

# Diseño de escenarios macroeconómicos para las pruebas de resistencia de cambio climático

Pablo Aguilar, Beatriz González y Samuel Hurtado

BANCO DE ESPAÑA

Los autores pertenecen a la Dirección General de Economía y Estadística del Banco de España, y agradecen los comentarios recibidos de un evaluador anónimo. Dirección de correo electrónico para comentarios: [samuel\(dot\)hurtado\(at\)bde\(dot\)es](mailto:samuel(dot)hurtado(at)bde(dot)es).

Este artículo es responsabilidad exclusiva de los autores y no refleja necesariamente la opinión del Banco de España o del Eurosistema.



### Resumen

Los desafíos del cambio climático afectan a todas las facetas de la economía, y en particular también a la estabilidad financiera, que puede sufrir efectos tanto de los riesgos físicos (asociados al propio proceso de cambio climático) como de los riesgos de transición (asociados a las iniciativas para frenar el proceso de cambio climático). Este artículo presenta un modelo diseñado para producir escenarios macroeconómicos relacionados principalmente con los riesgos de transición, que puedan servir de base para pruebas de resistencia que comprueben que todas las piezas del sistema financiero estén preparadas para enfrentarse a posibles eventos adversos en este sentido. En particular, estos escenarios se basan en un hipotético encarecimiento en el precio de los derechos de emisión de CO<sub>2</sub>, en un horizonte de entre dos y cinco años. El modelo simula el impacto de esta perturbación en la economía española, con especial atención a las asimetrías sectoriales en función de la intensidad en el uso de distintos tipos de energía en cada rama, a las interrelaciones de dependencia resumidas por las tablas *input-output* de la economía española, y a los efectos de equilibrio general en términos de cambios en los precios relativos y de reasignación sectorial.

### 1 Introducción

Los desafíos del cambio climático afectan a todas las facetas de la economía, y en particular también a la estabilidad financiera. Tanto los riesgos físicos como los riesgos de transición pueden tener efectos asimétricos que pongan de manifiesto una especial vulnerabilidad en determinados sectores o empresas, de manera que, en los escenarios más pesimistas, algunas instituciones financieras<sup>1</sup> podrían encontrarse en dificultades si se hallasen mal diversificadas en estas nuevas dimensiones relevantes. Las pruebas de resistencia a la banca tratan de anticiparse a la posible aparición de este tipo de problemas, y para realizarlas es necesario disponer de herramientas cuantitativas que permitan simular los efectos de las perturbaciones y su transmisión a lo largo de la economía y del sistema financiero. Este artículo presenta una de las piezas que se están preparando para la elaboración de estas pruebas de resistencia de cambio climático: un modelo sectorial capaz de generar los escenarios macroeconómicos que sirven como punto de partida del ejercicio. Dado que el objetivo actual es únicamente comenzar la divulgación sobre

---

<sup>1</sup> Esto incluye no solo la banca, sino también otros intermediarios financieros, como el sector de seguros y los fondos, muy ligados en España a la banca. En principio, los escenarios generados con este modelo podrían utilizarse para analizar los efectos de la perturbación sobre todos ellos.

el proceso de elaboración de estos escenarios, y puesto que el modelo está aún en desarrollo, a continuación se comentan únicamente sus características principales y el tipo de resultados que puede generar, y en particular no se ofrecen (por ahora) detalles acerca de los efectos de la perturbación simulada sobre sectores particulares.

Los riesgos físicos son los asociados al propio proceso de cambio climático: aumento de las temperaturas, deshielo y subida del nivel del mar, mayor frecuencia e intensidad de fenómenos atmosféricos adversos, degradación progresiva de variables medioambientales como la calidad del aire o del agua, deforestación y pérdida de biodiversidad, entre otros<sup>2</sup>. Aunque estos riesgos ya se están empezando a materializar, por ejemplo, provocando mayores daños a bienes de capital y activos inmobiliarios, así como reducciones de productividad y interrupciones puntuales en cadenas de producción, es previsible que continúen aumentando durante décadas, de manera que sus efectos más adversos se concentrarían en el largo plazo.

Por su parte, los riesgos de transición son los asociados a las iniciativas para frenar el proceso de cambio climático: aumento del coste de los derechos de emisión, cambios tecnológicos que aumenten la velocidad a la que se deprecia el capital al ser sustituido por opciones menos contaminantes, nuevos impuestos o subvenciones diseñados para acelerar las reducciones en el volumen de emisiones de gases de efecto invernadero, nuevas regulaciones que obliguen a modificar el comportamiento de los agentes para obtener esos resultados, o incluso cambios de preferencias de los consumidores que provoquen la respuesta de los productores, etc. El desarrollo de la normativa de cambio climático en el ámbito político tiene también efecto sobre las entidades financieras, como el «Plan de Acción: Financiar el desarrollo sostenible», de la Comisión Europea, que busca reorientar los flujos de capital hacia inversiones sostenibles, o el reglamento de taxonomía aprobado por la Comisión Europea, que define los criterios para clasificar la actividad económica medioambientalmente. Los desarrollos normativos también ocasionan posibles efectos en las carteras de activos de las entidades financieras, como el eventual impacto en la valoración de activos de la *etiqueta medioambiental en los bonos (EU Green Bond Standard)* o los derivados del tratamiento de aspectos medioambientales en las pruebas de resistencia bancarias por parte del Banco Central Europeo (BCE) o de carácter más general en función de la revisión del mandato del BCE<sup>3</sup>. En el caso de los riesgos físicos, el mayor peligro es que las actuaciones resulten insuficientes para reconducir la evolución actual del cambio climático y evitar los resultados más pesimistas en el largo plazo. Este mayor margen temporal de actuación debería mitigar los riesgos implícitos para la estabilidad financiera, en la medida en que las entidades puedan ir adaptando su exposición a distintas empresas o sectores de manera suave a lo largo del tiempo; aun así, dada la potencial profundidad de estos riesgos, será

---

2 Diferentes organismos europeos e internacionales han publicado evidencias del impacto físico a largo plazo del cambio climático. Véanse Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (2015), G20 (2016), Banco Central Europeo (2019) y Comisión Europea (2020).

3 Véase Banco Central Europeo (2021).

necesario evaluarlos de manera cuantitativa también en un futuro relativamente cercano. Sin embargo, en el caso de los riesgos de transición existe una mayor probabilidad de observar efectos potencialmente elevados en plazos más acotados, especialmente si se produce una transición desordenada que amplifique los costes en corto plazo<sup>4</sup>.

De acuerdo con esto, el modelo que se presenta en este artículo está diseñado para producir escenarios macroeconómicos relacionados principalmente con los riesgos de transición, que puedan servir de base para pruebas de resistencia que comprueben que todas las piezas del sistema financiero estén preparadas para enfrentarse a posibles eventos adversos en este sentido. En particular, estos escenarios se basarán en un hipotético encarecimiento en el precio de los derechos de emisión de CO<sub>2</sub>, en un horizonte de entre dos y cinco años. El modelo simula el impacto de esta perturbación en la economía española, con especial atención a las asimetrías sectoriales en función de la intensidad en el uso de distintos tipos de energía en cada rama, a las interrelaciones de dependencia resumidas por las tablas *input-output* de la economía española y a los efectos de equilibrio general en términos de cambios en los precios relativos y de reasignación sectorial<sup>5</sup>.

La sección 2 detalla las características principales del modelo en cuestión, mientras que la sección 3 comenta resultados de simulación preliminares y la sección 4 presenta ejercicios de sensibilidad alrededor de esos resultados. Por último, la sección 5 concluye.

## 2 Un modelo sectorial de equilibrio general para la economía española

Las pruebas de resistencia al sector bancario utilizan como punto de partida unos escenarios macroeconómicos diseñados para recoger el posible comportamiento de la economía en caso de que se materializasen perturbaciones negativas de gran tamaño. A partir de las variables agregadas que proporcionan estos escenarios, en fases posteriores se estima el efecto sobre las carteras de préstamos y sobre el balance de las entidades bancarias. Estos escenarios se elaboran habitualmente mediante modelos macroeconómicos tradicionales, como el Modelo Trimestral del Banco de España (MTBE)<sup>6</sup>, que resume las relaciones históricas entre las principales

4 Véanse, Banco de Inglaterra (2018), Junta Europea de Riesgo Sistémico (2016) y Banco Central Europeo (2019).

5 El modelo actual presenta una heterogeneidad muy rica en cuanto a los sectores y los vínculos a través de las tablas *input-output*. Sin embargo, la versión actual no tiene capital ni fricciones financieras, ni tiene explícitamente modelado el sector bancario, que podría ser un canal adicional de realimentación de los resultados presentados. Esta extensión se deja para el futuro. Adicionalmente, el modelo se focaliza en la heterogeneidad entre sectores, dado que es especialmente relevante para explicar el impacto diferencial de los riesgos de transición; puede haber otros niveles de heterogeneidad intrasectorial, o de heterogeneidad geográfica, que también resulten relevantes [como encuentran, por ejemplo, Bolton y Kacperczyk (2020)], pero no quedan recogidos por este modelo y no se exploran en este artículo.

6 Véase Arencibia, Hurtado, De Luis y Ortega (2017).

variables de la economía española; por ejemplo, entre la inversión de las empresas y la demanda o los tipos de interés a los que se enfrentan, o entre el consumo de los hogares y su renta disponible real o la tasa de paro. Se trata de un modelo generalista, capaz de simular una gran variedad de posibles perturbaciones, pero que no contiene los ingredientes necesarios para elaborar un escenario que recoja adecuadamente los riesgos de transición, para los que resulta fundamental disponer de una elevada desagregación sectorial y de un especial detalle en cuanto al uso de energía o la intensidad de las emisiones en cada rama.

Para cubrir estas carencias, en los últimos meses se ha empezado a desarrollar un nuevo modelo macroeconómico diseñado específicamente con el objetivo de generar estos escenarios. El modelo no está todavía finalizado, pero, al igual que sucede con el MTBE, probablemente tampoco llegará a estarlo en ningún momento: en su lugar, será el centro de un proceso continuo de renovación y mejora que lo vaya adaptando a los acontecimientos y a las necesidades que vayan surgiendo. A continuación, se describen de manera general las principales características de este modelo. En los próximos meses, el Banco de España publicará un documento ocasional en el que se detallará de manera más técnica la especificación de la versión actual del modelo<sup>7</sup>.

Inspirado en desarrollos anteriores de la literatura<sup>8</sup>, se trata de un modelo de equilibrio general en el que los agentes ajustan sus decisiones dependiendo de todas las variables de decisión del resto de los agentes. En particular, los precios y las cantidades se ajustan de manera óptima, siguiendo las prescripciones que se derivan del problema de optimización descrito para los diferentes agentes del modelo (consumidores, productores y comercializadores, entre otros). Este elemento explica, en gran medida, la dificultad para computar el equilibrio del modelo: es necesario encontrar el conjunto de precios y de cantidades para todos los sectores que asegure, a la vez, que todos los agentes están en su punto óptimo y que se cumplen todas las restricciones agregadas de la economía (la oferta de cada producto coincide con su demanda, el empleo demandado por las empresas es igual al ofertado por los hogares, etc).

Una de las principales características del modelo es la desagregación sectorial detallada. Dado que los riesgos asociados al cambio climático presentan un componente asimétrico muy marcado en este sentido, era fundamental que el modelo fuese capaz de capturar el diferente peso de la energía en las funciones de producción de las distintas ramas, y las interrelaciones entre ellas. El cuadro 1 detalla la desagregación sectorial que actualmente contempla el modelo: 51 sectores no energéticos y dos sectores de producción de energía, que en adelante llamaremos «combustibles» y «electricidad». Por su parte, el gráfico 1 muestra cómo la calibración

---

7 Véase Aguilar, González y Hurtado (2021).

8 Véase, por ejemplo, Bouakez, Rachedi y Santoro (2020).

Cuadro 1

**SECTORES CONSIDERADOS DEL MODELO**

## Sectores no energéticos

1 Agricultura y ganadería	27 Resto de comercio al por mayor
2 Silvicultura y explotación forestal	28 Resto de comercio al por menor
3 Pesca y acuicultura	29 Transporte terrestre
4 Industrias extractivas	30 Transporte marítimo
5 Productos alimenticios, bebidas y tabaco	31 Transporte aéreo
6 Textil, prendas de vestir, cuero y calzado	32 Servicios auxiliares del transporte
7 Productos de madera, excepto muebles	33 Correos
8 Papel	34 Hostelería y restauración
9 Impresión y reproducción	35 Servicios de edición
10 Productos químicos	36 Cine y televisión, música y radio
11 Productos farmacéuticos	37 Telecomunicaciones
12 Productos de caucho y plásticos	38 Informática y programación
13 Otros productos minerales no metálicos	39 Servicios financieros, excepto seguros y pensiones
14 Metalurgia	40 Seguros y pensiones
15 Productos metálicos, excepto maquinaria y equipo	41 Servicios auxiliares a los servicios financieros
16 Productos informáticos, electrónicos y ópticos	42 Servicios inmobiliarios
17 Equipo eléctrico	43 Servicios jurídicos y contables, y de consultoría
18 Maquinaria y equipo	44 Servicios técnicos de arquitectura e ingeniería
19 Vehículos de motor	45 Publicidad
20 Otro material de transporte	46 Otros servicios profesionales
21 Muebles; otros productos manufacturados	47 Servicios administrativos
22 Reparación e instalación de maquinaria y equipos	48 Administración pública y seguridad social
23 Tratamiento y distribución de agua	49 Educación
24 Alcantarillado y residuos	50 Sanidad
25 Construcción	51 Otros servicios
26 Comercio y reparación de vehículos de motor	

## Sectores energéticos

52 Coque y productos de refinación de petróleo	53 Energía eléctrica, gas, vapor y aire acondicionado
--	---

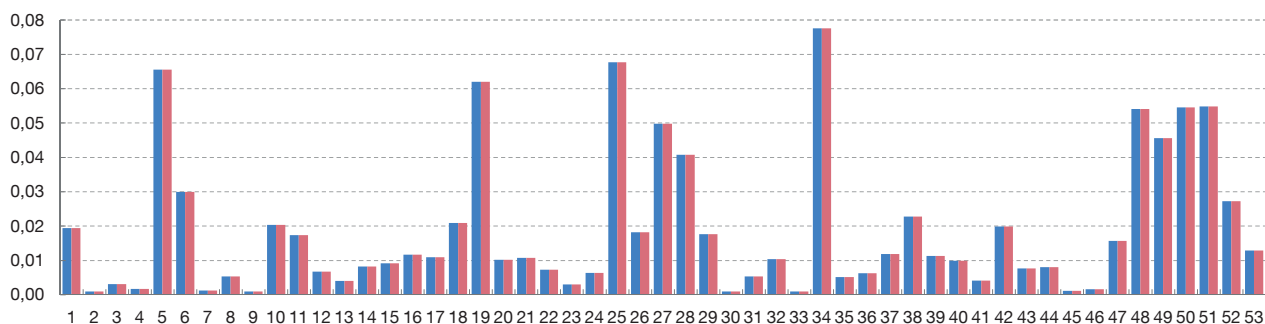
FUENTE: Elaboración propia.

del modelo replica de manera exacta el peso de cada sector en el consumo de los hogares, y de manera razonablemente aproximada (pero ya no exacta, debido a las simplificaciones en términos de la forma estilizada de las funciones de agregación y de producción) el peso de la energía entre los insumos de los diferentes sectores no energéticos, y el tamaño relativo de las distintas ramas en términos tanto de valor añadido como de producción.

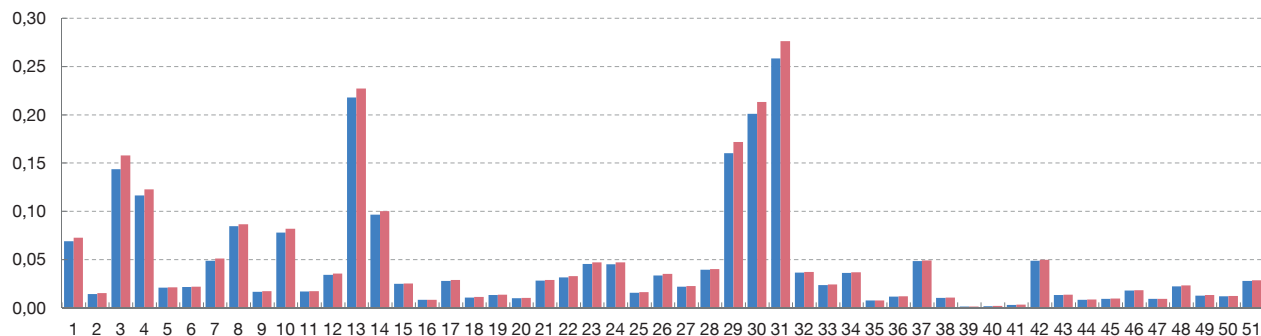
Los dos sectores energéticos difieren en cuanto a la cantidad de derechos de emisión asociados a cada uno, y también en la forma en la que se relacionan las especificaciones simplificadas del modelo con las estructuras más complejas del mundo real.

**CALIBRACIÓN DEL MODELO: AJUSTE DE LOS DATOS SECTORIALES**

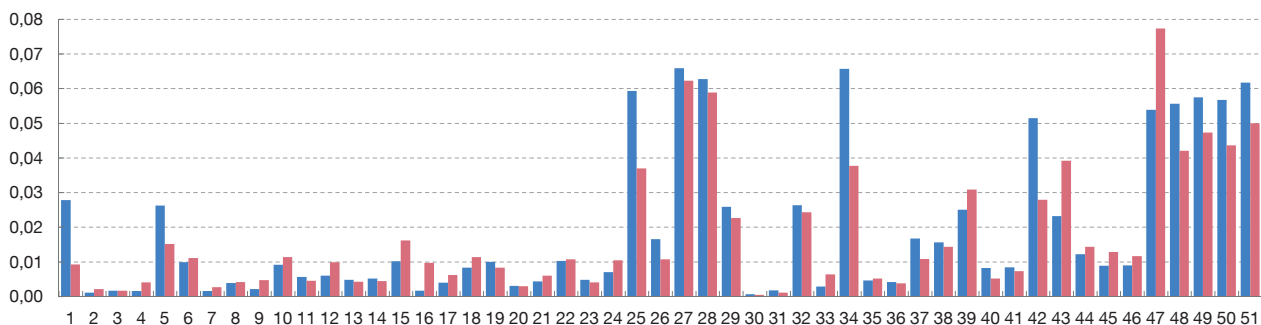
1 PESOS EN EL CONSUMO NOMINAL



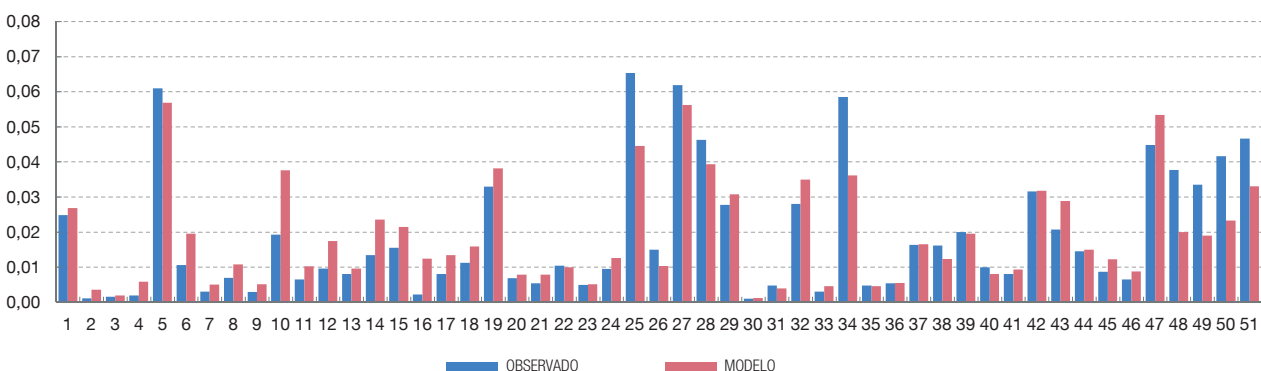
2 PESO DE LA ENGERÍA EN LA PRODUCCIÓN DE CADA SECTOR



3 PESOS EN EL VALOR AÑADIDO NOMINAL



4 PESOS EN LA PRODUCCIÓN NOMINAL (CI + RA + EB)



FUENTE: Elaboración propia, a partir de datos de Eurostat.



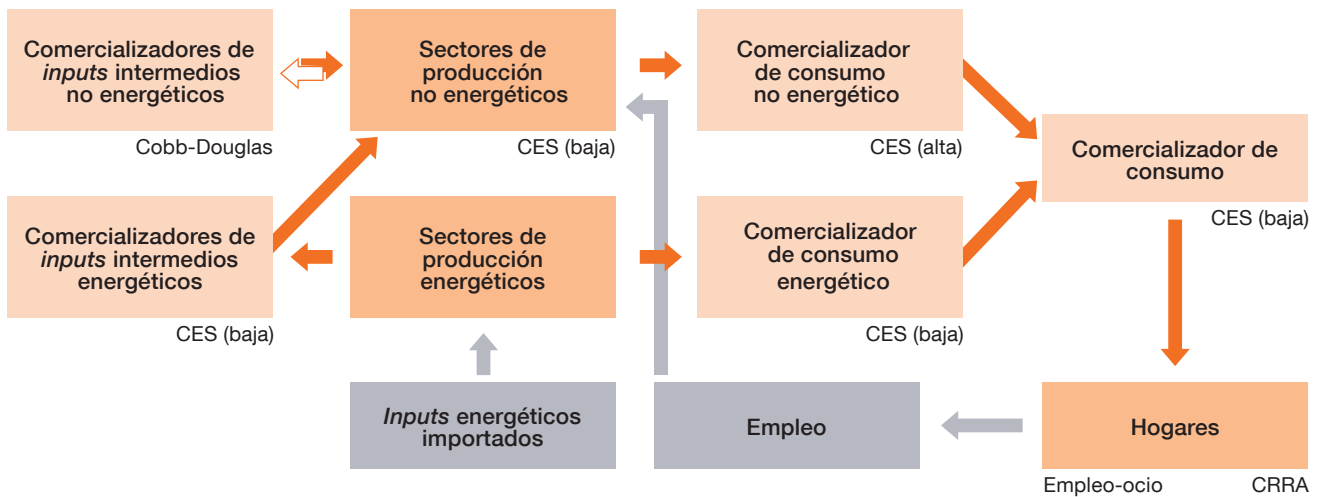
En el caso de los combustibles, su producción no genera una cantidad elevada de emisiones, pero su uso sí: son los agentes que emplean los combustibles los que tienen que adquirir los derechos de emisión asociados, mientras que el productor de combustibles recibe un precio que no incluye la parte correspondiente a esos derechos. La electricidad, en cambio, genera emisiones al producirse, pero no necesariamente al utilizarse, de manera que los usuarios de electricidad no necesitan adquirir derechos de emisión para emplearla: pagan un precio a los productores de electricidad, que son los encargados de proveerse de los derechos de emisión necesarios para poder producir esa electricidad.

Frente a estas peculiaridades del mundo real, en la estructura simplificada del modelo ambos sectores funcionan de la misma manera: los usuarios de la energía pagan un precio bruto que incluye tanto la propia electricidad o combustibles como los derechos de emisión necesarios para producirla o consumirlos, y a los productores energéticos les llega un precio neto del que ya ha sido descontado el coste de esos derechos de emisión. El ajuste del modelo a los datos resuelve esta divergencia entre las estructuras del mundo real y del modelo: el precio de los combustibles en el mundo real corresponde a su precio neto en el modelo, mientras que el precio de la electricidad en el mundo real corresponde a su precio bruto en el modelo.

La diferencia entre el precio bruto y el precio neto en el modelo la genera un tipo impositivo asociado a las emisiones, que se calibra con los datos disponibles para la economía española, procedentes de las tablas *input-output* y de las cuentas de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera por ramas de actividad publicadas por el Instituto Nacional de Estadística. Para la electricidad, el tipo impositivo procede de la relación entre el valor de los derechos de emisión utilizados por el sector de producción de electricidad y los ingresos agregados del sector, netos de esos derechos. En el caso de los combustibles, el tipo impositivo se estima a través de la relación entre el valor de los derechos de emisión utilizados por todos los sectores, salvo el eléctrico, y los ingresos agregados del sector, netos de los derechos que emplea. El resultado es un tipo impositivo asociado a los combustibles mucho mayor que el asociado a la electricidad, como corresponde al mayor nivel de emisiones que generan su producción y su utilización.

El esquema 1 resume de forma muy sintética la estructura del modelo. En la esquina inferior derecha, los hogares deciden óptimamente entre consumo y ocio para maximizar una función de utilidad con aversión relativa al riesgo constante; su decisión dependerá del nivel de consumo y de la relación entre el precio agregado y los salarios. En la parte derecha del esquema, estos hogares compran un bien homogéneo al comercializador de consumo, que combina los bienes de consumo energéticos y no energéticos mediante una función de agregación con elasticidad de sustitución constante. Cada uno de estos dos bienes de consumo, a su vez, procede de un comercializador que agrega las distintas variedades de bienes energéticos, o no

## REPRESENTACIÓN SINTÉTICA DE LA ESTRUCTURA DEL MODELO



FUENTE: Elaboración propia.

energéticos, mediante la correspondiente función de agregación CES (*constant elasticity of substitution*). Y en el lado izquierdo hay otros 51 comercializadores de consumos intermedios no energéticos con función de agregación Cobb-Douglas (equivalente a CES con elasticidad unitaria), y 51 comercializadores de consumos intermedios energéticos con función de agregación CES, que combinan los distintos productos para comercializar la cesta de consumos intermedios energéticos o no energéticos utilizada por cada uno de los sectores de producción no energéticos. Además de estas dos cestas de consumos intermedios, estos productores no energéticos utilizan también empleo, combinando los tres elementos mediante una función de producción CES anidada. Los productores de energía en el modelo utilizan una tecnología mucho más sencilla: únicamente utilizan como *input* productos energéticos básicos, importados a un precio internacional que no depende de las acciones de la economía nacional (en particular, este precio no debe variar al aumentar en la simulación el tipo impositivo asociado a las emisiones).

Las distintas funciones de agregación y de producción contienen numerosos parámetros que permiten controlar el grado de sustitución entre bienes. En general, casi todos ellos están calibrados en valores inferiores a la unidad, indicando que, como respuesta al *shock* simulado, es de esperar una cierta sustitución entre bienes, pero en grado reducido. Este es el caso para la sustitución entre combustibles y electricidad, tanto en el lado de los bienes de consumo como en el de los productos intermedios. El valor de este parámetro deberá ajustarse al horizonte de la simulación: en un plazo de tres años, no es esperable que un fuerte encarecimiento de los derechos de emisión provoque una sustitución considerable de combustibles por electricidad en el sector de transporte por carretera, pero en un plazo de quince años sí podría hacerlo. Entre distintos consumos intermedios no energéticos, la

sustitución es unitaria (agregador Cobb-Douglas), lo que hace que las cantidades reaccionen de manera proporcional a las variaciones en los precios relativos, de manera que se mantiene constante el peso nominal de los distintos sectores en la cesta de consumos intermedios que adquiere cada productor no energético<sup>9</sup>. La única elasticidad de sustitución calibrada con un valor superior a la unidad es la del comercializador de bienes de consumo no energéticos: ante cambios en los precios relativos, los hogares pueden realizar un reajuste sustancial entre las distintas categorías de bienes no energéticos que consumen.

En total, en el modelo interactúan entre sí 159 agentes:

- 1 hogar representativo.
- 51 productores no energéticos, que utilizan empleo, una cesta diferenciada de consumos intermedios energéticos y una cesta diferenciada de productos intermedios no energéticos.
- 2 productores energéticos, que utilizan productos energéticos básicos, importados.
- 1 agregador de consumo, que combina dos productos (energético y no energético).
- 1 agregador de consumo energético, que combina dos productos (combustibles y electricidad).
- 1 agregador de consumo no energético, que combina 51 productos (los producidos por cada uno de los sectores no energéticos).
- 51 agregadores de productos intermedios energéticos, cada uno de los cuales combina 2 productos energéticos (combustibles y electricidad).
- 51 agregadores de productos intermedios no energéticos, cada uno de los cuales combina 51 productos no energéticos.

Computar el equilibrio del modelo exige encontrar los 159 precios y las casi 3.000 cantidades que hacen que se cumplan simultáneamente las condiciones de optimalidad de todos estos agentes y las restricciones agregadas de la economía.

---

<sup>9</sup> Este nivel de sustitución puede resultar demasiado elevado para simulaciones con un horizonte temporal reducido, de manera que en el futuro puede ser deseable sustituir estos agregadores Cobb-Douglas por agregadores de elasticidad de sustitución constante inferior a la unidad. Sin embargo, dado el alto número de variables que entran en este bloque del modelo, la complejidad computacional del ejercicio aumentaría sustancialmente. El resultado sería una ampliación (no homogénea) de las diferencias sectoriales en la simulación (mayor impacto en casi todos los sectores, que ya presentan efectos especialmente negativos).

### 3 Un ejercicio de simulación sencillo

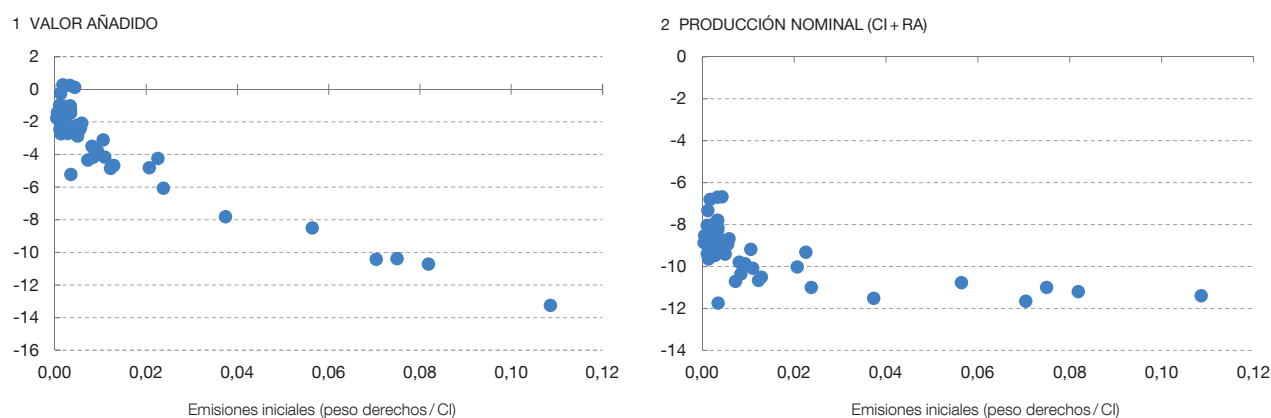
El modelo descrito en la sección anterior puede utilizarse para estimar los efectos de un encarecimiento de los derechos de emisión de CO<sub>2</sub>. Los resultados tendrán en cuenta la estructura de producción de la economía española (resumida en las tablas *input-output*) y los efectos de equilibrio general en términos de cambios en los precios relativos y de reasignación sectorial tanto en la producción como en el consumo, etc.

En el ejercicio de simulación que se presenta a continuación, cuyos resultados son todavía muy provisionales, la perturbación consiste en un aumento sustancial del tipo impositivo que representa en el modelo el coste de los derechos de emisión de CO<sub>2</sub>. El precio de estos derechos se multiplicó aproximadamente por cinco entre el verano de 2017 y el verano de 2019, en gran parte como resultado de cambios regulatorios destinados a reducir el exceso de oferta del mercado y a generar mayores incentivos para reducir las emisiones, a través de reducciones en las cantidades ofertadas en las subastas de derechos y del lanzamiento de la reserva de estabilidad del mercado (*Market Stability Reserve, MSR*), que comenzaría a operar en enero de 2019. Como ejemplo de una posible intensificación de estos riesgos de transición, en la simulación se estima el impacto que tendría un nuevo aumento de magnitud similar, desde los 33 euros por tonelada de CO<sub>2</sub> emitida que indicaba la cotización del mercado a principios de 2021, hasta los 165 euros por tonelada.

Bajo una calibración relativamente estándar, esta perturbación da lugar en el modelo a una fuerte reducción en la energía utilizada tanto en el consumo como en la producción. Esta reducción es mayor en los combustibles, cuyo uso se reduce en un 34 %, frente al 19 % de la electricidad, menos intensiva en emisiones.

Los efectos agregados de la perturbación son negativos: el empleo se reduce un 2,3 % y el PIB real cae un 3 %. Pero la dispersión entre sectores es elevada: algunos caen de manera mucho más intensa que la media, mientras que unos pocos se ven incluso beneficiados. En general, los sectores más perjudicados por el aumento en los costes de emisión son aquellos con mayor intensidad energética, pero en la simulación se observan efectos de segunda vuelta no lineales de tamaño considerable. Así, hay sectores con peso de las emisiones relativamente parecido que se ven afectados de manera muy diferente, dependiendo de con qué otros sectores están más interrelacionados. Un sector que genere pocas emisiones puede verse fuertemente afectado si utiliza muchos consumos intermedios procedentes de otros sectores que sí son intensivos en energía (aumentan sus costes), o si una parte importante de sus ventas se dirige a ese tipo de sectores (cae su demanda). La calibración del modelo a los datos

## EFECTO EN LOS DISTINTOS SECTORES DEL AUMENTO DEL COSTE DE LAS EMISIONES



FUENTE: Elaboración propia, a partir de datos de Eurostat.

de las tablas *input-output* para España asegura que estas relaciones están capturadas de manera realista.

El gráfico 2 presenta la relación entre el nivel de emisiones de cada sector no energético y el impacto de la simulación en términos de valor añadido real y de producción (VA). Los sectores energéticos, no presentados en estos gráficos, son claramente los más afectados. Dado que los resultados son aún preliminares y serán revisados en el futuro, no se identifica en el gráfico qué observaciones corresponden a qué sectores.

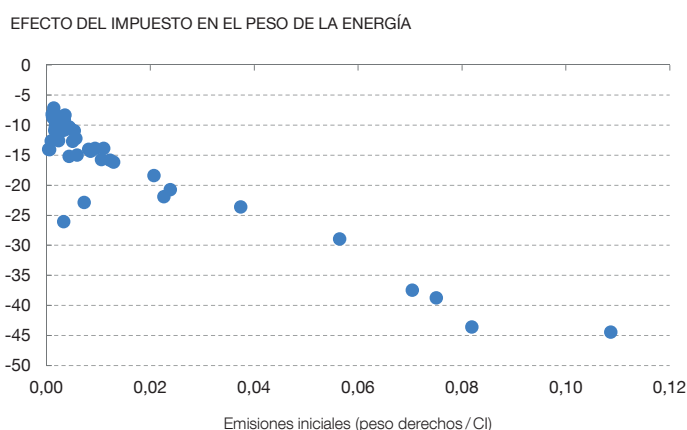
En respuesta a la perturbación, todos los sectores productivos reducen sustancialmente la cantidad de energía que utilizan, pero el efecto es mayor en los sectores más contaminantes, que no solo reducen más su producción, sino que también recortan más el peso de la energía en el conjunto de consumos intermedios que utilizan. El gráfico 3 ilustra este resultado.

El consumo de los hogares también cae considerablemente en términos agregados, y, como muestra el gráfico 4, la reducción es generalizada a prácticamente todos los sectores. Aun así, la caída en el consumo es de mayor intensidad en aquellos productos que sufren un encarecimiento en términos relativos como respuesta a la perturbación.

En conjunto, la simulación genera los resultados esperables, en el sentido de que los sectores más perjudicados por el aumento del precio en los derechos de emisión son aquellos que más emiten, pero muestra también efectos no lineales interesantes, asociados a las interrelaciones entre sectores a través de la matriz *input-output*.

Gráfico 3

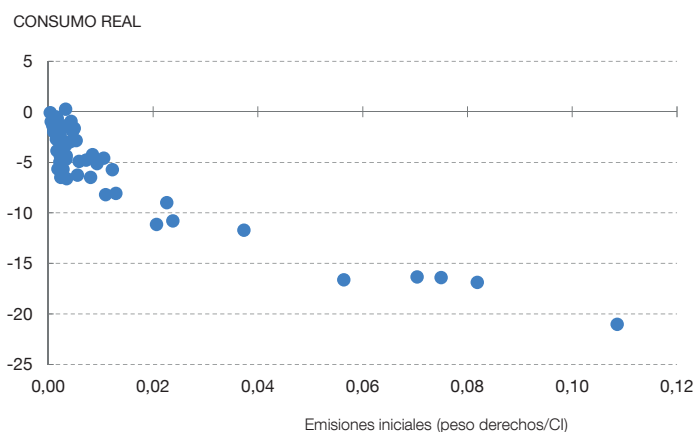
### EFFECTO DEL AUMENTO DEL COSTE DE LAS EMISIONES SOBRE LA INTENSIDAD ENERGÉTICA



FUENTE: Elaboración propia, a partir de datos de Eurostat.

Gráfico 4

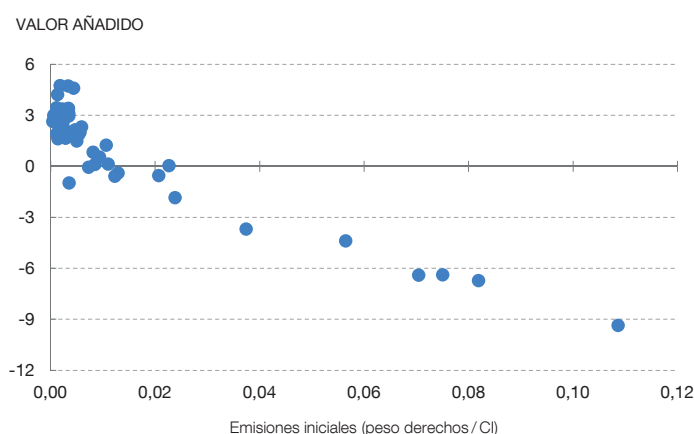
### EFFECTO DEL AUMENTO DEL COSTE DE LAS EMISIONES SOBRE EL CONSUMO DE LOS HOGARES



FUENTE: Elaboración propia, a partir de datos de Eurostat.

## 4 Sensibilidad de los resultados a cambios en algunos parámetros

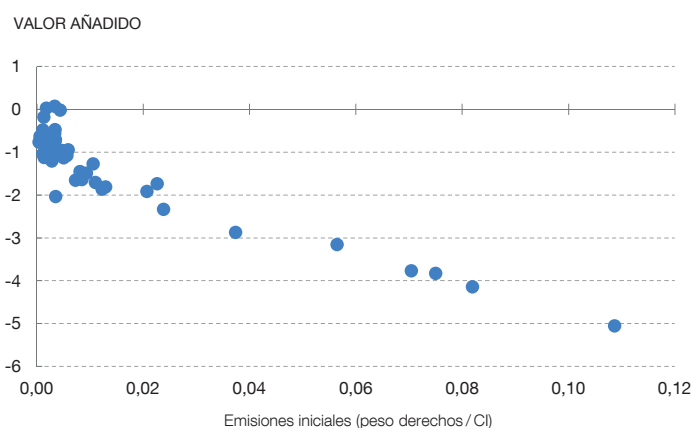
Sobre todo en cuanto a su cuantificación, los resultados de la simulación presentada en la sección anterior dependen de manera crucial del amplio conjunto de parámetros con los que se calibra el modelo, y de las estructuras representadas en él. En esta sección se presentan dos ejercicios de sensibilidad alrededor de esa simulación central, primero cambiando la manera en la que se implementa el aumento en los costes de las emisiones, y a continuación modificando los parámetros que regulan el grado de sustitución entre productos en las funciones de producción de las empresas y en la función de utilidad de los consumidores.

**SIMULACIÓN ALTERNATIVA CON REDUCCIÓN DE IMPUESTOS A LA RENTA LABORAL**

FUENTE: Elaboración propia, a partir de datos de Eurostat.

En la versión del modelo utilizada en la sección anterior, el coste de los derechos de emisión se devuelve a los agentes mediante transferencias *lump-sum*, que son una manera sencilla de aproximar cualquier mecanismo del mundo real en el que la asignación de derechos de emisión y los efectos sobre los ingresos de los hogares no dependan de sus acciones futuras. Este supuesto da lugar a un escenario particularmente pesimista: los cambios regulatorios también podrían implementarse de manera que el mayor coste de las emisiones generase un aumento de los ingresos públicos que permitiese complementar la perturbación negativa que supone el aumento de los costes de emisión con otros cambios impositivos que puedan amortiguar parcialmente los efectos negativos del *shock*. Dado que el objetivo de estos ejercicios de simulación es generar escenarios macroeconómicos que sirvan como punto de partida para la realización de pruebas de resistencia de cambio climático para el sector bancario, es razonable utilizar supuestos que amplifiquen los efectos negativos de la perturbación. Pero no tiene por qué ser el escenario más probable.

El gráfico 5 presenta los resultados de una simulación alternativa en la que el cambio regulatorio se implementa tratando de minimizar los costes de transición: el aumento en el coste de las emisiones se realiza a través de un impuesto que aumenta los ingresos públicos y permite que se reduzcan otras figuras impositivas distorsionantes; en este caso, el impuesto sobre las rentas salariales de los hogares. Con esto se afecta a la decisión de los hogares entre ocio y empleo, lo que genera una perturbación positiva de oferta (un aumento de la oferta laboral) que se combina con la negativa (asociada de manera directa al aumento de los costes de emisión). Dependiendo de la calibración de la elasticidad de la oferta de trabajo al salario, el resultado neto puede ser, como en esta simulación, expansivo: aumentan tanto el empleo como el PIB, se reduce el impacto negativo sobre los

**SIMULACIÓN ALTERNATIVA CON ELASTICIDAD DE SUSTITUCIÓN MÁS ELEVADA**

FUENTE: Elaboración propia, a partir de datos de Eurostat.

sectores que más emisiones generan, y aparece un número considerable de ramas que se ven beneficiadas por la perturbación. Se trata de sectores que generan pocas emisiones y tampoco dependen especialmente en sus compras ni en sus ventas de sectores que generen muchas emisiones, de manera que no les afecta sustancialmente el aumento de los costes de emisión pero sí se ven beneficiados por la mayor oferta de trabajo (y por un abaratamiento en términos de precios relativos respecto al resto de los sectores, que ya estaba presente en la simulación de la sección anterior).

Frente al 34 % y al 19 % de caída en el uso de combustibles y de electricidad en la simulación central, este escenario con reducción de impuestos a la renta laboral genera reducciones algo menores: del 29 % y del 13 %. Pero el coste en términos de empleo y de PIB queda totalmente eliminado, lo que hace que sea posible implementar un aumento mayor de los costes de emisión hasta conseguir los mismos efectos en términos de reducción de emisiones, eliminando los costes económicos a nivel agregado (pero todavía con importantes efectos negativos para algunos sectores).

Una segunda dimensión en la que es necesario realizar ejercicios de sensibilidad es la de las elasticidades de sustitución entre bienes. Como se comentaba en la sección anterior, los sectores más afectados por el aumento en los costes de emisión son aquellos que dependen en mayor medida del uso de carburantes. En el largo plazo, la elasticidad de sustitución entre tipos de energía sería mayor, permitiendo a estos sectores sustituir en mayor medida los carburantes por electricidad, o *inputs* que se producen utilizando mucha energía por otros que requieren menos; en cualquier caso, recortando las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a su proceso productivo y, por tanto, reduciendo el efecto contractivo de la perturbación. El gráfico 6 muestra los resultados de una simulación alternativa en la que la elasticidad de sustitución es mayor.



Este mayor grado de sustitución reduce la heterogeneidad sectorial, dando lugar a un efecto menos diferenciado por ramas. Los sectores que se veían perjudicados en la simulación base siguen siendo los que más caen en esta versión con mayor elasticidad de sustitución, y los sectores beneficiados siguen siendo los mismos, pero la diferencia entre unos y otros se reduce sustancialmente. Corrigiendo esta diferencia de escala, la forma de la nube de puntos es similar a la original, pero no idéntica: el cambio en la elasticidad de sustitución genera efectos moderadamente no lineales que dependen de la estructura productiva y de las interrelaciones entre sectores.

## 5 Conclusiones

Tanto el cambio climático como las políticas implementadas para frenarlo pueden provocar efectos negativos sobre la economía, que se transmitirían a las entidades financieras a través de su exposición a las empresas y a los sectores más afectados. Estos riesgos deben ser evaluados de cara a mitigar y prevenir efectos sobre la estabilidad financiera. Con ese objetivo, distintas instituciones, incluido el Banco de España, han comenzado a preparar la elaboración de pruebas de resistencia de cambio climático para la banca, que identifiquen actuaciones destinadas a reducir la probabilidad de los eventos más desfavorables.

Un primer ingrediente para esas pruebas de resistencia son los escenarios macroeconómicos que recojan el efecto sobre la economía de posibles perturbaciones adversas. En este artículo hemos presentado un modelo diseñado expresamente para la construcción de estos escenarios. Dado que son los más relevantes en plazos relativamente cortos, el modelo presta especial atención a los riesgos de transición, asociados a las medidas regulatorias destinadas a frenar el proceso de cambio climático. Y puesto que los efectos de estos riesgos son previsiblemente muy asimétricos a nivel sectorial, el modelo incluye una alta granularidad y pone el énfasis en las interrelaciones descritas por las tablas *input-output* para la economía española, y en los efectos de equilibrio general en términos de cambios en los precios relativos y de sustitución entre productos intermedios en las funciones de producción de las empresas, y entre tipos de consumo en la función de utilidad de los hogares. Los riesgos físicos (los derivados del propio proceso de cambio climático) quedan para otro desarrollo posterior, que requerirá un modelo diferente, más centrado en el largo plazo y probablemente con menos desagregación sectorial.

Este artículo ha presentado una versión todavía preliminar de este modelo sectorial. En el corto plazo, el desarrollo se centrará, primero, en mejorar el ajuste a otros aspectos de los datos observados y en flexibilizar las opciones para los parámetros con los que se define la elasticidad de sustitución entre bienes en las distintas funciones de agregación, producción y consumo. Más adelante, se podría expandir

para convertirlo en un modelo de economía abierta, con exportaciones y con importaciones distintas de las de bienes energéticos básicos, y para incluir capital en la función de producción, mejorando el realismo con el que el modelo ajusta los datos y permitiendo incorporar en las simulaciones efectos sobre los activos que las empresas usan como garantías para sus préstamos.

Incluso con la versión actual, más simple, el modelo ya aproxima de manera bastante cercana la estructura productiva de la economía española, y permite elaborar simulaciones razonablemente realistas, en las que los sectores más afectados por un encarecimiento del precio de las emisiones son aquellos que hacen mayor uso de los insumos energéticos, pero a la vez reflejando los efectos no lineales que genera la interrelación entre sectores en una estructura de equilibrio general.

El modelo permite identificar algunos factores que resultan determinantes a la hora de diseñar las políticas de lucha contra el cambio climático, y en particular resalta la importancia del diseño de los instrumentos fiscales y de los mecanismos regulatorios para conseguir con el menor coste económico posible los objetivos de reducción de emisiones. Pese a ello, los resultados de las simulaciones resaltan también que, incluso en los mejores escenarios, permanecen los riesgos para algunos sectores, que se verían perjudicados por una transición desordenada incluso si las políticas medioambientales se implementan a través de estructuras impositivas que incluyan elementos compensatorios que eliminen los efectos adversos a nivel agregado. Las pruebas de resistencia de cambio climático para la banca tratarán de asegurar que se minimizan los riesgos de estabilidad financiera asociados a estas perturbaciones.

## BIBLIOGRAFÍA

- Adrian, T., N. Boyarchenko y D. Giannone (2019). «Vulnerable Growth», *American Economic Review*, 109(4), pp. 1263-1289.
- Aguilar, P., B. González y S. Hurtado (2021). *A sectorial model for carbon tax stress test scenarios*, Documentos de Trabajo, Banco de España, de próxima publicación.
- Arencibia, A., S. Hurtado, M. de Luis y E. Ortega (2017). *New Version of the Quarterly Model of Banco de España (MTBE)*, Documentos Ocasionales, n.º 1709, Banco de España.
- Banco Central Europeo (2019). «Climate change and financial stability», artículo especial A del *Financial Stability Review*, mayo.
- Banco Central Europeo (2021). «Climate change and central banking», discurso de Christine Lagarde, presidenta del BCE, de 25 de enero.
- Banco de Inglaterra (2018). *Transition in thinking: The impact of climate change on the UK banking sector*, Informe de la Autoridad de Regulación Prudencial, septiembre.
- Bolton, P., y M. T. Kacperczyk (2020). *Do Investors Care about Carbon Risk?*, Oficina Nacional de Investigación Económica (NBER), Documento de Trabajo n.º 26968.
- Bouakez, H., O. Rachedi y E. Santoro (2020). «The Government Spending Multiplier in a Multi-Sector Model», R&R, *American Economic Journal: Macroeconomics*.
- Comisión Europea (2020). *Climate change impacts and adaptation in Europe*, informe final del estudio PESETA IV del Centro de Investigación Conjunta.
- G20 (2016). *G20 Green Finance Synthesis Report*, Grupo de Estudio de Finanzas Verdes del G20, septiembre.
- Junta Europea de Riesgo Sistémico (2016). *Too late, too sudden: Transition to a low-carbon economy and systemic risk*, informe n.º 6 del Comité Científico Consultivo, febrero.
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (2015). *The Economic Consequences of Climate Change*, OECD Publishing, París, noviembre.