. Para ello, se han empleado contrastes de raíz unitaria que permiten la presencia de diversos cambios en los elementos deterministas de la relación. Con ayuda de estos estadísticos se ha podido constatar que la evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita de los países que componen la muestra, con la única excepción de Luxemburgo, está conectada con la media global, por lo que existe una fuerte evidencia a favor de la presencia de tendencias comunes entre estas series.

Ahora bien, esto no implica que se esté produciendo un verdadero procesode convergencia en las emisiones de CO<sub>2</sub>. El proceso de convergencia esperado sería aquél en el que los países con mayores emisiones redujeran el diferencial con respecto a los que menos emiten y que, a su vez, éstos aumentarán sus posiciones comparativas no por un incremento de las cantidades de CO<sub>2</sub> arrojados, sino como consecuencia de la acción de los mayores contaminantes. Los resultados obtenidos muestran que existe convergencia, pero que desde los años 80 ésta es, principalmente el resultado de la suma de dos fuerzas divergentes. Así, los países de alta emisión por capita se mantienen en sus niveles, incluso aumentan los diferenciales en relación con el resto, mientras que los países con menos niveles no se aproximan hacia los valores medios, sino que se mantienen o alejan de ellos.

Ahora bien los resultados muestran poca eficacia de los acuerdos internacionales de reducción de CO<sub>2</sub> tomados por los países implicados y, sobre todo, la falta de credibilidad por parte de los países en desarrollo sobre el verdadero comportamiento de

los países industrializados, lo que puede dificultar la toma de futuras decisiones multilaterales en materia medioambiental.

## **Referencias**

Agarwal, A. y Narain, S., 1991, Global warming in an unequal world, Center for Science and Environment, Nueva Delhi

Aldy, J.E., 2006. Per cápita carbon dioxide emissions: convergence or divergence? Environmental and Resource Economics 33 (4), 533–555.

Barro R, Sala-i-Martin X (1991) Convergence across states and regions. Brooking Papers in Economic Activity 1:107–158

Barro, R.J. and X. Sala-i-Martin. 1992. Convergence. Journal of Political Economy 100(2):223-251.

Barrasi, M., Cole, M., and Elliot, R. (2008). “Stochastic divergence or convergence of per capita carbon dioxide emissions: Re-examining the evidence.” Environmental and Resource Economics, 40, 121–137.

Bernard AB, Durlauf SN (1995) Convergence in international output. J Appl Econ 10:97–108

Camarero, M., Y. Mendoza y J. Ordóñez (2011). Re-examining CO<sub>2</sub> emissions. Is the assessment of convergence meaningless? No 2011/6, Working Papers Universidad Jaume I.

Carlino, G.A. and L.O. Mills. 1993. Are U.S. Regional Incomes Converging? A Time Series Analysis. Journal of Monetary Economics 32: 335-346.

Carlino GA, Mills L (1996) Convergence and the U.S. States: a time-series analysis. Journal of Regional Science 36(4):597–616

Carrión JL, German-Soto V (2007) Stochastic convergence amongst Mexican states. *Regional Studies*, 41(4):531–541.

Carrión JL, German-Soto V (2010) Stochastic convergence in the industrial sector of the Mexican states. *Annals of Regional Science*. 45:547–570.

Carrión JL, D Kim y P. Perron (2009). GLS-based Unit Root Tests with Multiple Structural Breaks both Under the Null and the Alternative Hypotheses," *Econometric Theory* 25, 1754-1792.

Den Elzen, M.G.J. y Schaeffer, M., 2002, Responsibility for past and future global warming: uncertainties in attributing anthropogenic climate change, *Climatic Change* 54, 29-73.

Dickey DA, Fuller W A (1979) Distribution of the estimators for autoregressive time Grubb, M. ( 1990) The greenhouse effect: negotiating targets, *International Affairs* 66, 67-89.

Lee, C. y C. Chang (2008). "New evidence on the convergence of per capita carbon dioxide emissions from panel seemingly unrelated regressions augmented Dickey-Fuller tests." *Energy*, 33, 1468–1475.

Lee, C. and Chang, C. (2009). "Stochastic convergence of per capita carbon dioxide emissions and multiple structural breaks in OECD countries." *Economic Modelling*, 26, 1375–1381.

Lee, C., Chang, C., and Chen, P. (2008a). "Do CO<sub>2</sub> emission levels converge among 21 OECD countries? new evidence from unit root structural break tests." *Applied Economics Letters*, 15, 551–556.

Lee, C., Chang, C., and Chen, P. (2008b). "New evidence on the convergence of per capita carbon dioxide emissions from panel seemingly unrelated regressions augmented dickey–fuller tests." *Energy*, 15, 551–556.

Li, Q., Papell, D., 1999. Convergence of international output: time series evidence for 16 OECD countries. *International Review of Economics and Finance* 8, 267–280.

Loewy MB, Papell DH (1996) Are U.S. regional incomes converging? Some further evidence. *JMon Econ* 38:587–598.

Lutter, R. 2000. Developing Countries' Greenhouse Emissions: Uncertainty and Implications for Participation in the Kyoto Protocol. *Energy Journal* 21(4): 93-120.

Marland, G., T.A. Boden, and R.J. Andres. 2003. Global, Regional, and National CO<sub>2</sub> Emissions. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Oak Ridge, TN: United States Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory, Carbon Dioxide Information Analysis Center.

Meyer, A. 2000. Contraction and Convergence: The Global Solution to Climate Change. Foxhole, England: Green Books.

Montañés A, Olloqui I, Calvo E (2005) Selection of the break in the Perron-type test. *J Econom* 129:41–64

Montañés A, Reyes M (1998) Effect of a shift in the trend function on Dickey-Fuller unit root tests. *Econometric Theory* 14:355–363.

Oxley, L. and D. Greasley (1995) A time series perspective on convergence: Australia, UK and USA since 1870, *The Economic Record*, 71, 259–270

Pearce, D.W. y Warford, J.J., 1993, World without end New York: Oxford University Press

Perron P (1989) The Great Crash, the oil price shock and the unit root hypothesis. *Econometrica* 57:1361–1401

Perron P, Yabu T (2009) Estimating Deterministic Trends with an Integrated or Stationary Noise Component" *Journal of Econometrics* 151 (2009), 56-69.

Quah DT (1993) Empirical cross-section dynamics in economic growth. *Eur Econ Rev* 37:426–434

Quah DT (1996) Convergence empirics across economies with (some) capital mobility. *J Econ Growth* 1:95–124.

Romero-Ávila, D. (2008). Convergence in carbon dioxide emissions among industrialised countries revisited. *Energy Economics* 30 2265–2282

Smith, K.R., Swisher, J. y Ahuja, D.R., 1993, Who pays to solve the problem and how much?

Strazicich, M.C., List, J.A. (2003). Are CO<sub>2</sub> emission levels converging among industrial countries? *Environmental and Resource Economics* 24, 263–271.

Tomljanovich M, Vogelsang TJ (2002) Are U.S. regions converging? Using new econometric methods to examine old issues. *Empir Econ* 27:49–62

Westerlund, J. and Basher, S. (2008). “Testing for convergence in carbon dioxide emissions using a century of panel data.” *Environmental and Resource Economics*, 20, 109–120.

**Cuadro 1. Contrastes de raíz unitaria**

	DF	CKP1	CKP2	CKP3	CKP4	CKP5
Australia	-2,59	<b>-3,77</b>	<b>-4,62</b>	<b>-5,18</b>	<b>-5,31</b>	<b>-6,05</b>
Austria	<b>-4,43</b>	<b>-5,30</b>	<b>-4,44</b>	<b>-4,51</b>	<b>-4,80</b>	<b>-5,04</b>
Bélgica	-2,93	-2,97	<b>-3,71</b>	<b>-5,31</b>	<b>-5,06</b>	<b>-5,23</b>
Canadá	<b>-4,19</b>	-2,14	-1,81	<b>-5,08</b>	<b>-7,85</b>	<b>-7,69</b>
Dinamarca	-2,22	-2,50	<b>-4,53</b>	<b>-4,76</b>	<b>-4,69</b>	<b>-5,22</b>
Finlandia	-1,64	<b>-4,79</b>	<b>-3,78</b>	<b>-6,15</b>	<b>-6,12</b>	<b>-6,17</b>
Francia	-2,54	<b>-5,17</b>	<b>-5,17</b>	<b>-5,38</b>	<b>-5,24</b>	<b>-6,29</b>
Alemania	<b>-3,66</b>	-2,43	-2,38	<b>-4,86</b>	-4,30	<b>-5,84</b>
Grecia	-0,29	<b>-3,86</b>	-3,41	<b>-5,63</b>	<b>-5,47</b>	<b>-6,46</b>
Islandia	<b>-4,48</b>	<b>-5,41</b>	<b>-4,55</b>	<b>-7,89</b>	<b>-6,74</b>	<b>-6,63</b>
Irlanda	<b>-5,13</b>	-2,67	-2,92	<b>-5,43</b>	<b>-5,60</b>	<b>-6,08</b>
Italia	-2,38	-2,47	<b>-4,22</b>	<b>-4,51</b>	<b>-4,61</b>	-4,72
Japón	-1,07	-2,67	<b>-5,31</b>	<b>-5,29</b>	<b>-5,34</b>	<b>-5,49</b>
Luxemburgo	-2,23	-2,39	-2,74	-3,22	-4,00	-4,41
Países Bajos	-2,07	<b>-3,82</b>	-3,21	<b>-4,27</b>	<b>-6,26</b>	<b>-6,23</b>
Nueva Zelanda	-2,52	-2,89	<b>-3,76</b>	-3,39	<b>-5,14</b>	<b>-6,05</b>
Noruega	-1,62	-2,94	-2,44	<b>-6,90</b>	<b>-4,18</b>	-4,09
Portugal	-2,09	-1,74	-2,56	-1,84	<b>-5,66</b>	<b>-5,98</b>
España	-1,74	-2,18	-2,45	-2,52	<b>-5,51</b>	<b>-5,81</b>
Suecia	-2,07	-1,75	<b>-5,58</b>	<b>-4,96</b>	<b>-5,03</b>	<b>-6,52</b>
Suiza	-1,62	-1,62	-2,18	<b>-5,21</b>	<b>-5,49</b>	<b>-8,73</b>
Reino Unido	-2,22	-1,71	-2,19	-2,05	<b>-4,91</b>	<b>-5,51</b>
United States	<b>-3,99</b>	<b>-5,12</b>	<b>-4,96</b>	<b>-6,21</b>	<b>-6,44</b>	<b>-6,48</b>

La segunda columna presenta los datos del estadístico Dickey-Fuller, mientras que el resto recoge los valores del estadístico CKP para 1-5 rupturas, respectivamente.

En negrita, aquellos casos en los que se rechaza la hipótesis nula al 5%.

En cursiva, aquellos casos en los que sólo se rechaza la hipótesis nula al 10%

Cuadro 2. Convergencia Estocástica.

	$\mu_{i1}$	$\beta_{i1}$	TB1	$\mu_{i2}$	$\beta_{i2}$	TB2	$\mu_{i3}$	$\beta_{i3}$	Tb3	$\mu_{i4}$	$\beta_{i4}$	TB4	$\mu_{i5}$	$\beta_{i5}$	TB5	$\mu_{i6}$	$\beta_{i6}$
Australia	0'02	0'01	1979	0'33	0'01												
Austria	-0'40	0'01	1969	-0'18	0'00	1980	-0'06	0'00									
Belgium	0'40	-0'01	1982	0'03	0'00	1993	0'08	-0'01									
Canada	0'52	-0'01	1957	0'22	0'03	1963	0'28	0'03	1982	0'34	0'01	1993	0'32	0'03			
Dinamarca	-0'33	0'03	1970	0'11	0'00	1990	0'15	-0'02									
Finland	-1'30	0'05	1969	-0'07	0'01												
France	-0'12	0'00	1983	-0'27	-0'01												
Alemania	0'00	0'06	1957	0'12	0'04	1963	0'19	0'00	1975	0'03	0'02	1984	0'09	0'00	1998	-0'09	0'01
Grecia	-2'30	0'05	1983	-0'33	0'01												
Islandia	-0'02	-0'02	1957	0'08	-0'03	1968	-0'33	0'00	1977	-0'23	0'00						
Irlanda	-0'32	-0'05	1958	-0'45	0'00	1971	-0'15	-0'05	1978	-0'25	0'01	1997	0'22	-0'03			
Italia	-1'69	0'05	1967	-0'52	0'01	1990	-0'16	-0'01									
Japón	-1'02	-0'06	1957	-0'94	0'01	1966	-0'24	-0'01	1973	-0'17	0'00						
Luxemburgo																	
Países Bajos	-0'16	0'00	1961	-0'05	0'00	1969	0'04	0'01	1981	-0'01	0'01	1996	0'07	-0'01			
Nueva Zelanda	0'24	-0'05	1967	-0'65	0'01	2001	0'05	-0'05									
Noruega	-0'62	-0'01	1965	-0'44	0'01	1989	-0'07	-0'05	1996	-0'09	0'00						
Portugal	-1'57	-0'08	1959	-1'88	0'02	1983	-0'69	-0'03	1992	0'08	-0'14	1999	0'21	-0'12			
España	-0'38	-0'15	1958	-0'60	-0'16	1964	-0'94	0'01	1976	0'06	-0'11	1983	-0'42	0'00			
Suecia	0'02	-0'05	1956	-0'14	0'02	1970	0'16	-0'03	1979	-0'05	-0'04	1983	-0'24	-0'05	2001	-0'26	-0'07
Suiza	-0'43	-0'12	1955	-0'29	-0'10	1961	-0'32	-0'02	1973	-0'26	-0'04	1982	-0'24	-0'03	1996	-0'37	-0'03
Reino Unido	0'18	0'08	1955	0'32	0'02	1961	0'28	-0'01	1968	0'03	0'00	1975	-0'14	0'02	1983	0'00	-0'01
United States	0'63	0'02	1982	0'66	0'00												

Este cuadro recoge las estimaciones del modelo (6) al aplicar el método de Perron-Tabu (2009). TB<sub>i</sub> son los diferentes períodos de ruptura.  
Los valores en cursiva implican que las estimaciones no son significativamente distintas de 0 al 10%.

Gráfico 1. Evolución total de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> (Fuente: CDIAC)

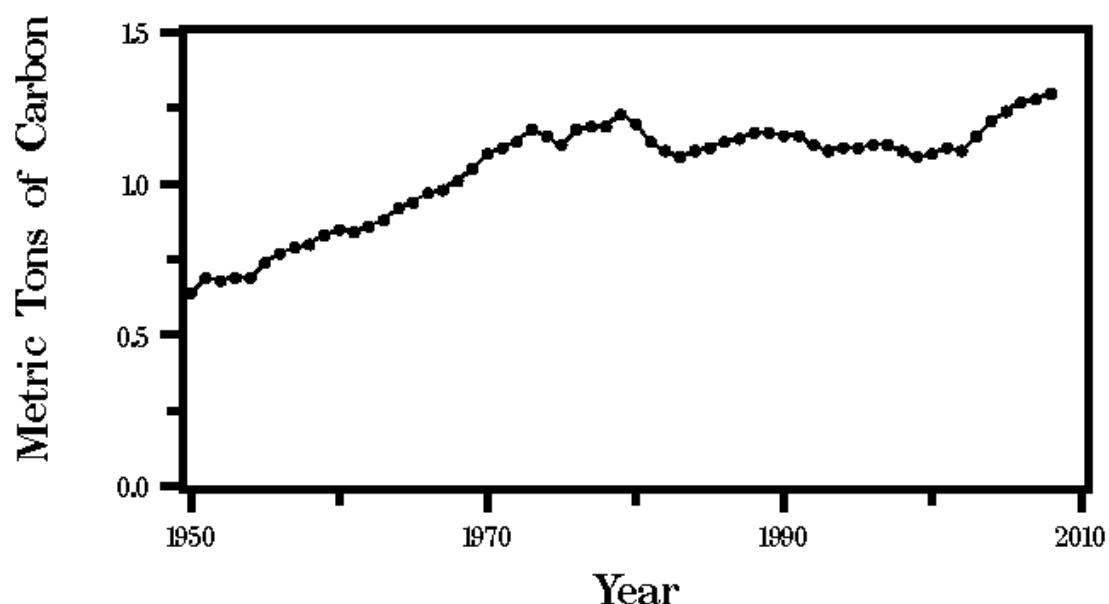
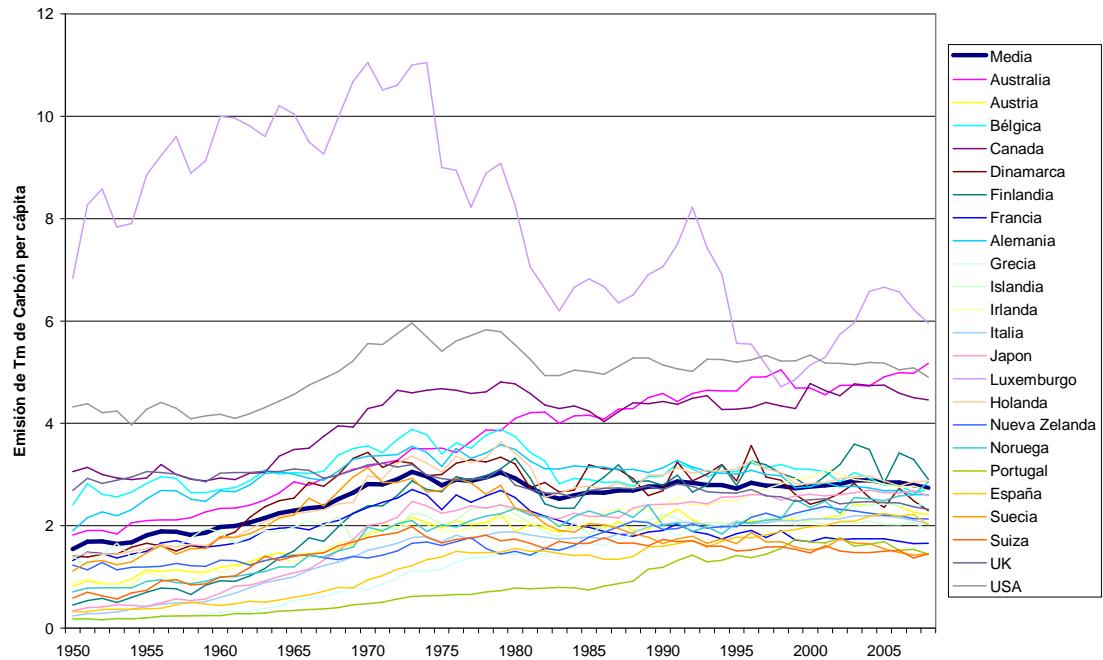
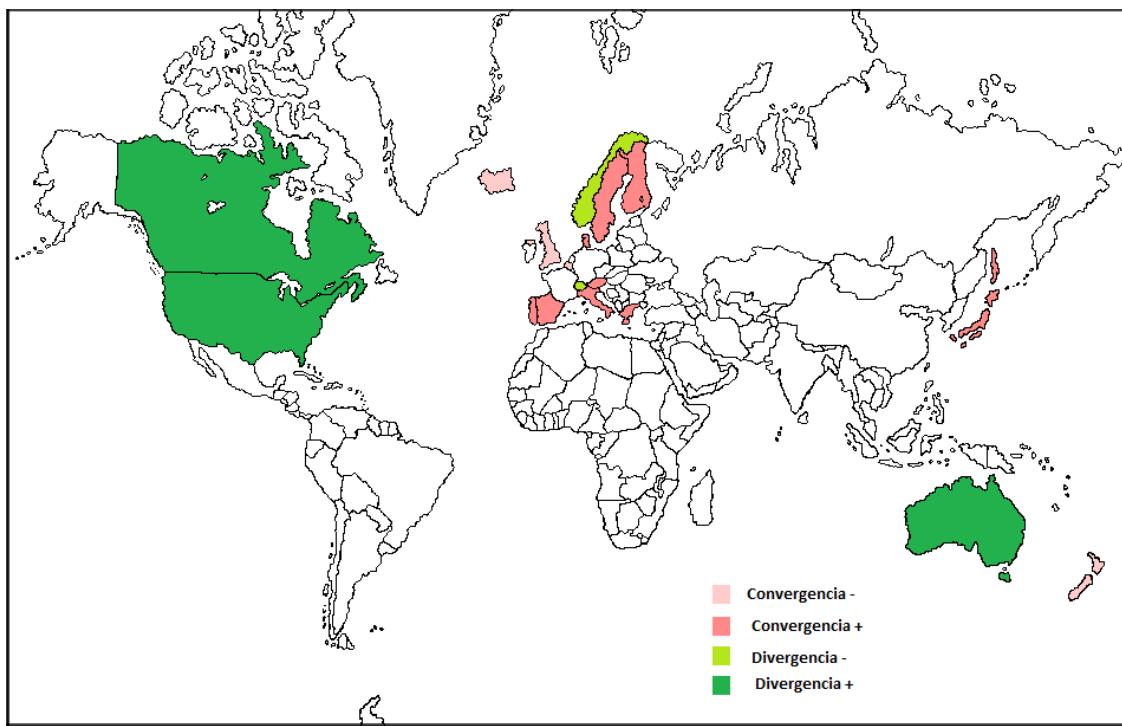


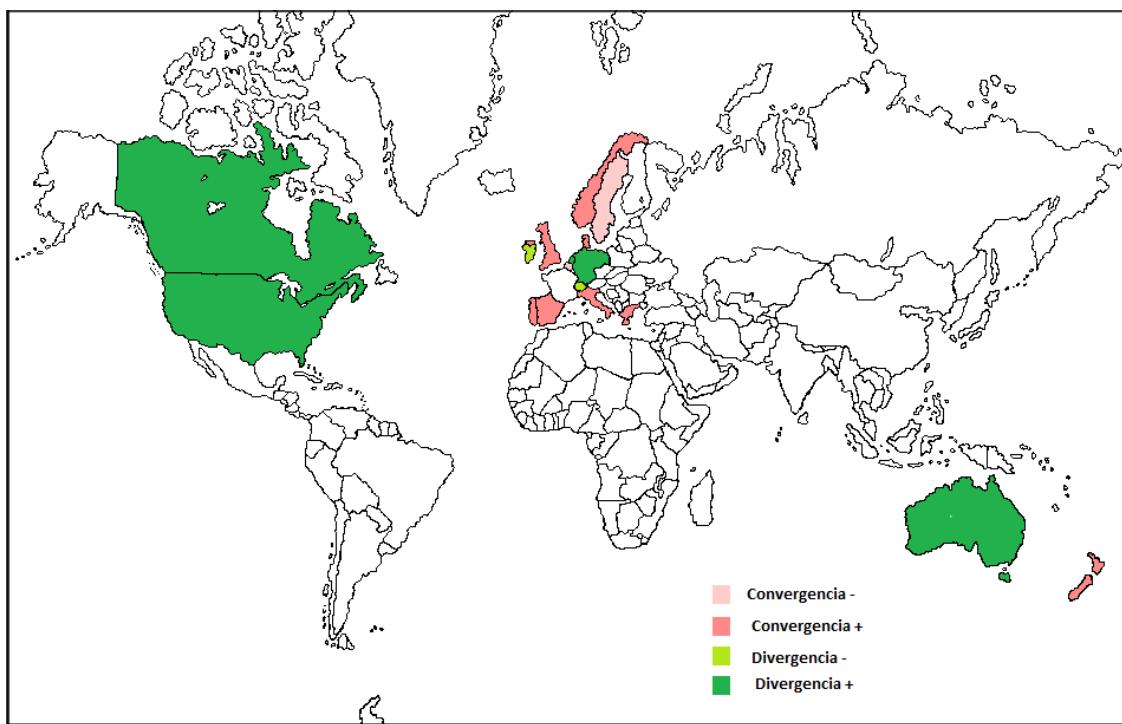
Gráfico 2. Evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita para cada uno de los países.



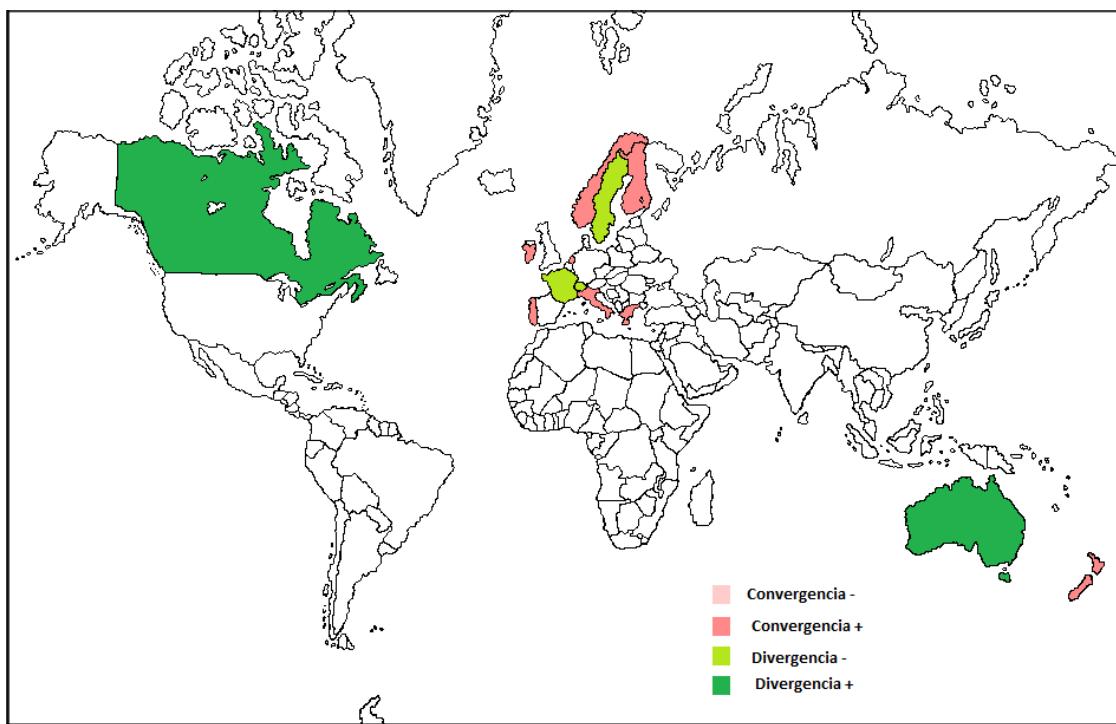
**Gráfico 3.  $\beta$  Convergencia en el año 1965**



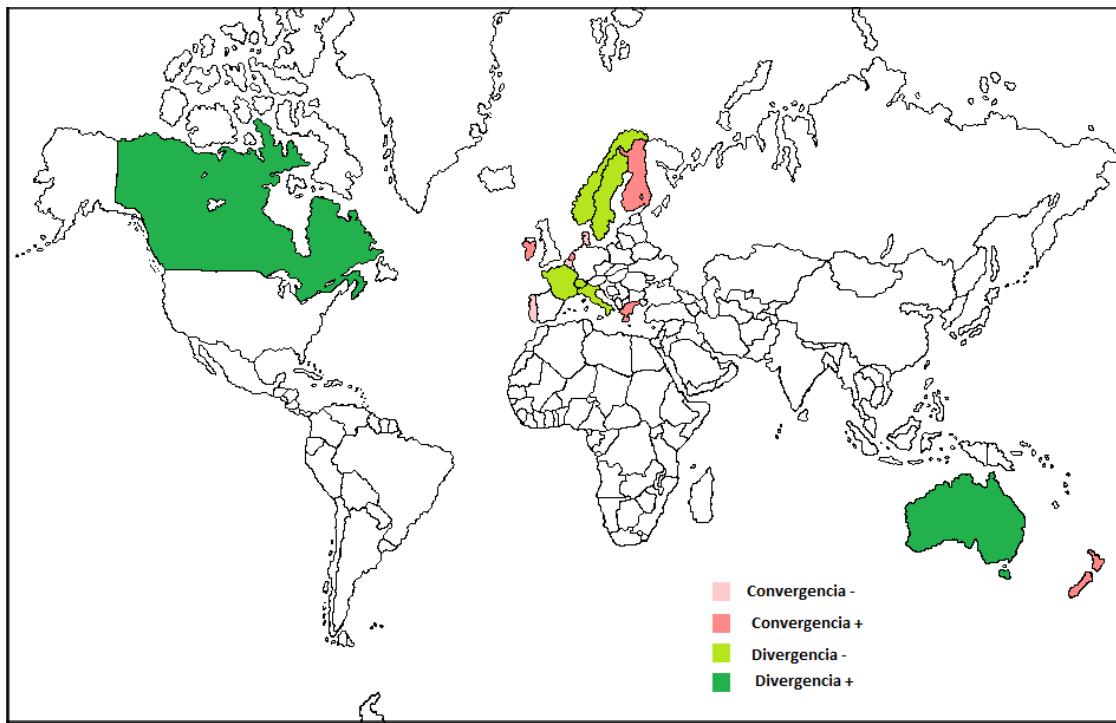
**Gráfico 4.  $\beta$  -Convergencia en el año 1975**



**Gráfico 5.  $\beta$  -Convergencia en el año 1985**



**Gráfico 6.  $\beta$  -Convergencia en el año 1995**



**Gráfico 7.  $\beta$  -Convergencia en el año 2005**

