

TRABAJO FIN DE GRADO

**LA DINÁMICA DE LA CONVERGENCIA EN EMISIONES
DE CO₂ EN LA OCDE**

Carbon Emissions convergence DYNAMICS in the OECD

Autoría: Paula Morro Tabares

Tutor: Gustavo A. Marrero Díaz

Grado en ECONOMÍA

FACULTAD DE ECONOMÍA, EMPRESA Y TURISMO

Curso Académico 2022 / 2023

ÍNDICE

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| CAPÍTULO 1: <u>INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS</u> | pág. 5 |
| 1.1 INTRODUCCIÓN | pág. 5 |
| 1.2 OBJETIVOS | pág. 5 |
| 1.3 ÁMBITO DE ESTUDIO | pág. 6 |
| CAPÍTULO 2: <u>PAPEL LAS EMISIONES DE CO₂</u> | pág. 6 |
| 2.1 BREVE RECORRIDO HISTÓRICO | pág. 6 |
| 2.2 EL CO ₂ , EL MAYOR RESPONSABLE | pág. 9 |
| 2.3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA | pág. 9 |
| CAPÍTULO 3: <u>ANÁLISIS DE CONVERGENCIA DE EMISIONES DE CO₂</u> | pág. 11 |
| 3.1 MOTIVACIÓN | pág. 11 |
| 3.1.1 BASE DE DATOS | pág. 12 |
| 3.2 ANÁLISIS DE LA CONVERGENCIA ABSOLUTA BETA EN EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO | pág. 13 |
| 3.2.1 ANÁLISIS BETA-CONVERGENCIA (β^{CO_2}) | pág. 14 |
| 3.2.2 EVOLUCIÓN DE LA BETA-CONVERGENCIA ($\beta^{CO_2}(t)$) | pág. 18 |
| 3.2.3 ESTADO ESTACIONARIO | pág. 19 |
| 3.2.4 COMPARATIVA: PRECIOS DEL PETRÓLEO Y EVOLUCIÓN DE LA BETA | pág. 20 |
| CAPÍTULO 4: <u>DESCOMPOSICIÓN DE BETA-CONVERGENCIA DE CO₂</u> | pág. 22 |
| 4.1 MARCO TEÓRICO: IDENTIDAD DE KAYA | pág. 23 |
| 4.2 METODOLOGÍA | pág. 24 |
| 4.3 RESULTADOS | pág. 26 |
| 4.3.1 CONVERGENCIA EN PIB PER CÁPITA | pág. 26 |
| 4.3.2 CONVERGENCIA EN INTENSIDAD ENERGÉTICA PER CÁPITA | pág. 27 |
| 4.3.3 CONVERGENCIA RATIO CO ₂ / ENERGÍA TOTAL (RELACIONADO CON EL MIX ENERGÉTICO) | pág. 28 |
| 4.4. DESCOMPOSICIÓN DE LA BETA | pág. 29 |
| CAPÍTULO 5: <u>CONCLUSIONES</u> | pág. 31 |
| CAPÍTULO 6: <u>BIBLIOGRAFÍA</u> | pág. 33 |
| CAPÍTULO 7: <u>ANEXO</u> | pág. 34 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| FIGURA 1 Concentraciones globales de CO ₂ en la atmósfera | pág. 7 |
| FIGURA 2 Emisiones anuales globales de CO ₂ | pág. 7 |
| FIGURA 3 Emisiones Globales de Gases de Efecto Invernadero por tipo de gas | pág. 9 |
| FIGURA 4 “Curva ambiental de Kutznets” | pág. 10 |
| FIGURA 5 Convergencia en PIB per cápita, por décadas (1960-2019) | pág. 16 |
| FIGURA 6 Convergencia en CO ₂ per cápita, por décadas (1960-2019) | pág. 17 |
| FIGURA 7 Evolución de la $\beta^{\text{CO}_2}(\text{t})$ | pág. 18 |
| FIGURA 8 Evolución de las emisiones de CO ₂ per cápita de cada país | pág. 19 |
| FIGURA 9 Comparación entre el precio petróleo BRENT europeo y $\beta(\text{t})^{\text{CO}_2}$ | pág. 21 |
| FIGURA 10 Evolución de la β -convergencia en PIB per cápita | pág. 26 |
| FIGURA 11 Evolución de la β -convergencia en Intensidad Energética | pág. 27 |
| FIGURA 12 Evolución de la β -convergencia CO ₂ /Energía Total | pág. 28 |
| FIGURA 13 Evolución de las diferentes β (CO ₂ , PIB, MIX, IE) | pág. 29 |
| FIGURA 14 Descomposición de la β^{CO_2} (áreas) | pág. 30 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| TABLA 1 Descomposición de β^{CO_2} por la Identidad de Kaya | pág. 34 |
|------------------------------------------------------------------------------------|---------|

RESUMEN

El análisis de la huella de carbono es crucial para la puesta en marcha de políticas destinadas a su reducción y a la mejora del medioambiente. Esta representa el volumen total de gases de efecto invernadero emitidos por el ser humano, expresada en toneladas de CO₂. Este trabajo investiga la hipótesis de convergencia en emisiones de dióxido de carbono en una muestra de países de la OCDE, que son los países que más contaminan por habitante en la actualidad. Mediremos los cambios de la velocidad de convergencia en emisiones entre 1960 y 2019 usando la reciente metodología de Kremer et al. (2021). Partiendo de la Identidad de Kaya, que relaciona las emisiones con factores económicos, energéticos y tecnológicos, descomponemos la velocidad de convergencia de CO₂ entre las velocidades de convergencia de estos componentes más un término de error. De este modo conseguimos entender los aspectos han provocado la reducción en convergencia de CO₂ en la OCDE que observamos en los últimos 20 años.

Palabras clave: emisiones, convergencia, dióxido de carbono, actividad económica, mix energético, intensidad energética.

ABSTRACT

Carbon footprint analysis is a fundamental element in the implementation of policies aimed at reducing the carbon footprint and improving the environment. It represents the total volume of greenhouse gases emitted by humans, expressed in tons of CO₂. The present paper investigates the hypothesis of convergence in carbon dioxide emissions in a sample of OECD countries, which are the countries that currently pollute the most per capita. Using the recent methodology of Kremer et al. (2021), we will measure changes in the rate of convergence in emissions between 1960 and 2019. Based on the Kaya Identity, which relates emissions to economic, energy and technological factors, we decompose the CO₂ convergence speed between the convergence speeds of these components plus an error term. This allows us to understand what has caused the reduction in CO₂ convergence in the OECD that we have observed over the last 20 years.

Keywords: emissions, convergence, carbon dioxide, economic activity (GDP), energy mix, energy intensity.

1.1 INTRODUCCIÓN

Los activos de origen natural son componentes fundamentales en el sistema económico. La naturaleza detenta un papel esencial como proveedor de recursos y bienes de carácter ambiental. No obstante, en la actualidad tanto los recursos minerales o los energéticos, como el suelo, los recursos biológicos o los hídricos se hallan sumergidos en una profunda crisis climática directamente provocada por la especie humana. Entre los muchos problemas a los que nos enfrentamos, podemos situar el calentamiento global entre los más preocupantes. La emisión de gases de efecto invernadero (GEI) provoca fenómenos meteorológicos extremos y devastadores, migraciones, inundaciones, sequías o cambios en los hábitats vírgenes. En definitiva, una alteración del planeta tal y como lo conocemos; una alteración que podría ser irreparable y acarrear secuelas en la perduración de las especies que habitamos en él.

Bien sea para la producción de electricidad, para la calefacción o para el transporte, la **quema de combustibles fósiles** se considera la principal culpable del aumento de la temperatura media de la superficie terrestre y de los océanos. Los expertos alertan de que hay que tomar medidas lo antes posible si queremos subsanar la puesta en peligro de nuestro futuro. Es cierto que estamos a tiempo, pero no significa que la cuenta atrás no esté llegando a su fin. Si se desea decretar leyes y políticas sensatas, eficientes y responsables, que alcancen una reducción efectiva de las emisiones de gases contaminantes, hemos de comprender tanto el comportamiento de esta variable, como sus dinámicas y los factores críticos que inciden en la toma de decisiones de los agentes o sectores que más contaminan. Con ello, identificaremos cuáles son los elementos con los que podemos jugar para modificar su tendencia.

1.2 OBJETIVOS

Este Trabajo de Fin de Grado tiene como fin esclarecer la existencia, o no, de convergencia entre una muestra de países de la OCDE en torno a unos ciertos niveles de emisiones de CO₂¹. Esperamos ofrecer mayor nitidez en la identificación de factores que han motivado el proceso de convergencia o, por el contrario, lo han desincentivado.

¹ La muestra constará de 25 países: Alemania, Australia, Austria, Bélgica, Canadá, Corea, Dinamarca, España, Estados Unidos, Finlandia, Francia, Grecia, Holanda, Hungría, Irlanda, Israel, Italia, Japón, México, Noruega, Polonia, Portugal, Reino Unido, Suecia y Suiza.

Comenzaremos examinando la **convergencia en emisiones de CO₂** entre dichos países utilizando la metodología expuesta en el trabajo de Kremer, et al. (2021). Tras ello, detallaremos qué aspectos macroeconómicos variables pueden estar asociados con la dinámica de las emisiones. Para ello, partimos de la **“Identidad de Kaya”**, que relaciona factores económicos, energéticos y ambientales.

1.3 ÁMBITO DE ESTUDIO

La predominancia del dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera justifica la elección de este gas como principal variable de análisis en este trabajo. Solucionar su exceso resulta todo un desafío, sobre todo teniendo en cuenta su vida media ya que tiene la capacidad de permanecer en el aire durante décadas. En el siguiente capítulo se detallarán las características o hechos que hacen que adquiera relativa importancia con respecto al resto de gases.

CAPÍTULO 2

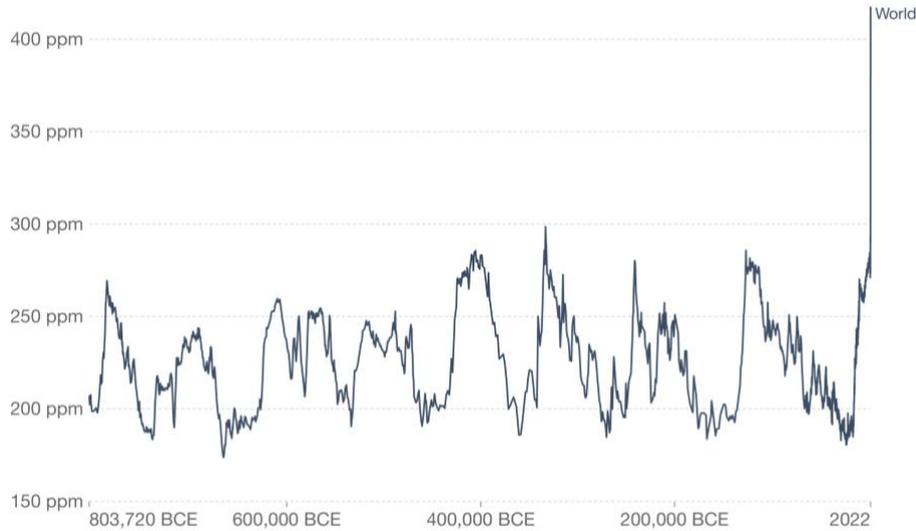
PAPEL DE LAS EMISIONES DE CO₂

El dióxido de carbono (CO₂) es un compuesto de carbono y oxígeno; un gas incoloro que resulta pieza clave dentro del ecosistema. Desempeña labores esenciales tanto para nuestra supervivencia, como la de los demás seres vivos. El ser humano lo desprende al respirar; las plantas lo captan para llevar a cabo la fotosíntesis. Además, es el responsable de retener el calor solar e impedir que el planeta se enfríe; una labor esencial para nuestra supervivencia. El ecosistema global está diseñado para que el dióxido de carbono sea fundamental en la conservación de la vida, no para destruirla. Si es tan necesario para la perduración de la Tierra tal y cómo la conocemos, entonces **¿desde cuándo se demoniza al CO₂?**

2.1 BREVE RECORRIDO HISTÓRICO

Como podemos observar en la **Figura 1**, las concentraciones de CO₂ en la atmósfera seguían un patrón cíclico y estable a lo largo de toda la historia del planeta. No obstante, al final del siglo XVIII y principios del XIX, se aprecia un acelerado incremento en los datos registrado.

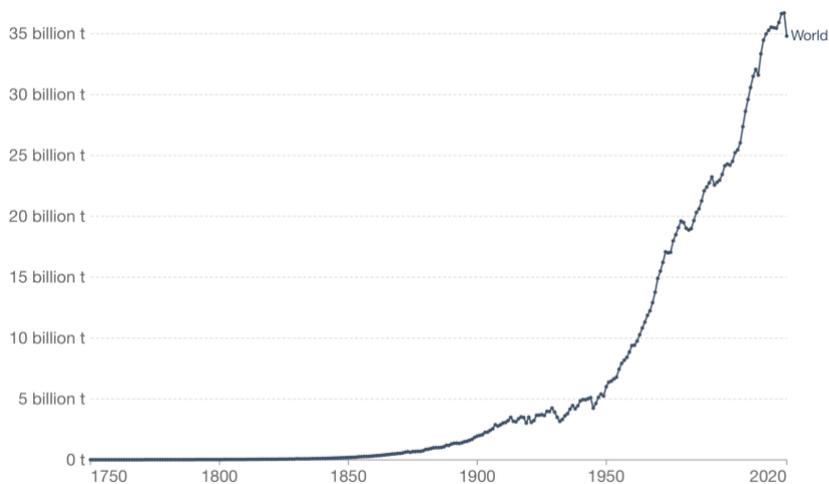
FIGURA 1: Concentraciones globales de CO₂ en la atmósfera



Fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration (Our World in Data)

Lo mismo podemos observar en la **Figura 2** que representa las emisiones globales de CO₂ anuales. Sin embargo, es al finalizar la Segunda Guerra Mundial cuando se experimenta la subida más intensa. Se desata un imparable y desorbitado ascenso en la tasa de crecimiento de las emisiones y de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera, que se mantendrá constante durante el resto del siglo XX y principios del XXI.

FIGURA 2: Emisiones anuales globales de CO₂



Fuente: Global Carbon Project (Our World in Data)

Durante este horizonte temporal dan lugar la Primera y la Segunda Revolución Industrial. Ambas sostienen el **modelo de crecimiento económico** contemporáneo, caracterizado en un principio por el avance en la eficiencia de los procesos y productividad.

Las mejoras tecnológicas del momento y el uso de nuevas fuentes energéticas fueron necesarias para el progreso. Todo ello, en un contexto de boom demográfico, un intenso proceso de urbanización, mejoras en los sistemas educativos y progreso en las redes de comunicación y en el transporte. Fue una combinación perfecta que impulsó una expansión sin precedentes de las emisiones de CO₂. Se sostuvo prácticamente tres décadas y dio lugar a niveles de renta per cápita muy superiores a lo visto previamente y a mejoras sustanciales en el bienestar de los países occidentales. No obstante, el patrón económico y de desarrollo industrial y tecnológico que caracterizó esta *Edad de Oro del Capitalismo* (1945-1975) se apoyó en un **modelo energético altamente contaminante**. Es cierto que la gran emisión de gases a la atmósfera ha traído consigo altos niveles de riqueza y bienestar. Sin embargo, han sido muchas y muy peligrosas las consecuencias que ha provocado y, sobre todo, puede provocar. Consecuencias sobre la supervivencia de los seres vivos que la habitamos y sobre nuestro bienestar, tanto presente como futuro.

Durante estos últimos años el ritmo de crecimiento de las emisiones está siendo alarmante. Las cifras de concentración de gases de efecto invernadero son desmesuradas y suponen una gran preocupación teniendo en cuenta la larga capacidad que tiene este gas de permanecer en la atmósfera, junto a los efectos negativos que supone el tener cantidades excesivas permanentemente en ella.

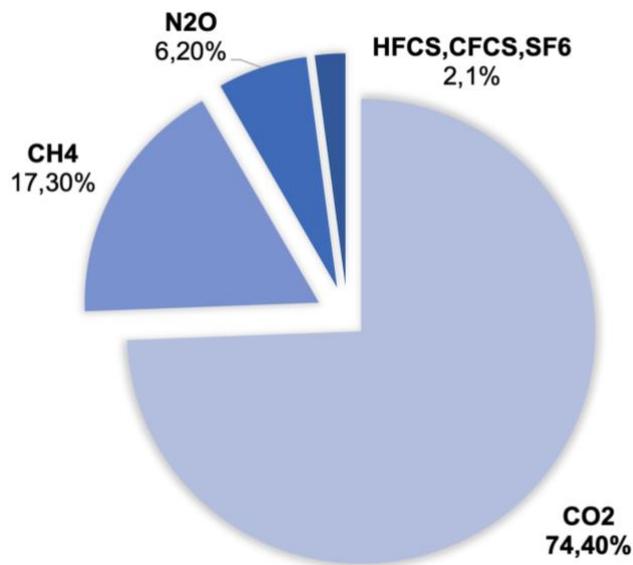
Además, la acumulación de dióxido de carbono no solo implica pérdidas en materia ambiental. Estas concentraciones implican graves consecuencias económicas que alarman a instituciones, gobiernos y organismos internacionales, que necesitan poner en marcha mecanismos de mejora con la inevitable ayuda del sector privado. Así quedó documentado en el informe *Stern*. Este fue redactado por el economista Nicholas Stern, antiguo miembro del Banco Mundial, por encargo del Tesoro Británico. En él se muestra el impacto del calentamiento global sobre la economía mundial, describiéndose sus efectos sobre las magnitudes económicas. El incremento medio de entre 2 y 3 grados centígrados podría provocar una pérdida de hasta el 3% del Producto Interior Bruto (PIB) del mundo. Si el calentamiento fuera más elevado y oscilara entre 5 y 6 grados centígrados, la pérdida podría alcanzar el 10%.

2.2 EL CO₂, EL MAYOR RESPONSABLE

El dióxido de carbono es responsable de un 75% del total del calentamiento global Richie et al. (2020), mientras las aportaciones de los demás gases dominantes son mucho más reducidas: el metano (CH₄), un 17,3%; el óxido nitroso (N₂O), un 6,2%; y el conjunto restante de gases de efecto invernadero (como los hidrofluorocarburos (HFCs), los clorofluorocarburos (CFCs) o el hexafluoruro de azufre (SF₆)), un 2,1%.

En el **Gráfico 1** observamos el desglose de las emisiones mundiales en 2016, medidas en sus equivalentes de dióxido de carbono (CO₂).² Esta es la métrica estándar utilizada para cuantificar las emisiones de GEI, adoptada por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC).

FIGURA 3: Emisiones Globales de Gases de Efecto Invernadero por tipo de gas



Fuente: Our World in Data (2020). Elaboración propia

2.3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

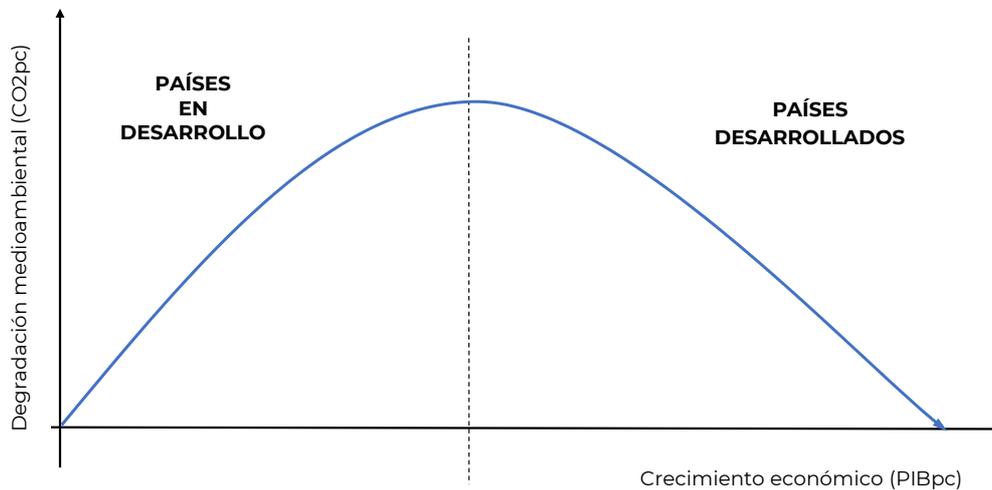
Entre la literatura económica procederemos a realizar una búsqueda para encontrar la relación entre los niveles de contaminación y la riqueza de una nación. Fueron numerosos los autores que intentaron dar respuesta y

² Para convertir los diferentes gases en equivalentes de dióxido de carbono hemos de multiplicar su masa por su potencial de calentamiento global (PCG), que mide el impacto del calentamiento de un gas en comparación con el CO₂. La escala temporal oficialmente elegida son los 100 años.

explicar la creciente concentración de gases y su relación con la evolución de las economías. En nuestro caso, escogeremos la obra del economista Simon Kuznets. Fue Premio Nobel de Economía de 1971 por sus interpretaciones sobre los efectos económicos de diferentes factores medioambientales; sobre el proceso de transformación de la estructura productiva de las diferentes economías según su grado de desarrollo; y sobre el crecimiento económico y sus consecuencias (Abramovitz, 1986).

En su famosa obra, “la Curva Ambiental de Kuznets” (véase Iglesias y Golpe, 2011), plantea una interpretación teórica sobre la trayectoria de los niveles de contaminación de una economía y su relación con la equivalente del Producto Interior Bruto (PIB). En los escritos, su principal premisa es simple y clara. Llegó a la siguiente conclusión: a medida que una economía experimentaba un crecimiento del PIB per cápita, este venía acompañado de mejoras en materia ambiental. Es decir, “a mayor riqueza, menores emisiones”. No obstante, la relación entre el crecimiento económico y la calidad ambiental no la describe como lineal. Él propone una en forma de U invertida (**Figura 4**), describiendo el proceso de transformación de la estructura productiva de las economías a medida que van creciendo. Las etapas serían las siguientes:

FIGURA 4: “Curva ambiental de Kuznets”



Fuente: “La Curva de Kuznets y la Emisión de CO2” (Abramovitz, M.). Elaboración propia.

1. En un primer instante, las denominadas “economías emergentes”. Ellas apuestan por sectores de baja carga tecnológica y poca inversión inicial. Es decir, se especializan mayoritariamente en aquellos de carácter primario, como la agricultura, históricamente poco contaminantes. Podemos

observar en el gráfico esta etapa, donde las economías contemplan bajos niveles de PIB per cápita y su calidad medioambiental suele ser alta.

2. Con el fin de incrementar su riqueza, estas redireccionan su enfoque productivo hacia actividades más eficientes. Pasan a una segunda etapa donde se verán sumergidas en un proceso industrializador basado en la quema de combustibles fósiles como principal fuente de energía, debido a su bajo coste. Ello significa que se expandirán, pero a costa de mayores niveles de degradación ambiental.
3. En la última fase, una vez alcanzado cierto grado de riqueza, se da lo que se denomina *terciarización* de una economía. Este fenómeno produce una reforma y reajuste del esquema sectorial donde el peso de los servicios se impone en detrimento del sector industrial. El incremento de la renta de los consumidores (en su mayoría, familias) es la principal causa del aumento en la proporción de las actividades terciarias sobre el PIB, ya que les es posible incrementar su consumo en servicios que mejoran su calidad de vida (salud, educación, seguros, transportes, ocio, ...). Estamos hablando de países que alcanzan la denominación de "avanzados" o "desarrollados". Como podemos observar en la parte derecha de la gráfica, las emisiones alcanzarían su máximo, pero comenzarían a decrecer por el mayor peso de la producción de estos bienes inmateriales.

Otra interpretación, según Dinda (2004), es que existe un momento en el que un país alcanza un nivel de vida lo suficientemente alto como para que las personas lleguen a valorar cada vez más las comodidades ambientales, por lo que su disposición a gastar en productos más "verdes" es mayor y el daño medioambiental disminuye.

Según la investigación de Capó Parrilla (2005), se avala empíricamente la relación entre *la calidad ambiental y el crecimiento económico* para países europeos, acorde con la hipótesis de la Curva Ambiental de Kuznets, tanto para los contaminantes con efectos locales y a corto plazo [...] como para el caso de contaminantes con efectos más globales y a largo, como el dióxido de carbono y los gases de efecto invernadero.

CAPÍTULO 3 **ANÁLISIS DE CONVERGENCIA DE EMISIONES DE CO₂**

3.1 MOTIVACIÓN

Los estudios para predecir el comportamiento de las emisiones de CO₂ -así como para identificar sus determinantes y analizar su evolución- han cobrado mucho interés entre el mundo académico, pero también entre la

clase política. La gravedad, las consecuencias expuestas en las secciones anteriores y las **desigualdades** internacionales justifican el interés, la prioridad y la atención que se muestra por las distintas naciones, instituciones y organismos intergubernamentales.

El comportamiento de las emisiones ha sido objeto de estudio para la propuesta e implementación de distintas políticas que tienen como fin reducir el impacto negativo que tienen sobre el planeta. La multiplicidad de factores que influyen en esta variable (históricos, demográficos, tecnológicos, institucionales, económicos, sociales, ...) muestran la complejidad del análisis y son la clave para entender el porqué de las desigualdades en la evolución y en los niveles de contaminación de las distintas regiones.

El mandato de la CMNUC indica que para lograr la estabilización de las emisiones de efecto invernadero se requiere de la participación y esfuerzo conjunto de las potencias en desarrollo, como los países más desarrollados. A pesar de la indudable responsabilidad histórica – y contemporánea– de los países industrializados, las eminentes tasas de crecimiento de las potencias emergentes, como China o India, hacen necesario que para el alcance de cualquier meta en la reducción de emisiones dependa de su completa colaboración.

Escogeremos un grupo de países pertenecientes a la OCDE para analizar la existencia (o no) de convergencia en emisiones de CO₂ y tener conocimiento de lo que está ocurriendo. Nos ayudará a entender si se están reduciendo o aumentando las disparidades entre las potencias más y menos contaminantes y, en su caso, si estas andan sumergidas en un proceso de convergencia hacia un mismo estado estacionario o si se da la posibilidad de que los resultados apunten a que los países están convergiendo a estados estacionarios diferentes (Mora, 2003).

Para el análisis hemos escogido 25 países de la OCDE: Alemania, Australia, Austria, Bélgica, Canadá, Corea, Dinamarca, España, Estados Unidos, Finlandia, Francia, Grecia, Holanda, Hungría, Irlanda, Israel, Italia, Japón, México, Noruega, Polonia, Portugal, Reino Unido, Suecia y Suiza.³

3.1.1 BASE DE DATOS

Los datos los obtenemos de la Agencia Internacional de la Energía (AIE). Esta es un organismo autónomo en el marco de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). Entre sus numerosos objetivos, compartidos por sus 28 miembros se encuentra el de *promover*

³Excluiremos por falta de datos a los siguientes países: Chile, República Checa, Nueva Zelanda, Eslovaquia y Eslovenia. Asimismo, hemos decidido no introducir en la muestra del segundo estudio a Luxemburgo e Islandia por sus especificidades energéticas.

políticas energéticas racionales y ayudar en la integración de las políticas ambientales y energéticas.

Para ello, una de sus funciones principales es la de generar publicaciones crítico-analíticas sobre el sector energético y sus dinámicas; realizar estudios y análisis de los diferentes países; y disponer de estadísticas de los sectores y los mercados energéticos para su explotación por parte de expertos, académicos o quien lo considere. La siguiente tabla resume las principales variables usadas en este estudio y sus unidades de medida.

| Nombre | Breve descripción | Unidad de medida |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CO₂ per cápita | <p>Las emisiones de CO₂ per cápita miden las emisiones anuales medias por persona de un país. Se calcula dividiendo las emisiones anuales totales de un país por su población.</p> <p>Esta variable recoge todas las emisiones procedentes de la producción de energía (carbón, petróleo, gas y combustión) además de las emisiones industriales directas procedentes de la producción de acero y cemento. No incluye las emisiones derivadas del cambio del uso del suelo.</p> | Emisiones de CO ₂ en toneladas equivalentes por habitante. |
| PIB per cápita | El ingreso o renta per cápita es un indicador económico que mide la relación existente entre el nivel de renta de un país y su población. | Producto Interior Bruto de un país en dólares corrientes por habitante y año. |
| Intensidad de carbonización | Se mide el porcentaje que representa la energía obtenida por la emisión de CO ₂ del total de energía consumida. Está estrechamente relacionado con el mix energético de las economías. | Emisiones de CO ₂ en toneladas equivalentes de un país entre el gasto total de energía de este. |
| Intensidad Energética | Es un indicador de (la inversa) de la eficiencia energética de una economía. Indica la cantidad de unidades de energía que se necesitan para producir una unidad de riqueza. | Gasto o consumo total de energía de un país entre su PIB. |

3.2 ANÁLISIS DE LA CONVERGENCIA ABSOLUTA BETA EN EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO

En este apartado 3.2 vamos a realizar **dos estudios**. En primer lugar, vamos a calcular y representar la beta-convergencia en emisiones de CO₂ en de los diferentes países a lo largo de las décadas que transcurren entre 1960 y 2019. El segundo análisis lo centraremos en cómo ha variado esa beta conjunta de esos países a lo largo de esos años. Es decir, en vez de tener una medida de convergencia para todo el periodo analizado (para los 59 años o uno para cada década), estimaremos un coeficiente que cambien en el tiempo. Lo segundo nos permitirá asociar la evolución de una medida de

convergencia con el ciclo económico, o con cambios en variables energéticas (la eficiencia energética o la penetración de renovables), o el precio del petróleo o cambios sectoriales, entre otros. También será relevante comparar las estimaciones de la dinámica de convergencia de las emisiones con las obtenidas para el PIB per cápita o variables energéticas.

3.2.1 ANÁLISIS BETA-CONVERGENCIA (β^{CO_2})

En este apartado describiremos los resultados conseguidos del estudio de la **beta-convergencia** en emisiones de CO₂ per cápita y su evolución a lo largo de las distintas décadas que transcurren de 1960 hasta el 2019. Este se considera un estudio previo que únicamente debe contextualizar y motivar el propuesto en el siguiente apartado (3.2.2).

En primer lugar, compararemos la beta-convergencia de las dos principales macromagnitudes objeto de estudio en este trabajo: el CO₂ per cápita y el PIB per cápita. Tal y como se discutió en el Capítulo 2, existe una relación estrecha entre la calidad ambiental y la riqueza de una economía en países desarrollados. En este sentido, es relevante analizar si esta relación se traslada a la velocidad de convergencia, y si esta asociación cambia con el tiempo.

Nuestro marco de análisis de partida es el trabajo de Kremer et al. (2021), quienes analizan la dinámica de convergencia para el PIB per cápita a nivel mundial. Aquí se adapta este marco al caso de las emisiones de CO₂ y a nuestra muestra de países de la OCDE. El modelo de partida es el siguiente (lo expresamos de manera genérica):

$$(1) \quad \log(X_{i,t}) - \log(X_{i,t-1}) = \alpha + \beta(X_{i,t}) + \varepsilon_{i,t}$$

Esta relaciona la tasa de variación de una variable (X) con un término constante (alfa); la variable que se estudia por el coeficiente que indica la convergencia (beta) y un término de error (épsilon). El coeficiente alfa representa los factores persistentes que en algunos casos retardan (en el caso en el que el coeficiente tenga signo negativo) y en otros casos impulsan (coeficiente con signo positivo) el crecimiento del producto per cápita de cada uno de los países. El signo del coeficiente responde a causas estructurales como la configuración institucional del país, rasgos históricos, ...

Por otro lado, tenemos la beta (Barro y Sala-i-Martin, 2003): la existencia de un proceso de **beta-convergencia** entre un grupo de países se da si los más rezagados han tenido tasas de crecimiento mayores (en promedio) que los más avanzados. De verificarse este fenómeno, el coeficiente beta será

negativo. Llevado a las variables de nuestro estudio tendríamos las siguientes interpretaciones y sus respectivas regresiones:

- **PIB per cápita:** se dice que se ha dado el proceso de beta convergencia si se observa que los países pobres han crecido más que los ricos, es decir, si observamos que aquellos con rentas per cápita más bajas crecen a tasas superiores.

$$(2) \quad \log(\text{PIBpc}_{i,t}) - \log(\text{PIBpc}_{i,t-1}) = \alpha + \beta(\text{PIBpc}_{i,t}) + \varepsilon_{i,t}$$

- **Emisiones de CO₂ per cápita:** el proceso de beta-convergencia se dará si los países con mayores emisiones consiguen disminuir el diferencial respecto a los menos contaminantes, al mismo tiempo que estos aumentan su posición relativa. Lo ideal sería que esto se diera, no por mayores incrementos del nivel de CO₂ emitido, si no como consecuencia de la reducción de emisiones de los que más contaminan.

$$(3) \quad \log(\text{CO}_2\text{pc}_{i,t}) - \log(\text{CO}_2\text{pc}_{i,t-1}) = \alpha + \beta(\text{CO}_2\text{pc}_{i,t}) + \varepsilon_{i,t}$$

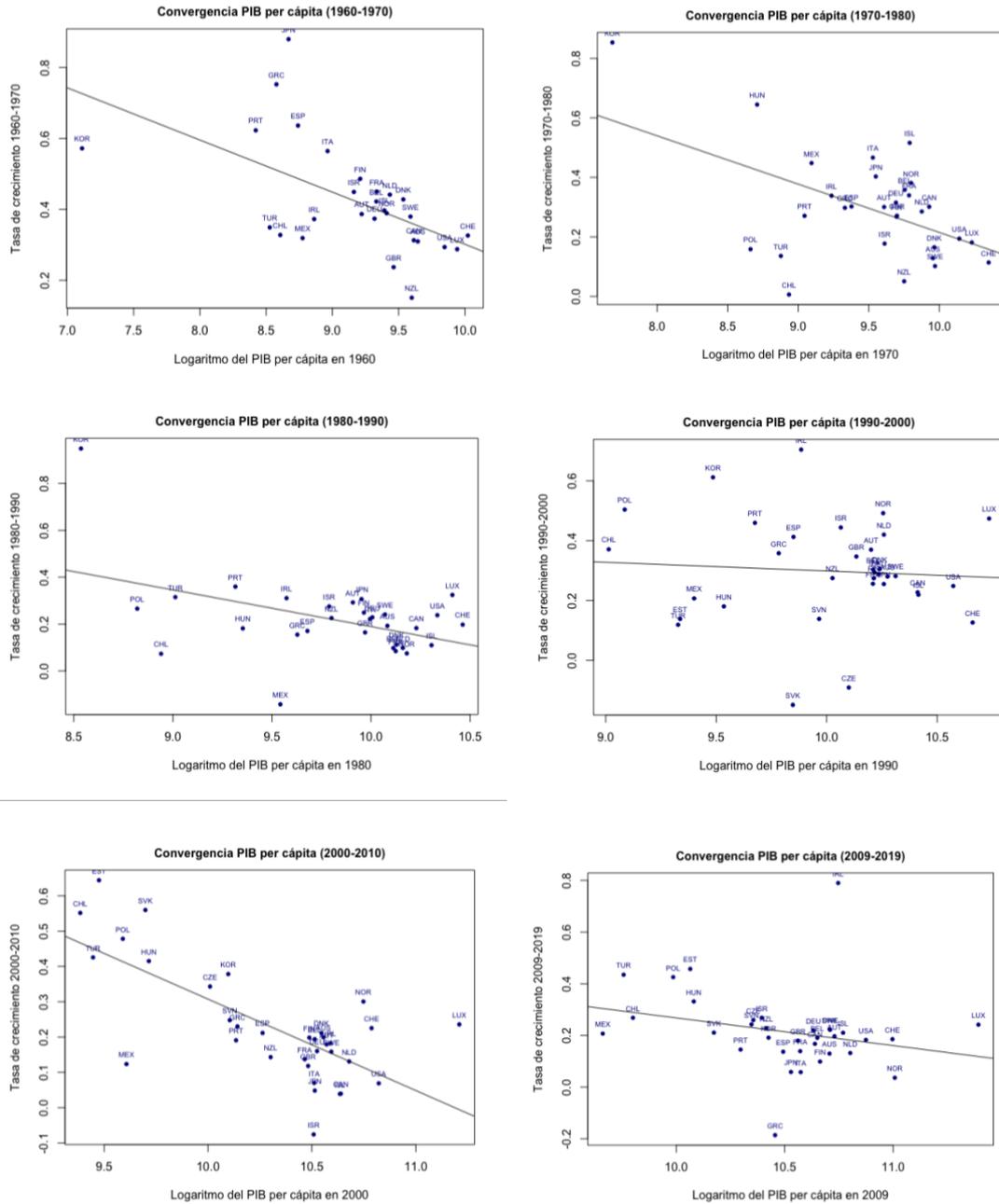
El resultado de estas ecuaciones de beta-convergencia, para un determinado conjunto de países y años, se puede representar en un sencillo gráfico de nube de puntos: enfrenta el crecimiento anualizado de la variable en el periodo frente a su valor inicial al comienzo del periodo (**Figura 5** y **Figura 6**). Como primera aproximación a analizar la dinámica de la velocidad de convergencia, realizamos estos gráficos por décadas.

En la **Figura 5**, mostramos los resultados para el **PIB per cápita**. En general, las pendientes son negativas en todas las décadas, por lo que ha existido proceso de convergencia entre estos países en esta variable. La pendiente negativa de la recta ajustada indica que la tasa de crecimiento ha sido mayor en los países inicialmente más pobres.

A pesar de ello, observamos que la intensidad de este ha ido variando, dependiendo del periodo. La evidencia indica que los países de menor renta crecieron a tasas superiores que los más avanzados especialmente durante la década de 1960 y mitad de los setenta. Desde 1975, tras la primera crisis del petróleo, que el proceso de convergencia experimenta un estancamiento hasta el periodo de expansión precedente a la última crisis económica de los noventa. También resaltamos los primeros años del siglo XXI como una etapa de reducción de los diferenciales de renta, previos a la Gran Recesión que dio lugar en 2008, donde se ha vuelto a estancar el proceso de convergencia en PIB per cápita.⁴

⁴ Al menos en el caso europeo, este proceso de convergencia ha sido impulsado mayoritariamente por el proceso de integración de la Unión Europea, destacando los beneficios que traen consigo la creación del Mercado Interior (libre movilidad de factores, ...) y los acuerdos firmados entre ellos (Maastricht (1992), Lisboa (2007), ...).

FIGURA 5: Convergencia en PIB per cápita por décadas (1960-2019)

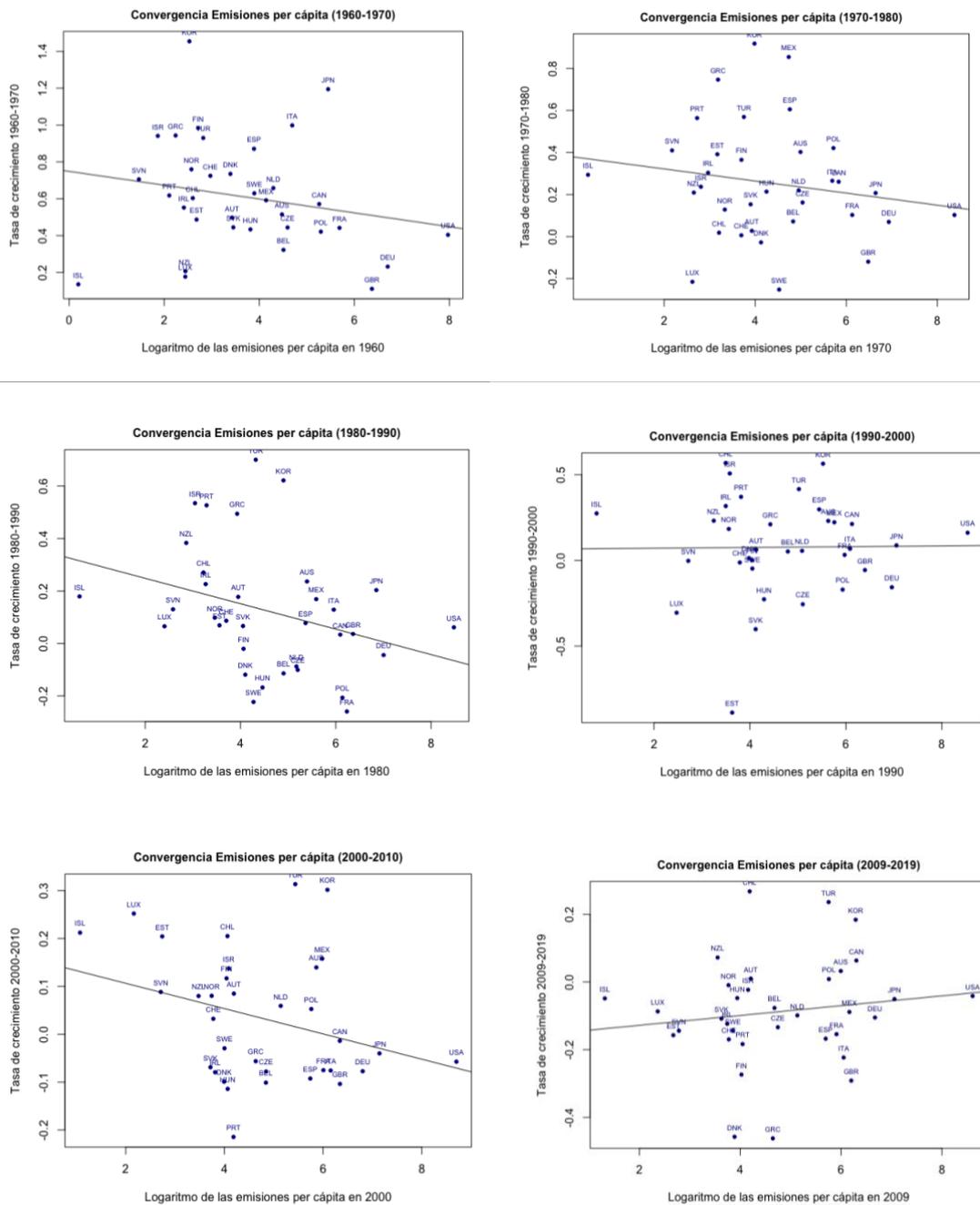


Fuente: Agencia Internacional de la Energía. Elaboración propia

En la **Figura 6** replicamos este análisis, pero para las emisiones de CO₂ per cápita. Teniendo en cuenta la evolución de los coeficientes beta de la variable PIB per cápita, expuestos previamente, y la relación entre estas según la Curva de Kuznets medioambiental, esperamos alguna asociación entre ambas medidas. Tras examinar los resultados, esta asociación no es todo lo estrecha que se esperaba inicialmente. Además, parece que las emisiones están

convergiendo incluso a niveles más lentos que los asociados con el PIB per cápita. En ninguna década se observa una pendiente negativa altamente significativa. La década de los 2000, es casi la única en la que se observa una aceleración clara de la convergencia en emisiones; esta década de mayor convergencia también coincide con la del PIB per cápita. En la década reciente, hay un freno claro de la convergencia.

FIGURA 6: Convergencia en CO₂ per cápita por décadas (1960-2019)

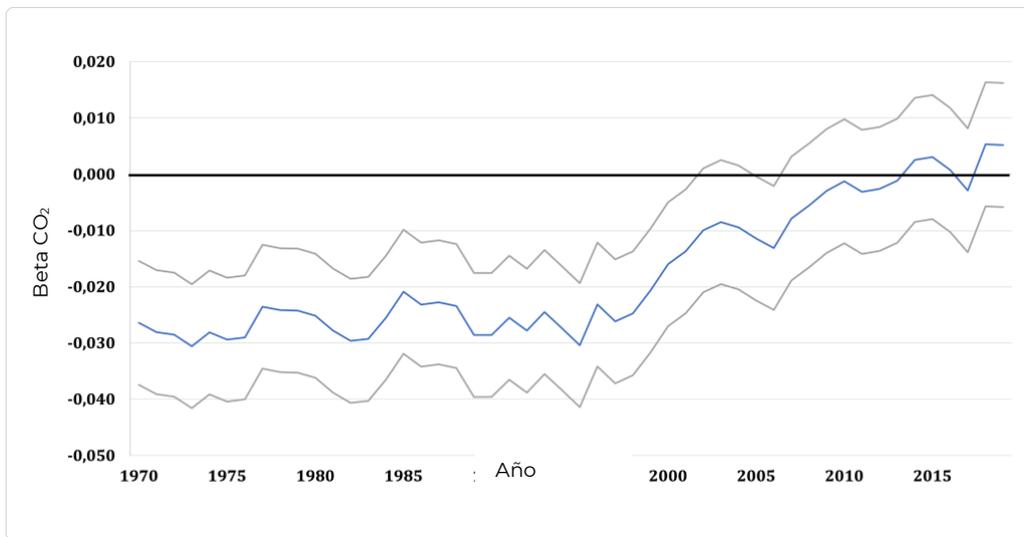


Fuente: Agencia Internacional de la Energía. Elaboración propia

En general, se observa que, desde la década de los ochenta, el proceso de convergencia se ve alterada como resultado de dos fuerzas divergentes: *los países de alta emisión per cápita se mantienen en sus niveles, incluso aumentan los diferenciales en relación con el resto, mientras que los países con menos no se aproximan hacia los valores medios, si no que se mantienen o alejan de ellos* (Montañés Bernal, 2012).

3.2.2 EVOLUCIÓN DE LA BETA-CONVERGENCIA ($\beta^{\text{CO}_2}(\text{t})$)

FIGURA 7: Evolución de la $\beta^{\text{CO}_2}(\text{t})$



Fuente: Agencia Internacional de la Energía. Elaboración propia

Analizamos a continuación la evolución dinámica de la velocidad de convergencia, medida por el parámetro beta de las ecuaciones de convergencia (3). Para calcular esta beta cambiante en el tiempo ($\beta(\text{t})$), seguimos la propuesta de Kremer et al. (2021), y usamos una técnica de *rolling* para realizar estimaciones recursivas: calculamos una beta para cada año, empezando con la estimación entre 1960 y 1970, y añadiendo y quitando un año en periodos sucesivos. Así, estimaremos un coeficiente para cada año y podremos dibujar su trayectoria.

Así, la beta para 1970 representará el coeficiente de convergencia entre el año 1970 y 1960. Para 1971, el coeficiente de convergencia entre 1971 y 1961. Y así sucesivamente. Por ello, el lector observará que se perderán diez datos, porque cada ventana temporal consta de una década. Tras su cómputo, plasmados los resultados gráficamente en la **Figura 7**, donde se muestra no sólo la estimación puntual sino también sus intervalos de confianza.

La convergencia actual en emisiones de CO_2 es nula. Pero esto no ha sido así siempre. De hecho, en la primera parte de la muestra (antes de

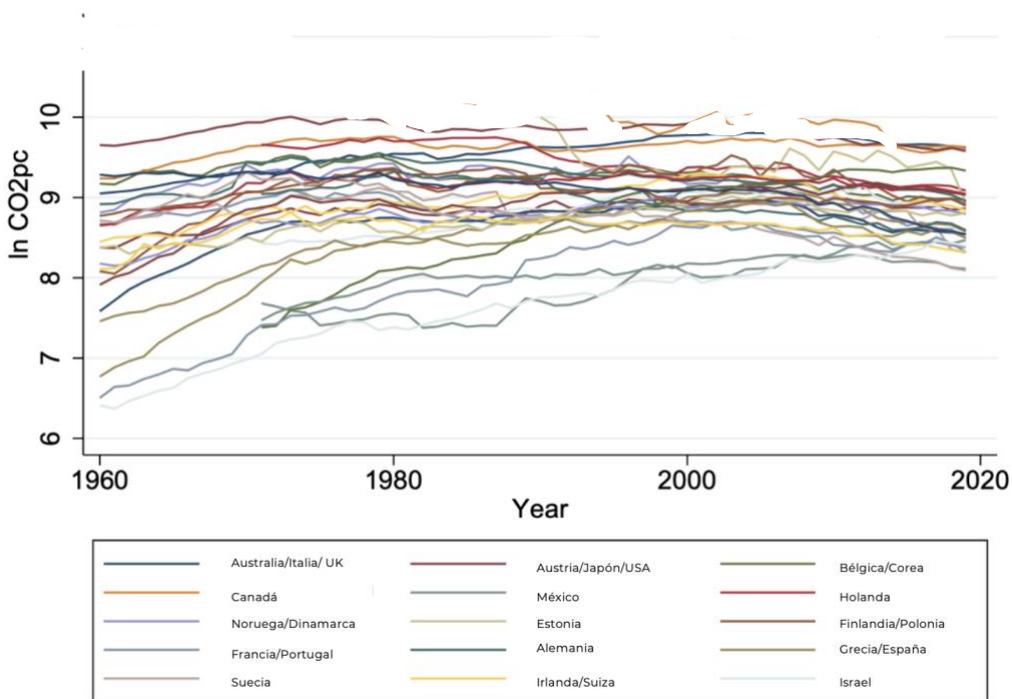
aproximadamente 1997), el coeficiente beta es negativo y significativo, lo que indica que los países más contaminantes en esos periodos redujeron las emisiones más rápidamente que los menos contaminantes. El coeficiente es de una reducción de los diferenciales de un 3% anual, el cual no es muy elevado, pero resulta significativo.

Se puede considerar que aproximadamente el año 1997 es un punto de inflexión. Hasta ese momento el proceso de convergencia era reducido, pero estable. No obstante, desde mitad de la década de los noventa las disparidades entre los países de la muestra parecen dejar de reducirse. Actualmente, el coeficiente de beta-convergencia no es significativo, por lo que se ha dejado de acortar las disparidades en emisiones en la muestra de países analizados.

3.2.3 ESTADO ESTACIONARIO

Tras este análisis cabe preguntarse si esta convergencia nula en emisiones puede deberse a que cada país ya ha alcanzado su estado estacionario correspondiente. No hacemos un análisis muy riguroso sobre esto, pero la evidencia que encontramos parece sólida. Mostraremos la evolución de las emisiones de CO₂ por habitante de todos los países (**Figura 8**).

FIGURA 8: Evolución de las emisiones de CO₂ per cápita de cada país



En esta figura podemos ver, de manera intuitiva, si el freno en convergencia se debe a que todos han convergido y han llegado al mismo estado estacionario o, por el contrario, simplemente se ha parado el proceso de convergencia. Las diferencias observadas, al ser la escala la logarítmica, se consideran tasas de crecimiento. Esto es, si la diferencia en el eje de vertical es de 1 punto, significa que las emisiones per cápita difieren el doble (un 100%). Como vimos en la **Figura 7**, los niveles de emisiones convergen hasta finales del siglo XX. Tras ello, parece que la tasa de crecimiento de la variable CO₂ para cada país se ha estabilizado.

Por ello, en la **Figura 8** vemos claramente que siguen patentes las desigualdades entre los países. De hecho, actualmente, podríamos identificar varios grupos de países atendiendo a los datos finales de la muestra. Los países de posiciones intermedias son difíciles de reconocer, por ello nos centraremos en describir solamente los extremos. En la parte alta de la gráfica tenemos a países con altos niveles de contaminación, como Estados Unidos, Canadá o Australia, seguidos de países como Bélgica, Países Bajos, Alemania o Japón.

Si analizamos la parte inferior del gráfico, señalamos potencias como Portugal, Israel o México. Podríamos intentar determinar los demás conjuntos de países atendiendo a sus características estructurales, características energéticas y las estadísticas. Por ejemplo, por su parte, países como España, Reino Unido y Francia, se han estabilizado en torno a un mismo nivel. Con esto, concluimos que las diferencias entre los países sí existen y se debe al freno del proceso de convergencia absoluta entre ellos desde los años noventa. Esto consecuencia un afianzamiento de los países en sus propios niveles de CO₂, reflejando la nula intención de reducir las disparidades entre las potencias desarrolladas.

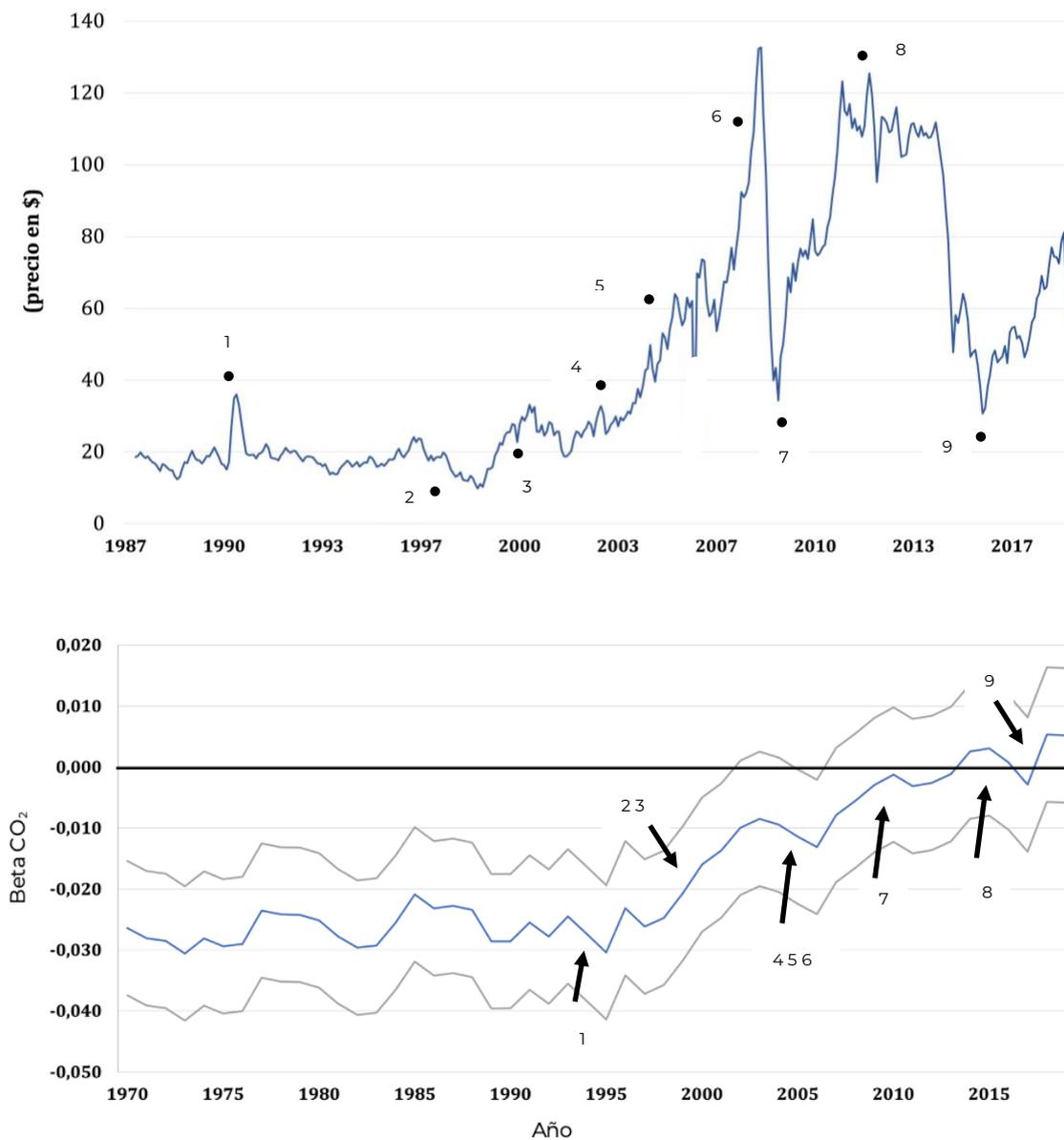
3.2.3 COMPARATIVA: PRECIOS DEL PETRÓLEO Y EVOLUCIÓN DE LA BETA

Una hipótesis relevante es la de contrastar si esta dinámica de convergencia está asociada con alguna serie (común a todos los países) como puede ser el precio del barril del petróleo.

Hemos escogido el barril de petróleo Brent europeo, expresado en dólares por barril. Estudiaremos gráficamente si hay correlación entre los picos de los precios y las aceleraciones de convergencia. Comparando ambas figuras, podemos identificar acontecimientos clave (Andrés Stumpf, 2017) para entender la relación que existe entre ambas variables. Detallamos estos puntos marcados en el gráfico en una tabla a continuación de esta **Figura 9**. Al contrastar cada acontecimiento (subida o bajada del precio del barril) con el respectivo comportamiento de la convergencia en emisiones de ese

periodo se verifica la existencia de una relación inversa en todos los casos. Cuando los precios se disparan, en proceso de convergencia tiende a intensificarse: la $\beta(t)^{CO_2}$ se vuelve más negativa. Sin embargo, cuando los precios se desploman, se frena esa reducción de los diferenciales entre los países de la muestra (la $\beta(t)^{CO_2}$ tiene tendencia positiva). Es más, tal y como avanzamos en el apartado 3.2.2, estos últimos años las fuertes bajadas en los precios del petróleo han intensificado la desaceleración de la convergencia, entrando en lo que podemos calificar como un proceso de nula convergencia en emisiones de CO_2 .

FIGURA 9: Comparación entre el precio petróleo BRENT europeo y $\beta(t)^{CO_2}$



Fuente: Datosmacro.com (precios del barril BRENT) y IEA (dinámica beta convergencia CO_2).
 Elaboración propia

| Tabla | Acontecimiento |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Punto 1 | La guerra del Golfo dispara el barril de Brent a los 40 dólares en 1990. |
| Punto 2 | La crisis financiera en Asia oriental hunde los precios (1997-1998). |
| Punto 3 | En 2001 , atentados del 11 de septiembre en Estados Unidos y la quiebra de la energética Enron que hace bajar el precio del barril. En 2003 , inestabilidad política en varios países productores. Con la invasión en Irán, empeora la situación. Se reduce la oferta, por lo que suben los precios. |
| Punto 4 | Con el boom constructor, en 2006 se alcanzan casi los 80 dólares por barril. Al incremento de la demanda se le une la inestabilidad política y social de la crisis de los misiles con Corea del Norte y la Guerra en Irak y el Líbano, que empeora la situación. |
| Punto 5 | La escalada de precios del petróleo no frena. Empieza el 2008 superando los 100 dólares por primera vez. |
| Punto 6 | El petróleo cae por debajo de los 40 dólares en plena crisis de Lehman Brothers. |
| Punto 7 | De 2010 al 2014 , se dan varios acontecimientos que mantienen los precios en niveles altos . En 2011 , se proclama la “primavera árabe”, con turbulencias en Egipto y alrededores. Asimismo, incrementos en la demanda, mayoritariamente de países como China e India. |
| Punto 8 | La demanda mundial cae por la coyuntura económica en 2015 . No hay una respuesta acorde por la OPEP. Los países exportadores de petróleo mantienen los niveles de producción, provocando una caída en picado del precio del barril. La desaceleración de economías potentes, como la de China, intensifica la caída, así como la ruptura de las relaciones entre Arabia Saudí e Irán. El barril se desploma hasta los 30 dólares. |

CAPÍTULO 4 **DESCOMPOSICIÓN DE BETA-CONVERGENCIA DE CO₂**

En esta segunda parte, procederemos al análisis y descomposición de la convergencia de las emisiones de CO₂ per cápita. Nuestro objetivo es fundamentar teórica y empíricamente la evolución de $\beta(t)^{CO_2}$ y así aportar mayor nitidez a qué ha causado ese cambio de tendencia en la convergencia de las emisiones a partir de mitad de los noventa. La evolución del petróleo está asociada con algunos aumentos y reducciones, pero no es capaz de explicar ese cambio de tendencia continuado.

Como los resultados muestran en los apartados anteriores, hasta el siglo XXI, la convergencia en emisiones de CO₂ per cápita se mantenía estable. La velocidad de minoración de estas diferencias entre las regiones era lenta, pero se conservaba constante. Sin embargo, durante el final del siglo XX y comienzos de los 2000s, no solo se frena la convergencia si no que la $\beta(t)^{CO_2}$ se vuelve positiva, aunque sigue sin ser significativa.

En este Capítulo 4, introduciremos una identidad teórica que explica el comportamiento de las emisiones per cápita de una economía. Le aplicaremos una serie de transformaciones para reescribirla en términos de convergencia y así poder determinar qué factores o variables – y en qué medida – explican el análisis previo de la trayectoria del coeficiente $\beta(t)^{CO_2}$.

4.1 MARCO TEÓRICO: IDENTIDAD DE KAYA

El profesor Yoichi Kaya es especialista en economía de la energía, director del Instituto de Tecnología Innovadora para la Tierra, y profesor emérito de la Universidad de Tokio

En 1993 publica un libro, *Environment, energy, and economy: Strategies for sustainability* (en español, “Medio ambiente, energía y economía: Estrategias para la sostenibilidad”).⁵ En el formula una expresión muy simple que relaciona factores económicos, energéticos y ambientales para explicar el comportamiento de las emisiones. Existe evidencia empírica que avala esta expresión, a la que se le denomina *Identidad de Kaya*. Como se expone en Díaz et al., (2020), esta ecuación (4) muestra que la actividad económica actúa y modifica el comportamiento de la variable “emisiones de CO₂”. Los autores explican que hay varios canales:

$$(4) \ CO_{2,t} = POB_t \times \frac{PIB_t}{POB_t} \times \frac{ENERG_t}{PIB_t} \times \frac{CO_{2,t}}{ENERG_t}$$

- **Factores “extensivos”:** el **crecimiento poblacional** y la **renta per cápita** de una economía (PIB per cápita).
- **Factores “tecnológicos”:** la **intensidad energética** (ratio $ENERG^6/PIB$) y la **intensidad de carbonización** (ratio $CO_2/ENERG$).
 - La **intensidad energética** es un indicador de eficiencia energética (de la *tecnología* energética) de una economía e indica la cantidad de unidades de energía que se necesitan para producir una unidad de riqueza. Cuanto más eficiente sea esta (intensidad energética baja) más bajos son los costes ya que se consume relativamente poca energía para los niveles de PIB que se obtienen. Al contrario, cuanto más elevada sea la intensidad

⁵ Yoichi Kaya ha sido profesor de la Facultad de Ingeniería de la Facultad de Tokio hasta 1995 y de la Universidad de Keio hasta los 2000. Fue miembro del Club de Roma entre el 1974 y 1992. Está especializado en ingeniería de sistemas en el campo de la energía y el medioambiente. Presidió el Instituto japonés de Ingeniería Eléctrica entre 1994 y 1995 y la Sociedad Japonesa de Energía y Recursos entre 1995 y 1998. Fue miembro del Consejo de IIASA entre 1985 y 1995.

⁶ La variable ENER, uso de energía total, mide el uso energético primario de todas las fuentes en millones de toneladas equivalentes de petróleo.

energética, más alto es el coste de convertir una unidad de energía en unidad de PIB, es decir, en riqueza.

- o La **intensidad de carbonización** es un indicador del grado de limpieza (o suciedad) del proceso productivo de una economía, y que mayoritariamente está asociado a su mix energético. En este caso, estamos midiendo el porcentaje que representa la energía obtenida por la emisión de CO₂ del total de energía consumida. En el total agruparíamos la completa variedad de fuentes de energía que economía posee⁷. Esta composición es diferente en cada uno de los países, atendiendo a sus características estructurales, geográficas o económicas.

4.2 METODOLOGÍA

Plantearemos la siguiente estrategia para proceder a la construcción de una ecuación que muestre la descomposición del $\beta(t)^{CO_2}$. Primero reescribimos la ecuación (4) en términos per cápita, y simplificamos la notación renombrando cada término como PIB (PIB per cápita), IE (Intensidad Energética), MIX (la intensidad de carbón en la producción, que lo relacionamos con el mix energético):

$$\frac{CO_{2,t}}{POB_t} = \frac{PIB_t}{POB_t} \times \frac{ENERG_t}{PIB_t} \times \frac{CO_{2,t}}{ENERG_t}$$

$$(5) \quad CO_{2,t} = PIB_t \times IE_t \times MIX_t$$

A continuación, log-linearizamos la ecuación (5) y tenemos una ecuación lineal para cada año.

$$(6) \quad \log CO_{2,t} = \log PIB_t + \log IE_t + \log MIX_t$$

Valoramos esta ecuación en dos instantes de tiempo (t y t-1), y tomamos diferencias. Al realizar este procedimiento, la ecuación (5) la reescribimos en tasas de crecimiento (diferencias logarítmicas). Nótese que, para cada variable X, podemos usar la expresión (1) y reescribir la ecuación en términos de las betas de convergencia de cada una de las variables incluidos en la identidad de Kaya, del pasado del logaritmo y de un término residual (que incluye los residuos de todas las ecuaciones y los términos constantes). Además, promediamos en la sección cruzada (para cada año t, tomamos la media de todos los países): $\frac{1}{N} \sum_i x_{i,t} = \bar{x}_t$. De esta manera podemos tener una ecuación para cada instante de tiempo t que relaciona las distintas betas de las distintas variables:

⁷ Por ejemplo, en 2021, en España imperó la energía eólica (24%), la nuclear (21%), la generada por centrales de ciclo combinado (17%) y la hidráulica (11%) (*Red Eléctrica de España, 2022*)

$$(7) \beta_t^{CO_2} \log(\overline{CO_{2,t-1}}) = \beta_t^{PIB} \log(\overline{PIB_{t-1}}) + \beta_t^{IE} \log(\overline{IE_{t-1}}) + \beta_t^{MIX} \ln(\overline{MIX_{t-1}}) + w_t$$

Llegados a este punto, recalcamos **dos problemas**. En primer lugar, hemos de tener en cuenta que pasar de una identidad en niveles a la ecuación de las betas no es una operación trivial. Estamos basando el cálculo de las betas en una identidad teóricamente perfecta (4).

No se puede llegar a que la beta del CO₂ es la suma de las betas de las tres variables incluidas en la Identidad de Kaya. Aproximarlo por una suma causará inevitablemente errores en los resultados ya que habrá muchos aspectos de los $\beta(t)$ que no serán lineales. Además, también debemos asumir errores de medida en las variables. Por esto, aparece el término de **error**. Lo interpretaremos como el error medio de la aproximación lineal, es decir, los errores no calculados capturados por las otras betas. Nótese que este error lo calculamos directamente a partir de (7). Todos los términos de (7) los tenemos estimados para cada momento del tiempo t, menos el residuo.

Como segundo asunto, nótese que los diferentes betas estimados y usados en (9) no se expresa en las mismas unidades. Para poder analizar la contribución de la beta de cada variable a la convergencia de emisiones de CO₂ per cápita, hemos de aplicar un **factor escala** a cada elemento de la ecuación. De esta manera, ya tendremos todo en unidades de convergencia de CO₂.

Hay un **factor de escala** para cada beta: el cociente entre el logaritmo neperiano de la media de la variable correspondiente⁸ y el logaritmo neperiano de la media de CO₂ per cápita para cada periodo (diez años). Por ejemplo, el factor de escala de 1970 para la variable PIB per cápita será el logaritmo neperiano de la media del PIB per cápita entre 1960-1970, entre el logaritmo neperiano de la media de las emisiones de CO₂ per cápita de 1960-1970.

$$(10) \beta_t^{CO_2} = \beta_t^{PIB} \frac{\log(\overline{PIB_{t-1}})}{\log(\overline{CO_{2,t-1}})} + \beta_t^{IE} \frac{\log(\overline{IE_{t-1}})}{\log(\overline{CO_{2,t-1}})} + \beta_t^{MIX} \frac{\log(\overline{MIX_{t-1}})}{\log(\overline{CO_{2,t-1}})} + \frac{\bar{v}_t}{\log(\overline{CO_{2,t-1}})}$$

Como podemos observar en la expresión final (10), el residuo también quedará en términos de emisiones de dióxido de carbono. Una vez conseguida la expresión que descompone el coeficiente beta del CO₂, sólo nos queda estimar las diferentes betas para la IE y el MIX. Para ello usamos el procedimiento *rolling* que fue explicado anteriormente. Obtenemos el residuo como comentamos anteriormente, y ya tendremos la descomposición en cuatro elementos: el asociado al PIB per cápita; a la IE y a la intensidad en emisiones; y a un término residual.

⁸ Aplicaremos el factor escala a la variable PIB per cápita, a la intensidad energética y a la ratio CO₂/Energía.

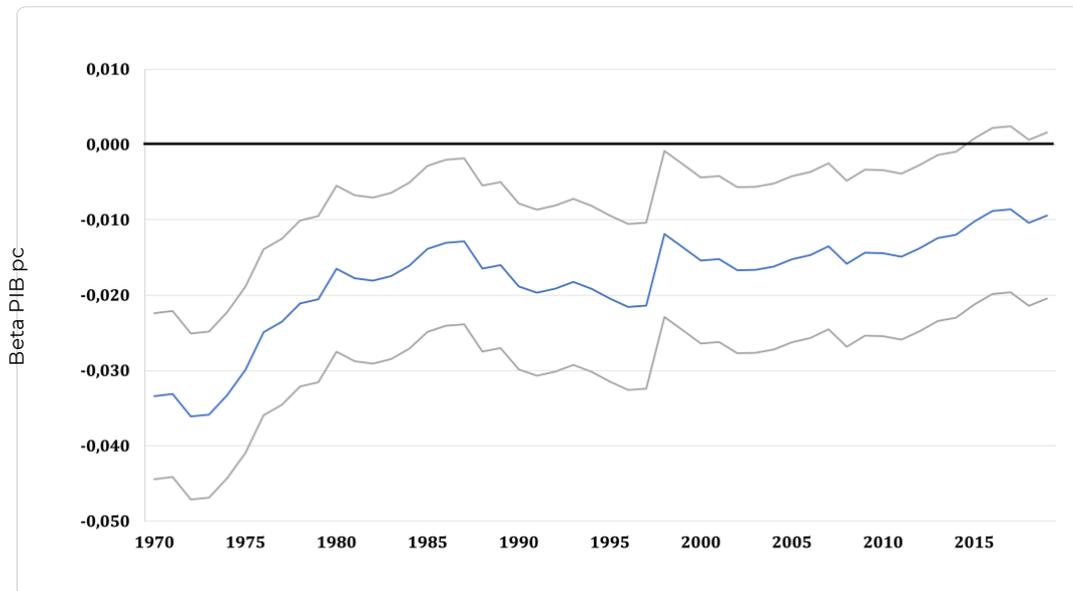
Recapitulando, para la descomposición, necesitamos los valores medios de cada variable para cada ventana temporal y el correspondiente coeficiente de convergencia para cada una de estas ventanas de diez años. Asimismo, tras un cómputo trivial, hemos logrado elaborar una tabla que recoja la aportación de cada variable a la convergencia de emisiones de CO₂ (**Tabla 1** del Anexo).

4.3 RESULTADOS

Ahora procederemos a mostrar gráficamente los resultados obtenidos tras el cómputo de los cálculos anteriores. Subdividiremos esta sección en dos apartados: primero examinaremos la evolución dinámica de cada beta y, tras ello, plasmaremos la descomposición de la beta $\beta(t)^{CO_2}$ siguiendo la metodología explicada en el anterior apartado.

4.3.1 CONVERGENCIA EN PIB

FIGURA 10: Evolución de la β -convergencia del PIB per cápita



Fuente: Agencia Internacional de la Energía. Elaboración propia

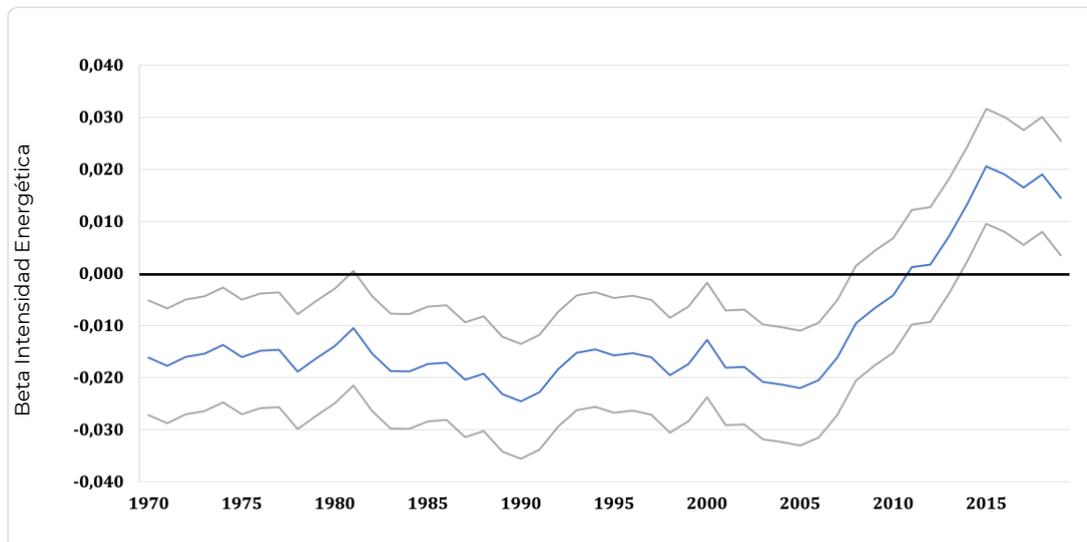
Aunque las desigualdades en renta per cápita aún sigan patentes en el panorama internacional, la tasa de reducción de estas disparidades se ha mantenido relativamente constante. Es cierto que el proceso de convergencia entre los países de la muestra fue más intenso durante los años de la posguerra. La tasa de velocidad de reducción de las disparidades es mayor durante el comienzo de la segunda mitad del siglo XX. El coeficiente beta se ha

mantenido negativo, es decir, las diferencias siguen disminuyendo entre las diferentes economías, aunque poco. Sin embargo, el proceso de convergencia se ha ido desacelerando (lo muestra la tendencia positiva de $\beta(t)$) y parece haberse estancado a niveles muy próximos a cero.

4.3.2 **CONVERGENCIA EN INTENSIDAD ENERGÉTICA**

En primer lugar, recordaremos que la intensidad energética (IE) mide la cantidad de unidades de energía que se necesitan para producir una unidad de riqueza. Es decir, representa la ratio uso energético-PIB.

FIGURA 11: Evolución de la β -convergencia de la Intensidad Energética



Fuente: Agencia Internacional de la Energía. Elaboración propia

Al analizar su trayectoria en la **Figura 11**, identificamos claramente un punto de inflexión en la mitad de la primera década de los 2000. Durante las primeras terceras partes de la muestra, entre los años 1970 y 2000, identificamos un proceso de convergencia (el coeficiente beta se mantiene negativo) siguiendo una trayectoria cíclica, atendiendo a la fase de expansión o contracción económica contemporánea. Hemos de destacar que, a pesar de que existiera el proceso de convergencia, este era muy reducido. El decrecimiento de los diferenciales entre las potencias era muy paulatino.

Tras el comienzo del nuevo siglo, en los últimos veinte años de la muestra (2000-2020) podemos observar como el coeficiente beta comienza a crecer intensamente. En pocos años la situación se transforma, de reducirse las disparidades entre las distintas ratios, estas comienzan a agudizarse originando un proceso de divergencia a partir del año 2010.

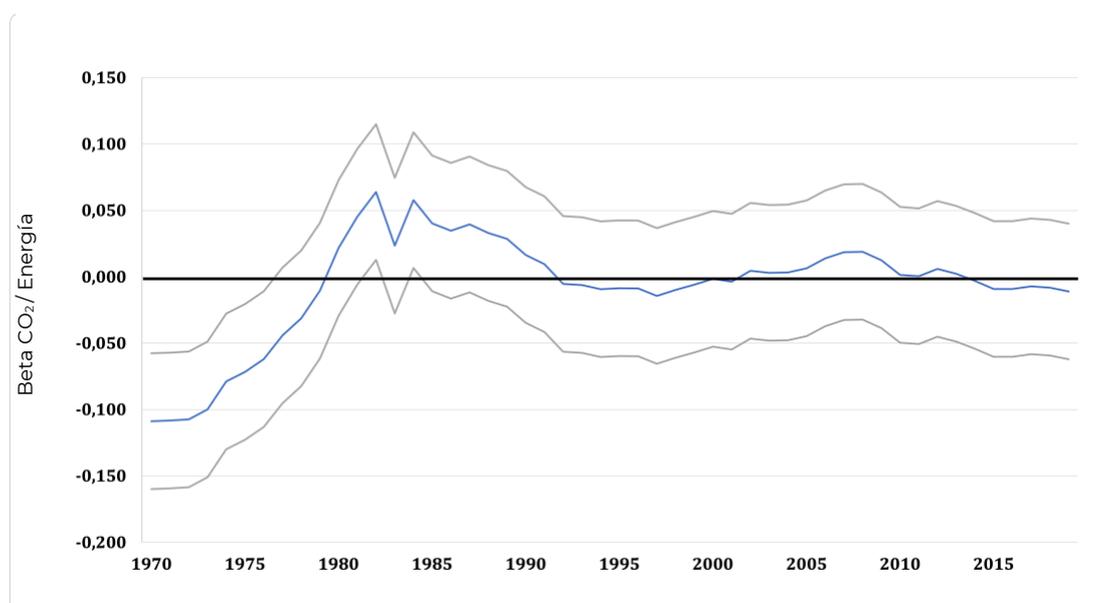
Ejemplo de ello lo tenemos entre las grandes potencias de la OCDE (Francia, Alemania o Reino Unido) y países como España o Portugal. Mientras que en los países más avanzados la intensidad energética ha sufrido una acentuada reducción durante los años setenta, después de las dos crisis del petróleo, y se ha mantenido constante a partir de los años noventa, en regiones más rezagadas la intensidad energética ha presentado una tendencia creciente a lo largo del siglo XX y no ha experimentado algún decrecimiento hasta el XXI.

Las trayectorias divergentes entre países de la OCDE se justifican mayoritariamente por lo anteriormente expuesto en el apartado 2.3; se puede seguir creciendo en términos económicos, a la vez que decrece la curva de demanda de recursos naturales una vez se ha alcanzado la calificación de país desarrollado (Curva Ambiental de Kuznets). En nuestro país, España, como en otros, la trayectoria diverge de esto anterior porque aún se encuentra en la etapa intermedia de transición en la que la contaminación impera.

4.3.3 CONVERGENCIA RATIO CO₂/ENERGÍA TOTAL (RELACIONADO CON EL MIX ENERGÉTICO)

En este caso, esta ratio mide la **intensidad de carbonización**. Es un indicador del grado de suciedad del *mix energético* de una economía. Nos aporta información sobre las proporciones de las distintas fuentes de energía de las que hace uso una economía, respecto del total de energía consumida.

FIGURA 12: Evolución de la β -convergencia CO₂/Energía Total



Fuente: Agencia Internacional de la Energía. Elaboración propia

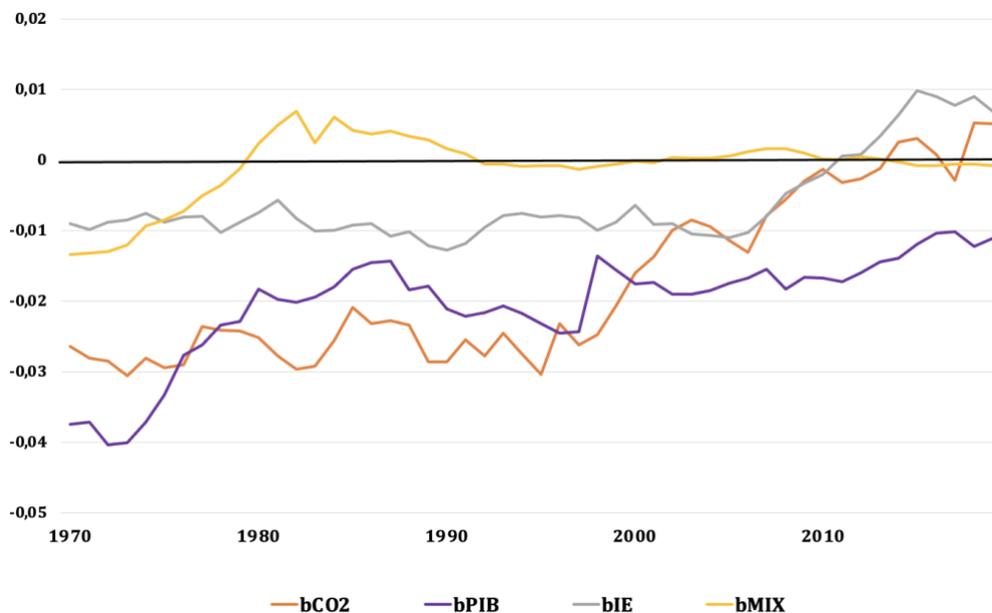
La convergencia en esta variable ha sido prácticamente nula durante casi toda la muestra. Esto indica que el patrón de fuentes energéticas de cada economía es diferente, atendiendo cada uno a sus propias características y sus necesidades. Las estadísticas muestran que no ha habido cambio alguno en las proporciones de las diferentes fuentes de energía.

El único periodo de convergencia se da a lo largo de los setenta, por el cambio generalizado del petróleo por fuentes de energía como el carbón o el gas natural. Las crisis del petróleo (1973 y 1979) pusieron de manifiesto la inviabilidad de depender mayoritariamente del oro negro.

4.4 DESCOMPOSICIÓN DE LA BETA

Tras el análisis individual de cada componente de la *Identidad de Kaya*, vamos a observar todas en su conjunto. En la **Figura 13**, la línea naranja indica la evolución de la beta referente a las emisiones de dióxido de carbono y, por lo que hemos demostrado en la metodología, el proceso de convergencia de las otras variables han de explicarla.

FIGURA 13: Evolución de las diferentes β (CO₂, PIB, MIX, IE)



Fuente: Agencia Internacional de la Energía. Elaboración propia

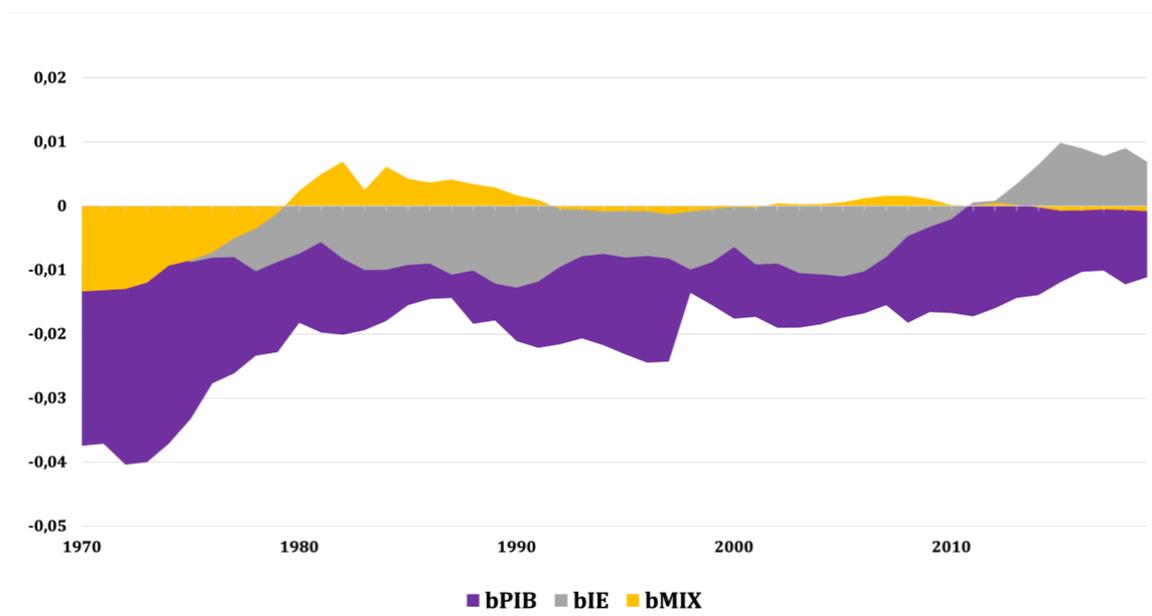
A primera vista, omitimos de antemano que el proceso de convergencia del **patrón relacionado con el mix energético** haya tenido

algún efecto, al menos a partir de los ochenta. Sabemos que ha sido prácticamente nulo desde los ochenta, por lo que no ayuda a explicar los movimientos de la beta de las emisiones. No obstante, cabe recalcar que, si su aportación ha sido nula, pero la literatura explica que esta tiene una relación directa con la convergencia en emisiones, hemos de tener en cuenta que tenemos una dimensión muy relevante sin explotar para alcanzar los objetivos medioambientales. Recuperaremos en las conclusiones la ratio CO₂/Energía, haciendo hincapié en su potencial a la hora de intensificar la reducción de los diferenciales de emisión de gases contaminantes.

Por otro lado, observamos la beta referente al **PIB per cápita** (violeta) y la beta referente a la **intensidad energética** (gris). Desde 1970 al año 2000, la beta PIB per cápita prácticamente coincide con la de emisiones, por lo que podemos intuir que la reducción de las disparidades entre países en materia ambiental se explicaba en su mayoría por la aminoración de la brecha en renta per cápita entre los países más ricos y los menos pudientes, en este periodo de tiempo.

Pero, a partir del año 2000, parece que el proceso de reducción de la convergencia que se da en la variable intensidad energética es el que explica fundamentalmente la $\beta(t)^{CO_2}$. Tanto es así que las dos líneas que representan esa evolución de ambas betas (naranja y gris) se sobreponen completamente desde 2007 a 2010. Por ello, concluimos que esta tendencia positiva de la $\beta(t)^E$ es la que empuja a la $\beta(t)^{CO_2}$ a hacia dígitos positivos, indicando que los países frenan completamente el proceso de reducción de las desigualdades en emisiones de dióxido de carbono.

FIGURA 14: Descomposición de la β^{CO_2} (áreas)



Fuente: Agencia Internacional de la Energía. Elaboración propia

En la **Figura 14** se puede identificar de manera más sencilla la contribución de los procesos de convergencia de cada variable a la $\beta(t)^{CO_2}$. Para ello, hemos cogido el coeficiente beta de cada variable y lo hemos multiplicado por el factor escala para poder tener los procesos de convergencia en unidades de $\beta(t)^{CO_2}$. Omitimos el componente residual, al no aportar explicación al análisis.

Durante los años setenta, es la convergencia en renta per cápita y el cambio en el patrón energético (transición del petróleo al carbón y gas natural) lo que logra explicar perfectamente el proceso de reducción de disparidades en emisiones. Los siguientes 25 años, aproximadamente hasta el 2005, de nuevo podemos observar cómo el proceso se verá condicionado por las dinámicas y movimientos cíclicos del PIB per cápita, pero también entra en juego la eficiencia energética (favorablemente).

Como hemos adelantado anteriormente, el proceso de convergencia de las variables que se encuentran en terreno merma la reducción de los diferenciales de emisión de contaminantes a la atmósfera durante estos años. Aunque se mantiene relativamente estable, la aminoración de las diferencias se da a tasas de velocidad bastante bajas.

Hace un par de líneas, anticipamos que a partir de los 2000 la intensidad energética marca las pautas de $\beta(t)^{CO_2}$. Lo verificamos con esta nueva gráfica. Vemos que la $\beta(t)^{PIB}$ se estanca en esta última década, por lo que no se consigue contrarrestar las mayores diferencias entre países en términos de eficiencia energética. La alta intensidad energética que caracteriza este periodo previo a la Gran Recesión de 2008 ejerce en estos años como fuerza divergente, provocando que la $\beta(t)^{CO_2}$ alcance dígitos positivos, es decir, que las diferencias entre países en emisiones de CO_2 aumente. Mientras que la suave convergencia del PIB per cápita contribuye negativamente, es la falta de convergencia de la IE la que hace que haya desaparecido la convergencia en emisiones de CO_2 en las últimas décadas.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIÓN

En este estudio hemos querido esclarecer y mostrar evidencia empírica sobre la convergencia entre los países de la OCDE en emisión de CO_2 por habitante. Con ello, nos sumamos a aquellos que afirman que queda mucho trabajo por hacer para solucionar su exceso en la atmósfera y todas las consecuencias que esto supone.

En una primera parte, siguiendo la metodología propuesta por Kremer, et al. (2021), mostramos que durante estos años las diferencias entre los países de la OCDE han dejado de reducirse y se mantienen en niveles altos. Teniendo en cuenta que cuanto más negativo es el coeficiente de convergencia, mayor en la convergencia existente, observamos que su evolución muestra una tendencia positiva desde el año 2000, aproximadamente. Los países de alta emisión se mantienen en niveles altos, mientras que los que menos emiten no se acercan a ellos, es más, se alejan o se mantienen.

En una segunda sección, nos propusimos descomponer el coeficiente de convergencia de las emisiones, para poder así identificar qué aspectos macroeconómicos han sido clave en su trayectoria. A través de la Identidad de Kaya, desagregamos el coeficiente de convergencia y analizamos gráfica y numéricamente la aportación de cada variable (PIB per cápita, intensidad energética y mix energético) a ese coeficiente.

Las conclusiones fueron claras: el proceso de convergencia en emisiones de CO₂ ha estado profundamente marcado por la convergencia en indicadores económicos y ha sido muy dependiente de la fase expansiva o de contracción en la que nos encontráramos. A partir del 2000, la reducción en convergencia en materia de intensidad energética es la que marca el patrón de la convergencia en emisiones. Además, la escasa convergencia en el modelo energético (mix energético) de los países ha dificultado que esta haya sido una vía que impulsara la reducción de los diferenciales entre las regiones de la OCDE.

En resumen, podemos observar el nulo efecto de las políticas medioambientales actuales. No solo no se ha avanzado en la convergencia en emisiones, si no que estas desigualdades se han agudizado. Si se quiere conseguir una disminución efectiva de los gases contaminantes, concretamente del dióxido de carbono, se debe de hacer especial énfasis: primero, en las variables económicas, ya que marcan decisivamente las dinámicas de la quema de combustibles fósiles por lo que se habría que estudiar una **política económica anticíclica** que minimice los efectos de los factores estructurales (precios) sobre las emisiones; y segundo, realizar un esfuerzo en la adopción de un **patrón energético** (común entre los distintos países) **menos contaminante** de acuerdo a los objetivos medioambientales propuestos, aunque teniendo en cuenta las particularidades cada país.

CAPÍTULO 6

BIBLIOGRAFÍA

1. Abramovitz, M. (1986). "Simon Kuznets 1901–1985" *The Journal of Economic History*, 46(1), 241-246. doi:10.1017/S0022050700045642
2. Ballesta, J. A. C., & Rodríguez, M. (2009). "Terciarización e industrialización en la economía española: un análisis input-output" *Papeles de economía española*, 120, 106-125. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3019462>
3. Barro, R. J., & Sala-i-Martin, X. I. (2003). "Economic Growth, second edition". *Amsterdam University Press*.
4. Becerra, S. N., & Blasco, M. M. (2004). "El precio del petróleo y el PIB per capita, 1970-2004. Análisis de varias diferencias" *BOLETÍN ECONÓMICO DE ICE*, 2820.
5. "Bibliologías: Estadísticas ambientales y de cambio climático para América Latina y el Caribe: Acerca de las estadísticas ambientales. (2022)" <https://biblioguias.cepal.org/c.php?g=934230>
6. Díaz, A., Marrero, G. A., & Punch, L. A. (2020). "CAMBIO CLIMÁTICO, CRECIMIENTO ECONÓMICO Y PAPEL DE LAS TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS" [Paper]. *PAPELES DE ECONOMÍA ESPAÑOLA*.
7. "Emissions – Key World Energy Statistics" (2020) IEA. <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020/emissions>
8. "Emisiones de CO₂" (2023) Datosmacro.com. <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/emisiones-co2>
9. "Evolución histórica del precio del petróleo Brent" (2017) https://cincodias.elpais.com/infografias/1601013_Hist_Petroleo/HistPetro.html
10. Hannah Ritchie, Max Roser and Pablo Rosado (2020) – "CO₂ and Greenhouse Gas Emissions" *OurWorldInData.org* <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>
11. Iglesias, J., & Golpe, A. (2011, mayo). "La Curva de Kuznets y la Emisión de CO₂"
12. "Kaya, Yoichi" (2020, 6 febrero). Club of Rome. <https://www.clubofrome.org/member/kaya-yoichi/>
13. Kremer, M., You, Y., & Willis, J. (2021, julio). "Converging to Convergence" (*NBER Macroeconomics Annual*, volume 36, 2021). University of Chicago Press. <https://doi.org/10.1086/718672>
14. KUZNETS, S. (1955), "Economic growth and income inequality", *American Economic Review* no 45: 1–28.
15. LINARES, P. (2009) "Eficiencia energética y medioambiente", *Información Comercial Española*, 847: 7593.
16. López del Paso, R. (2014). "Evolución de las emisiones de CO₂" *EXtoikos*, 15, 89.
17. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico - Agencia Internacional de la Energía (AIE). (2023). <https://energia.gob.es/REI/relaciones-energeticas-internacionales/organismos-internacionales/Paginas/agencia-internacional-energia.aspx>

18. Montañés Bernal, R. P. (2012). "CONVERGENCIA ESTOCÁSTICA EN EMISIONES DE CO₂: UNA APLICACIÓN PARA LOS PAÍSES INDUSTRIALIZADOS" [TFM]. *Universidad de Zaragoza*.
19. Olcina Cantos, J. (2009). "Cambio y riesgos climáticos en España" *Investigaciones Geográficas*, 49, 197 <https://doi.org/10.14198/ingeo2009.49.10>
20. Panopoulou, E., & Pantelidis, T. (2009). "Club Convergence in Carbon Dioxide Emissions. *Environmental and Resource Economics*" 44, 47-70.
21. "R: What is R?" (2023.)
<https://www.r-project.org/about.html>
22. Ros Massana, R. Dra. (2017). "La industria (1800-1919)" *HISTORIA DE BÉJAR*: Vol. II.
23. "Transición de energía: ha habido pocos cambios en la mezcla de energía desde 1973" (2020, 18 septiembre). *Foro Económico Mundial*.
<https://es.weforum.org/agenda/2020/09/estos-graficos-muestran-lo-poco-que-ha-cambiado-el-suministro-de-energia-mundial-desde-la-decada-de-1970/>
24. United Nations. (2022). "Cambio climático" | *Naciones Unidas*.
25. "Verdad Sobre El **Dc*. (2023). El Informe Stern/ The Stern Review: La Verdad Del Cambio Climático/ Economics of Climate Change" . *Paidós Iberica Ediciones*
<https://www.un.org/es/global-issues/climate-change>
26. "Why Stata" | Stata. (2023.)
<https://www.stata.com/why-use-stata/>

CAPÍTULO 7

ANEXO

Tabla 1: Descomposición de β^{CO_2} por la Identidad de Kaya

| AÑO | BETA CO ₂ DESCOMPOSICIÓN | | | | |
|------|-------------------------------------|------------|-----------------------|----------------|------------|
| | CO ₂ pc | PIB pc | Intensidad energética | MIX energético | Residuo |
| 1970 | -0,0264194 | -0,0374434 | -0,0089873 | -0,0133688 | 0,03338019 |
| 1971 | -0,0280727 | -0,0371434 | -0,0098214 | -0,0131763 | 0,03206844 |
| 1972 | -0,0285018 | -0,0403893 | -0,0088399 | -0,0129808 | 0,03370822 |
| 1973 | -0,0305634 | -0,0400067 | -0,0084784 | -0,0119761 | 0,02989771 |
| 1974 | -0,0281129 | -0,0371277 | -0,0074905 | -0,0093479 | 0,02585319 |
| 1975 | -0,0293971 | -0,0332601 | -0,008756 | -0,0084918 | 0,02111076 |
| 1976 | -0,0289956 | -0,0276914 | -0,0080889 | -0,0072654 | 0,01405009 |
| 1977 | -0,0235346 | -0,0261629 | -0,007958 | -0,0050684 | 0,01565468 |
| 1978 | -0,0241512 | -0,0233861 | -0,0102095 | -0,0035442 | 0,01298862 |
| 1979 | -0,0242297 | -0,0228314 | -0,0087511 | -0,0011597 | 0,00851257 |
| 1980 | -0,0251527 | -0,0182423 | -0,0074678 | 0,00236831 | -0,0018109 |
| 1981 | -0,0277849 | -0,0197408 | -0,0056685 | 0,00496712 | -0,0073427 |

| | | | | | |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1982 | -0,0296136 | -0,0201114 | -0,008242 | 0,00693501 | -0,0081953 |
| 1983 | -0,0292603 | -0,0194011 | -0,0100053 | 0,00248321 | -0,0023371 |
| 1984 | -0,0255161 | -0,0179513 | -0,009975 | 0,00613046 | -0,0037204 |
| 1985 | -0,020881 | -0,0154655 | -0,0091968 | 0,00424022 | -0,0004589 |
| 1986 | -0,0231756 | -0,0145448 | -0,0090229 | 0,00366584 | -0,0032737 |
| 1987 | -0,0227663 | -0,0143549 | -0,010723 | 0,00412582 | -0,0018142 |
| 1988 | -0,0234208 | -0,0183997 | -0,0100973 | 0,00340382 | 0,00167252 |
| 1989 | -0,0285643 | -0,0178736 | -0,0121171 | 0,00288708 | -0,0014608 |
| 1990 | -0,0285632 | -0,0211088 | -0,0127642 | 0,00165629 | 0,00365348 |
| 1991 | -0,0254972 | -0,0221438 | -0,0118169 | 0,00095051 | 0,00751301 |
| 1992 | -0,0278012 | -0,0215981 | -0,0095044 | -0,0005194 | 0,00382075 |
| 1993 | -0,0244852 | -0,0206605 | -0,0078567 | -0,0005896 | 0,00462169 |
| 1994 | -0,0273996 | -0,0217394 | -0,0075135 | -0,0008745 | 0,00272789 |
| 1995 | -0,0303823 | -0,0231857 | -0,0080637 | -0,0008004 | 0,00166752 |
| 1996 | -0,0231488 | -0,0244747 | -0,0078304 | -0,000807 | 0,00996324 |
| 1997 | -0,0261479 | -0,0243109 | -0,0082071 | -0,0012938 | 0,00766383 |
| 1998 | -0,0247306 | -0,0135521 | -0,0099294 | -0,0008766 | -0,0003725 |
| 1999 | -0,0206675 | -0,0155425 | -0,0087831 | -0,0005171 | 0,00417517 |
| 2000 | -0,0159856 | -0,0175877 | -0,0064321 | -0,0001344 | 0,00816859 |
| 2001 | -0,0136927 | -0,0173391 | -0,0091303 | -0,0003244 | 0,01310106 |
| 2002 | -0,0099525 | -0,0190396 | -0,0090257 | 0,00040714 | 0,01770568 |
| 2003 | -0,0084994 | -0,018986 | -0,0104836 | 0,00026625 | 0,02070399 |
| 2004 | -0,0094523 | -0,0184963 | -0,0106778 | 0,00029387 | 0,01942789 |
| 2005 | -0,0114133 | -0,0174276 | -0,0109918 | 0,00055413 | 0,01645195 |
| 2006 | -0,0131019 | -0,0167524 | -0,0101989 | 0,00120726 | 0,01264213 |
| 2007 | -0,0078592 | -0,0154931 | -0,0079751 | 0,00158007 | 0,01402887 |
| 2008 | -0,0055326 | -0,0182232 | -0,0046993 | 0,00158602 | 0,01580384 |
| 2009 | -0,0029484 | -0,0165754 | -0,0032653 | 0,00103979 | 0,0158526 |
| 2010 | -0,0012387 | -0,0167111 | -0,0020594 | 0,00012602 | 0,01740583 |
| 2011 | -0,0031274 | -0,0172542 | 0,00057234 | 4,2833E-05 | 0,01351162 |
| 2012 | -0,0026021 | -0,015955 | 0,00081833 | 0,00049872 | 0,01203583 |
| 2013 | -0,0011513 | -0,0143839 | 0,00344124 | 0,00018776 | 0,0096036 |
| 2014 | 0,00255361 | -0,0139088 | 0,00645678 | -0,0002443 | 0,0102499 |
| 2015 | 0,0030681 | -0,0119311 | 0,00984054 | -0,0007286 | 0,00588726 |
| 2016 | 0,00077143 | -0,0103004 | 0,00901235 | -0,0007152 | 0,00277469 |
| 2017 | -0,0028642 | -0,0101048 | 0,00779448 | -0,0005632 | 9,3336E-06 |
| 2018 | 0,00532315 | -0,0122422 | 0,00899942 | -0,0006061 | 0,00917193 |
| 2019 | 0,00518883 | -0,0111266 | 0,00689623 | -0,0008142 | 0,01023349 |