

Antonia Díaz\*  
Gustavo A. Marrero\*\*  
Luis A. Puch\*\*\*

## MACROECONOMÍA, ENERGÍA Y EMISIONES DE CO<sub>2</sub>

*En este trabajo revisamos nuestros resultados recientes acerca del vínculo entre el desempeño macroeconómico, el mix de tecnologías energéticas y la evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub>. El marco teórico del análisis es el de los modelos de crecimiento económico con generaciones sucesivas de capital. Mostramos que las emisiones de CO<sub>2</sub> dependen, fundamentalmente, del crecimiento económico sostenido por altos niveles de intensidad energética fósil. Finalmente, reflexionamos sobre la posibilidad de avanzar simultáneamente en la transición verde y la recuperación económica tras el impacto de la COVID-19.*

### Macroeconomics, energy and CO<sub>2</sub> emissions

*In this paper we review our recent results on the link between macroeconomic performance, the mix of energy technologies and the evolution of CO<sub>2</sub> emissions. The theoretical framework of the analysis is that of models of economic growth with successive generations of capital. We show that CO<sub>2</sub> emissions fundamentally depend on economic growth sustained by high levels of fossil energy intensity. Finally, we reflect on the possibility of advancing simultaneously in the green transition and economic recovery after the impact of COVID-19.*

**Palabras clave:** emisiones, intensidad energética, PIB, mix energético, energía renovable, modelos de panel.

**Keywords:** emissions, energy intensity, GDP, energy mix, renewable energy, panel models.

**JEL:** C23, O5, Q2, Q43.

---

\* Universidad Carlos III de Madrid.

Contacto: [andiaz@eco.uc3m.es](mailto:andiaz@eco.uc3m.es)

\*\* Universidad de La Laguna.

Contacto: [gmarrero@ull.es](mailto:gmarrero@ull.es)

\*\*\* ICAE, Universidad Complutense de Madrid.

Contacto: [lpuch@ccee.ucm.es](mailto:lpuch@ccee.ucm.es)

Agradecemos los comentarios de Josué Barrera-Santana y Jesús Rodríguez López.

Versión de enero de 2022.

<https://doi.org/10.32796/ice.2022.924.7355>

## 1. Introducción

Uno de los pilares centrales del Plan de Recuperación «Next Generation» y del Marco Financiero Plurianual de la Unión Europea es el «European Green Deal», que es un ambicioso proyecto de transformación sectorial para luchar contra el cambio climático. Como se explica en Díaz (2020), se pretende aprovechar el impulso de la reactivación económica tras la crisis de la COVID-19 para avanzar en aquellas reformas económicas que permitan un desarrollo económico compatible con la neutralidad climática. Para evaluar el efecto de esas reformas debemos entender y medir la relación entre cambio climático y actividad económica. Esta relación es dinámica y de doble dirección: el clima afecta nuestra productividad, el rendimiento de nuestras inversiones y, simultáneamente, nuestras decisiones dejan una huella medioambiental. En este artículo queremos repasar algunos de nuestros hallazgos más importantes en la relación entre macroeconomía, energía y emisiones de CO<sub>2</sub>. Para ello, revisamos nuestros principales resultados en Díaz *et al.* (2019), Díaz *et al.* (2020) y Barrera-Santana *et al.* (2021), y elaboramos sobre algunas de sus potenciales implicaciones para la discusión actual. Entender la compleja interacción entre actividad económica y emisiones nos ayudará a entender los costes económicos de avanzar en la lucha contra el cambio climático y en el mejor diseño de políticas económicas dirigidas a la recuperación económica y la transición verde en la Unión Europea tras la crisis de la COVID-19.

En el apartado 2 describimos el marco general de nuestro análisis. En primer lugar, en el subapartado «Contabilidad de emisiones» hacemos un repaso somero de la evidencia básica sobre la evolución a lo largo del tiempo de las emisiones de CO<sub>2</sub> (el principal componente de los gases de efecto invernadero), la actividad económica y la energía. Para presentar esta evidencia preliminar echamos mano de la ecuación de Kaya. Esta ecuación se usa para hacer lo que se conoce como «contabilidad de emisiones». Así como

descomponemos el crecimiento del PIB como suma del crecimiento de los componentes principales del gasto final agregado, podemos descomponer el crecimiento en las emisiones en función del crecimiento del PIB per cápita, población y consumo energético. La ecuación de Kaya es una herramienta útil de primer diagnóstico. Por ejemplo, permite deducir de un vistazo que las emisiones de CO<sub>2</sub> en España, a diferencia de Alemania, están muy correlacionadas con el ciclo económico. Esto, en principio, plantea un problema porque nos hace suponer que la recuperación en ciernes ha de venir con un aumento pronunciado de emisiones en España. También nos permite poner en contexto el esfuerzo de mitigación de emisiones que hay que hacer para cumplir con el Acuerdo de París. Por ejemplo, durante el periodo 1971-2019 la tasa de crecimiento anual de las emisiones de CO<sub>2</sub> mundiales ha sido 1,90 % y para llegar a la neutralidad climática en 2050 las emisiones globales deben caer a una tasa del 4 % anual. Es decir, debemos hacer un gran esfuerzo y debe ser drástico. La cuestión, obviamente, es el coste económico de las políticas de mitigación de emisiones. Hasta la fecha, el PIB mundial ha crecido casi en un 2 % anual. Es decir, emisiones y crecimiento han ido de la mano.

Pero las correlaciones estadísticas, en principio, no nos dicen mucho acerca de la relación entre actividad económica y emisiones. Para ello, necesitamos un marco teórico que sea compatible con la evidencia mostrada por la ecuación de Kaya. En el subapartado «El marco teórico» describimos el marco con el que podemos entender la relación entre emisiones, macroeconomía y energía y evaluar los efectos de políticas de mitigación de emisiones. Aquí repasamos las contribuciones de Díaz *et al.* (2004) y Díaz y Puch (2019a, 2019b). Este marco está basado en la teoría neoclásica de crecimiento con generaciones sucesivas de capital físico que se diferencian entre sí en su contenido tecnológico y su requerimiento de energía. Este requerimiento viene determinado por la evolución del progreso técnico ahorrador de energía y su interacción

con la evolución del progreso técnico que es específico a la inversión. De esta manera, cambios en la inversión agregada afectan tanto al volumen de energía demandada como al tipo de energía requerida y a la productividad agregada. Este es el canal por el que las políticas energéticas afectan a la macroeconomía. A este modelo de crecimiento neoclásico añadimos la función de daño climático, como hacen Golosov *et al.* (2014), que a su vez está basado en los diversos trabajos de Nordhaus<sup>1</sup>. En el subapartado «Modelos empíricos» describimos los implicados por la teoría que hemos usado en nuestros trabajos para estimar la relación entre crecimiento económico, energía y niveles de emisiones de CO<sub>2</sub>. La traslación de los modelos teóricos a empíricos no es inmediata. En muchos modelos teóricos se pueden ignorar particularidades de cada economía como la composición sectorial o se puede tener una versión muy simplificada del *mix* energético. En cambio, a la hora de estimar la relación entre emisiones, crecimiento y demanda de energía hay que explicitar esas especificidades de cada país y en cada momento del tiempo o estado de desarrollo económico.

Una cuestión importante que hemos aprendido es que, antes de caracterizar la dinámica de la relación entre energía, economía y emisiones, es conveniente valorar las restricciones que impone en un mundo globalizado la experiencia reciente de crecimiento económico en distintos países y regiones. En Díaz *et al.* (2019) nos centramos en la relación entre uso de energía y crecimiento económico en un panel de 134 países. Y es que un punto crucial para avanzar en la transición energética es conocer el coste económico de cambiar nuestro modelo energético, en la doble dimensión de cantidad de energía que usamos por unidad de PIB (ratio conocida como «intensidad energética») y del tipo de energía (el *mix* energético que usemos). En el apartado 3 mostramos que, dado el estado actual

de la tecnología, la mejora de la intensidad energética va asociada a la dinámica del crecimiento económico a nivel mundial. Además, condicionado a la intensidad energética, el paso de los combustibles fósiles a las energías renovables de frontera (eólica, solar o geotérmica) también se correlaciona positivamente con el crecimiento. Por tanto, dada la dificultad para conseguir un cambio radical en el *mix* energético a nivel global, tal que se generalice el uso de tecnologías renovables de frontera, la evidencia que obtenemos indica que la mejor política para minimizar el coste económico de mitigar emisiones es optar por invertir en eficiencia energética, sea cual sea el origen de esta.

En el apartado 4 revisamos algunos de los resultados de Barrera-Santana *et al.* (2021) para el caso de los países de Europa Occidental, y en relación a los resultados globales que habíamos obtenido en Díaz *et al.* (2020). En estos trabajos sí estimamos el efecto sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> de los cambios en la intensidad energética y en el peso de las fuentes renovables en el *mix* energético controlando por la experiencia de crecimiento económico a corto y largo plazo.

Nuestro principal hallazgo es que el crecimiento económico está fuertemente correlacionado con el nivel de emisiones en aquellos países donde los periodos de expansión económica están asociados a sectores intensivos en energía. Además, el efecto mitigador de las energías renovables depende negativamente de la intensidad energética del país. Con esta información, en el apartado 5 usamos nuestras estimaciones para hacer una pequeña evaluación de la factibilidad de los objetivos del «European Green Deal». Nuestros resultados sugieren que es muy difícil cumplir esos objetivos sin que se reduzca la actividad económica o impulsar un cambio acelerado en nuestro modelo energético. Estas circunstancias pueden constituir un desafío para los objetivos de transición climática contemplados en el Plan de Recuperación de la UE, cuyo principal objetivo en este mismo momento es mitigar el impacto económico y social de la pandemia de coronavirus. En el apartado 6 presentamos unas reflexiones finales y algunas

<sup>1</sup> W. Nordhaus, en diversos trabajos desde 1977, fue el primero que estudió la relación entre crecimiento económico y cambio climático y ha diseñado los modelos canónicos para estudiar esta relación. Véase un resumen de sus aportaciones en Nordhaus y Boyer (2000).

sugerencias de política económica. En particular, creemos que urge establecer impuestos procíclicos en el uso de combustibles que, al mismo tiempo, garanticen la previsibilidad del precio del carbono.

## 2. El marco para el análisis

El Acuerdo de París marca como objetivo llegar a la neutralidad climática en 2050 para poder limitar el aumento de la temperatura media del planeta en 1,5 °C para el año 2100. La neutralidad climática implica que debemos lanzar a la atmósfera aquella cantidad de CO<sub>2</sub> que se pueda absorber, ya sea por medios naturales o artificiales. Según diversas estimaciones, los sumideros naturales de carbono eliminan entre 9,5 y 11 gigatoneladas (Gt) de CO<sub>2</sub> al año. Las emisiones globales anuales de CO<sub>2</sub> alcanzaron las 33,6 Gt en 2019 (las emisiones de CO<sub>2</sub> son responsables de alrededor del 80 % de los gases de efecto invernadero)<sup>2</sup>. Hasta la fecha, ningún sumidero artificial puede eliminar carbono de la atmósfera en la escala necesaria para combatir efectivamente el calentamiento global. De acuerdo con estas estimaciones, el nivel sostenible de emisiones de CO<sub>2</sub> es un 33 % del nivel de 2019 y alrededor de un 29 % de las de 2020. Esto quiere decir que desde 2019 hasta 2050 el nivel mundial de emisiones de CO<sub>2</sub> debe caer a una tasa media anual del 3,54 %. Para diseñar un plan de descarbonización factible es necesario saber cuál ha sido la senda de emisiones en el pasado, cuáles son sus determinantes, y tener un marco teórico para entender su relación con la actividad económica. Solo de esta manera podremos estimar los costes y beneficios, en términos de PIB, tanto en el corto como en el largo plazo, de las políticas de descarbonización que se quieran implementar.

<sup>2</sup> Véase el informe *International Climate Negotiations* emitido por el Parlamento Europeo en 2018. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/626092/IPOL\\_STU\(2018\)626092\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/626092/IPOL_STU(2018)626092_EN.pdf)

## Contabilidad de emisiones

Antes de analizar cualquier teoría es necesario conocer los datos. Una forma sencilla de organizar la evidencia sobre emisiones de CO<sub>2</sub> y actividad económica es la ecuación conocida como «identidad de Kaya» que pone en relación el nivel de emisiones, el PIB y uso energético:

$$CO_{2t} = \frac{PIB_t}{Población_t} \times Población_t \times \frac{CO_{2t}}{PIB_t} \quad [1]$$

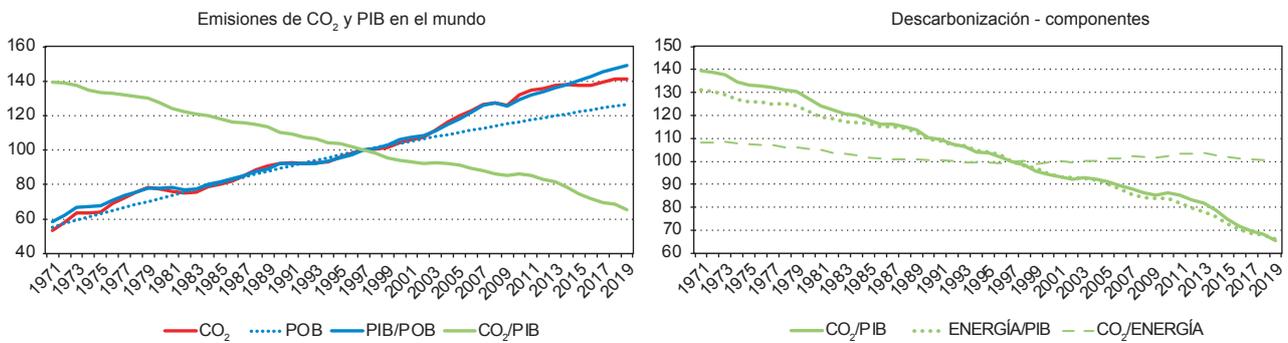
Donde el agregado CO<sub>2t</sub> se refiere a las emisiones totales, ya sea de un país o de un grupo de países. Los componentes  $PIB_t/Población_t$  y  $Población_t$  hacen referencia a nuestra actividad económica. Podríamos decir que el primero es el «margen intensivo» y el segundo el «margen extensivo». El tercer componente es un índice del grado de «carbonización económica». Este índice puede disminuir por dos razones: o porque usemos menos energía en nuestra actividad económica o porque esta energía sea más limpia. Podemos descomponerlo en dos partes:

$$\frac{CO_{2t}}{PIB_t} = \frac{Energía_t}{PIB_t} \times \frac{CO_{2t}}{Energía_t} \quad [2]$$

Donde la primera ratio es un indicador macroeconómico de intensidad energética. El numerador se refiere al consumo total de energía, producida en el país o importada, y contiene tanto el uso final de energía, aquella que consumen los sectores finales, como el primario, el necesario para generar la energía final. Este consumo total incluye todas las fuentes tanto de origen fósil como renovable. Cuanto menor es la ratio de intensidad energética, se entiende que más eficiente es la tecnología productiva de un país, lo que redundará en menos emisiones y, como veremos, en una mayor productividad agregada. El último componente de la identidad indica la intensidad de carbonización o el grado de suciedad en CO<sub>2</sub> de la energía utilizada.

FIGURA 1

## ECUACIÓN DE KAYA PARA EL MUNDO



FUENTE: Elaboración propia a partir de datos de la AIE (Agencia Internacional de la Energía).

Esta ratio depende del *mix* energético del país: cuanta más energía de origen renovable, menor será la ratio; pero incluso dentro del *mix* de origen fósil puede haber diferencias significativas, ya que el carbón es mucho más contaminante que el gas. Es interesante diferenciar entre estas dos formas de descarbonización económica porque se refieren a diferentes procesos que atañen a diferentes actores de la economía. Un ejemplo de descarbonización energética es la sustitución de vehículos propulsados por gasolina por sus equivalentes eléctricos. Un ejemplo de reducción en intensidad energética son las mejoras constantes en la eficiencia de los motores de los vehículos. En ambos casos, conseguimos disminuir el nivel de emisiones por unidad de producción, pero lo hacemos de forma muy diferente. Volveremos a hablar más adelante de las consecuencias macroeconómicas, especialmente para la política económica, de avanzar en cada tipo de descarbonización económica.

Si tomamos las Expresiones [1] y [2] en logaritmos y en diferencias, podemos hacer una contabilidad del crecimiento de las emisiones, de igual manera que hacemos una contabilidad del crecimiento del PIB como suma de las tasas de crecimiento de sus componentes. La Figura 1 es una versión de Díaz *et al.* (2020).

En el panel de la izquierda se muestra la evolución de los componentes de la Ecuación [1] y el en panel de la derecha se muestra la evolución de los componentes de la Ecuación [2].

Durante el periodo 1971-2019, la tasa de crecimiento media de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> ha sido prácticamente igual a la del PIB per cápita mundial, 1,85 % y 1,91 %, respectivamente, como se ve en la Tabla 1. Esto quiere decir que el ritmo al que hemos descarbonizado nuestra actividad económica per cápita ha compensado el aumento de la población mundial. Este comportamiento parejo de emisiones y evolución del PIB per cápita se mantiene en todo el periodo con ligeras variaciones. Por ejemplo, desde la firma del Protocolo de Kyoto en 1997 las emisiones han crecido a una tasa ligeramente menor que el PIB per cápita. Es decir, hemos descarbonizado nuestra actividad económica a un ritmo ligeramente superior al del periodo anterior 1971-1997. El segundo panel de la Figura 1 muestra que esa descarbonización ha venido fundamentalmente a través de una caída sostenida en la intensidad energética, mientras que la descarbonización energética (el cambio de energías fósiles a renovables) ha jugado un papel menor hasta el momento presente. Los datos agregados ocultan

TABLA 1

## TASAS DE CRECIMIENTO DE LOS COMPONENTES DE LA ECUACIÓN DE KAYA MUNDIAL

	CO <sub>2</sub>	POB	PIB/POB	CO <sub>2</sub> /PIB	ENERGÍA/PIB	CO <sub>2</sub> /ENERGÍA
1971-2019 .....	1,85	1,50	1,91	-1,53	-1,35	-0,19
1971-1997 .....	1,81	1,73	1,61	-1,51	-1,19	-0,32
1997-2019 .....	1,90	1,22	2,27	-1,56	-1,53	-0,03
2019.....	-0,05	1,07	1,89	-2,94	-1,79	-1,17
2019-2050 .....	-3,54	1,50	2,00	-6,83	-2,00	-4,93

FUENTE: Elaboración propia a partir de datos de la AIE (Agencia Internacional de la Energía).

mucha heterogeneidad, pero, en general, tal y como estimamos en Díaz *et al.* (2019), las reducciones en emisiones han venido fundamentalmente por ganancias de eficiencia.

Volvamos ahora al objetivo del Acuerdo de París. Para alcanzar la neutralidad en 2050, la tasa de crecimiento media anual de las emisiones debe ser -3,54 % desde hoy hasta entonces. Lo primero que salta a la vista es que se trata de un gran cambio comparado con la media histórica, como muestra la Tabla 1. Aunque la tasa de crecimiento en 2019 ya fue negativa, solo lo fue en -0,05 %. Cabe destacar que en 2020 las emisiones disminuyeron casi en un 5 % gracias, en buena medida, a que el PIB mundial cayó en un 4,2 % debido a la crisis de la COVID-19. La gran pregunta es si podemos reducir emisiones al ritmo necesario sin provocar una recesión ni que, por supuesto, disminuya la población. La última fila de la Tabla 1 hace un pequeño cálculo del ritmo de descarbonización necesario para cumplir el Acuerdo de París sin que caiga el PIB ni la población. Este escenario sería el ideal, dado que no comporta sacrificios económicos. Pero este escenario ideal implica cambios muy drásticos. Por ejemplo, la ratio CO<sub>2</sub>/PIB debería caer casi en un 7 % anual. Si suponemos que la intensidad energética disminuyera al 2 % anual, la carbonización de la energía consumida debería caer casi en un 5 % anual. ¿Tiene sentido suponer que la intensidad energética

caiga al 2 %? ¿Es factible? ¿Es posible cambiar el *mix* energético de tal manera que permita descarbonizar tan rápidamente? Para responder a estas preguntas tenemos que establecer un marco teórico para entender la relación entre crecimiento del PIB, uso de energía, *mix* energético y emisiones. Solo de esta manera podremos evaluar los costes y beneficios de las políticas necesarias para estar en el escenario propuesto.

### El marco teórico

A partir de la evidencia descriptiva anterior, nuestra estrategia consiste en establecer una relación entre las emisiones de CO<sub>2</sub> y las variables fundamentales: la actividad económica y el uso de energía. El marco para el análisis es el de la teoría neoclásica del crecimiento. Concretamente, ampliamos una especificación particular de la teoría de la producción neoclásica con uso de energía, incorporando un supuesto acerca de cómo se generan las emisiones contaminantes. Esta modelación amplía la expresión de los modelos DICE (Dynamic Integrated Climate-Economy) explicitando el papel de la energía. Véase, por ejemplo, Brock y Taylor (2010) o Álvarez *et al.* (2005).

El punto de partida es considerar una función de producción agregada bajo rendimientos constantes a escala. La especificación más sencilla que podemos considerar supone que la producción agregada se

obtiene de una combinación de capital, trabajo y energía en presencia de progreso técnico. Por sencillez, y siguiendo a Díaz *et al.* (2019), suponemos que el *input* energético,  $Z_t$ , combina energía de origen fósil y renovable:

$$Z_t = (\vartheta Z_{ft}^\nu + (1 - \vartheta) Z_{gt}^\nu)^{1/\nu} \quad [3]$$

Donde  $0 < \vartheta < 1$  y  $\nu \geq 0$ . El *input* energético  $Z_t$  es una combinación de dos tipos de *inputs*,  $Z_{jt}$ , cada uno de ellos representando un agregado de uso primario de energía, bien de origen fósil,  $j = f$ , o bien de origen renovable,  $j = g$ . Suponemos que la elasticidad de sustitución entre ambos agregados energéticos puede ser mayor que uno, de manera que ambos *inputs* sean sustitutos y que la economía podría operar usando solo un tipo de energía, fósil o renovable. Además, cada cesta de energías de tipo  $j$  es, a su vez, un *mix* de varias fuentes:

$$Z_{jt} = [\lambda_{j1} e_{j1t}^{\rho_j} + \lambda_{j2} e_{j2t}^{\rho_j} + \dots + \lambda_{jn} e_{jnt}^{\rho_j}]^{1/\rho_j} \quad [4]$$

Donde la elasticidad de sustitución de las diferentes fuentes energéticas dentro de cada uno de los agregados,  $Z_{jt}$ ,  $j = f, g$ , puede ser diferente de uno. Optamos por esta representación porque la composición sectorial de la economía y su velocidad de transformación afectan la elasticidad de la producción con respecto de cada fuente. La producción agregada requiere de capital, energía y trabajo:

$$Y_t = A_t K_t^\alpha Z_t^\theta L_t^{1-\alpha-\theta} \quad [5]$$

Donde el factor  $A_t$  es un factor de progreso tecnológico Hicksiano. En esta representación general añadimos un supuesto adicional. Como en Díaz y Puch (2019a, 2019b), suponemos que el capital tiene un requerimiento energético y que este requerimiento

es específico de la tecnología incorporada en él. Una forma de expresar esta complementariedad es:

$$Z_t = x_t K_t \quad [6]$$

Cuanto mayor es  $x_t$ , mayor es la necesidad de energía del capital existente y más energía se usará. Por tanto, representa la intensidad energética del *stock* de capital. Obviamente, esta intensidad energética, como muestran Boyd y Lee (2019), entre otros, depende de las decisiones de las empresas y el resto de los agentes económicos. Como mostramos en Díaz y Puch (2019a) el factor  $x_t$  cambia con las decisiones de inversión de los agentes económicos y el ritmo de reemplazo del capital. Si combinamos [5] y [6] podemos interpretar  $Z_t$  como demanda de energía y expresarla en función de la producción per cápita y la cantidad de trabajo:

$$Z_t = L_t \left( \frac{x_t^\alpha}{A_t} \right)^{1/(\alpha+\theta)} y_t^{1/(\alpha+\theta)} \quad [7]$$

Esta expresión nos dice que el uso energético es mayor cuanto mayor es el nivel de producción per cápita, cuanto mayor es la intensidad energética del capital y cuanto menor sea nuestro nivel de productividad agregada. Ahora vamos a integrar esta teoría de producción con la de daño climático.

Siguiendo a Golosov *et al.* (2014), representamos el daño climático como una función del volumen de CO<sub>2</sub> acumulado en la atmósfera, que llamamos  $S_t$ :

$$D_t = \exp(-\gamma_t (S_t - \bar{S})) \quad [8]$$

La variable climática es, a su vez, un *stock* cuya evolución depende de la capacidad física de la naturaleza de absorber CO<sub>2</sub> (a la tasa  $\omega$ ), y del flujo de emisiones en cada periodo,  $P_t$ . Para simplificar, podemos expresar la ley de evolución del clima como:

$$S_t = P_t + (1 - \omega) S_{t-1} \quad [9]$$

Nos queda la parte más importante, que es la relación entre emisiones,  $P_t$ , y actividad económica. Vamos a suponer que:

$$P_t = \tilde{Z}_t^\theta \tag{10}$$

Donde  $\tilde{Z}_t$  es la energía de origen fósil medida en unidades de CO<sub>2</sub>. Ahora, usando [7], podemos reescribir la Ecuación [10] como:

$$P_t = \left(\frac{\tilde{Z}_t}{Z_t}\right)^\theta L_t \left(\frac{x_t^\alpha}{A_t}\right)^{\gamma/(\alpha+\theta)} Y_t^{\gamma/(\alpha+\theta)} \tag{11}$$

Esta expresión, en logaritmos, es el fundamento teórico de la ecuación de Kaya, que es la suma de las Ecuaciones [1] y [2]. El primer componente ( $\tilde{Z}_t / Z_t$ ) es el grado de carbonización energética; el segundo componente,  $L_t$ , es un indicador de la población;  $x_t$  es la intensidad energética que podemos aproximar por la ratio energía sobre PIB,  $x_t \approx Z_t / Y_t$ , dado que el stock de capital y el PIB tienen tasas de crecimiento similares. El último componente es el PIB per cápita. El hecho de que aparezca el factor de desarrollo tecnológico implica que la relación entre emisiones y actividad económica varía según los niveles de desarrollo, como se muestra en Barrera-Santana *et al.* (2021). Ahora, con este bagaje teórico podemos pasar a estimar la relación observada entre emisiones, crecimiento económico, intensidad energética y descarbonización. Para ello, el modelo teórico resumido en la Ecuación [11] debe ser adaptado para poder aplicar las técnicas econométricas adecuadas.

### Modelos empíricos

Para poder llevar la relación de equilibrio que aparece en la Ecuación [11] a los datos, tenemos que hacer una pequeña reinterpretación de esa relación. Para ello, introducimos un modelo empírico que relaciona las emisiones de CO<sub>2</sub> con la actividad económica

y las variables energéticas (*i. e.*: la intensidad energética y el *mix* de consumo primario y final). Las variables macroeconómicas son el nivel de actividad y la tasa de crecimiento del PIB real por habitante, ajustadas por PPA (paridad del poder adquisitivo), y se acompañan de un conjunto de efectos fijos y temporales que se han utilizado en la literatura. De este modo, consideramos el siguiente modelo dinámico de datos de panel:

$$GP_{i,t} = \alpha + R_i + T_t - \beta \ln(P_{i,t-1}) + \delta \ln(Y_{i,t-1}) + \varphi GY_{i,t} + \theta' XE_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \tag{12}$$

Donde el crecimiento de las emisiones per cápita,  $GP$ , se regresa sobre un retardo del nivel de emisiones,  $P$ , y del nivel de PIB,  $Y$ , ambos en logaritmos, y sobre la tasa de crecimiento del PIB,  $GY$ . La regresión incluye un término constante, y variables *dummy* regionales y temporales,  $R_i$  y  $T_t$ , respectivamente. El elemento clave es el conjunto de controles,  $XE$ , que describe las variables energéticas que afectan al crecimiento de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Estas variables son específicas a cada país y a cada periodo y vienen representadas por:

$$\theta' XE_{i,t} \equiv \theta_0 GEI_{i,t} + \sum_{j=1}^{J-1} \theta_j^m \Delta m_{j,i,t} + \sum_{k=1}^{K-1} \theta_k^s \Delta s_{k,i,t} \tag{13}$$

Donde, en primer lugar,  $GEI$  mide la intensidad energética a través de los cambios en el uso de energía en unidades físicas sobre el PIB (consumo de energía por dólar en términos constantes). Esto es equivalente empírico a la variable en el modelo teórico expresado en la Ecuación [11]. El factor de descarbonización energética ( $\tilde{Z}_t / Z_t$ ) viene expresado por los cambios en el *mix* energético, que es el factor  $\sum_{j=1}^{J-1} \theta_j^m \Delta m_{j,i,t}$ . Cada  $\Delta m_j$  refleja el cambio en la participación en el *mix* de consumo energético primario (carbón, gas, nuclear y renovables), teniendo que omitir la categoría de consumo de petróleo para evitar problemas de multicolinealidad estricta en las estimaciones. Por su parte, representa el cambio en la participación de cada sector

de consumo energético final (residencial, industria, transporte, comercio y servicios), siendo el sector primario el omitido en este caso. En cada caso, por tanto, los coeficientes estimados se referirán en relación con las correspondientes categorías omitidas.

Esta especificación nos permite considerar separadamente el papel del *mix* energético primario y del *mix* energético final, a la vez que la contribución de la intensidad energética. Respecto al *mix* primario, típicamente exploramos el movimiento desde el petróleo (la omitida) hacia carbón, gas natural, nuclear o renovables. En cuanto a la composición sectorial de consumo energético final, consideramos el paso de consumo en el sector primario (la omitida) a consumo en el sector residencial, industrial, transporte o comercio y servicios. Es necesario introducir la distribución sectorial del uso energético final porque hay sectores que contaminan menos que otros y queremos distinguir cambios en intensidad energética de cada sector de los cambios en composición sectorial. También estudiamos los resultados que se obtienen para distintas regiones organizadas por los niveles de renta de los países.

Las estimaciones pueden ser tipo *pool-OLS*, o en dos etapas tipo *System GMM* (Arellano & Bover, 1995; Blundell & Bond, 1998), puesto que las primeras son sensibles a sesgos de endogeneidad de las variables explicativas. La validez de los instrumentos del *System GMM* se contrasta con un test J de Hansen de sobreidentificación. Respecto a la proliferación de instrumentos, implementamos la reducción de instrumentos propuesta por Roodman (2009). Al «colapsar» la matriz de instrumentos, nuestra especificación del *System GMM* limita el número de restricciones de sobreidentificación reduciendo la matriz de instrumentos a un número claramente inferior al tamaño de la sección cruzada. En la especificación del *GMM* usamos errores estándar robustos, y la matriz de varianzas y covarianzas se corrige por posibles sesgos en muestras pequeñas (Windmeijer, 2005). La discusión detallada de los distintos aspectos econométricos se desarrolla en los artículos de referencia: Díaz *et al.* (2019),

Díaz *et al.* (2020) y Barrera-Santana *et al.* (2021). Las estimaciones que discutimos a continuación provienen también de esos trabajos. Como hemos indicado en la «Introducción», tanto en Díaz *et al.* (2020) como en Barrera-Santana *et al.* (2021), nos centramos en la relación entre energía, economía y emisiones. Sin embargo, antes de elaborar nuestro argumento respecto a la dinámica de las emisiones de CO<sub>2</sub>, conviene tener una visión global de lo que hemos aprendido sobre la relación entre energía y crecimiento económico, tal y como lo hemos estudiado previamente en Díaz *et al.* (2019).

### 3. Uso de energía y crecimiento económico

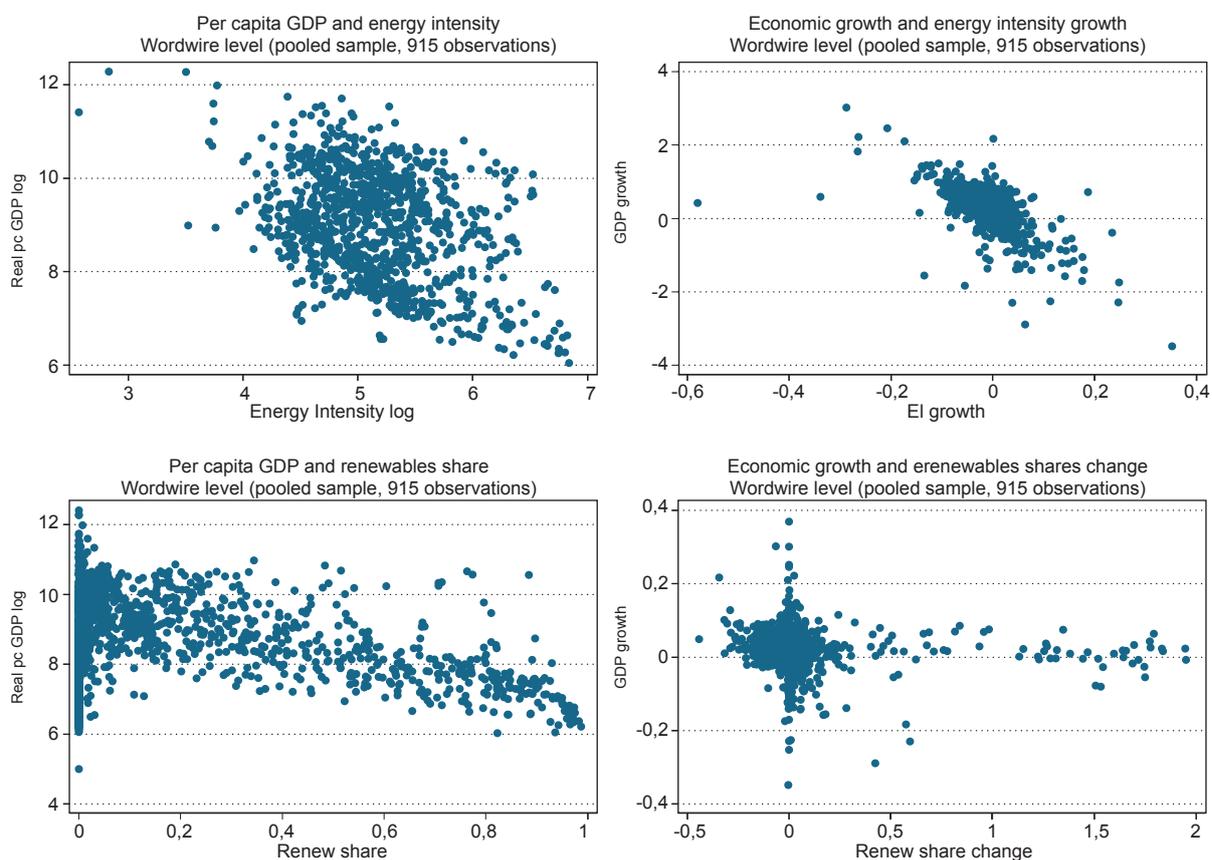
En la senda idílica descrita en el subapartado «Contabilidad de emisiones» supusimos un crecimiento anual del PIB per cápita del 2 % y una caída anual de la intensidad energética de la misma magnitud. Esto implica que para lograr la neutralidad climática en 2050 la energía debe descarbonizarse a un 5 % anual. ¿Tiene algún viso de realidad ese escenario? ¿Es probable esa tasa de crecimiento del PIB dada la experiencia histórica? ¿La inversión en reducir intensidad energética nos hace crecer más o menos o es neutral económicamente? Por último, ¿la transición verde nos hará más productivos? Responder a estas preguntas es importante porque debemos conocer el coste económico agregado de acelerar el ritmo de mitigación de emisiones. Para responderlas, debemos entender cómo los cambios en la intensidad energética y la implantación de energía renovable se relacionan con el crecimiento económico. Esto es lo que estudiamos en Díaz *et al.* (2019).

En este trabajo analizamos la evolución del PIB y varios indicadores energéticos para una muestra de 134 países en el periodo 1960-2010.

La Figura 2 la hemos tomado prestada de ese artículo. En el panel superior, están representados los niveles y las tasas de crecimiento del PIB per cápita, frente a los niveles y las tasas de crecimiento de la

FIGURA 2

PIB, INTENSIDAD ENERGÉTICA Y RECURSOS RENOVABLES



FUENTE: Figura 1 de Díaz *et al.* (2019).

intensidad energética. Por un lado, el gráfico en niveles muestra la gran dispersión que se observa en los datos de todos los países para todos los años. Observamos intensidades energéticas bajas asociadas a enormes diferencias en niveles de desarrollo económico. Sin embargo, cuando nos fijamos en las tasas de crecimiento, la correlación es claramente negativa y significativa. Es decir, una experiencia de mayor crecimiento económico a lo largo de los últimos años ha ido aparejada con reducciones muy importantes en la intensidad energética. Ahora, la pregunta es si existe

alguna relación de algún tipo o se trata de pura coincidencia temporal. Cualquier hipótesis que establezcamos sobre esa relación solo puede explicitarse con un modelo macroeconómico estructural. Esto es lo que hacemos en Díaz *et al.* (2004), y Díaz y Puch (2019a, 2019b). En particular, en Díaz y Puch (2019a) estudiamos un modelo de crecimiento neoclásico donde todo desarrollo tecnológico es, en sí mismo, ahorrador de energía, aunque también haya innovaciones dirigidas específicamente a ahorrar energía, como muestra la evidencia señalada por los ya mencionados Boyd y Lee

(2019), o Gamtessa y Olani (2018), entre otros. Estos trabajos apuntan a que los precios energéticos influyen en el proceso de innovación y adopción tecnológica. No solo eso, sino que la inversión en eficiencia energética puede reportar beneficios privados incluso cuando los precios energéticos no estén en niveles desorbitados si existe incertidumbre sobre su evolución futura (o se sabe que van a aumentar inexorablemente). Esto es así porque buena parte de las innovaciones tecnológicas están incorporadas a los bienes de inversión: para aprovecharlas hay que invertir, poner maquinaria y estructuras a funcionar y, por tanto, consumir nueva energía. Para evitar que la inversión de hoy produzca la ruina de mañana cuando suban los precios es mejor invertir en eficiencia energética. En el agregado, este comportamiento produce las ganancias observadas en eficiencia energética, como mostramos en Díaz *et al.* (2004), y Díaz y Puch (2019b).

La Figura 2 mostrada anteriormente también nos muestra la evolución conjunta de energías renovables y crecimiento del PIB. Aumentar el peso de las energías renovables en el *mix* energético es la otra vía de descarbonización, como ya señalamos en el subapartado «Contabilidad de emisiones». Cuando consideramos (ahora, en el panel inferior de la Figura 2) el PIB per cápita y su crecimiento, frente a la participación de las energías renovables en el *mix* energético primario y su variación anual, respectivamente, no hay evidencia de relación entre el crecimiento económico y la variación en el tiempo en el uso de energía renovables, aunque encontramos una correlación entre niveles de desarrollo y participación de las renovables moderadamente negativa. Por tanto, tenemos que, por un lado, el crecimiento económico viene asociado con una menor intensidad energética, pero que parece no tener relación significativa con el grado de carbonización energético. Ahora surgen dos cuestiones, ¿cuál es el tamaño estimado de las ganancias en eficiencia debidas al crecimiento? y ¿podemos arrojar luz sobre esa falta de relación entre renovables y crecimiento?

En efecto, en Díaz *et al.* (2019) hemos estimado una variante de la Ecuación [12] anterior (centrada, en ese caso, en las emisiones), con el objetivo de caracterizar, como paso previo, la relación entre las variables energéticas y el crecimiento económico a nivel global. Concretamente, la especificación que proponemos es:

$$GY_{i,t} = \alpha + R_i + T_t + \beta \ln(Y_{i,t-t}) + \theta' XE_{i,t} + \lambda' X_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad [14]$$

Donde la variable dependiente es la tasa de crecimiento anual del PIB per cápita,  $GY$ , como es habitual en esta literatura<sup>3</sup>. Las variables explicativas son la propia variable retrasada,  $Y_{i,t}$ , para controlar por el estado inicial de la tecnología y para hacer explícita la idea de convergencia condicional ( $Y_t$  versus  $(1 - \beta) \times Y_{t-1}$ ) donde  $\beta$  captura la velocidad de convergencia.

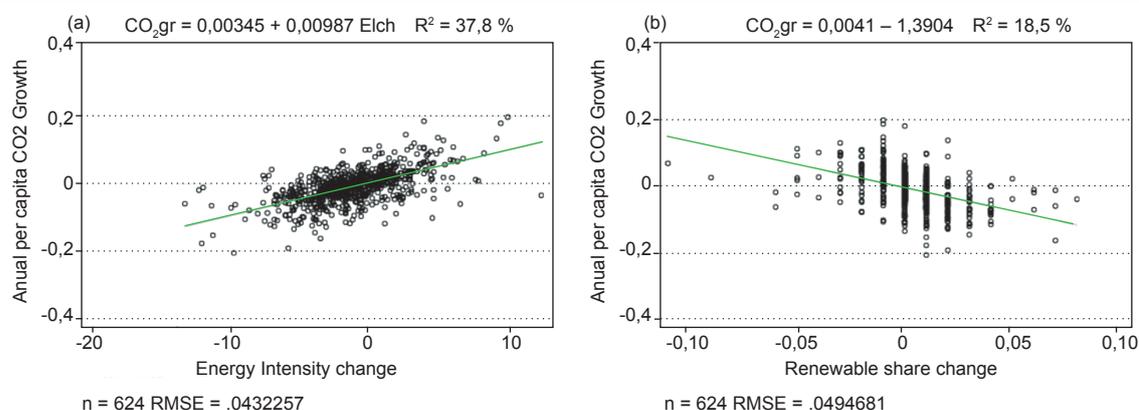
La clave, como en la Especificación [12]-[13], es decir, lo que es distintivo de nuestra estrategia empírica, sea para el crecimiento económico o para las emisiones de CO<sub>2</sub>, es el papel del conjunto de variables energéticas,  $XE$ . Además, la Ecuación [14] considera una serie de variables específicas de cada país,  $X_{i,t}$ , en la línea de la literatura de crecimiento y convergencia. Concretamente, en Díaz *et al.* (2019) controlamos por productividad, desarrollo tecnológico, capital humano y calidad de las instituciones. Las técnicas econométricas que utilizamos siguen lo indicado en el subapartado «Modelos empíricos» a modo de breve resumen. El marco teórico es el descrito previamente, para estimar la relación entre los cambios en la intensidad energética o en el *mix* energético (y, por tanto, en el grado de carbonización energética) y el PIB.

En Díaz *et al.* (2019) encontramos evidencia muy robusta de la relación negativa entre intensidad energética y crecimiento económico, independientemente del

<sup>3</sup> En el artículo también consideramos una especificación alternativa con la variable PIB en niveles, siguiendo una literatura complementaria a la que consideramos. Esto no altera las implicaciones de nuestros resultados. Nótese que el crecimiento que se considera es para un periodo del modelo de cinco años, habitual para este tipo de datos de panel.

FIGURA 3

EMISIONES DE CO<sub>2</sub>, INTENSIDAD ENERGÉTICA Y RENOVABLES



FUENTE: Barrera-Santana *et al.* (2021).

nivel de renta de los países. En particular, una reducción de un 1 % en la ratio de intensidad energética viene asociada a un aumento del PIB per cápita entre el 0,6 % y el 0,7 %. Díaz y Puch (2019a) muestran que esto es el caso porque las caídas en intensidad energética vienen asociadas a innovaciones tecnológicas que hacen aumentar la productividad. Por tanto, parece que una caída de la intensidad energética del 2 % puede ser compatible con una tasa de crecimiento del PIB per cápita del 2 %, como hemos supuesto en el escenario descrito en el subapartado «Contabilidad de emisiones» (véase también la Tabla 1). Pasemos ahora a la relación entre *mix* energético y crecimiento. En principio, un aumento en un 1 % del peso de las fuentes renovables en el *mix* primario tiene un impacto negativo y significativo en el crecimiento del PIB per cápita. En nuestras estimaciones, la elasticidad del crecimiento del PIB respecto al peso de renovables oscila entre -0,42 y -2. Esto indica que, en principio, cambiar a fuentes renovables puede tener un coste económico apreciable. Sin embargo, si distinguimos entre tipos de energías renovables obtenemos que la elasticidad se vuelve positiva, entre 0,4 y 0,6,

cuando estimamos el efecto de un aumento en el *mix* de aquellas energías limpias con gran contenido tecnológico, como la fotovoltaica o la eólica. Es reseñable que las elasticidades de intensidad y renovables de frontera son de una magnitud similar, alrededor de 0,6, lo que sugiere que lo realmente importante para descarbonizar nuestras economías es la inversión tecnológica, ya sea en aumentar nuestra eficiencia energética o en adoptar fuentes renovables con alto contenido tecnológico. Respecto a la composición sectorial del uso energético, tiene un efecto mucho menor sobre el crecimiento del PIB que la intensidad energética. Es decir, no importa *per se* la especialización sectorial de los países, sino la tecnología energética que esos sectores usen.

Aunque estos resultados son esperanzadores, aún no podemos responder a la pregunta implícita del apartado 1 (¿es compatible una tasa de crecimiento del PIB per cápita del 2 % y un ritmo de descarbonización energética del 5 %?) porque aún nos queda un ingrediente, que es estimar cómo un cambio en el *mix* energético reduce el crecimiento de las emisiones. De ello hablaremos en el siguiente apartado.

#### 4. Emisiones de CO<sub>2</sub>, crecimiento económico y uso de energía

En Barrera-Santana *et al.* (2021) estudiamos la relación emisiones, crecimiento económico y energía que se deriva para los países de la Europa Occidental del modelo teórico presentado anteriormente.

La Figura 3 muestra el comportamiento conjunto de crecimiento de las emisiones, cambios en intensidad energética y cambios en el peso de las fuentes renovables en el *mix* energético para el total del panel de datos de nuestra muestra. El panel de la izquierda (a) muestra una clara correlación positiva entre intensidad energética y emisiones. El panel de la derecha (b) muestra, como es esperable, que el crecimiento de las emisiones es menor cuando mayor es el peso de fuentes renovables en el *mix* del país. La Figura 3 muestra, también, que esa relación, aunque existente, parece variar entre países y que puede depender del tiempo. Para poder estimar la elasticidad de las emisiones respecto a esas variables, construimos la siguiente versión de la Ecuación [12]:

$$\Delta \ln(p_{i,t}) = \alpha + R_i + T_t - \beta_1 \ln(p_{i,t-s}) + \beta_2 \Delta \ln(y_{i,t}) + \beta_3 \Delta EI_{i,t} + \beta_4 \Delta RES_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad [15]$$

Donde  $p_{i,t}$  se refiere a las emisiones per cápita,  $y_{i,t}$  es el PIB per cápita,  $\Delta EI_{i,t}$  es el cambio en intensidad energética y  $\Delta RES_{i,t}$  es el cambio en la proporción de energías renovables en el *mix* energético. Los resultados principales de Barrera-Santana *et al.* (2021) aparecen resumidos en la Tabla 2.

Esta tabla presenta tres estimaciones diferentes. La columna (1) contiene los resultados de una versión básica de la Ecuación [15] donde se omitieran las variables energéticas. Si no controlamos por las variables energéticas, observamos que la tasa de crecimiento de las emisiones es menor cuanto mayor es su nivel pasado y que la elasticidad es muy significativa, -0,0888. Es decir, a simple vista parece que hubiera convergencia en niveles de emisión de CO<sub>2</sub>. Esto, en principio, es una buena noticia

porque nos dice que la tasa de crecimiento de las emisiones tiene un patrón descendente. También vemos que el crecimiento de las emisiones está significativamente correlacionado con el crecimiento del PIB, con una elasticidad de 0,434. Si miráramos el mundo con la versión (1) del modelo de emisiones diríamos que la manera de reducir su nivel es reduciendo la actividad económica, ya que cada punto de crecimiento del PIB trae un 0,434 % de crecimiento extra de las emisiones, incluso en presencia de convergencia, ya que la elasticidad de crecimiento de emisiones es de un orden de magnitud menor que la elasticidad respecto al crecimiento del PIB.

Pasemos ahora a la columna (2), donde introducimos las variables energéticas. Aquí vemos que la elasticidad del crecimiento de las emisiones respecto a su valor retardado cae a la mitad, pero, ahora, la elasticidad respecto al PIB es casi el doble. Esto nos dice que cabe esperar un aumento significativo de las emisiones en los próximos años que deben ser de recuperación económica. Además, la elasticidad de las emisiones respecto a la intensidad energética es significativa, 0,031. ¿Qué significa ese número? Literalmente, que una reducción en una desviación estándar de la ratio de intensidad energética (que equivale a una caída en un 18 % de la intensidad energética media de los países de la muestra) se asocia a una caída de 3 % en emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita en nuestra muestra. Este número es significativo puesto que la desviación estándar del crecimiento anual de CO<sub>2</sub> per cápita para toda la muestra analizada es de 5,5 %. Pasemos ahora al papel de las energías renovables en el *mix* energético. La elasticidad del cambio en el peso de las renovables es -0,008. La implicación es que un aumento en una desviación estándar en el peso de las renovables (que en nuestra muestra equivale a aumentar el peso de las renovables en 6,8 % en un año) viene asociado con una disminución en el crecimiento anual de las emisiones de CO<sub>2</sub> dentro del país de aproximadamente 0,8 %, casi en un punto porcentual. Lo importante de estos resultados es que las elasticidades respecto de las variables energéticas son de un orden de

**TABLA 2**  
**ESTIMACIONES CON DATOS DE PANEL. EMISIONES DE CO<sub>2</sub> PER CÁPITA,  
 CRECIMIENTO Y ENERGÍA**

	(1)	(2)	(3)
$\ln(p_{t-1})$	-0,0888*** (0,0169)	-0,0449*** (0,0123)	-0,0485*** (0,0119)
$\Delta \ln(y_{i,t})$	0,434*** (0,121)	0,754*** (0,103)	0,107 (0,173)
$\Delta EI_{i,t}$	–	0,031*** (0,003)	0,031*** (0,003)
$\Delta RES_{i,t}$	–	-0,008*** (0,002)	-0,008*** (0,002)
$\Delta \ln(y_{i,t}) \times \Delta EI_{i,t}$	–	–	0,139*** (0,0353)
$\Delta \ln(y_{i,t}) \times \Delta RES_{i,t}$	–	–	-0,0160 (0,0893)
Constante	0,744*** (0,151)	0,385*** (0,107)	0,416*** (0,103)
Efecto fijo país	Sí	Sí	Sí
Efecto fijo temporal	Sí	Sí	Sí
R <sup>2</sup>	0,372	0,649	0,654
N.º países	624	624	624

NOTAS: Errores estándar entre paréntesis. \*p < 0,10; \*\*p < 0,05; \*\*\*p < 0,01. Las elasticidades de EI y RES representan el efecto del cambio de una desviación estándar sobre la tasa de crecimiento anual de las emisiones.

FUENTE: Extractos de las Tablas 4.1 y 4.2 de Barrera-Santana *et al.* (2021).

magnitud menor que la elasticidad respecto del PIB. Como hemos dicho anteriormente, esto que-rría decir que, en principio, no podemos reducir emisiones de forma significativa sin reducir la actividad económica. Pero esta conclusión no tiene en cuenta que el crecimiento de la actividad económica puede tener efectos indirectos sobre las emisiones dependiendo de las variables energéticas. Por ejemplo, en principio, en un país muy eficiente y con gran peso de renovables, el aumento de actividad económica no debería redundar en un aumento de las emisiones. Por ello, aumentamos el modelo presentado en la Ecuación [15] con dos términos que interaccionan

el crecimiento del PIB con las variables energéticas,  $\Delta \ln(y_{i,t}) \times \Delta EI_{i,t}$  y  $\Delta \ln(y_{i,t}) \times \Delta RES_{i,t}$ , respectivamente. Los resultados aparecen en la columna (3). Cuando interaccionamos el crecimiento del PIB con las variables energéticas obtenemos que la elasticidad de las emisiones respecto a la actividad económica se reduce drásticamente y deja de ser significativa (de 0,754 a 0,107) y solo lo es cuando se combina con alta intensidad energética. En ese caso, la elasticidad es 0,139 y muy significativa. En cambio, la elasticidad del término donde el crecimiento del PIB interacciona con el peso de renovables es negativo, aunque no significativo.

**TABLA 3**  
**TASAS DE CRECIMIENTO DE EMISIONES PARA VARIOS PAÍSES DE LA UE**  
**Y VARIOS PERIODOS**

	% de UE CO <sub>2</sub> emisiones en 2019	Emisiones de 2020/Objetivo 2030	Tasas de crecimiento		
			2020-2030	1990-2019	2019-2020
UE.....	—	1,51	-4,04	-0,84	-13,14
Francia.....	10,18	1,52	-4,10	-0,71	-16,01
Alemania.....	23,21	1,33	-2,84	-1,34	-11,24
Italia.....	11,25	1,58	-4,47	-0,69	-13,06
<b>España.....</b>	<b>9,23</b>	<b>2,28</b>	<b>-7,92</b>	<b>0,81</b>	<b>-18,68</b>

FUENTE: Elaboración propia a partir de estadísticas BP plc (British Petroleum).

Nuestra lectura de estos resultados es que no es el crecimiento del PIB *per se* el que genera emisiones de CO<sub>2</sub> adicionales. Más bien, es el crecimiento del PIB siempre que la intensidad energética es alta. Cabe resaltar que, ahora, las energías renovables pasan a tener un efecto mayor para mitigar emisiones: a la elasticidad de -0,008 de un efecto directo hay que añadirle el -0,016 al interaccionar renovables con crecimiento del PIB. Es decir, el efecto benéfico de aumentar el peso de las renovables viene a través de compensar el efecto del aumento de la actividad económica. Este resultado refuerza el anterior: nuestra prioridad absoluta debe ser reducir nuestra intensidad energética, sea cual sea la fuente, y aprovechar la recuperación económica para impulsar el cambio en nuestro *mix* energético.

##### 5. Transición verde y recuperación económica en la Unión Europea

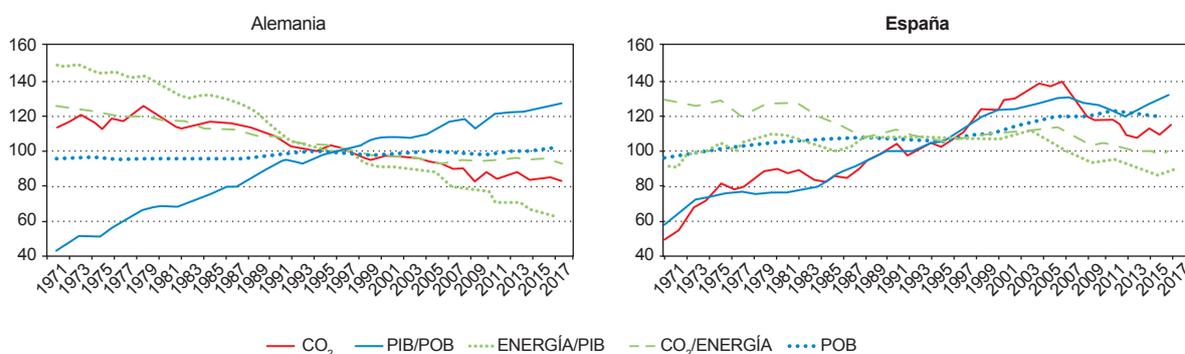
Uno de los pilares básicos del Plan de Recuperación de la Unión Europea está asociado al «European Green Deal» con el que se pretende movilizar una gran masa de recursos e inversiones que faciliten la transición

energética y llegar a la neutralidad climática en 2050. Para ello, la Unión Europea se ha fijado un objetivo intermedio que es que las emisiones en 2030 sean un 55 % inferiores a las de 1990. La Tabla 3 pone en contexto estos números. Para el total de la Unión, este objetivo implica reducir las emisiones en un 4 % anual durante el periodo 2020-2030. Este objetivo supone multiplicar por cuatro la tasa de reducción de emisiones del periodo 1990-2019, pero es tres veces menor a la tasa de reducción del año 2020, donde la tasa de crecimiento del PIB europeo fue del -5,8 %.

Si aplicáramos este objetivo de manera uniforme para todos los países de la Unión, vemos que España debe reducir sus emisiones casi en un 8 %, mientras que Alemania debe hacerlo en menos del 3 %. Y es que hay una gran heterogeneidad entre países. La Figura 4 muestra los componentes de la ecuación de Kaya para Alemania y España. En Alemania, las emisiones están desacopladas del PIB y siguen, más bien, la evolución del grado de carbonización del *mix* energético. Vemos que la intensidad energética cae con fuerza en todo el periodo considerado. Seguramente, la especialización de Alemania en el sector manufacturero con un gran contenido tecnológico es el factor más

FIGURA 4

ECUACIÓN DE KAYA PARA ALEMANIA Y ESPAÑA



FUENTE: Elaboración propia a partir de datos de la AIE (Agencia Internacional de la Energía).

importante para entender su evolución. En España, por el contrario, las emisiones siguen con fuerza la evolución del PIB per cápita, presentando ambos un fuerte componente cíclico. Más aun, la intensidad energética solo cae de forma apreciable desde 2005. Es incluso más llamativo que la carbonización del *mix* energético estaba plana durante el gran periodo 1986-2005. Seguramente, la primera caída de los años ochenta venga explicada por la reconversión industrial y la segunda por el efecto de la Gran Recesión.

Esta evolución tan dispar nos sugiere que las emisiones de CO<sub>2</sub> aumentarán en España con fuerza, a diferencia de Alemania, durante esta fase de recuperación, a menos que haya cambios drásticos en inversión que mejoren la eficiencia energética y nuestro *mix* energético.

¿Qué sugieren las estimaciones obtenidas en Barrera-Santana *et al.* (2021) sobre la factibilidad de los planes de la Unión Europea? Por ejemplo, para el total de la Unión Europea, si se mantiene constante el peso de las renovables en el *mix* energético y se desea mantener una tasa de crecimiento del 2 % en el PIB per cápita, la intensidad energética debe caer casi en un 25 % cada año, para que las emisiones

caigan en un 4 % anualmente. Si, por el contrario, se mantiene constante la evolución de la intensidad energética, habría que aumentar el peso de las renovables en 6,8 puntos porcentuales anualmente, lo que supone un aumento del peso en un 93 % de aquí a 2030. Esto es prácticamente el doble del objetivo planteado por la iniciativa legislativa «Fit for 55» de la Comisión Europea<sup>4</sup>. Hay que manejar estas comparaciones con cuidado, porque nosotros estamos planteando escenarios extremos (cómo debe cambiar el *mix* energético si no cambia la eficiencia energética total), mientras que la Comisión Europea está planteando avanzar en las dos maneras de descarbonizar nuestras economías. Lo que ponen de manifiesto nuestras estimaciones es que, en efecto, hay que llevar a cabo cambios drásticos en nuestras variables energéticas. En caso contrario, no podremos alcanzar los objetivos planeados ni para 2030 ni 2050. Al menos, no podremos alcanzarlos sin que caiga la actividad económica.

La pregunta que se plantea ahora es, dadas estas estimaciones, ¿cuál es el plan de actuación más eficaz

<sup>4</sup> Véase en [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP\\_21\\_3541](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_21_3541)

en el medio plazo? Los resultados de Barrera-Santana *et al.* (2021) indican que hay un gran margen de mejora en nuestro *mix* energético. Allí se muestra, al comparar para toda la muestra de países, que la mayor reducción de emisiones proviene de sustituir petróleo por energías renovables, mientras que, en la dirección opuesta, está moverse hacia aumentar el peso en el *mix* del carbón. Por su parte, sustituir petróleo por gas natural supone una mejora moderada de las emisiones, mientras que un incremento del peso de la energía nuclear en el *mix* primario resulta en una situación intermedia. Respecto a los cambios en los consumos de energía por los diferentes sectores finales, obtenemos evidencia de que una vez que controlamos por la intensidad energética de los distintos países en el panel, junto al resto de controles básico, solo son significativos para las emisiones de CO<sub>2</sub> los aumentos de la participación de la demanda energética del sector transporte (recordemos que el sector omitido es el primario) y, menos claro, del sector industrial. Es interesante observar que el efecto de cambios en el *mix* final se reparte entre el transporte y, moderadamente, la industria, al controlar, simultáneamente, por el *mix* primario y la intensidad energética.

Nuestros resultados ponen de manifiesto que las políticas contra el cambio climático deberían dirigirse a impulsar la eficiencia energética y a disminuir el peso de la demanda energética del sector transporte, principalmente. Además, incrementar en el *mix* primario la participación de las energías renovables tiene efectos verdaderamente significativos sobre la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, y frente a cualquier alternativa.

## 6. Conclusiones

En este artículo hemos revisado algunos de nuestros resultados recientes acerca del vínculo entre el desempeño macroeconómico, el *mix* de tecnologías energéticas y la evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub>. El marco teórico de nuestro análisis es el de los modelos de

crecimiento económico con generaciones sucesivas de capital físico en las que, a lo largo del tiempo y si invertimos para ello, no solo mejora la productividad de las máquinas, sino que también disminuyen sus requerimientos de energía. Los modelos empíricos que derivamos en este marco se implementan mediante el uso de técnicas econométricas de panel sobre datos agregados de muchos países.

Nuestros resultados empíricos muestran que la reducción constante en la intensidad energética ha sido el canal principal para mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub>, mientras que, hasta la fecha, el aumento del peso de fuentes renovables en el *mix* energético ha jugado un papel secundario. Además, el crecimiento del PIB conlleva un aumento de emisiones en aquellos casos en que la intensidad energética es alta. En ciertos países, como España, las emisiones de CO<sub>2</sub> tienen un fuerte componente cíclico asociado a las fluctuaciones del PIB. Además, las economías que han exhibido altos niveles de intensidad energética en el pasado reciente producen emisiones de CO<sub>2</sub> mucho mayores durante un *boom* económico. Por último, la evolución conjunta de emisiones y actividad económica presenta grandes diferencias entre países, dependiendo de su nivel de desarrollo y variables energéticas. Estas características de los datos deben tenerse en cuenta a la hora de diseñar las estrategias de transición climática contempladas en el Plan de Recuperación de la UE, cuyo principal objetivo en este mismo momento es mitigar el impacto económico y social de la pandemia del coronavirus.

La principal implicación de todos estos hallazgos es la prioridad absoluta de las políticas que contribuyan a alcanzar la convergencia condicional en los estándares de intensidad energética en los países de Europa Occidental. La especialización sectorial estructural entre países ha de equilibrarse y proceder a la racionalización del modelo energético. Sin embargo, es evidente que el cambio estructural no es alcanzable en el corto plazo. Es por esta razón que nos parece que hay que actuar a dos niveles. En el medio plazo hay que articular dos tipos de políticas. Primero, facilitar la transformación del

*mix* energético primario. Para ello, habría que diseñar un verdadero impuesto al carbono en origen. Segundo, actuar selectivamente sobre aquellos sectores finales que más contribuyen a las emisiones, como es el caso del transporte, fijando objetivos de eficiencia energética claros. En este sentido, los objetivos fijados en la iniciativa legislativa «Fit for 55» van en la buena dirección. En el corto plazo habría que establecer impuestos procíclicos en el uso de combustibles que, al mismo tiempo, garanticen previsibilidad del precio del carbono.

Queremos destacar que los resultados en Díaz *et al.* (2019) nos indican que la inversión en eficiencia energética y la inversión en renovables de última generación aumentan la productividad de las economías, lo que sugiere que el esfuerzo inversor que hagamos ahora tendrá su recompensa en mayor productividad en el futuro. Por último, debemos recordar que incentivar el uso de gas y energía nuclear no parece ser una política que ayude a reducir emisiones ni aumentar nuestra productividad. Debemos actuar con celeridad si queremos alcanzar los objetivos deseados para 2050.

## Referencias bibliográficas

- Álvarez, F., Marrero, G. A. & Puch, L. A. (2005). Air pollution and the macroeconomy across European countries. *FEDEA*, Documento de trabajo n.º 10.
- Arellano, M. & Bover, O. (1995). Another look at the instrumental variable estimation of error-components models. *Journal of Econometrics*, 68(1), 29-51.
- Barrera-Santana, J., Marrero, G. A., Puch, L. A. & Díaz, A. (2021). CO<sub>2</sub> emissions and energy technologies in Western Europe. *SERIEs: Journal of the Spanish Economic Association*, 12(2), 105-150.
- Blundell, R. & Bond, S. (1998). Initial conditions and moment restrictions in dynamic panel data models. *Journal of Econometrics*, 87(1), 115-143.
- Boyd, G. A. & Lee, J. M. (2019). Measuring plant level energy efficiency and technical change in the U.S. metal-based durable manufacturing sector using stochastic frontier analysis. *Energy Economics*, 81, 159-174.
- Brock, W. A. & Taylor, M. S. (2010). The green Solow model. *Journal of Economic Growth*, 15(2), 127-153.
- Díaz, A. (2020). El Fondo de Recuperación: un avance institucional para preservar la integración económica. *Información Comercial Española (ICE), Revista de Economía*, 916, 77-93. <https://doi.org/10.32796/ice.2020.916.7105>
- Díaz, A., Marrero, G. A. & Puch, L. A. (2020). Cambio climático, crecimiento económico y el papel de las tecnologías energéticas. *Papeles de Economía Española*, 164, 120-133. <https://www.proquest.com/openview/d851bd30b48c14a388b2158f31f32b15/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2032638>
- Díaz, A., Marrero, G. A., Puch, L. A. & Rodríguez-López, J. (2019). Economic growth, energy intensity and the energy mix. *Energy Economics*, 81, 1056-1077.
- Díaz, A. & Puch, L. A. (2019a). Investment, technological progress and energy efficiency. *The B.E. Journal of Macroeconomics*, 19(2), 1-28.
- Díaz, A. & Puch, L. A. (2019b). Vintage Capital Investment and Energy Use Fluctuations. Mimeo. *Universidad Carlos III de Madrid*.
- Díaz, A., Puch, L. A. & Guilló, M. D. (2004). Costly capital reallocation and energy use. *Review of Economic Dynamics*, 7(2), 494-518.
- Gamtesa, S. & Olani, A. B. (2018). Energy price, energy efficiency, and capital productivity: Empirical investigations and policy implications. *Energy Economics*, 72, 650-666.
- Golosov, M., Hassler, J., Krusell, P. & Tsyvinski, A. (2014). Optimal Taxes on Fossil Fuel in General Equilibrium. *Econometrica*, 82(1), 41-88.
- IEA, International Energy Agency. (2018). *The Role of Energy Efficiency: Perspectives for the Energy Transition*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/d9090f84-fd5a-464b-976a-99c7905c9c57/PerspectivesfortheEnergyTransition-TheRoleofEnergyEfficiency.pdf>
- IEA, International Energy Agency. (2019). *Global Energy & CO<sub>2</sub> Status Report 2019*. <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-co2-status-report-2019>
- Nordhaus, W. D. & Boyer, J. (2000). *Warming the World: Economic Models of Global Warming*. The MIT Press.
- Roodman, D. (2009). A note on the theme of too many instruments. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 71(1), 135-158.
- Windmeijer, F. (2005). A finite sample correction for the variance of linear efficient two-step GMM estimators. *Journal of Econometrics*, 126(1), 25-51.