

Impacto de los escenarios post-Kyoto en España

MIKEL GONZÁLEZ-EGUINO*

INTRODUCCIÓN

En la última década, el cambio climático (CC) se ha convertido en una cuestión clave en la agenda política internacional. Existe un consenso amplio en la comunidad científica sobre la necesidad de reducir fuertemente los gases de efecto invernadero (GEIS) si queremos controlar el aumento de las temperaturas (IPCC 2007).

Lograr un acuerdo sobre los niveles globales de reducción de GEIS es una labor compleja. Para ello, es preciso primero estimar los beneficios y los costos de las distintas medidas alternativas, elegir entre un objetivo global y asignar, posteriormente, y entre los distintos países las cuotas de reducción de emisiones. Los análisis costo-beneficio sobre la reducción de GEIS comenzaron a desarrollarse en la década de los años noventa, y han sido aplicados a nivel global (Nordhaus 1993), a nivel regional (Weyant 1999) y utilizando diversos tipos de modelos (Springer 2003). Más recientemente diversos

Manuscrito recibido en septiembre de 2008; aceptado en enero de 2010.

* Basque Centre for Climate Change (BC3), <mikel.gonzalez@bc3research.org>. El autor agradece los comentarios y sugerencias de dos dictaminadores anónimos de la revista.

trabajos se han centrado en cómo lograr una distribución equitativa de las cuotas entre países y a lo largo del tiempo (Frankel 2008).

Los costos de mitigación de GEIS están muy influenciados por parámetros de carácter tecnológico y económico (González-Eguino 2007). Sin embargo, existen variables de carácter político que tienen una gran importancia y que es preciso investigar. Este artículo se centra concretamente en analizar el efecto de la elección de los objetivos de mitigación, o del *targeting*, y el efecto de la elección de los plazos, o *timing*. Para ello analiza el caso concreto de España y utiliza un modelo de equilibrio general aplicado (MEGA) dinámico tipo Ramsey.

El artículo se ordena de la siguiente manera: el apartado dos repasa las perspectivas de reducción de GEIS en el largo plazo a nivel global y el apartado tres presenta los objetivos particulares para España. En el apartado cuatro recoge los escenarios a analizar y en el apartado cinco describe el modelo propuesto y su calibración. Los resultados para cada escenario se analizan en el apartado seis junto con el análisis de sensibilidad del apartado siete. Por último, en el apartado ocho, se recogen las limitaciones, las principales conclusiones del análisis y las futuras líneas de trabajo.

LA POLÍTICA GLOBAL DE MITIGACIÓN DE GEIS

Según la Agencia Internacional de la Energía (IEA, por su siglas en inglés) (IEA 2009), y en ausencia de políticas globales sobre CC, las emisiones de GEIS se duplicarán a mitad del siglo XXI. En este escenario, el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) considera que existe una probabilidad de un 50-60% de que la temperatura media de la atmósfera supere los 3°C respecto al período preindustrial. Es decir, existen posibilidades de franquear los ‘umbrales de prevención’ identificados por la comunidad científica en torno en los 2°C (COM 2007). Para no exceder los 2°C es preciso que la concentración de GEI se establezca en torno a 450-550 partes por millón (ppm), y eso requiere que las emisiones globales alcancen su cénit en 2020 y disminuyan a la mitad en 2050 (IPCC 2007). Teniendo en cuenta el crecimiento poblacional y económico de los países emergentes, esto requeriría

que los países desarrollados redujeran sus propias emisiones un 60-80% para 2050 (Stern 2008).

El Protocolo de Kyoto¹ firmado en 1997 es un paso pequeño en esta dirección. Este tratado es el primer acuerdo internacional que establece unos objetivos de reducción de GEIS y unas fechas de cumplimiento concretas. El objetivo es que los países desarrollados (Anexo B²) reduzcan sus emisiones conjuntas un 5.2% por debajo de los niveles de 1990 para el periodo 2008-2012. Como su aplicación finaliza en 2012, existe una amplia incertidumbre respecto a los nuevos compromisos que puedan surgir de su renegociación.

La Unión Europea (UE), unilateralmente y al margen de la evolución de las negociaciones internacionales, ha acordado un paquete de medidas destinadas a reducir sus emisiones de GEIS un 20% para 2020³ (COM 2008). Si la comunidad internacional se suma a este esfuerzo en la futura Cumbre de México en 2010, la UE se comprometería a reducir sus emisiones hasta un 30%. Para ello, y desde 2005, funciona en la UE un Sistema de Comercio de Emisiones (EU-ETS, por sus siglas en inglés) entre los sectores más intensivos energía.⁴ Mediante este sistema se limita las emisiones al número de permisos de emisión otorgado y se genera un precio por las emisiones mediante el libre intercambio de los derechos en el mercado.

¹ Después de casi 10 años de negociaciones, el Protocolo de Kyoto entró en vigor en 2005 con la ratificación de Rusia, y el rechazo de Estados Unidos y Australia.

² País del Anexo B. Entre paréntesis variación objetivo de las emisiones de GEIS con respecto a 1990: Unión Europea (15), Bulgaria, República Checa, Eslovaquia, Eslovenia, Estonia, Letonia, Liechtenstein, Lituania, Mónaco, Rumania, Suiza (-8%); Estados Unidos (-7%); Canadá, Hungría, Japón, Polonia (-6%); Croacia (-5%); Nueva Zelanda, Rusia, Ucrania (0%); Noruega (1%); Australia (8%); Islandia (10%).

³ El paquete de Energía y Cambio Climático, conocido como "20-20-20", persigue: 1) reducir las emisiones de GEIS un 20%, 2) abastecer 20% de la demanda energética con fuentes renovables y 3) aumentar un 20% la eficiencia energética. Los tres objetivos para 2020.

⁴ Estos sectores, que representan aproximadamente 50% de las emisiones de CO₂, son el sector Eléctrico, Cemento, Refino, Vidrio, Cerámica, Metalurgia y Papel. Se está estudiando la incorporación del sector Transporte aéreo.

LA POLÍTICA DE MITIGACIÓN DE GEIS EN ESPAÑA

España, como parte de la UE, se comprometió en el Protocolo de Kyoto a no aumentar sus emisiones más de un 15% respecto a los niveles 1990. Este objetivo, ampliado a través del Plan Nacional de Asignación (2008-2012) hasta un 24%, mediante la contabilización de los sumideros de carbono (2%) y la compra de créditos en el mercado de derechos (7%), ha sido ya ampliamente rebasado. En el año 2007 las emisiones habían superado 50% y situaban a España como uno de los países europeos más alejado de sus objetivos. Aunque en 2006 comenzó a invertirse ligeramente esta tendencia (la economía creció un 4% y las emisiones caían un 4%), ha sido la crisis económica de 2008-2009 la que ha forzado una reducción de las emisiones. Aunque, según las previsiones de la Comisión Nacional de la Energía, la demanda eléctrica y de gas natural moderarán su crecimiento de forma significativa hasta 2012, las emisiones seguirán creciendo en el futuro en ausencia de políticas energéticas y climáticas.

Esta situación plantea el interrogante sobre cuáles serán los costos económicos de cumplir los objetivos de mitigación en el largo plazo. Existe abundante evidencia científica (IPCC 2007) que muestra un potencial 'económico'⁵ suficiente para estabilizar las emisiones globales con un costo entre 20-50 dólares por tonelada de CO₂ equivalente evitada (US\$/tCO₂eq). Sin embargo, una reducción consistente con el objetivo de estabilización de 2°C supondría costos mayores, seguramente superiores a los 80-100 dólares. Los estudios también muestran que no existe una tecnología que pueda proporcionar todo el potencial de mitigación en ninguno de los sectores y que los costos dependerán mucho de las particularidades de cada país.

Ocaña (2004) realizó una de las primeras aproximaciones sobre los costos de mitigación de GEIS para España, mediante el cálculo del déficit entre

⁵ El potencial de mitigación de mercado considera el potencial desde el punto de vista de la rentabilidad privada, mientras que el potencial de mitigación económico lo hace desde el punto de vista de la rentabilidad social. Sin una intervención pública que regule la externalidad causada por las emisiones de GEIS difícilmente el potencial de mercado podrá alcanzar el potencial económico existente.

las emisiones futuras estimadas y los permisos de emisión otorgados a los sectores incluidos en el EU-ETS.⁶ Según este análisis, en el año 2010 el costo total para un precio estimado de 10-20 €/tonelada en España se situaría entre 150 y 300 millones de euros. La limitación de este tipo de estudios es que únicamente consideran los costos para los sectores incluidos en el EU-ETS (50% de las emisiones de GEIS) y no tienen en cuenta los impactos indirectos.

Para incorporar los efectos indirectos algunos autores han optado por aplicar modelos insumo-producto (Alcántara y Padilla 2003; Tarancón y del Río 2007) o modelos de equilibrio general aplicados (Labandeira y Rodríguez 2006; Gómez-Plana *et al.* 2009), más consistente con la teoría microeconómica. Según Labandeira y Rodríguez (2006), en el corto plazo y utilizando un MEGA, cada 1% de reducción de GEIS iría asociado a un reducción de 0.1% del producto interno bruto (PIB).

La mayoría de los estudios con MEGAS en España se han centrado en analizar los costos de mitigación en un contexto estático y de corto plazo.⁷ Este artículo analiza los costos de mitigación en el largo plazo (escenario Kyoto 2050) utilizando un MEGA dinámico.

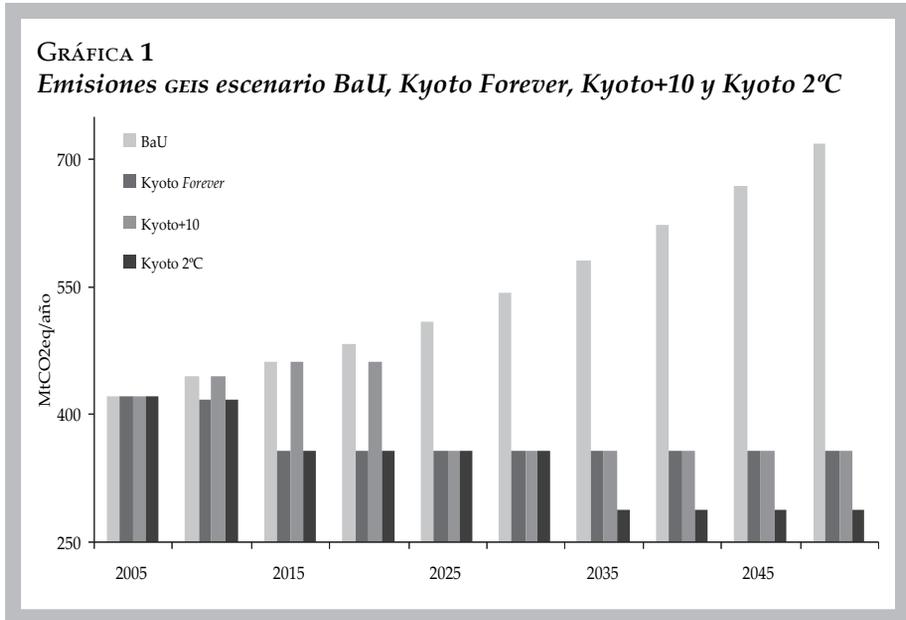
ESCENARIOS

Los escenarios post-Kyoto alternativos que se presentan a continuación abarcan hasta el año 2050. Están diseñados para poder investigar el efecto de los cambios en los objetivos y en los plazos de las políticas de mitigación:

⁶ EU-ETS, en funcionamiento desde 2005, comprende el sector Cemento, Refino, Vidrio y cerámica, Metalurgia, Papel y Eléctrico. Con este sistema los gobiernos: i) determinan mediante Planes Nacionales de Asignación los permisos que recibirá cada instalación y ii) permiten que se intercambien a un precio de mercado. Aunque la mayoría de los permisos se otorgan gratuitamente, progresivamente se sustituirá por un sistema de subastas. Por ejemplo, en el sector eléctrico y para las instalaciones de Captura y Almacenamiento de Carbono (CCS) se plantea una subasta de 100% en 2013 y en 2020 para los sectores industriales.

⁷ Una excepción es Gómez-Plana (2007) que utiliza un MEGA dinámico para analizar el efecto de combinar la reducción de emisiones y distintas formas funcionales o tecnologías.

- i. BaU o *Business as Usual*: representa un escenario en donde no existe una limitación sobre las emisiones de GEIS. Es el escenario tendencial o de referencia.
- ii. *Kyoto Forever*: representa una extensión hasta el año 2050 de los objetivos de Kyoto. Esto supone: 1) reducir las emisiones para el periodo 2008-2012 de forma que éstas no superen en un 15% las emisiones de 1990 y 2) estabilizarlas en esos mismos niveles hasta 2050.
- iii. *Kyoto+10*: El escenario *Kyoto+10* es idéntico que el escenario *Kyoto Forever*, pero los objetivos de reducción se alcanzarán y estabilizarán con 10 años de retraso, debido a lo lejos que se encuentra actualmente España de sus objetivos.
- iv. *Kyoto 2°C*: El escenario es idéntico al escenario *Kyoto Forever* pero en el año 2030 las emisiones se reducen hasta alcanzar los niveles de 1990. Este nivel sería similar al necesario para estabilizar la temperatura global en 2°C, si las negociaciones y el reparto de objetivos por países fuera similar al Protocolo de Kyoto.



La gráfica 1 recoge la evolución de las emisiones de GEIS en el escenario de referencia BaU y en los otros tres escenarios propuestos. Las emisiones en el escenario BaU alcanzan las 719 millones de toneladas de CO₂ equivalente (MtCO₂eq) en el año 2050, mientras que el escenario *Kyoto Forever* y *Kyoto+10*

se estabilizarían en torno a 357 MtCO₂eq. En el escenario Kyoto 2°C las emisiones se estabilizan en los niveles de 1990, es decir, en 288 MtCO₂eq.

El ritmo de reducción de emisiones en el escenario Kyoto *Forever* y Kyoto+10 se basa en los Planes Nacionales de Asignación,⁸ que contemplan una primera fase de mantenimiento de las emisiones (2005-2007), coincidiendo con la puesta en marcha del primer periodo del EU-ETS, y otra fase posterior de intensa reducción (2008-2012). La reducción real de emisiones es significativa si consideramos el crecimiento previsible (BaU). La reducción de emisiones del escenario Kyoto *Forever*, respecto al escenario BaU, es un 25% en 2020 y un 51% en 2050, mientras que la del escenario Kyoto 2°C en 2050 es un 61 por ciento.

Estos escenarios no recogen las posibilidades otorgadas a España, como país del anexo B del Protocolo de Kyoto, para contabilizar como propias reducciones de emisiones realizadas en terceros países. Esta consideración debería reflejar una reducción de los costos de mitigación por dos vías: 1) una ligera reducción de los objetivos de mitigación ‘nacionales’ y 2) una reducción de los costos marginales de mitigación, ya que en estos terceros países el costo de la tonelada de CO₂ evitada debería ser menor.

MODELO

Para estimar los costos de la mitigación utilizaremos un MEGA dinámico tipo Ramsey que introduce la restricción de emisiones simulando un mercado de permisos de emisión. Los MEGAS son versiones empíricas de un modelo walrasiano y recogen las interdependencias entre los diversos agentes económicos. Estos modelos permiten capturar el flujo circular de la renta y son útiles para analizar políticas que, como las de mitigación de emisiones de GEIS, tienen impactos directos e indirectos significativos. Una buena introducción a estos modelos puede encontrarse en Shoven y Whalley (1992).

El modelo se compone de: 1) 22 sectores productivos; 2) un consumidor representativo, propietario de los factores productivos (capital y trabajo);

⁸ *Plan Nacional de Asignación (PNA) 2005-2007 y 2008-2012* (RD 1886/2004 y RD1360/2006).

3) un gobierno, que recauda impuestos, provee bienes y servicios públicos y controla las emisiones de GEIS a través de los permisos de emisión, y 4) el agregado Resto del Mundo, agrupa a todo el sector exterior. La desagregación de los sectores productivos comprende a los sectores energéticos (Carbón, Petróleo, Gas natural y Electricidad), a sectores relevantes por sus emisiones (Agricultura, Transporte e Industria) y a sectores relevantes por su peso económico (Servicios privados y públicos).

Las emisiones de GEIS que hemos considerado son las sujetas a control por el Protocolo de Kyoto: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), monóxido de nitrógeno (N_2O) y gases fluorados (SF_6 , HFC, PFC). Estas emisiones se agrupan en dos bloques; emisiones de combustión y emisiones de proceso. Las emisiones de combustión proceden directamente de la quema de combustibles fósiles, mientras que las emisiones de proceso se originan a lo largo del proceso de productivo.

Productores

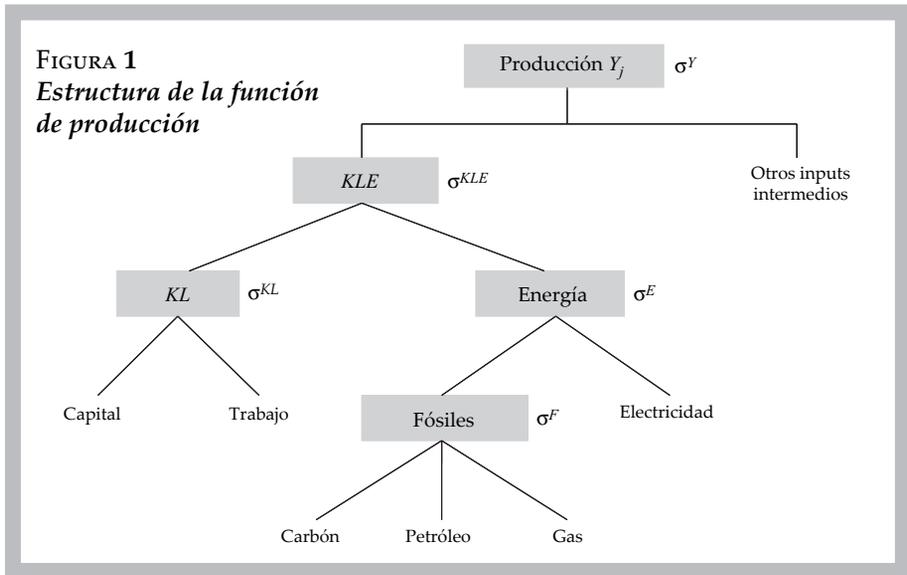
Cada sector productivo, $j = 1, \dots, J$, produce un bien homogéneo con una tecnología caracterizada mediante funciones de elasticidad de sustitución constante (CES, por su siglas en inglés) anidadas. La producción de cada sector (Y_j^A) en cada momento t se obtiene combinando insumos intermedios ($Y_{1,j,t}^{ID}$), capital ($K_{j,t}$), trabajo ($L_{j,t}$) y emisiones ($E_{j,t}^P$). Las emisiones son, a efectos del modelo, un factor productivo más, ya que tienen que ir asociadas a un permiso de emisión y éste tendrá un precio (véase la sección referente a emisiones y política ambiental). La ecuación [1] (véanse los apéndices) recoge de forma simplificada la función de producción y la figura 1 representa su estructura gráfica.⁹ Los parámetros σ representan las elasticidades de sustitución entre los diferentes insumos.

⁹ Es habitual en un MEGA representar las funciones de producción de forma gráfica para así evitar su compleja extensión algebraica. En el apéndice se recoge esta función de forma más detallada.

$$Y_{j,t}^A = CES(Y_{1,j,t}^{ID}, \dots, Y_{J,j,t}^{ID}; K_{j,t}; L_{j,t}; E_{j,t}^P : \sigma^Y, \sigma^{KLE}, \sigma^{KL}, \sigma^E, \sigma^F), \forall (j,t) \quad [1]$$

Los productores maximizan beneficios sujetos a las restricciones tecnológicas descritas por la función de producción. El beneficio neto de impuestos en el equilibrio de competencia perfecta será nulo, es decir; el valor del producto de cada sector será igual al valor de todos los insumos utilizados. Esta condición se recoge en la ecuación [2], donde $P_{j,t}$ es el precio del producto del sector j en el instante t , $P_{K,t}$ es el precio del capital, $P_{L,t}$ el precio del trabajo y $P_{E,t}$ el precio de los permisos de emisión. Finalmente, τ_j^P y τ_j^L son las tasas impositivas sectoriales sobre el capital y el trabajo.

$$P_{j,t} \cdot \tau_j^P \cdot Y_{j,t} = [P_{j,t} \cdot \sum_{jj=1}^J Y_{jj,j,t}^{ID} + (P_{K,t} \cdot \tau_j^K \cdot K_{j,t}) + (P_{L,t} \cdot \tau_j^L \cdot L_j) + (P_{E,t} \cdot E_{j,t}^P)], \forall (j,t) \quad [2]$$



Consumidores

El modelo considera un consumidor representativo. Sus preferencias se definen mediante una función de utilidad CES anidada de los diferentes bienes de consumo j en el periodo t ($C_{1,t}$), junto a sus respectivas elasticidades de sustitución (véanse ecuación [3] y figura 2). La utilidad total (U) es la agregación de las utilidades intertemporales (U_t), siendo la elasticidad de sustitución intertemporal (σ^U) el parámetro que modula las preferencias entre utilidad presente y futura (ecuación [4]).

$$U_t = CES(C_{1,t}, \dots, C_{j,t}; \sigma^C, \sigma^{CE}, \sigma^{CB}), \forall t \quad [3]$$

$$U = CES(U_1, \dots, U_t; \sigma^U) \quad [4]$$

El consumidor maximiza la utilidad total sujeto a una restricción presupues-taria. El ingreso en cada periodo t (véase la ecuación [5]) obtenido de las rentas del trabajo, del capital y de las transferencias directas del gobierno (T_t), debe ser igual al gasto destinado a consumo ($C_{j,t}$), pago de impuestos (τ_j^C), compra de permisos de emisión (E_t^C) y ahorro (S_t). Los consumidores también generan emisiones de GEIS y, a efectos del modelo, también tienen que adquirir permisos de emisión.

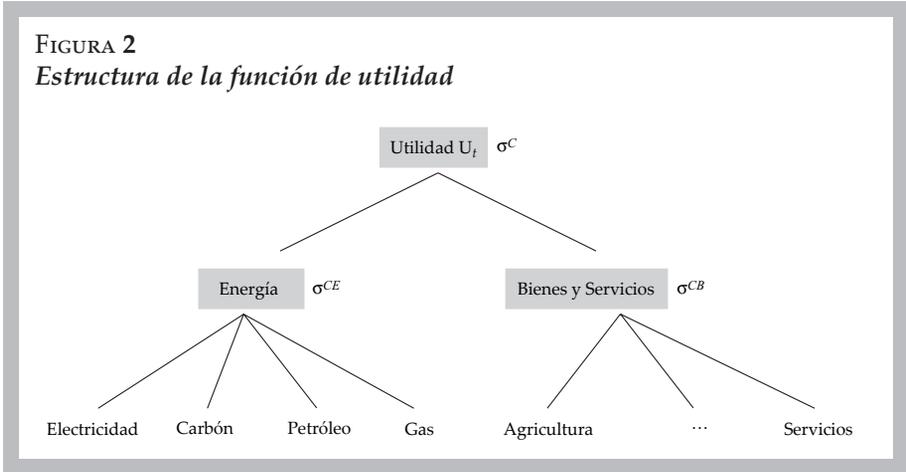
$$P_{K,t} \cdot K_t + P_{L,t} \cdot L_t + T_t = \sum_{j=1}^J (P_{j,t} \cdot \tau_j^C \cdot C_j) + P_{E,t} \cdot E_t^C + S_t, \forall t \quad [5]$$

Gobierno

El gobierno obtiene sus ingresos de la recaudación de los impuestos sobre el capital, el trabajo y el consumo, y mediante los ingresos derivados de los permisos de emisión; siendo E_t la suma de las emisiones de los productores y consumidores y $P_{E,t}$ el precio del permiso en el periodo t . Los ingresos deben ser idénticos en cada periodo a los gastos en bienes y servicios públicos $G_{j,t}$ y las transferencias hacia los consumidores (T_t). El nivel de gasto público

FIGURA 2

Estructura de la función de utilidad



(\bar{G}_t) y su estructura se mantienen fijos mediante el uso de una función Leontief recogida en la ecuación [6]. El balance presupuestario se recoge en la ecuación [7].

$$\bar{G}_t = Leontief(G_{1,t}, \dots, G_{J,t}), (\forall t) \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
 P_{E,t} \cdot E_t + \sum_{j=1}^J (P_{L,t} \cdot \tau^L \cdot L_{j,t} + P_{j,t} \cdot \tau_j^C \cdot C_{j,t} + P_{j,t} \cdot \tau_j^P \cdot Y_{j,t}) \\
 = \sum_{j=1}^J P_{j,t} \cdot G_{j,t} + T_t, \forall t \tag{7}
 \end{aligned}$$

Sector exterior

Para capturar las relaciones económicas con el entorno hemos agrupado a todos los países en un único agregado llamado “Resto del Mundo”, y, de todos los flujos existentes, consideramos únicamente las importaciones y exportaciones de bienes y servicios.

Para modelar el comercio internacional utilizamos dos supuestos habituales en un MEGA el supuesto de economía pequeña y abierta y el supuesto

Armington. El supuesto de economía pequeña y abierta establece que: *a)* la economía nacional es demasiado pequeña para influir en los precios mundiales y *b)* las necesidades de importación y exportación pueden ser satisfechas mediante el comercio internacional. El supuesto Armington establece que los bienes nacionales y los importados/exportados son sustitutos imperfectos (Armington 1969). En la práctica, esto supone modelar la oferta total ($Y_{j,t}^{TS}$) como una función CES (ecuación [8]), que agrega la producción nacional ($T_{j,t}$) y las importaciones ($M_{j,t}$), que es igual a la demanda total ($Y_{j,t}^{TD}$), y que se modela mediante una función de elasticidad de transformación constante (CET) (ecuación [9]) que se divide entre demanda interna ($Y_{j,t}^D$) y exportaciones ($X_{j,t}$).

$$Y_{j,t}^{TS} = CES(Y_{j,t}, M_{j,t} : \sigma^A), \forall (j,t) \quad [8]$$

$$Y_{j,t}^{TD} = Y_{j,t}^{TS} = CET(Y_{j,t}^D, X_{j,t} : \sigma^T), \forall (j,t) \quad [9]$$

Finalmente, y como condición de cierre, suponemos que el déficit comercial (XD_t , importaciones totales menos exportaciones totales) es exógeno (ecuación [10]) siendo $P_{X,t}$ la variable de ajuste.

$$\sum_{j=1}^J P_{X,t} (M_{j,t} - X_{j,t}) = \overline{XD}_t, \forall (t) \quad [10]$$

Crecimiento económico y cambio tecnológico

El crecimiento económico proviene del aumento del factor trabajo (exógeno) y del incremento del factor capital (endógeno). La oferta de trabajo está dada en el año de referencia inicial (\bar{L}_0) y crece a una tasa constante g (ecuación [11]). Esta tasa de crecimiento recoge dos factores implícitos: el crecimiento demográfico y las mejoras de productividad. El stock de capital también está dado en el año inicial (\bar{K}_0), pero su crecimiento (ecuación [12])

depende de la inversión (I_t), que en último término depende de la decisión entre ahorro-consumo y de la tasa de depreciación del capital (δ).

$$\bar{L}_{t+1} = \bar{L}_t \cdot (1 + g), \forall(t) \tag{11}$$

$$K_{t+1} = K_t \cdot (1 - \delta) + I_t, \forall(t) \tag{12}$$

Para evitar que el stock de capital sea consumido completamente en el último periodo, es necesario utilizar una condición de transversalidad que nos permita aproximar un modelo de horizonte infinito a otro de horizonte finito. La literatura propone diferentes reglas para que la distorsión de esta condición sea mínima. En nuestro caso, adoptaremos la más habitual en la literatura sobre MEGAS (ecuación [13]) y que establece que el crecimiento de la inversión y de la utilidad en el último periodo (T) debe ser igual. En Lau *et al.* (2002) podemos encontrar una demostración sobre el pequeño efecto de esta condición sobre las sendas óptimas.

$$\frac{I_T}{I_{T-1}} = \frac{U_{T, 'priv'}}{U_{T-1, 'priv'}} \tag{13}$$

El progreso tecnológico es una parte importante de la dinámica del modelo. En nuestro caso el cambio tecnológico es exógeno y depende de un parámetro (φ_t) que mide las mejoras futuras en eficiencia de emisiones o GEIS, es decir, en la generación de emisiones por unidad de producto. Este parámetro sigue una función logística en forma de S (véase Löschel 2002) típica en los procesos de difusión tecnológica (ecuación [14]). Esta función parte de un valor inicial en t_0 , aumenta exponencialmente y se estabiliza en t_f . El valor inicial y final de este parámetro será diferente para las emisiones de combustión (φ_t^C) y proceso (φ_t^P), ya que la evolución reciente y las perspectivas tecnológicas futuras en ambos casos difieren.

$$\varphi_t = \varphi_{t_f} \cdot \frac{1}{1 + (\varphi_{t_f} / \varphi_{t_0} - 1) \cdot e^{-t}} \tag{14}$$

Emisiones y política ambiental

Las emisiones totales (E_t) son la suma de las emisiones de productores (E_t^P) y consumidores (E_t^C). Cada una de ellas se obtiene a su vez sumando las emisiones de combustión y proceso. Las emisiones de combustión están asociadas mediante coeficientes del consumo de carbón, petróleo y gas (denotado por el subíndice $e = 3$) para productores (α_e) y consumidores (γ_e). Las emisiones de proceso están asociadas también mediante coeficientes a la producción (x_j) y al consumo final total (z). Estas emisiones están corregidas en cada periodo por un parámetro de progreso tecnológico (φ_t^C, φ_t^P).

$$E_t^P = \varphi_t^C \cdot \left(\sum_{e=1}^3 \alpha_e \cdot \sum_{j=1}^J Y_{e,j,t}^{ID} \right) + \varphi_t^P \cdot \left(\sum_{j=1}^J x_j \cdot Y_{j,t} \right), \forall t \quad [15]$$

$$E_t^C = \varphi_t^C \cdot \sum_{e=1}^3 (\lambda_e \cdot C_{e,t}) + \varphi_t^P \cdot \left(z \cdot \sum_{j=1}^J C_{j,t} \right), \forall t \quad [16]$$

La política ambiental se implementa simulando un mercado de permisos de emisiones transferibles. Es una forma natural de simular reducciones costo-efectivas de GEIS en el caso de un MEGA, ya que los permisos pueden ser tratados como un factor productivo más que alcanza un precio de equilibrio a través de la oferta y la demanda (Dellink 2005). Si la cantidad de permisos supera el nivel de emisiones el precio de los permisos será nulo, pero a medida que el gobierno comience a restringirlos en base su precio comenzará a aumentar. Esto no implica preferencia alguna respecto a ningún instrumento.

En el caso de las emisiones de combustión las posibilidades de reducción son limitadas ya que la quema de combustibles fósiles genera inevitablemente emisiones de CO_2 .¹⁰ Sin embargo, las emisiones de combustión

¹⁰ Aunque en un futuro las tecnologías de Captura y Almacenamiento de Carbono (CAC) pueden estar disponibles y ser rentables, todavía están en fase de demostración. Aún así, esta tecnología supondría el almacenamiento de las emisiones en depósitos, pero no la supresión de las mismas.

pueden reducirse de manera inducida. Las variaciones en los precios relativos de los factores originan cambios en: el mix energético, sustituyendo combustibles fósiles más intensivos en CO₂ por otros menos intensivos; en las funciones producción y utilidad, sustituyendo el uso de energía por otros insumos, y en la estructura económica; modificando los patrones de consumo hacia productos bajos en carbono. Por último, y cuando todas las posibilidades de sustitución han sido explotadas, la única forma de reducir las emisiones de combustión es reduciendo el nivel de actividad económica asociado.

En el caso de las emisiones de proceso existen posibilidades de reducción mediante el uso de diferentes tecnologías y cambios en los procesos productivos. Para poder capturar este hecho, y siguiendo a Reilly *et al.* (2002), utilizamos una función CES que permite incorporar un cierto nivel de sustitución entre la producción ($Y_{j,t}^A$) y las emisiones de proceso ($E_{j,t}^P$). En Hyman *et al.* (2003) podemos encontrar una estimación de los valores para este parámetro (σ^B).

$$Y_{j,t} = CES\left(Y_{j,t}^A, E_{j,t}^P : \sigma^B\right) \quad [17]$$

Equilibrio y solución

El concepto de equilibrio utilizado se corresponde con la noción walrasiana tradicional; las cantidades ofertadas son iguales a las cantidades demandadas y todos los agentes cumplen con sus planes de optimización, actuando los precios como variables de ajuste. Esto supone un equilibrio en cada periodo t en el mercado de bienes y servicios (ecuación [18]), en el mercado de trabajo y capital (ecuaciones [19] y [20]) y entre el ahorro y la inversión (ecuación [21]). En el mercado de permisos las emisiones totales deben ser iguales al número de permisos disponibles (ecuación [22]).

$$Y_{j,t}^D = \sum_{jj=1}^J Y_{j,j,t}^{ID} + C_{j,t} + G_{j,t} + I_{j,t} \quad [18]$$

$$\sum_{j=1}^J L_{j,t} = \bar{L}_t \quad [19]$$

$$\sum_{j=1}^J K_{j,t} = K_t \quad [20]$$

$$S_t = \sum_{j=1}^J P_{j,t} \cdot I_{j,t} + \bar{XD}_t \quad [21]$$

$$\bar{E}_t = E_t^P + E_t^C \quad [22]$$

Encontrar las soluciones de equilibrio implica resolver un sistema dinámico de ecuaciones no lineales. Para la programación del modelo se ha utilizado el lenguaje GAMS/MPGGE y para su resolución el algoritmo PATH (Dirkse y Ferris 1995).

Calibración y datos

Para calibrar el modelo utilizamos una Matriz de Contabilidad Social (SAM, por sus siglas en inglés) que integra la información de la Tabla Insumo-producto y de los Balances Energéticos Sectoriales (véanse los apéndices). Esto nos permite conocer los flujos energéticos subyacentes en la TIO y calcular a partir de ellos las emisiones de GEIS. La reacción de los agentes ante los cambios se recoge a través de elasticidades de sustitución (Babiker *et al.* 2001, véanse los apéndices). Asignamos a la tasa decrecimiento (g) y depreciación del capital (δ) un valor de 2.5 y 5 por ciento, respectivamente, que es la tasa media de crecimiento anual ocurrido en España en el periodo 1990-2005 (véase González-Eguino 2007).

Las emisiones de combustión en el año base se calculan a través de los coeficientes estándares para el carbón, el petróleo y el gas natural, considerando que en algunos sectores no utilizan estos insumos para la combustión

(véase la tabla A3). Las emisiones de proceso se obtienen como diferencia entre las emisiones de combustión estimadas y las emisiones totales calculadas por las Cuentas Ambientales Nacionales (INE 2002). La evolución de las emisiones futuras depende del parámetro de cambio tecnológico exógeno habitual en la literatura (Chesnay 2006); un 1.5% anual para emisiones de proceso y un 1% en combustión.

RESULTADOS

Los impactos del control de GEIS se estiman mediante la comparación entre el escenario BaU y los restantes. Dividimos el análisis de los resultados en tres bloques: en primer lugar, presentamos los resultados a nivel agregado, en segundo lugar estudiamos los efectos a nivel sectorial y, por último, analizamos la evolución de los precios de los permisos de emisión.

Resultados generales

Los resultados generales para el año 2050 y para los tres escenarios considerados (Kyoto *Forever*, Kyoto+10, Kyoto 2°C) se recogen en la tabla 1. Las variables macroeconómicas principales (PIB, consumo privado e inversión¹¹), en 2050 son inferiores al escenario BaU, lo que nos muestra algo obvio pero importante: que reducir las emisiones de GEIS tiene un costo frente la opción de emitir de forma gratuita y sin restricción. La utilidad total, que recoge la suma descontada de la utilidad en cada periodo, es un 0.30-0.61% inferior al escenario BaU.

El PIB muestra también una disminución progresiva hasta alcanzar en 2050 una reducción en los tres escenarios entre un 1.26 y un 2.19 por ciento. A través de la evolución de esta variable (véase la gráfica 2) podemos observar, además, algunas diferencias entre escenarios. En primer lugar, observamos que la reducción en el escenario Kyoto *Forever* es inicialmente inferior a

¹¹ El Gasto Público y el Balance Comercial, por hipótesis del modelo, no varían con respecto a al escenario BaU.

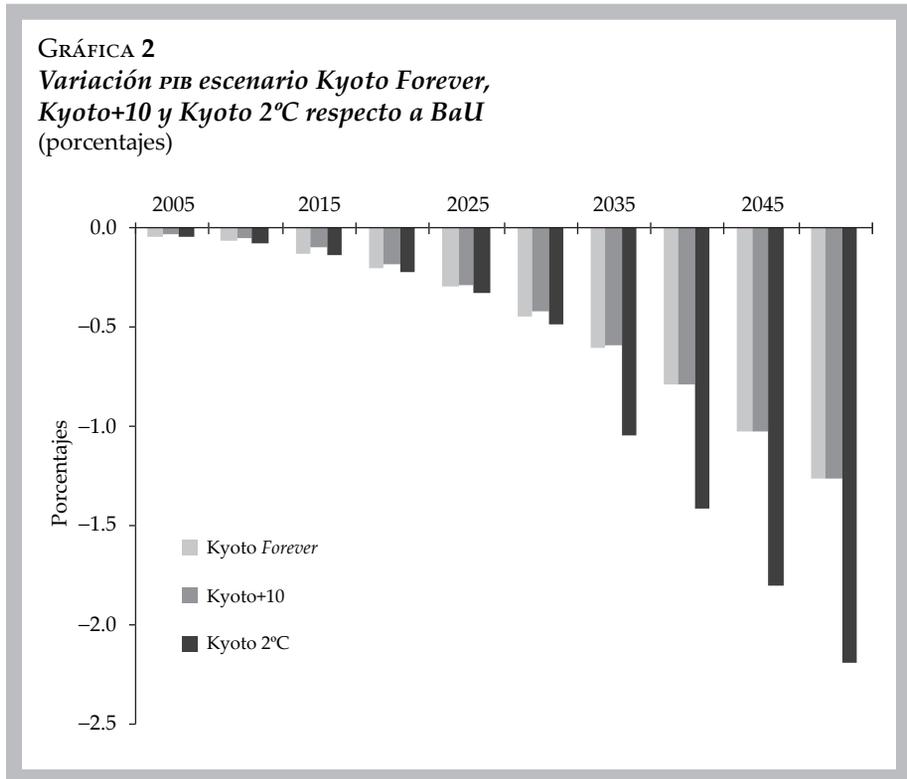
TABLA 1
Impacto en economía, energía y emisiones: escenario Kyoto Forever, Kyoto+10 y Kyoto 2°C respecto a escenario BaU para 2050
 (porcentajes)

	<i>Kyoto Forever</i>	<i>Kyoto+10</i>	<i>Kyoto 2°C</i>
Economía			
Utilidad total (2005-2050)	-0.31	-0.30	-0.61
Utilidad	-0.99	-0.98	-1.85
PIB	-1.27	-1.26	-2.19
Consumo privado	-0.77	-0.76	-1.43
Inversión	-2.55	-2.55	-4.11
Energía			
Consumo total	-23.47	-23.46	-31.55
Consumo productores	-30.35	-30.35	-40.05
Consumo consumidores	-11.03	-11.03	-16.20
Consumo carbón	-63.19	-63.19	-74.00
Consumo petróleo	-36.54	-36.53	-48.88
Consumo gas natural	-24.33	-24.33	-36.10
Consumo electricidad	-11.14	-11.14	-15.63
Emisiones GEIS			
Emisiones totales	-51.06	-51.06	-61.10
Emisiones combustión	-45.35	-45.35	-57.45
Emisiones proceso	-71.25	-71.25	-72.21
Precio permisos (€/tCO ₂ eq)	92.01	92.02	168.46

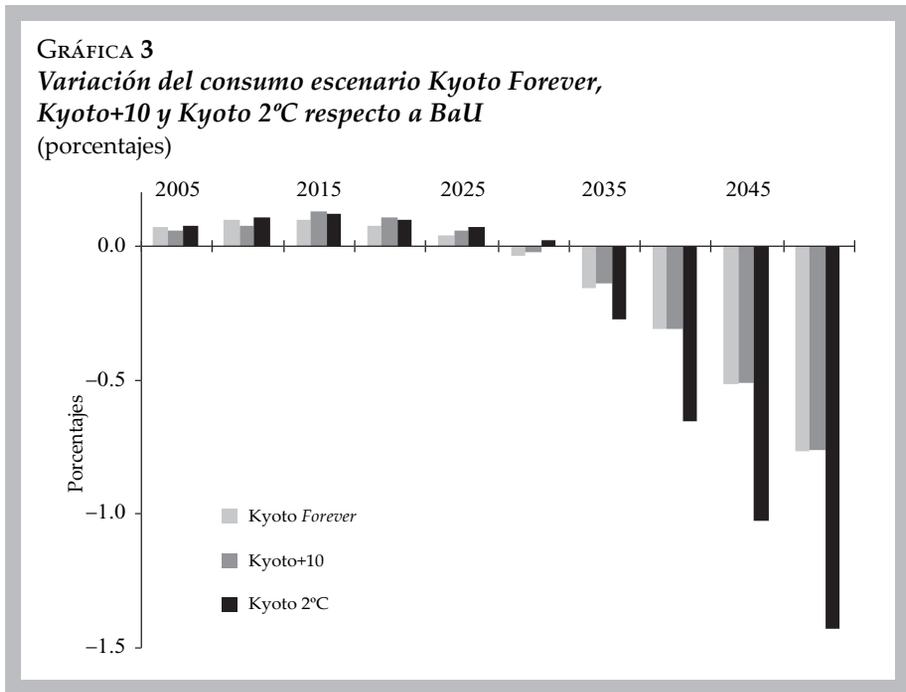
Kyoto+10, ya que la restricción comienza 10 años más tarde. Esto, no sólo retrasa el impacto económico, sino que otorga también más tiempo para que las mejoras tecnológicas previstas se desarrollen (ϕ_t), haciendo que el impacto pueda ser menor. Sin embargo, dado el progreso de la tecnología, este efecto se ve neutralizado y, aunque el costo del Kyoto+10 es inferior, las diferencias en 2050 son mínimas.

En segundo lugar, la reducción del PIB en el escenario Kyoto 2°C es mucho más intensa a partir de 2030, cuando los objetivos se hacen más estrictos (-61% GEIS respecto a BaU). A partir de 2030, el PIB sufre un recorte

considerable pasando en 2050 de una reducción de 1.27% (escenario *Kyoto Forever*) a una reducción de 2.19%. Esta diferencia se manifiesta, como analizaremos más adelante, a través de un incremento en los costos marginales de reducción de emisiones (CMR).



Podríamos pensar que como los objetivos entre el periodo 2005-2030 para los escenarios *Kyoto Forever* y *Kyoto 2°C* son idénticos, el impacto sobre el PIB durante este periodo también debería ser igual, pero no es así. Para explicar este fenómeno es necesario recordar el carácter dinámico (tipo Ramsey) del modelo y que los agentes anticipan y ajustan su comportamiento desde un inicio. Para ilustrar este fenómeno podemos observar la evolución del consumo con respecto al escenario BaU.



La gráfica 3 nos muestra cómo el consumo privado aumenta inicialmente y después disminuye. Es decir, el consumo (y también las emisiones) pueden aumentar ante el anuncio de una política (véase Bye 2000) ya que los agentes anticipan la política y ajustan su comportamiento de cara a maximizar su utilidad total. Una elección óptima puede llevarles a desplazar una mayor parte del consumo al presente, donde genera mayor utilidad. En cualquier caso, este desplazamiento tiene limitaciones ya que un mayor consumo presente supone menor ahorro, una menor inversión, lo que podría traducirse en una menor capacidad productiva y un menor consumo futuro. Igual que sucedía con el PIB, el efecto sobre el consumo en largo plazo en el escenario *Kyoto Forever* y *Kyoto+10* es muy parecido, mientras que la reducción en el escenario *Kyoto 2°C* es más notable.

La tabla 1 muestra también cómo la reducción de emisiones en los tres escenarios (51-61%), es compatible con una reducción mucho menor del

consumo energético (23-31%), lo que ilustra un desacople relativo entre GEIS, PIB y consumo energético. Esto no significa que el consumo de energía disminuya en términos absolutos; éste seguirá creciendo pero lo hará a un ritmo menor que en el escenario BaU. Las posibilidades de sustitución entre insumos, los cambios en los patrones consumo (sustitución de productos) y las mejoras tecnológicas explican este resultado.

De hecho, si analizamos el consumo de energía desagregado por tipos de combustibles, observamos cómo las políticas de mitigación de GEIS condicionan el mix energético y, progresivamente, van sustituyendo combustibles más contaminantes, como el carbón y petróleo, por otros menos contaminantes, como el gas natural. Finalmente, en 2050 el consumo de carbón se reduce respecto al escenario BaU un 63-74%, el petróleo un 36-48%, y el gas natural y la electricidad, un 24-36% y 11-15%, respectivamente. En un inicio, la mayor parte de la reducción proviene de las emisiones de proceso, pero a medida que los objetivos son más intensos, la reducción proviene de las emisiones de combustión, que suponen cerca de 80% de las emisiones totales. Los patrones de evolución en los tres escenarios respecto al consumo y el mix energético son muy parecidos.

Resultados sectoriales

El modelo utilizado nos permite conocer los efectos sectoriales. La desagregación sectorial es importante ya que las políticas de mitigación tienen impactos muy diversos y difusos, y no es posible conocerlos con un análisis macroeconómico. En un MEGA los factores de producción son exógenos y, por lo tanto, los cambios sectoriales deben entenderse como un desplazamiento de recursos de unos sectores a otros que, con la política ambiental, resultan ahora más rentables. En general, puede decirse que los impactos sectoriales surgen de una combinación de efectos por el lado de la oferta; donde los sectores más intensivos en emisiones sufren un aumento en sus costos de producción y por el lado de la demanda; donde el precio más alto de los productos intensivos en emisiones hace disminuir su consumo. También influyen los impactos indirectos, o de ‘segunda ronda’, que se extienden

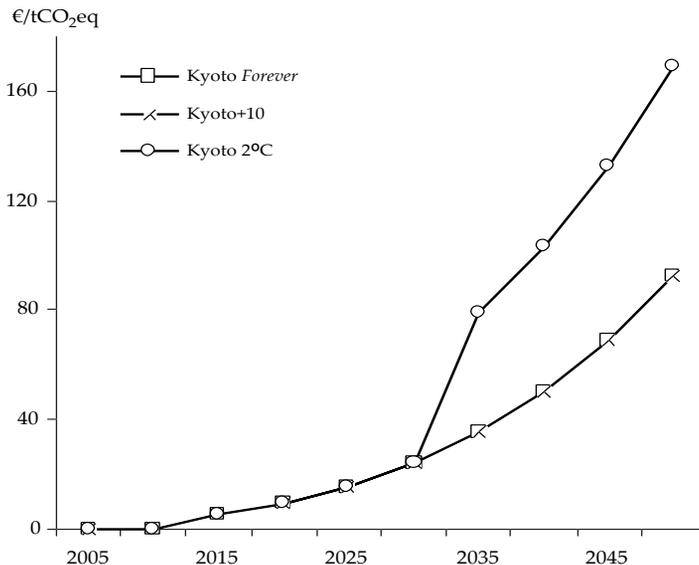
por la cadena intersectorial. Todos estos efectos se materializan, finalmente, en una ‘terciarización’ de la estructura económica dando un mayor peso a los sectores y productos que están relacionados con una menor intensidad en las emisiones de GEIS.

La gráfica 4 muestra el efecto sobre la producción en los 22 sectores analizados en 2050 y en los tres escenarios analizados. Los patrones de cambio son similares aunque, lógicamente, las reducciones en el escenario Kyoto 2°C son más intensas.

Los sectores más afectados son el sector Extracción de carbón, Extracción de crudo y gas,¹² Industria del Refino y Gas natural. Esto se debe al aumento

GRÁFICA 4

Evolución costo marginal reducción emisiones (CMR) escenario Kyoto Forever, Kyoto+10 y Kyoto 2°C, 2005-2050



¹² El peso de este sector en la economía es casi nulo ya que la presencia de hidrocarburos en España es mínima.

TABLA 2
Variación producción por sectores: escenario Kyoto Forever,
Kyoto+10 y Kyoto 2°C respecto a BaU para 2050
 (porcentajes)

	<i>Kyoto Forever</i>	<i>Kyoto +10</i>	<i>Kyoto 2°C</i>		<i>Kyoto Forever</i>	<i>Kyoto +10</i>	<i>Kyoto 2°C</i>
Agricultura	-2.6	-2.6	-4.2	Industria Resto	-3.3	-3.3	-5.2
Extracción de carbón	-65.2	-65.2	-75.9	Electricidad	-11.2	-11.2	-15.8
Extracción de crudo y gas	-38.1	-38.1	-52.5	Gas natural	-24.7	-24.7	-37.6
Extracción de minerales	-1.0	-1.0	-1.7	Distribución agua	-1.5	-1.5	-2.4
Industria de Alimentos	-2.4	-2.4	-4.1	Construcción	-2.2	-2.2	-3.5
Industria Textil y cuero	-2.4	-2.4	-3.9	Transporte terrestre	-2.9	-2.9	-4.6
Industria Madera- papel	-1.9	-1.9	-3.0	Transporte marítimo	4.0	4.0	5.8
Industria del Refino petróleo	-36.3	-36.3	-48.5	Transporte aéreo	-3.7	-3.7	-5.9
Industria Química	-2.1	-2.1	-3.4	Anexos del Transporte	-2.0	-2.0	-3.1
Industria Metálica	-2.7	-2.7	-4.3	Servicio comercial	-0.9	-0.9	-1.5
Industria Maquinaria	-1.5	-1.5	-2.3	Servicio no comercial	0.1	0.1	0.1

del precio relativo de los combustibles fósiles y su sustitución progresiva como producto para consumo final o consumo intermedio. El sector Eléctrico, aunque también sufre con un recorte considerable, su impacto es menor ya que la producción de electricidad es más flexible en cuanto a la posibilidad de sustituir insumos.

Otro grupo amplio de sectores (Agricultura, Industria Química, Industria Metálica, Transporte aéreo, Transporte por carretera) soporta un impacto moderado sobre su producción, con reducciones que se sitúan en torno a 2-4%. Por otro lado, observamos que el efecto en los sectores servicios es casi nulo. El sector Servicios no comerciales incluso aumenta ligeramente su producción.

Por último, y aunque puede sorprender, el sector Transporte marítimo aumenta su actividad productiva (4-5.8%). Aunque este sector es más intensivo en cuanto a emisiones de GEIS que otros, lo es menos que sus sustitutos más cercanos: Transporte terrestre y Transporte aéreo. Esto provoca que gran parte de la actividad de transporte de mercancías se canalice a través de este sector. Este efecto es un buen ejemplo de la importancia que tiene considerar los impactos indirectos en las políticas de mitigación.

Precio de permisos de emisión

A partir de los resultados de un MEGA podemos obtener implícitamente las curvas de costos marginales de reducción de emisiones (CMR) y, por lo tanto, los precios de los permisos de emisión (Ellerman *et al.* 1998). La solución del modelo asegura que la reducción será costo-efectiva, es decir, en equilibrio el CMR para todos los agentes será idéntico, y éste será precisamente el precio de los permisos en cada momento del tiempo.

El precio de los permisos (gráfica 4) es nulo en un inicio, cuando no hay restricción en las emisiones, pero a medida que los objetivos de reducción son más intensos el precio aumenta hasta alcanzar los 92 euros por tonelada en 2050 y 168 en el escenario Kyoto 2°C. Los resultados obtenidos están en la línea de lo sugerido por literatura (Weyant 1999).

La evolución conjunta de los precios y los objetivos de reducción ilustra cómo el costo de reducir emisiones aumenta más que proporcionalmente

ya que las mejores opciones tecnológicas van siendo agotadas. Un objetivo más ambicioso en cuanto a reducción de GEIS aumenta los costos más que proporcionalmente. Finalmente, y en nuestro caso, una reducción de las emisiones un 15% por ciento mayor (respecto 1990), supone doblar casi los costos marginales.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad que realizaremos a continuación nos permite profundizar sobre el impacto de las variaciones en los objetivos y los plazos. En primer lugar, variaremos los plazos; retrasamos los objetivos de Kyoto 5, 10 y 15 años. Y en segundo lugar, modificaremos los objetivos; reducimos las emisiones hasta los niveles de Kyoto (un 15% por encima de 1990), un 10% por encima, un 5% o, finalmente, en los mismos niveles de 1990. Los resultados se recogen en la tabla 3.

TABLA 3
Análisis de sensibilidad, variaciones PIB
(porcentajes)

	2010	2020	2030	2040	2050
Plazo de cumplimiento del Protocolo de Kyoto					
2010	-0.06	-0.20	-0.44	-0.79	-1.27
2015	-0.05	-0.18	-0.42	-0.79	-1.27
2020	-0.04	-0.11	-0.40	-0.78	-1.26
2025	-0.03	-0.08	-0.34	-0.75	-1.25
Objetivos reducción de emisiones					
Niveles 1990+15%	-0.06	-0.20	-0.44	-0.79	-1.27
Niveles 1990+10%	-0.07	-0.21	-0.45	-0.96	-1.53
Niveles 1990+5%	-0.07	-0.22	-0.47	-1.17	-1.83
Niveles 1990	-0.07	-0.22	-0.48	-1.41	-2.19

Los resultados para los diferentes plazos muestran que, aunque los impactos económicos disminuyen a medida que retrasamos los plazos, el efecto es muy

poco significativo. Los resultados sobre los cambios en los objetivos muestran, sin embargo, que estas variaciones sí son importantes y que los costos aumentan más que proporcionalmente.

Encontrar la senda óptima de reducción de emisiones requiere analizar los costos y los beneficios globales asociados a dichas reducciones, pero en lo que respecta al impacto económico regional podemos extraer una conclusión: que la elección de plazos es poco significativa en comparación con la elección de objetivos.

CONCLUSIONES

Aunque los costos de mitigación de GEIS estarán muy influenciados en el futuro por parámetros de carácter tecnológico y económico, existen variables de carácter político que tienen una gran importancia y que es preciso investigar. Este artículo se centra concretamente en analizar el efecto de la elección de los objetivos de mitigación (*targeting*) y el efecto de la elección de los plazos (*timing*) sobre los costos de mitigación. Para ello analiza el caso concreto de España y utiliza un MEGA dinámico tipo Ramsey.

Para ello, este trabajo analiza los siguientes tres escenarios que se extienden hasta 2050: 1) *Kyoto Forever*, reducir las emisiones acordes con el objetivo de Kyoto y en el plazo fijado (2008-12) y estabilizar hasta 2050; 2) *Kyoto+10*, retrasar 10 años el cumplimiento de los objetivos de Kyoto y estabilizar después las emisiones, y 3) *Kyoto 2°C*, endurecer a partir de 2030 la reducción de emisiones compatible con la estabilización de la temperatura global en 2°C (~450-550 ppm).

Para situar los resultados en perspectiva es necesario conocer algunas características y limitaciones del modelo. En primer lugar, suponemos agentes racionales con expectativas perfectas y mercados competitivos en equilibrio. En segundo lugar, los costos de transacción de la política a la nueva situación no son tenidos en cuenta en el análisis. Estos costos son difíciles de medir (McCann *et al.* 2005) y hemos optado por considerar los factores perfectamente móviles entre sectores. En tercer lugar, hemos supuesto que la mitigación de GEIS en España es unilateral y no se ha considerado la existencia de mecanismos de flexibilidad que permiten reducir emisiones en

otros países y contabilizarlas como propias. Una modelización más realista en las dos primeras cuestiones supondría elevar los costos de mitigación estimados, mientras que en la tercera supondría reducirlos. Por otro lado, la tecnología considerada en el modelo es exógena. Una especificación endógena sería más satisfactoria (Löschel 2002), y ésta es de hecho una de las líneas futuras de investigación.

A continuación destacamos algunas conclusiones extraídas a lo largo de este estudio. La primera es que una política destinada a reducir las emisiones de GEIS tendrá que asumir ciertos costos. Sin embargo, la sustitución de combustibles y otros insumos, las medidas de “final de tubería”, los cambios en los patrones de consumo o las mejoras tecnológicas podrían mantener estos costos dentro de unos límites razonables. La segunda es que las políticas de CC inducen un desacople relativo entre PIB y consumo energético, y un cambio del mix energético hacia combustibles menos intensivos en emisiones. En tercer lugar, observamos que los resultados a nivel sectorial son diversos, con algunos perdedores (Energético, Industrias intensivas en energía y materiales y Transportes) y también con ganadores (Transporte marítimo y sector Servicios). Por último, retrasar el cumplimiento de Kyoto 10 años (escenario Kyoto+10), influye sólo momentáneamente en los costos, ya que éstos acabarán convergiendo en el largo plazo. Por el contrario, reducir los GEIS a los niveles 1990 (escenario Kyoto 2°C) sí aumentaría los costos considerablemente. El análisis de sensibilidad nos muestra que el impacto de los plazos es poco significativo frente a la elección de los objetivos.

Actuar más tarde frente al CC permitiría esperar a que la tecnología mejore. Esta podría ser una buena opción si tuviéramos la certeza de que la tecnología va a mejorar sustancialmente en el corto-medio plazo y que dichas externalidades no van a crear irreversibilidades en la evolución del clima (Stern 2008). Por el contrario, si la tecnología siguiese la tendencia actual, sería mejor opción actuar antes que después, ya que los costos en el largo plazo apenas varían, reduciríamos el riesgo y la incertidumbre asociados a la evolución del clima y pondríamos en marcha incentivos para que las nuevas tecnologías se desarrollen realmente.

Actuar más energícamente contra el CC tiene la desventaja de hacer que los costos aumenten más que proporcionalmente a medida que estas

reducciones son más intensas. Sin embargo, si en el largo plazo se diera un cambio tecnológico importante, las medidas más estrictas necesarias para limitar el aumento de la temperatura en 2°C podrían incluso ser compatibles con un crecimiento económico sostenido.

REFERENCIAS

- Alcántara, V. y E. Padilla, “Key sectors in final energy consumption: an input-output application to the Spanish case”, *Energy Policy* vol. 31, núm. 15, 2003, pp. 1673-1678.
- Armington, P., “*A theory of demand for products distinguished by place of production*”, International Monetary Fund (IMF) Staff Papers no. 16, 1969, pp. 158-178.
- Babiker, M.B.; J.M. Reilly; M. Maller; R.S. Eckaus; I.S. Wing y R.C. Hyman, “*The MIT emissions prediction and policy analysis (EPPA) model: revisions, sensitivities, and comparisons of results*”, The MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Joint Program Report Series no. 71, febrero de 2001.
- Bye, B., “Environmental tax reform and producer foresight: An intertemporal computable general equilibrium analysis”, *Journal of Policy Modeling*, vol. 22, núm. 6, 2000, pp. 719-752.
- Chesnay, P. y J.P. Weyant, “Multi-greenhouse gas mitigation and climate policy”, en P. Chesnay y J.P. Weyant (eds.), *The Energy Journal*, Special issue, 2006.
- Comisión Europea (COM), “Limiting global climate change to 2 degrees Celsius: the way ahead for 2020 and beyond”, Comunicación de la Comisión al Consejo y al Parlamento Europeo, Bruselas, 2007.
- , “Europe’s climate change opportunity: 20-20 by 2020”, Comunicación de la Comisión Europea, Bruselas, 2008.
- Dellink, R.B., *Modelling the costs of environmental policy: a dynamic applied general equilibrium assessment*, Cheltenham, Edward Elgar Publishing, 2005.
- Dirkse, S.P. y M.C. Ferris, “The PATH solver: A non-monotone stabilization scheme for mixed complementarity problems”, *Optimization Methods and Software*, vol. 5, 1995, pp. 123-156.
- Ellerman, A. y A. Deceaux, “Analysis of Post-Kyoto CO₂ emissions trading using marginal abatement curves”, The MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Joint Program Report Series no. 40, octubre de 1998.
- Statistical Office of the European Commission (Eurostat), *Energy and Environment Statistics*, Luxemburgo, Eurostat, 2005.

- International Energy Agency (IEA), *World Energy Outlook 2008*, Paris, IEA, 2009.
- Frankel, J., “An elaborated proposal for global climate policy architecture: specific formulas and emission targets for all countries in all decades”, Harvard Project on International Climate Agreements, 2008.
- Gómez-Plana, A., “Política medioambiental y sustitución tecnológica entre inputs”, *Hacienda Pública Española*, núm. 181, 2007, pp. 9-28.
- Gómez-Plana, A.; S. Kverndokk y T. Faehn, “Can a carbon permit system reduce Spanish unemployment?”, *Energy Economics*, vol. 31, núm. 4, 2009, pp. 595-604.
- González-Eguino, M., “Impacto económico del control del cambio climático en España”, Fundación de las Cajas de Ahorro (FUNCAS), Estudios de la Fundación, Serie Tesis, 2007.
- Hyman, R.C.; J.M. Reilly, M.B. Babiker, A. de Másin y H.D. Jacoby, “Modeling non-CO₂ greenhouse gas abatement”, *Environmental Modeling and Assessment*, vol. 8, 2003, pp. 175-186.
- Instituto Nacional de Estadística (INE), *Estadísticas de Medio Ambiente*, Cuentas Ambientales, Madrid, INE, 2002,
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Climate Change 2007: Synthesis Report”, IPCC, 2007.
- Labandeira, X. y M. Rodríguez, “The effects of a sudden CO₂ reduction in Spain”, en C. de Miguel, X. Labandeira y B. Manzano (eds.), *Economic Modelling of Climate Change and Energy Policies*, Cheltenham, Edward Elgar, 2006.
- Lau, M.; A. Pahlke y T. Rutherford, “Approximating infinite-horizon models in a complementarity format: A primer in dynamic general equilibrium analysis”, *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 26, 2002, pp. 577-609.
- Löschel, A., “Technological change in economic models of environmental policy: a survey”, *Ecological Economics*, vol. 43, núm. 2, 2002, pp. 105-126.
- McCann, L.; B. Colby; K.W. Easter; A. Kasterine y K.V. Kuperan, “Transaction cost measurement for evaluating environmental policies”, *Ecological Economics*, vol. 52, núm. 4, 2005, pp. 527-542.
- Nordhaus, W.D., “Rolling the ‘DICE’: an optimal transition path for controlling greenhouse gases”, *Resource and Energy Economics*, vol. 15, 1993, pp. 27-50.
- Ocaña, C., “Impacto del Protocolo de Kyoto sobre la economía española”, *Revista Interdisciplinar de Gestión Ambiental*, vol. 63, 2004, pp. 12-26.
- Reilly, J.; M. Mayer y J. Harnisch, “Multiple Gas Control Under the Kyoto Agreement”, *Environmental Modeling and Assessment*, vol. 7, 2002, pp. 217-229.
- Shoven, J. y J. Whalley, *Applying General Equilibrium*, Cambridge, Cambridge University Press, 1992.

- Springer, U., "The Market for tradable GHG permits under the Kyoto Protocol: a survey of model studies", *Energy Economics*, vol. 25, núm. 5 2003, pp. 527-551.
- Stern, N., "The Economics of Climate Change", *American Economic Review*, vol. 98, núm. 2, 2008, pp. 1-37.
- Tarancón, M.A. y P. del Río González, "A combined input-output and sensitivity analysis approach to analyse sector linkages and CO₂ emissions", *Energy Economics*, vol. 29, núm. 3, 2007, pp. 578-597.
- Weyant, P., "The costs of the Kyoto Protocol: a multi-model evaluation", en P. Chesnay y P. Weyant (eds.), *The Energy Journal*, Special Issue, 1999.

APÉNDICES

Índices

Nombre	Entradas	Descripción
j, jj	$1, \dots, J$	Sectores / Bienes y servicios
t	$1, \dots, T$	Periodos
e	Carbón, Petróleo, Gas	Combustibles fósiles

Parámetros

Nombre	Descripción
g	Tasa de crecimiento de la oferta efectiva de trabajo
δ	Tasa de depreciación del capital
τ_j^L	Tasa impositiva en el trabajo en el sector j
τ_j^P	Tasas impositiva en la producción en el sector j
τ_j^C	Tasa impositiva en el consumo en el bien j
T_t	Transferencias entre consumidores y gobierno en el periodo t
α_e	Coefficientes de emisión de combustión para los productores en el combustible e
γ_e	Coefficientes de emisión de combustión para los consumidores en el combustible e
x_j	Coefficientes de emisión de proceso para el sector j
Z	Coefficientes de emisión de proceso para el consumidor representativo
ϕ_t^C	Progreso tecnológico en emisiones de combustión en el periodo t
ϕ_t^P	Progreso tecnológico en emisiones de proceso en el periodo t

Variables endógenas

<i>Nombre</i>	<i>Descripción</i>
$Y_{j,t}$	Producción del sector j en el periodo t
$Y_{j,t}^A$	Producción del sector j en el periodo t antes del abatimiento en las emisiones de proceso
$Y_{j,j,t}^{ID}$	Demanda intermedia del insumo jj en el sector j y en el periodo t
$Y_{j,t}^D$	Demanda interna del bien j en el periodo t
$Y_{j,t}^{TS}$	Oferta total del bien j en el periodo t
$Y_{j,t}^{TD}$	Demanda total del bien j en el periodo t
$M_{j,t}$	Importaciones del bien j en el periodo t
$X_{j,t}$	Exportaciones del bien j en el periodo t
$K_{j,t}$	Demanda de capital del sector j en el periodo t
$L_{j,t}$	Demanda de trabajo del sector j en el periodo t
U	Utilidad total consumidores
U_t	Utilidad consumidores en el periodo t
$C_{j,t}$	Consumo privado del bien j en el periodo t
$G_{j,t}$	Consumo público del bien j en el periodo t
S_t	Ahorro en el periodo t
$I_{j,t}$	Inversión en el sector j en el periodo t
K_t	Demanda de capital en el periodo t
$P_{j,t}$	Precio de equilibrio del bien j en el periodo t
$P_{k,t}$	Precio de equilibrio del capital en el periodo t
$P_{L,t}$	Precio de equilibrio del salario en el periodo t
$P_{E,t}$	Precio de equilibrio de los permisos de emisión en el periodo t
$P_{X,t}$	Tasa de intercambio o precio de equilibrio en el comercio internacional en el periodo t
$P_{I,t}$	Precio de equilibrio de la inversión en el periodo t
$E_{j,t}^P$	Emisiones productores en el periodo t
E_t^C	Emisiones consumidores en el periodo t

Variables exógenas

<i>Nombre</i>	<i>Descripción</i>
\overline{XD}_t	Déficit de comercio en el periodo t
\overline{G}_t	Consumo público total en el periodo t
\overline{K}_0	Oferta de capital en el periodo inicial
\overline{L}_t	Oferta de trabajo en el periodo t
\overline{E}_t	Emisiones totales o permisos de emisión totales

TABLA A1
Matriz de Contabilidad Social Energética para España
(Millones de euros)

	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7
Y1	26 758	0	0	0	-19 243	-579	-291
Y2	0	1 542	0	-3	-2	0	-1
Y3	0	0	130	0	0	0	0
Y4	0	0	0	1 782	0	-5	0
Y5	-4 671	0	0	0	46 260	-415	-37
Y6	-70	-2	-1	0	-162	12 554	-70
Y7	-149	-31	0	-14	-1 409	-248	13 858
Y8	-387	-6	-4	-4	-175	-37	-92
Y9	-1 504	-55	-4	-116	-1 897	-1 681	-807
Y10	-582	0	0	-74	-747	-159	-360
Y11	-229	-47	-4	-92	-142	-298	-486
Y12	-113	-9	0	-25	-678	-16	-81
Y13	-323	-4	-2	-43	-406	-217	-301
Y14	-2	-7	-2	-4	-83	-49	-97
Y15	-341	0	0	-10	-140	-31	-17
Y16	-124	-16	0	-25	-83	-44	-124
Y17	-542	-40	-1	-159	-2 058	-396	-846
Y18	-13	-2	-1	-1	-72	-23	-22
Y19	-4	-2	0	-2	-83	-34	0
Y20	-396	-35	0	-9	-826	-236	-472
Y21	0	-63	0	-168	-4 678	-1 816	-2 254
Y22	0	-3	0	0	-24	-72	-56
K	-15 519	-419	-99	-584	-6 114	-1 669	-2 882
L	-2 284	-571	-6	-322	-6 643	-3 562	-3 486
TaxK	850	11	-4	-25	946	-94	-78
TaxL	-355	-241	-2	-102	-1 541	-873	-998
TaxC	0	0	0	0	0	0	0
Taxls	0	0	0	0	0	0	0
Ahorro	0	0	0	0	0	0	0
Deficit	0	0	0	0	0	0	0
Total	0	0	0	0	0	0	0

Y8	Y9	Y10	Y11	Y12	Y13	Y14
0	-145	-3	0	0	0	0
-4	-24	-132	-4	-47	-780	0
-4 773	0	0	0	0	0	-67
0	0	-837	0	-976	0	0
0	-206	0	0	0	0	0
0	-404	-100	0	-689	0	0
-28	-1 040	-255	-358	-1 401	0	0
7 563	-477	-390	-62	-1 756	-179	-22
0	21 065	-1 374	-1 072	-3 808	0	0
-65	-628	22 913	-5 187	-6 320	-339	0
-101	-1 023	-1 791	31 104	-2 583	0	0
-9	-215	-656	-273	48 981	0	-1
-174	-588	-660	-413	-794	11 335	-15
-26	-250	-155	-49	-277	-239	861
0	-65	-45	0	0	0	-1
-44	-109	-161	-119	0	0	0
0	-1 030	-1 228	-465	-1 919	0	0
-6	-48	-42	-28	-55	0	0
0	-133	-71	-130	0	0	-1
-121	-557	-744	-532	-710	0	0
-113	-3 672	-2 927	-2 806	-4 459	-681	0
-68	0	-108	-321	-513	0	0
-1 494	-3 719	-3 635	-2 873	-5 881	-7 871	-671
-295	-4 634	-6 258	-14 583	-14 003	-1 134	-60
-119	-598	-15	-210	-297	227	-7
-123	-1 500	-1 326	-1 619	-2 493	-339	-16
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

TABLA A1, continuación...

	Y15	Y16	Y17	Y18	Y19	Y20	Y21
Y1	-1	-182	0	-4	0	0	-1 159
Y2	0	-3	0	0	0	0	-4
Y3	0	-1	-85	0	0	-5	0
Y4	0	-575	0	0	0	0	-8
Y5	0	0	0	-29	0	0	-13 439
Y6	-8	-51	-9	-9	-17	-23	-653
Y7	-28	-1 562	-43	-3	-17	-305	-3 573
Y8	-11	-92	-353	-96	-122	-30	-152
Y9	-104	-1 972	-62	-7	-1	-248	-1 677
Y10	-46	-5 330	-21	0	-3	-131	-408
Y11	-63	-2 945	-77	-3	-9	-242	-1 370
Y12	-22	-9 275	-701	-117	-57	-248	-3 083
Y13	-199	-218	-261	-4	-5	-174	-1 583
Y14	-1	-1	-3	-1	-1	-3	-34
Y15	2 457	-14	-8	0	0	-10	-469
Y16	-82	100 059	-152	-8	-14	-108	-8 408
Y17	-10	-1 438	21 818	-16	-53	-882	-2 567
Y18	-8	-17	-19	1 583	-1	-17	-103
Y19	-4	-96	-5	0	3 320	-350	-619
Y20	-50	-546	-1 160	-417	-923	20 395	-5 092
Y21	-247	-8 794	-2 988	-101	-417	-2 049	219 791
Y22	-20	-165	-39	0	-6	-235	-790
K	-617	-11 181	-7 909	-78	-469	-8 494	-87 231
L	-764	-50 667	-5 348	-571	-930	-4 992	-68 851
TaxK	2	-1 132	-1 085	-2	-6	-231	-6 109
TaxL	-174	-3 802	-1 490	-117	-269	-1 618	-12 409
TaxC	0	0	0	0	0	0	0
Taxls	0	0	0	0	0	0	0
Ahorro	0	0	0	0	0	0	0
Deficit	0	0	0	0	0	0	0
Total	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia con base en INE (2002).

Y22	M	X	C	G	I	Total
-142	5 563	-5 973	-4 358	0	-241	0
-5	213	-706	-40	0	0	0
0	4 809	-8	0	0	0	0
-15	971	-319	-18	0	0	0
-456	6 481	-6 050	-27 438	0	0	0
-386	4 694	-4 781	-9 684	0	-129	0
-1 107	4 056	-2 877	-3 415	0	-51	0
-53	1 715	-1 787	-2 991	0	0	0
-2 466	13 493	-10 081	-2 935	-2 612	-75	0
-175	7 611	-6 739	-41	0	-3 169	0
-1 832	19 000	-11 811	-3 744	-69	-21 143	0
-941	16 584	-25 791	-10 236	-23	-12 995	0
-771	130	-23	-4 287	0	0	0
-19	855	0	-413	0	0	0
-210	0	0	-1 096	0	0	0
-1 353	1	-11	-8 186	0	-80 889	0
-489	189	-2 001	-5 394	-206	-267	0
-32	21	-926	-139	-14	-15	0
-180	998	-1 863	-646	-95	0	0
-1 314	1 502	-1 934	-5 752	-71	0	0
-6 429	7 128	-11 010	-145 537	-4 117	-21 593	0
91 005	109	-126	-13 888	-74 680	0	0
-12 501	0	0	181 910	0	0	0
-44 308	0	0	234 272	0	0	0
-2 783	0	0	0	10 759	0	0
-13 038	0	0	0	44 445	0	0
0	0	0	-23 123	23 123	0	0
0	0	0	-3 560	3 560	0	0
0	0	0	-140 567	0	140 567	0
0	-96 123	94 817	1306	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

TABLA A2
Producción, consumo y emisiones en España

	Códigos Tabla Insumo-Producto	Producción	
	<i>Simétrica 1995 (ríos)</i>	<i>(M€)</i>	<i>(%)</i>
1 Agricultura, ganadería y pesca	1-3	26 758	(3.8)
2 Extracción carbón	4	1 542	(0.2)
3 Extracción crudo y gas	5	130	(0.0)
4 Extracción otros minerales	6-7	1 782	(0.3)
5 Industria alimentación	12-16	46 260	(6.5)
6 Industria textil	17-19	12 554	(1.8)
7 Industria madera y papel	20-22	13 858	(2.0)
8 Industria refino petróleo	8	7 563	(1.1)
9 Industria química	23-24	21 065	(3.0)
10 Industria metálica	29-30	22 913	(3.2)
11 Industria maquinaria	31-35	31 104	(4.4)
12 Otras industrias	25-28, 36-38	48 981	(6.9)
13 Electricidad	9	11 335	(1.6)
14 Gas natural	10	861	(0.1)
15 Distribución agua	11	2 457	(0.3)
16 Construcción	40	100 059	(14.1)
17 Transporte terrestre	45-46	21 818	(3.1)
18 Transporte marítimo	47	1 583	(0.2)
19 Transporte aéreo	48	3 320	(0.5)
20 Anexos del Transporte	49-50	20 395	(2.9)
21 Servicios comerciales	41-44, 51-56, 58, 62-63, 68-71	219 791	(31.1)
22 Servicios no comerciales	39,57, 59-61, 64-67	91 005	(12.9)
— Hogares	—	—	—
Total		707 134	(100)

Nota: 1/ Kilotoneladas CO₂ equivalente.

Fuente: elaboración propia con base en (INE 2002).

Consumo final		Emisiones CO ₂		Resto emisiones		Emisiones totales	
(M€)	(%)	(KtCO ₂ eq) ^{1/}	(%)	(KtCO ₂ eq)	(%)	(KtCO ₂ eq)	(%)
4 358	(1.7)	12 727	(5.5)	47 817	(51.4)	60 544	(18.6)
40	(0.0)	315	(0.1)	1 103	(1.2)	1 418	(0.4)
0	(0.0)	165	(0.1)	15	(0.0)	180	(0.1)
18	(0.0)	364	(0.2)	18	(0.0)	381	(0.1)
27 438	(11.0)	5 602	(2.4)	416	(0.4)	6 018	(1.9)
9 684	(3.9)	1 683	(0.7)	565	(0.6)	2 248	(0.7)
3 415	(1.4)	3 828	(1.6)	845	(0.9)	4 673	(1.4)
2 991	(1.2)	655	(0.3)	10 460	(11.2)	11 114	(3.4)
2 935	(1.2)	16 089	(6.9)	3 792	(4.1)	19 880	(6.1)
41	(0.0)	19 104	(8.2)	4 353	(4.7)	23 457	(7.2)
3 744	(1.5)	2 494	(1.1)	622	(0.7)	3 116	(1.0)
10 236	(4.1)	48 487	(20.9)	392	(0.4)	48 879	(15.0)
4 287	(1.7)	52 732	(22.7)	7 787	(8.4)	60 519	(18.6)
413	(0.2)	722	(0.3)	557	(0.6)	1 279	(0.4)
1 096	(0.4)	378	(0.2)	111	(0.1)	488	(0.2)
8 186	(3.3)	3 199	(1.4)	500	(0.5)	3 699	(1.1)
5 394	(2.2)	14 079	(6.1)	6	(0.0)	14 085	(4.3)
139	(0.1)	716	(0.3)	85	(0.1)	801	(0.2)
646	(0.3)	4 019	(1.7)	73	(0.1)	4 092	(1.3)
5 752	(2.3)	1 035	(0.4)	61	(0.1)	1 096	(0.3)
145 537	(58.2)	5 780	(2.5)	1 758	(1.9)	7 538	(2.3)
13 888	(5.5)	2 334	(1.0)	7 462	(8.0)	9 796	(3.0)
—	—	35 678	(15.4)	4 254	(4.6)	39 932	(12.3)
250 238	(100)	232 181	(100)	93 053	(100)	325 234	(100)

TABLA A3
***Elasticidades de sustitución producción,
 utilidad y comercio internacional***

σ^Y	Elasticidad de sustitución entre Insumos materiales y Energía-capital-trabajo	0
σ^{KEL}	Elasticidad de sustitución entre Energía y capital-trabajo	0.5
σ^{KL}	Elasticidad de sustitución entre capital-trabajo	1
σ^E	Elasticidad de sustitución entre Electricidad y Combustibles fósiles	0.5
σ^{E1}	Elasticidad de sustitución entre Carbón, Petróleo y Gas natural	1
σ^A	Elasticidad de sustitución entre bienes internos e importados	3
σ^T	Elasticidad de transformación entre bienes internos y exportaciones	2
σ^U	Elasticidad de sustitución entre utilidad intertemporal	0.5
σ^C	Elasticidad de sustitución entre consumo de bienes energéticos y no energéticos	0.5
σ^F	Elasticidad de sustitución en el consumo entre bienes energéticos	1
σ^G	Elasticidad de sustitución en el consumo entre bienes no energéticos	1
σ^B	Elasticidad de sustitución entre producción y emisiones de proceso	0.08

Fuente: Babiker *et al.* (2001).

TABLA A4
***Coefficientes estándares de CO₂ y uso de combustibles
 fósiles para combustión***

	<i>Carbón</i>	<i>Petróleo</i>	<i>Gas</i>
KtCO ₂ eq	4 104	2 851	2 187
Industria Química	69%	65%	38%
Industria (en general)	–	75%	–

Fuente: Eurostat (2005).