

# LOS COSTES DE MITIGAR EL CAMBIO CLIMÁTICO: UN ANÁLISIS DINÁMICO DE EQUILIBRIO GENERAL APLICADO\*

MIKEL GONZÁLEZ-EGUINO

*Basque Centre for Climate Change (BC3)*

*Universidad del País Vasco*

Este trabajo estudia el impacto económico de la mitigación de gases de efecto invernadero en España. Para ello, utiliza un modelo de equilibrio general dinámico aplicado que permite capturar las principales interacciones existentes entre las variables económicas, energéticas y ambientales. El artículo analiza los efectos de una reducción y posterior estabilización de las emisiones acorde con los objetivos del Protocolo de Kyoto. Para ello estudia la evolución de las principales variables macroeconómicas y sectoriales, así como la variación del *mix* energético y del precio de los permisos de emisión. Los resultados muestran que los costes de cumplir Kyoto en el largo plazo, aunque no son comparables a ninguna otra política ambiental, pueden ser limitados si se induce un cambio hacia una economía menos intensiva en carbono, a través de mejoras en la eficiencia energética, cambios en el *mix* energético y en los patrones de producción-consumo, y, por último, y de manera fundamental, mediante la innovación tecnológica.

*Palabras clave:* cambio climático, modelos de equilibrio general aplicados, España.

*Clasificación JEL:* D58, H21, Q48.

**E**l Protocolo de Kyoto (UN 1997) es el primer acuerdo internacional para reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEIs) y limitar los riesgos de un cambio climático. Su objetivo es alcanzar una reducción de las emisiones conjuntas de los principales países desarrollados de un 5,2% (respecto de los niveles de 1990) para el periodo 2008-2012. A medida que los plazos de cumplimiento se acercan y una nueva negociación para el periodo post-Kyoto<sup>1</sup> se abre, resulta relevante conocer cuáles serán los impactos económicos para los diferentes países.

---

(\*) Una versión de este trabajo ha sido publicada previamente como papel de trabajo n.º 442 de la Colección de Documentos de Trabajo de la Fundación de las Cajas de Ahorros (FUNCAS).

(1) El 30 de noviembre de 2009 tuvo lugar en Copenhague (Dinamarca) la Conferencia de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP-15) cuyo objetivo es alcanzar a un acuerdo mundial para el período post-Kyoto a partir de 2012. La UE ya se ha impuesto el objetivo de reducir sus emisiones un 20% para 2020 (COM 2008) y podría elevarlo a un 30% dependiendo de los avances de dichas negociaciones.

Aunque a nivel global reducir las emisiones de GEIs sea rentable a largo plazo, transitar hacia una economía baja en carbono supone para la mayoría de países un coste en el corto-medio plazo comparado con la opción de emitir GEIs sin restricción (Stern, 2006). Los estudios sobre los impactos económicos de la reducción de GEIs comenzaron a desarrollarse en la década de los 90 y han sido aplicados a nivel global (Nordhaus, 1993), por países y regiones (Weyant, 1999), y mediante la utilización de diversos tipos de modelos (Springer, 2003). Existe abundante evidencia científica (IPCC, 2007) que muestra potencial “económico”<sup>2</sup> suficiente para estabilizar las emisiones globales con un coste que oscilarían entre los 20-50 dólares por tonelada evitada (US\$/tCO<sub>2</sub>-eq). Sin embargo, una reducción de las emisiones más estricta, y consistente con el objetivo de estabilización climática en torno a los 2°C, supondrá un coste mayor y seguramente superior a los 80-100 US\$ por tonelada evitada (véase IPPC, 2007). Los estudios muestran que no existe una única tecnología o sector que pueda proporcionar toda la mitigación necesaria, y también que los costes dependerán mucho de las particularidades de cada país.

En el caso concreto de España los costes de mitigación estarán condicionados por la notable distancia que le separa de los objetivos de Kyoto. España podía aumentar sus emisiones hasta un 15% (respecto a 1990) para 2008-2012, pero en el año 2008 las emisiones habían alcanzado ya un 42%, debido principalmente al rápido crecimiento demográfico y económico y a una falta de contención en sectores claves como el transporte, donde el consumo de petróleo casi se ha duplicado en 20 años. Aunque la crisis económica ha frenado sensiblemente esta aceleración, la distancia de los objetivos supone un mayor esfuerzo y unos mayores costes iniciales de cumplimiento.

Ocaña (2004) realizó una de las primeras aproximaciones sobre los costes de mitigación de GEIs en España. Este estudio, y otros similares, calculan los costes de mitigación a través del déficit entre las emisiones futuras estimadas y los permisos de emisión otorgados a los sectores incluidos en el mercado de CO<sub>2</sub> europeo o EU-ETS<sup>3</sup>. Para un precio estimado de 10-20 €/tonelada el coste para España de cumplir Kyoto se situaría entre 150 y 300 millones de euros. La principal limitación de este tipo de estudios es que únicamente consideran los costes de los sectores incluidos en el EU-ETS (el 50% de las emisiones de GEIs) y que además no tienen en cuenta los impactos indirectos que se generan.

Para incorporar los efectos directos e indirectos de estas políticas algunos autores han optado por aplicar metodologías input-output (Alcántara y Roca, 1995; Labandeira y Labeaga, 2002; Alcántara y Padilla, 2003; Tarancón y del Río, 2007).

---

(2) 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.

(3) EU-ETS o Sistema de Mercado de Emisiones de la Unión Europea. En funcionamiento desde 2005, comprende el sector Cemento, Refino, Vidrio y cerámica, Metalurgia, Papel y Eléctrico. Mediante 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 del 100% en 2013 y en 2020 para los sectores industriales.

Estos estudios son muy útiles para analizar los efectos en el corto plazo cuando las posibilidades de sustitución de factores no son relevantes. La aplicación de Modelos de Equilibrio General Aplicados o MEGAs en el cálculo de los costes de mitigación es más reciente en España y tiene la ventaja de incorporar los impactos directos e indirectos, los precios de forma endógena y las posibilidades de sustitución entre inputs. En base a esta metodología, Labandeira y Rodríguez (2006) estiman que en el corto plazo con cada reducción de un 2% en las emisiones el PIB se contraería un 0,2%. Algunos trabajos como Manresa y Sancho (2004) o Faehn *et al.* (2009), también han estudiado este tipo de impactos mediante MEGAs e incorporando impuestos sobre el CO<sub>2</sub> asociados a una reforma fiscal ambiental.

La mayoría de los estudios con MEGAs en España se han centrado en analizar los costes de mitigación en un contexto estático y de corto plazo. Una excepción es Gómez (2007) que utiliza un MEGA dinámico para analizar el efecto de combinar la reducción de emisiones y distintas formas funcionales o tecnologías. Este artículo avanza en el análisis de los costes de mitigación en España en el largo plazo (escenario *Kyoto 2050*) mediante un MEGA dinámico. Otra de las particularidades de este análisis es que incorpora todos los GEIs además del CO<sub>2</sub>.

El artículo se ordena de la siguiente manera: en el apartado 1 se presenta el modelo, en el apartado 2 se recogen los datos y la calibración realizada, y en el apartado 3 se detallan los escenarios a analizar. A continuación, en el apartado 4, se estudian los resultados obtenidos y, en el apartado 5 se desarrolla un análisis exhaustivo de sensibilidad. Por último, en el apartado 6, se recogen las limitaciones del análisis, las principales conclusiones y las futuras líneas de trabajo.

## 1. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO

En este apartado se presentan las características del Modelo de Equilibrio General Aplicado o MEGA utilizado. Los MEGAs son versiones empíricas de un modelo walrasiano y recogen las interdependencias entre los diversos agentes económicos. Este tipo de modelos permiten capturar el flujo circular de la renta y son útiles para analizar políticas que, como la mitigación de emisiones de GEIs, tiene impactos directos e indirectos significativos. La simulación de políticas en el largo plazo requiere el uso de modelos dinámicos. En este caso, utilizaremos un modelo tipo Ramsey (Barro y Sala-i-Martin, 1995). Una introducción sobre MEGAs puede encontrarse en Shoven y Whalley (1992) o Ginsburgh y Keyzer (1997).

El modelo se compone de: 1) 22 sectores productivos, 2) un consumidor representativo, 3) un gobierno, que recauda impuestos, provee bienes y servicios públicos y controla las emisiones de GEIs a través de permisos de emisión y, por último, 4) el agregado Resto del Mundo, que agrupa a todo el sector exterior. La desagregación de los sectores comprende sectores energéticos (carbón, petróleo, gas y electricidad), sectores relevantes por sus emisiones (agricultura, transporte e industria) y sectores relevantes por su peso económico (servicios privados y públicos).

Las emisiones de GEIs consideradas son las sujetas a control por el Protocolo de Kyoto: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), monóxido de nitrógeno (N<sub>2</sub>O) y gases fluorados (SF<sub>6</sub>, HFC, PFC). Estas se agrupan en dos bloques: a) emisiones de combustión, que proceden directamente de la quema de combustibles fósiles y b) emisiones de proceso, que se originan en el proceso productivo.

### 1.1. Productores

Cada sector productivo,  $j = 1, \dots, J$ , produce un bien homogéneo con una tecnología caracterizada mediante funciones CES anidadas. La producción de cada sector ( $Y_{j,t}^A$ ) en cada momento  $t$  se obtiene combinando inputs 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 sección 1.6). La ecuación 1 (véase apéndice) recoge de forma simplificada la función de producción y el gráfico 1 representa su estructura gráfica<sup>4</sup>. Los parámetros  $\sigma$  representan las elasticidades de sustitución entre los diferentes inputs.

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

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 output de cada sector será igual al valor de todos los inputs utilizados. Esta condición se recoge en la ecuación 2, donde  $P_{j,t}$  es el precio del output 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,  $\tau_j^P$  y  $\tau_j^L$  son los tipos impositivos *ad valorem* sectoriales sobre el capital y el trabajo.

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

### 1.2. 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 (véase ecuación 3 y gráfico 2). La utilidad total ( $U$ ) es la agregación de las utilidades intertemporales ( $U_t$ ), siendo la elasticidad de sustitución intertemporal ( $\sigma^U$ ) el parámetro que modula las preferencias entre utilidad presente y futura (ecuación 4).

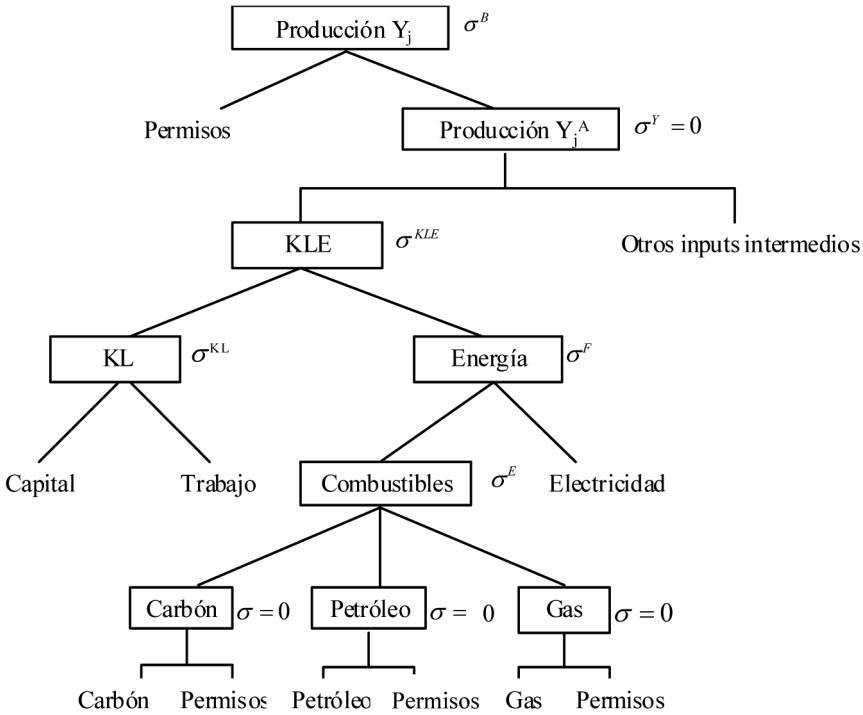
$$U_t = CES(C_{1,t}, \dots, C_{J,t}; \sigma^C, \sigma^{CE}, \sigma^{CB}), \forall t \quad [3]$$

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

El consumidor maximiza la utilidad total sujeto a una restricción presupuestaria. El ingreso en cada periodo  $t$  (véase 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 ( $C_{j,t}$ ), al pago de impuestos, a la compra de permisos

(4) 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.

Gráfico 1: ESTRUCTURA GENERAL DE LA FUNCIÓN DE PRODUCCIÓN



Fuente: MIT-EPPA (Babiker *et al.*, 2001).

Los consumidores también generan emisiones de GEIs y, a efectos del modelo, también tienen que adquirir permisos de emisión.

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

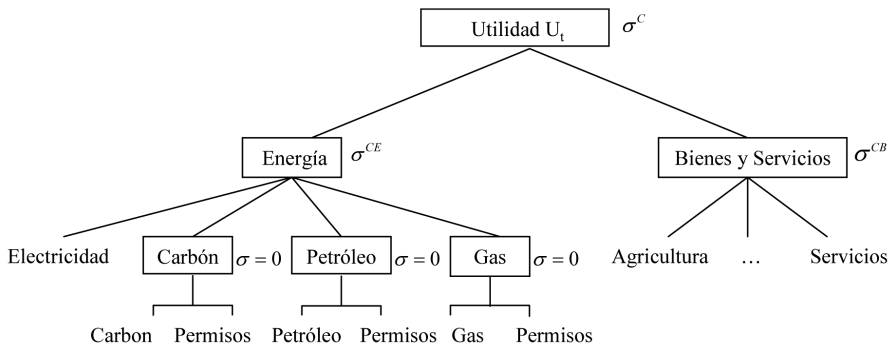
### 1.3. Gobierno

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 ( $G_t$ ) y su estructura se mantienen fijos mediante el uso de función Leontief recogida en la ecuación 6. El balance presupuestario se recoge en la ecuación 7.

$$\bar{G}_t = \text{Leontief}(G_{1,t}, \dots, G_{j,t}), \forall t \quad [6]$$

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

Gráfico 2: ESTRUCTURA DE LA FUNCIÓN DE UTILIDAD INSTANTÁNEA



Fuente: MIT-EPPA (Babiker *et al.*, 2001).

#### 1.4. 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 (véase Kehoe y Kehoe, 1994). El supuesto de economía pequeña y abierta establece que a) la economía doméstica es demasiado pequeña para influir en los precios mundiales y que b) las necesidades de importación y exportación pueden ser satisfechas mediante el comercio internacional. El supuesto Armington establece que los bienes domésticos e importados/exportados son sustitutos imperfectos (Armington, 1969). En la práctica, esto supone modelizar la oferta total ( $Y_{j,t}^{TS}$ ) como una función CES (ecuación 8), que agrega la producción doméstica ( $Y_{j,t}$ ) y las importaciones ( $M_{j,t}$ ), que es igual a la demanda total ( $Y_{j,t}^{TD}$ ), y que se modeliza mediante una función de transformación o función CET (ecuación 9) que se divide entre demanda doméstica ( $Y_{j,t}^D$ ) y exportaciones ( $X_{j,t}$ ).

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

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

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.

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

### 1.5. 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 ( $\delta$ ).

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

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

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.

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

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 ( $\varphi_t$ ) que mide las mejoras futuras en eficiencia de emisiones o GEIs, es decir, en la generación de emisiones por unidad de output. 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 ( $\varphi_t^C$ ) y proceso ( $\varphi_t^P$ ), ya que la evolución reciente y las perspectivas tecnológicas en ambos casos difieren, aunque siguen la evolución marcada por la ecuación 14.

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

### 1.6. 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 al consumo de carbón, petróleo y gas (denotado por el subíndice  $e = 3$ ) para productores ( $\alpha_e$ ) y consumidores ( $y_e$ ). 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 el parámetro de progreso tecnológico. ( $\varphi_t^C$ ,  $\varphi_t^P$ ).

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

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

La política ambiental se implementa simulando una subasta pública de permisos de emisión transferibles con una devolución de los ingresos generados mediante transferencias hacia los consumidores. La introducción de un mercado de permisos es una forma natural de simular reducciones coste-efectivas en 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 su precio comenzará a aumentar.

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<sub>2</sub>. Sin embargo, las emisiones de combustión pueden reducirse de manera inducida. Las variaciones en los precios relativos de los factores originan cambios en: i) el *mix* energético, sustituyendo combustibles fósiles más intensivos en CO<sub>2</sub> por otros menos intensivos; ii) las *funciones producción y utilidad*, sustituyendo el uso de energía por otros inputs; y iii) *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 iv) 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 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 ( $\sigma^B$ ).

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

(5) 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.



### 1.7. 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).

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

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

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

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

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

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/MPSGE y para su resolución el algoritmo PATH (Dirkse y Ferris, 1995).

## 2. CALIBRACIÓN Y DATOS

Los datos del equilibrio inicial provienen de la SAM recogida en los apéndices (véase apéndices, cuadro A1) y elaborada mediante la integración<sup>6</sup> de la información de la Tabla Input-Output Simétrica<sup>7</sup> de 1995 (INE, 2002a) y los Balances Energéticos Sectoriales para ese mismo año (Eurostat, 2005). Esto permite conocer los flujos energéticos subyacentes en la TIO y calcular las emisiones de GEIs (véase apéndices, cuadro A2). La reacción de los agentes ante los cambios o elasticidades proviene del modelo global MIT-EPPA (véase apéndices, cuadro A3). Aunque los objetivos de Kyoto estén referidos a 1990 la elección de la TIO de

(6) La integración de los datos energéticos se realiza siguiendo a Rutherford y Paltsev (2000). Esta integración consiste en introducir en la TIO unas nuevas filas de demanda de los bienes energéticos (crudo, carbón, petróleo, gas natural y electricidad) de los balances energéticos y ajustar posteriormente la TIO mediante el método de mínima entropía.

(7) La base de datos utilizada para elaborar la SAM es la TIO simétrica del INE y, por lo tanto, los datos están valorados a precios básicos. Sin embargo, el IVA, obtenido a partir de los datos de las Cuentas Nacionales, se integra dentro de la SAM detrayéndolo del Consumo Privado. Este es el citado impuesto al consumo desagradado por productos homogéneos.

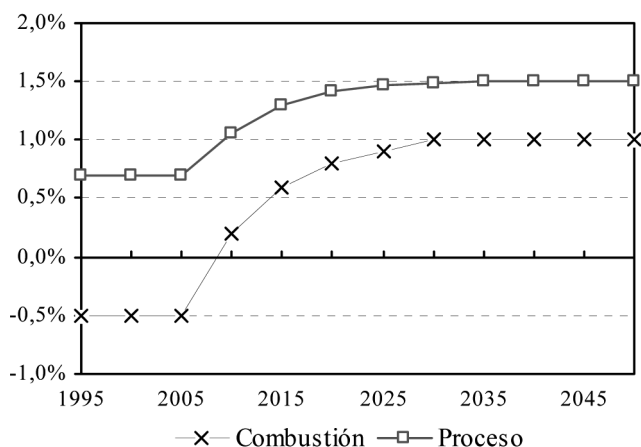
1995 permite contar con la información más actualizada disponible de la estructura económica española. Una descripción más detallada de los datos y su calibración puede encontrarse en González (2007).

Para calibrar la parte dinámica es necesario conocer la tasa de crecimiento ( $g$ ) y la tasa de depreciación del capital ( $\delta$ ). La literatura empírica (Jones, 1995) sugiere que la tasa media de crecimiento económico en el largo plazo puede considerarse suficientemente estable en el tiempo. Por lo tanto, asignaremos a  $g$  un valor de 2,5%, que se corresponde con la tasa media de crecimiento anual en España durante el periodo 1990-2005. En el caso de la depreciación del capital tomamos también el valor medio mostrado durante este periodo, un 5%.

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, aunque también se ha considerado que en algunos sectores no sólo utilizan estos inputs para la combustión (véase apéndices, cuadro A4). 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, 2002b).

La evolución de las emisiones depende del crecimiento económico y del cambio tecnológico. Este último parámetro mide la diferencia entre el crecimiento de las emisiones y el crecimiento del PIB. En el periodo 1990-2005 la tasa media anual de crecimiento de las emisiones de combustión y proceso en España fue un 3% y un 1,8 %, respectivamente, mientras que el PIB creció un 2,5%. Esto indica un desacople relativo entre PIB y emisiones de proceso (+0,7%), pero no entre PIB y emisiones de combustión (-0,5%). La literatura (Weyant, 1999; Weyant, *et al.*, 2006) suele estimar un desacople del 1,5% para emisiones de proceso y del 1% para emisiones de combustión. Supondremos que España convergerá desde los valores actuales hacia dichos valores por un proceso de difusión tecnológica siguiendo la función logística (ecuación 14) como se recoge en el gráfico 3.

Gráfico 3: PROYECCIONES DE LOS PARÁMETROS DE CAMBIO TECNOLÓGICO



Fuente: Elaboración propia.

### 3. ESCENARIOS

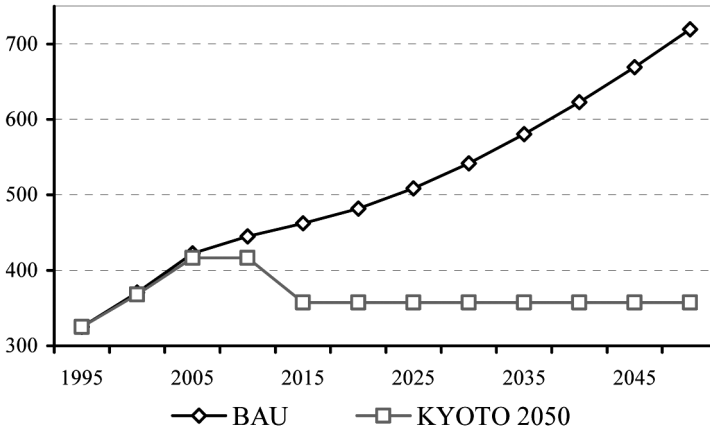
En base a las características del modelo y los datos utilizados establecemos dos escenarios de comparación:

- i. Escenario BAU o “*Business as Usual*”: representa un escenario en donde no existe mitigación de GEIs. Es decir, muestra la evolución de las principales variables si no existiera una limitación o control sobre las emisiones.
- ii. Escenario “Kyoto 2050”: representa una extensión hasta el año 2050 de los objetivos del Protocolo de Kyoto. Esto supone: 1) reducir las emisiones para el periodo 2008-2012 para que no superen en un 15% las emisiones de 1990 y 2) estabilizarlas en esos niveles hasta 2050.

---

Gráfico 4: EMISIONES GEIs ESCENARIO BAU Y KYOTO 2050 (MtCO<sub>2</sub> EQ.)

---



Fuente: Elaboración propia.

El gráfico 4 recoge la evolución de las emisiones de GEIs en ambos escenarios. En el escenario BAU crecen hasta alcanzar 719 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (MtCO<sub>2</sub> eq.) en el año 2050, mientras que en el escenario Kyoto 2050 se estabilizan en 357. El ritmo de estabilización se basa en los actuales Planes Nacionales de Asignación (PNA) que contemplan una primera fase de mantenimiento (2005-2007) y otra de reducción (2008-2012). La reducción de emisiones si comparásemos ambos escenarios sería un 25% en 2020 y un 51% en 2050.

#### 4. RESULTADOS

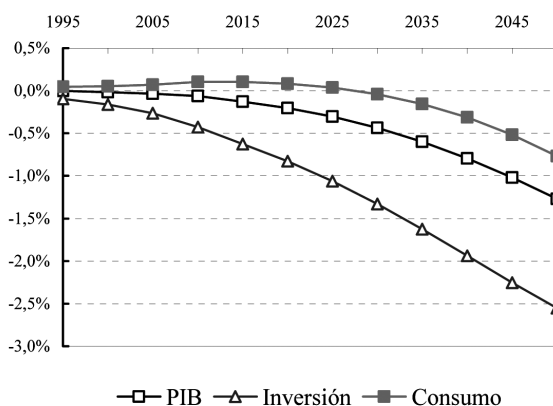
Los impactos del control de GEIs se estiman mediante la comparación entre el escenario Kyoto 2050 y el escenario BAU. Vamos a dividir el análisis de los resultados en tres bloques: en primer lugar, presentaremos los resultados a nivel agregado, en segundo lugar, a nivel sectorial y, por último, analizaremos la evolución de variables clave como el *mix* energético y el precio de los permisos de emisión.

##### 4.1. Resultados generales

Los resultados generales del escenario Kyoto 2050 se recogen en el cuadro 1. Las variables macroeconómicas principales (PIB, Producción y Consumo Privado) son en 2050 inferiores al escenario BAU. Esto ilustra algo obvio, pero importante: reducir las emisiones de efecto invernadero tiene un coste frente a la opción de emitir de forma gratuita y sin ninguna restricción. La utilidad total entre 1995-2050, que recoge la suma descontada de la utilidad en cada periodo, es un 0,31% inferior comparada con el escenario BAU.

El PIB disminuye hasta alcanzar una reducción del 1,2 por ciento en 2050. Esto se debe a la evolución del consumo privado y la inversión; ya que el gasto público y la balanza comercial son idénticos en ambos escenarios. El gráfico 5 muestra que el consumo privado aumenta inicialmente y después disminuye, mientras que la inversión decrece progresivamente. El consumo (y las emisiones) pueden aumentar ante el anuncio de una política ambiental ya que los agentes anticipan dicha restricción y consumen más en el presente donde el consumo genera una mayor utilidad (Bye 2000). Este fenómeno está limitado ya que un mayor consumo en el presente supone también un menor ahorro e inversión y, por lo tanto, un menor consumo futuro. La ventaja de la utilización de un modelo tipo Ramsey es que permite obtener aquella relación óptima entre consumo actual y consumo futuro para maximizar la utilidad a lo largo de todo el horizonte temporal.

Gráfico 5: VARIACIÓN CONSUMO, INVERSIÓN Y PIB  
ESCENARIO KYOTO 2050 RESPECTO A BAU



Fuente: Elaboración propia.

| <b>Cuadro 1: RESULTADOS GENERALES ESCENARIO KYOTO 2050 RESPECTO A BAU</b> |       |        |        |
|---|-------|--------|--------|
|   | 1995  | 2010   | 2030   |
| <i>Macroeconomía (% variación cantidades)</i>                             |       |        |        |
| Utilidad  | 0,04  | 0,10   | -0,10  |
| PIB   | 0,00  | -0,06  | -0,44  |
| Consumo Privado   | 0,04  | 0,10   | -0,04  |
| Inversión   | -0,10 | -0,43  | -1,33  |
| <i>Comercio Internacional (% variación cantidades)</i>                    |       |        |        |
| Importaciones   | -0,02 | -0,15  | -4,20  |
| Exportaciones   | -0,02 | -0,15  | -4,26  |
| <i>Sectores (% variación cantidades)</i>                                  |       |        |        |
| Producción sector Agricultura <sup>1</sup>                                | 0,03  | 0,06   | -0,83  |
| Producción sector Industria   | -0,03 | -0,18  | -1,75  |
| Producción sector Servicios   | 0,01  | 0,00   | -0,24  |
| Consumo final Agricultura   | 0,03  | 0,03   | -1,72  |
| Consumo final Industria   | 0,05  | 0,11   | -1,01  |
| Consumo final Servicios   | 0,04  | 0,10   | 0,42   |
| <i>Consumo Energético <sup>2</sup> (% variación cantidades)</i>           |       |        |        |
| Consumo energía Total   | 0,00  | -0,06  | -11,19 |
| Consumo energía Productores   | -0,02 | -0,14  | -14,96 |
| Consumo energía Consumidores  | 0,04  | 0,07   | -4,36  |
| <i>Emisiones de Efecto Invernadero (% variación cantidades)</i>           |       |        |        |
| Emisiones Totales   | 0,00  | -5,03  | -35,02 |
| Emisiones Combustión  | 0,00  | -0,08  | -23,83 |
| Emisiones Proceso   | 0,01  | -18,92 | -68,04 |
| Precio Permisos (euro / ton. CO2 eq.)                                     | 0,00  | 0,00   | 24,05  |
| <i>Precios (precios índice 1995 = 1)</i>                                  |       |        |        |
| ÍPC (numerario)   | 1,00  | 1,00   | 1,00   |
| Precio Capital  | 1,00  | 1,00   | 0,99   |
| Precio Trabajo  | 1,00  | 1,00   | 0,99   |
| <i>Cierre del modelo (variación cantidades)</i>                           |       |        |        |
| Gasto Público   | 0,00  | 0,00   | 0,00   |
| Deficit Comercial   | 0,00  | 0,00   | 0,00   |

<sup>1</sup> Los 22 sectores están agrupados en tres: Agricultura (1), Industria (2 a 16) y Servicios (17 a 22).

<sup>2</sup> El consumo de energía comprende el consumo de carbón, petróleo, gas natural y electricidad.

Fuente: Elaboración propia.

La estructura económica también se ve afectada por la política climática. El escenario Kyoto 2050 induce una terciarización general en la actividad económica que se manifiesta en una translación de la actividad hacia sectores/productos menos intensivos en emisiones de GEIs. El cuadro 1 nos permite analizar este fenómeno a través de la evolución de los agregados Agricultura, Industria y Servicios. La actividad de la Agricultura disminuye por su carácter intensivo en emisiones de proceso (sobre todo en CH<sub>4</sub>) y la de Industria, sobre todo, por su intensidad en emisiones de combustión (CO<sub>2</sub>). Por otro lado, el agregado sector Servicios, se ve poco afectado e incluso aumenta su consumo ligeramente. El importante peso del sector Servicios en el sistema económico es lo que permite que, a pesar la reducción significativa de la actividad mostrada por algunos sectores (véase apartado 4.2), el consumo total se mantenga en niveles razonables (-0,7% en 2050).

El cuadro 1 muestra cómo una reducción de emisiones de un 51% es compatible con una reducción del consumo energético de un 23%. Aunque el consumo de energía no disminuye en términos absolutos, crece a un ritmo menor que en el escenario BAU. Esta reducción del 23% es compatible con una disminución del PIB de un 1,27%, lo que ilustra un desacople relativo entre producción y consumo energético. Las posibilidades de sustitución entre inputs, los cambios en los patrones de producción y consumo y las mejoras tecnológicas explican este grado de desacople.

Los efectos sobre el comercio internacional se traducen en una ligera pérdida de competitividad, ya que estamos simulando una reducción de emisiones a nivel doméstico y suponemos un entorno inalterado. Aunque las importaciones totales se reducen, debido principalmente a la reducción de las importaciones de combustibles fósiles, las exportaciones totales se reducen en mayor medida, ya que el coste de los permisos de emisión se traslada hacia los productos domésticos.

Por último, analizamos el efecto sobre los precios relativos. Los resultados muestran que la política ambiental provoca 1) una disminución del precio del trabajo y del capital y 2) un aumento de los precios de la energía y los permisos de emisión. A medida que los permisos de emisión son más escasos aumenta el precio de los factores y productos intensivos en GEIs mientras que disminuye el precio del resto de factores. Un resultado relevante es el hecho de que el precio del factor trabajo disminuye relativamente más que el precio del factor capital. Esto se debe a que la política climática induce una menor acumulación de capital, ya que este segundo factor es endógeno en el modelo.

#### *4.2. Resultados sectoriales*

Una de las ventajas de un MEGA es que nos permite conocer los impactos sectoriales. Las políticas de mitigación tienen impactos sectoriales diversos que no es posible conocer mediante un análisis macroeconómico. En un MEGA los factores de producción se pueden desplazar de unos sectores a otros que, con la política ambiental, resultan ahora ser más rentables. Los impactos sectoriales surgen de una combinación de efectos por el lado de la oferta –donde los sectores más intensivos en emisiones aumentan sus costes de producción– y por el lado de la demanda –donde el precio más alto de los productos intensivos en emisiones hace disminuir su consumo–. Además también influye toda una serie de impactos indirectos que se extienden a través de toda la cadena intersectorial. Estos efectos se materializan finalmente en un cambio en la estructura económica dando un mayor peso a los sectores y productos con una menor intensidad en emisiones de GEIs.

El gráfico 6 muestra el efecto sobre la producción en los 22 sectores analizados en tres momentos del tiempo: en 2010, 2030 y 2050. Los sectores más afectados son el sector Extracción de carbón, el sector Extracción de crudo y gas (aunque su peso en la economía es casi nulo), el sector Industria del refino de petróleo y el sector Gas natural. Esto se debe al aumento del precio relativo de los combustibles fósiles y su sustitución progresiva en el consumo intermedio y final. El sector Eléctrico sufre un recorte considerable pero menor, ya que la producción de electricidad es más flexible en cuanto a la posibilidad de sustituir inputs.

Un grupo amplio de sectores (Agricultura, Industria química, Industria metálica, Transporte aéreo, Transporte por carretera) ve afectada su actividad productiva con reducciones que alcanzan en torno al 2 y 3%. Por otro lado, el efecto en los sectores servicios es casi nulo. El sector Servicios no comerciales incluso aumenta ligeramente su producción.

El único sector que aumenta su actividad es el sector Transporte marítimo. Aunque es más intensivo en emisiones de GEIs que otros sectores lo es menos que sus sustitutos más cercanos: el sector Transporte terrestre y el sector Transporte aéreo. Esto provoca que parte de la actividad de transporte de pasajeros y mercancías se canalice a través de dicho sector. Este es un buen ejemplo de la importancia que tiene considerar los impactos indirectos en las políticas de mitigación.

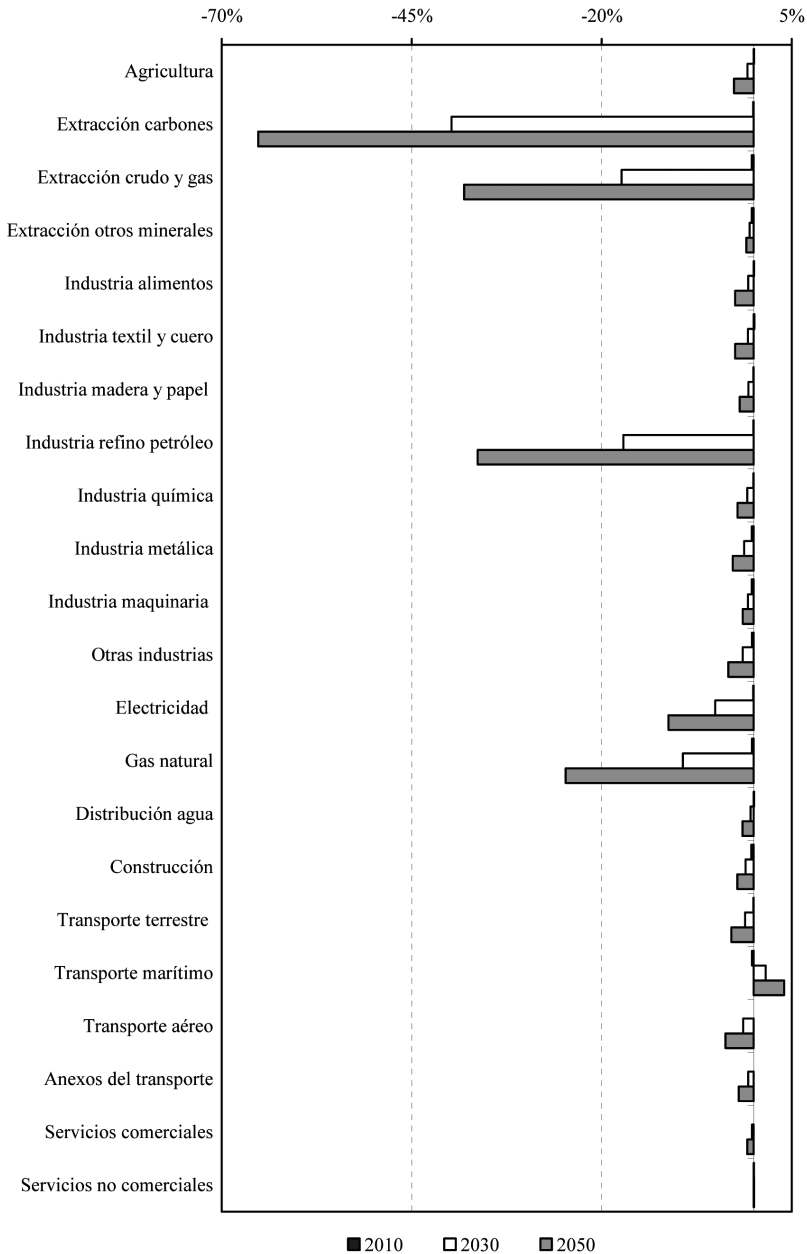
#### 4.3. Otros resultados: energía y permisos de emisión

El gráfico 7 recoge la variación en el consumo de energía por combustibles. Este gráfico ilustra cómo se van sustituyendo combustibles más intensivos en GEIs, como el carbón y el petróleo, por otros como el gas. Finalmente, en 2050 el consumo de carbón se reduce respecto al escenario BAU un 63%, el petróleo un 36%, y el gas un 24%. En un inicio, la mayor parte de la reducción proviene de las emisiones de proceso, debido a las mejores posibilidades iniciales de estas tecnologías y al supuesto de mejora tecnológica realizado, pero a medida que los objetivos son más intensos y estas posibilidades se agotan, la reducción se produce enteramente en las emisiones de combustión.

A partir de un MEGA podemos obtener las curvas de costes marginales de reducción de emisiones (CMR) y, por lo tanto, conocer los precios implícitos de los permisos de emisión (Ellerman y Deceaux, 1998) en un hipotético mercado perfectamente competitivo. La solución del modelo nos asegura que la reducción será coste-efectiva, es decir, que en equilibrio el CMR para todos los agentes será idéntico. Una de las ventajas de obtener las curvas de CMR a través de un MEGA es que incorporan los costes directos y también los indirectos, algo que los estudios de tipo tecnológico o “*bottom-up*” suelen ignorar.

El precio de los permisos (gráfico 8) es nulo en un inicio, cuando no hay restricción en las emisiones, pero a medida que los objetivos de reducción son más intensos aumenta hasta alcanzar los 92 euros por tonelada en 2050. La evolución conjunta de los precios y los objetivos de reducción ilustra cómo el coste de reducir emisiones aumenta más que proporcionalmente ya que las mejores opciones tecnológicas van siendo utilizadas. Los resultados obtenidos están en la línea de lo sugerido por la literatura (Weyant, 2004).

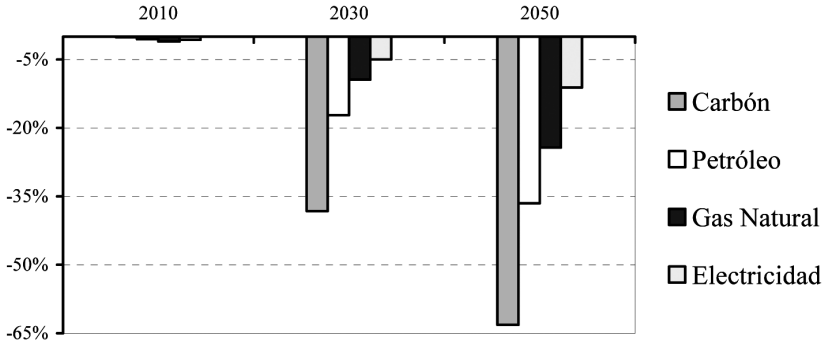
Gráfico 6: VARIACIÓN PRODUCCIÓN SECTORIAL  
 ESCENARIO KYOTO 2050 RESPECTO A BAU



Fuente: Elaboración propia.

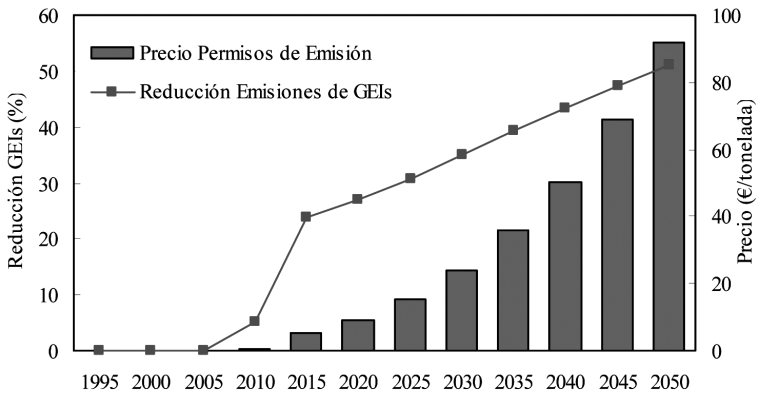


**Gráfico 7: VARIACIÓN CONSUMO FINAL POR TIPO DE ENERGÍA  
ESCENARIO KYOTO 2050 RESPECTO A BAU**



Fuente: Elaboración propia.

**Gráfico 8: PRECIO DE LOS PERMISOS DE EMISIÓN Y REDUCCIÓN  
DE GEIs ESCENARIO KYOTO 2050 RESPECTO A BAU**



Fuente: Elaboración propia.

## 5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

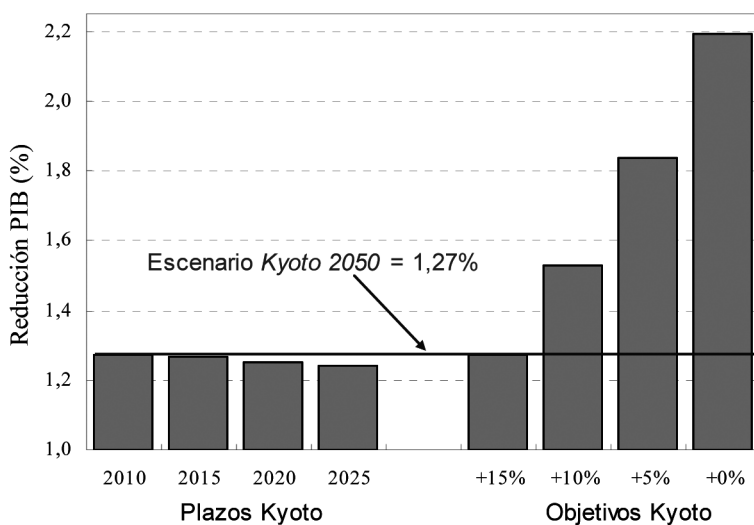
El análisis de sensibilidad es una de las piezas fundamentales para poder interpretar los resultados obtenidos en un MEGA, especialmente cuando existen incertidumbres importantes e inevitables. Para ello, asignaremos diferentes valores a los parámetros del modelo y después compararemos los resultados con los valores originales.

En concreto, en este análisis de sensibilidad vamos a evaluar dos aspectos clave: 1) el efecto de posibles cambios en las políticas de mitigación, ya que dependen de acuerdos internacionales que están todavía en fase de desarrollo (ej. Copenhague 2009) y 2) el efecto de posibles variaciones en los parámetros de tipo económico-tecnológico, como son el crecimiento económico o las elasticidades de sustitución.

### 5.1. Sensibilidad ante factores políticos

El gráfico 9 recoge las variaciones en el PIB para en el año 2050 ante factores “políticos”. En la primera parte mostramos el efecto de retrasar los plazos de Kyoto; en vez de alcanzar los objetivos de Kyoto en 2008-2012 se alcanzarían en 2015, 2020 o hasta 2025. En la segunda parte recogemos el efecto de un endurecimiento de los objetivos: el límite de Kyoto que fija no superar un 15% las emisiones de 1990, se fija en un 10%, en un 5% o en los mismos niveles de 1990. Estabilizar las emisiones en los niveles de 1990 supone reducir de hecho las emisiones un 62% respecto al escenario BAU en 2050.

Gráfico 9: SENSIBILIDAD ANTE FACTORES POLÍTICOS, % PIB EN 2050 ESCENARIO KYOTO 2050 RESPECTO A BAU



Fuente: Elaboración propia.

En base a los resultados del gráfico 9 observamos que retrasar los plazos de cumplimiento disminuye los impactos económicos pero muy ligeramente. Retrasar 10 años el cumplimiento de los objetivos de Kyoto en España supone un ahorro muy pequeño (0,2% del PIB para el año 2050). Si la tecnología mejorase al

ritmo actual, parece mejor opción actuar antes que después, ya que al menos esto evitaría la acumulación por más tiempo de los GEIs en la atmósfera y ayudaría a crear los incentivos globales que son necesarios para acelerar un proceso de cambio tecnológico hacia una economía baja en carbono.

Endurecer los objetivos de reducción de GEIs, por el contrario, sí supone un impacto importante sobre la actividad económica. Reducir las emisiones hasta los niveles de 1990 supone aumentar los costes en términos de PIB, para el año 2050 de un 1,27% a un 2,21%. Los costes aumentan más que proporcionalmente a medida que los objetivos son más intensos; observamos que un objetivo de reducción un 15 % mayor que lo fijado en Kyoto supone doblar los costes en 2050.

## 5.2. Sensibilidad ante factores económico-tecnológicos

Los parámetros económico-tecnológicos tienen también un rango de incertidumbre importante. Para medir su influencia vamos a dividir el análisis en tres bloques. En primer lugar, analizaremos el parámetro de crecimiento económico ( $g$ ), en segundo lugar, estudiaremos el efecto de la eficiencia en emisiones de combustión y de proceso ( $\varphi$ ) y, por último, analizaremos, las elasticidades de sustitución ( $\sigma$ ).

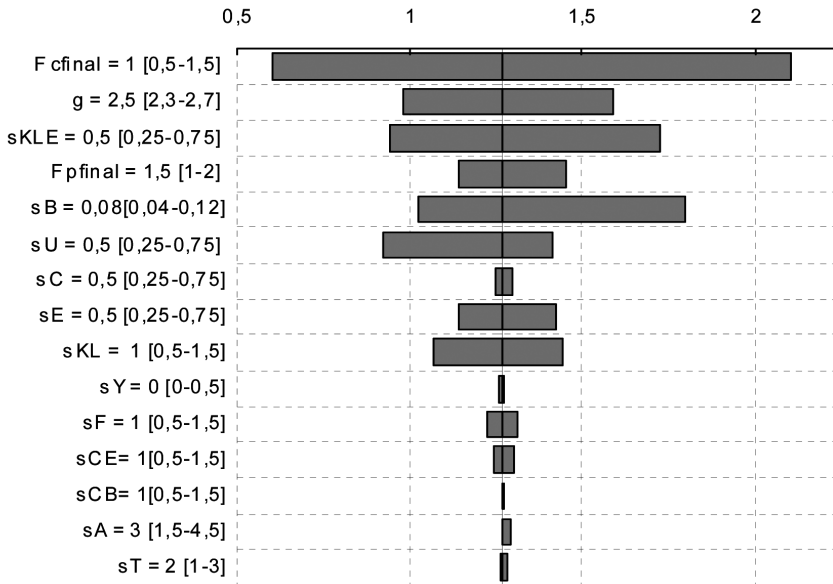
Los resultados de este análisis se presentan agrupados en el gráfico 10, que recoge las variaciones en el PIB en 2050 para los distintos valores de cada parámetro. Cada fila muestra el valor original del parámetro y entre paréntesis recoge el valor máximo y el mínimo investigado. A mayor valor de los parámetros menor coste de mitigación, ya que representa una mejor tecnología y mayores posibilidades de reducir las emisiones a un coste menor. La excepción es el parámetro de crecimiento económico ( $g$ ) ya que al aumentar su valor aumenta la cantidad de emisiones futuras y, por lo tanto, los esfuerzos de mitigación. Unas tasas de crecimiento ( $g$ ) entre 2,3 y 2,7% de media anual muestran variaciones en las reducciones del PIB en 2050 entre un 0,9 y 1,5%.

Las variaciones en el parámetro  $\varphi^C$  –mejora tecnológica en emisiones de combustión– tienen un impacto notable sobre los costes, ya que el peso de estas emisiones sobre el total es considerable (cerca del 75% del total) y sus previsiones de crecimiento son más elevadas. Si su valor en 2050 se situase entre 0,5% o 1,5%, en la reducción del PIB podría variar entre 0,6 y 2,1%. El parámetro  $\varphi^P$  –mejora tecnológica en emisiones de proceso–, también influye en los costes de mitigación (1,1-1,4%), pero tiene una menor relevancia.

Un aspecto a destacar a la hora de analizar la sensibilidad de las elasticidades es que éstas no influyen sobre la evolución del escenario BAU; su efecto surge *a posteriori* y como reacción de los agentes ante la política ambiental. Por lo tanto, el nivel de reducción de emisiones es idéntico para cualquier valor de las elasticidades. Los valores alternativos en todas las elasticidades los obtenemos variando un 50% arriba y abajo los valores originales.

El gráfico 10 muestra cómo la elasticidad de sustitución entre energía y capital/trabajo ( $\sigma^{KEL}$ ) ejerce una gran influencia sobre los resultados. La restricción sobre las emisiones eleva el precio de los permisos y de la energía, lo que fomenta su sustitución por capital-trabajo. La posibilidad de sustituir electricidad y combustibles fósiles ( $\sigma^E$ ) y de intercambio entre los propios combustibles ( $\sigma^F$ ) es también importante.

Gráfico 10: SENSIBILIDAD ANTE FACTORES ECONÓMICO-TECNOLÓGICOS,  
% PIB EN 2050 ESCENARIO KYOTO 2050 RESPECTO A BAU



Fuente: Elaboración propia.

Existen otras elasticidades que tienen un impacto relevante, como por ejemplo: la elasticidad intertemporal de utilidad ( $\sigma^U$ ), la elasticidad de sustitución entre bienes energéticos y no energéticos ( $\sigma^C$ ) y la elasticidad de proceso ( $\sigma^B$ ). La elasticidad intertemporal de utilidad permite una mayor flexibilidad para desplazar consumo hacia el presente donde genera mayor utilidad, y la elasticidad de sustitución entre bienes y servicios revela la importancia que puede tener la modificación de los patrones de consumo hacia otros menos intensivos en GEIs. La elasticidad de proceso ( $\sigma^B$ ) tiene un impacto mayor en los primeros periodos, ya que es posible reducir una cierta cantidad de emisiones de proceso con un coste inferior a la reducción de las emisiones de combustión.

El resto de elasticidades tiene una influencia menor. Esto se debe a que las variables a sustituir son menos importantes o están en un nivel de anidación más bajo dentro de las funciones de producción o consumo. También existen otras razones como, por ejemplo, en el caso de las elasticidades de comercio internacional ( $\sigma^A$ ,  $\sigma^T$ ), donde su impacto es menor por la limitación *ad hoc* impuesta sobre el déficit de comercio.

## 6. CONCLUSIONES

Este trabajo analiza los costes de mitigación de GEIs en España en el largo plazo. Para ello utiliza un Modelo de Equilibrio General Aplicado (MEGA) dinámico que simula un mercado de permisos de emisión. La política estudiada consiste en el cumplimiento y estabilización de los objetivos del Protocolo de Kyoto (escenario Kyoto 2050) hasta 2050.

Para situar los resultados es necesario conocer algunas características y limitaciones del modelo. Primero, el marco de análisis utilizado supone agentes racionales y con expectativas perfectas y mercados perfectamente competitivos. Segundo, los factores son considerados perfectamente móviles entre sectores. Tercero, la evolución tecnológica es considerada de forma exógena. Y cuarto, y por último, únicamente se han considerado los costes de mitigación de GEIs pero no así los daños evitados.

Estabilizar las emisiones en los límites fijados por el Protocolo de Kyoto (Escenario Kyoto 2050) supone una reducción del PIB en 2050 alrededor de un 1%. Además, el anuncio de la política podría elevar inicialmente el consumo y las emisiones. Por otro lado, la política simulada induce un desacople relativo entre PIB y consumo energético, y un cambio del *mix* energético hacia combustibles menos intensivos en emisiones. Los resultados a nivel sectorial son diversos ya que la política generará perdedores (industrias intensivas en energía y materiales) y ganadores (transporte marítimo y sector servicios). Finalmente, el precio de los permisos de emisión en un mercado doméstico como el simulado para España alcanzaría como referencia alrededor de 24 euros por tonelada en 2030 y 92 euros en 2050.

Estos resultados están sujetos a la variabilidad propia de los parámetros utilizados. El análisis de sensibilidad realizado sobre factores políticos (plazos y objetivos) muestra que el impacto de dilatar los plazos no es significativo mientras que la elección de los objetivos influye notablemente. El análisis de sensibilidad sobre factores económico-tecnológicos muestra cómo algunos parámetros son fundamentales como, por ejemplo, el grado de sustitución entre inputs energéticos. Por último, el grado y desarrollo tecnológico es uno de los elementos clave para reducir los costes de mitigación en el futuro.

En definitiva, es necesario asumir que una política destinada a reducir las emisiones de GEIs en España tendrá ciertos costes en el corto y medio plazo. Sin embargo, la sustitución entre combustibles fósiles y otros inputs, los cambios en los patrones de producción y consumo o las mejoras tecnológicas previstas pueden hacer que estos costes se sitúen dentro de unos límites razonables.

APÉNDICES

1. Ecuaciones del modelo y notación científica

1. Productores

Funciones de Producción por sectores<sup>8</sup>  $\forall(j, t)$

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

Condición de Beneficio Cero por sectores  $\forall(j, t)$

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

2. Consumidores

Función de Utilidad Total Intertemporal

$$U = CES(U_1, \dots, C_{J,t}; \sigma^C, \sigma^{CE}, \sigma^{CB}) \quad [3]$$

Función de Utilidad Instantánea  $\forall t$

$$U_t = CES(C_{1,t}, \dots, U_t; \sigma^U) \quad [4]$$

Condición de Balance Presupuestario  $\forall t$

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

3. Gobierno

Consumo Público del Gobierno

$$\bar{G}_t = Leontief(G_{1,t}, \dots, G_{J,t}) \quad [6]$$

Condición de Balance Presupuestario

$$P_{E,t} \cdot E_t + \sum_{j=1}^J (P_{L,t} \cdot \tau_j^L \cdot L_{j,t} + P_{j,t} \cdot \tau_j^C \cdot C_{j,t} + P_{j,t} \cdot \tau_j^P \cdot Y_{j,t}) = \sum_{j=1}^J P_{j,t} \cdot G_{j,t} + T_t, \forall t \quad [7]$$

(8) La ecuación 1 es una forma reducida de presentar una función CES, mediante los inputs y las elasticidades, y evitar así su gran extensión algebraica. A modo de ejemplo, una función CES para el caso de dos niveles de anidamiento y dos inputs tiene la siguiente forma:

El primer nivel:  $Y = CES(X_1, X_2; \sigma) = (a_1 X_1^{\sigma-1/\sigma} + a_2 X_2^{\sigma-1/\sigma})^{\sigma/\sigma-1}$  y el segundo nivel:

$X_2 = CES(X_3, X_4; \psi) = (a_3 X_3^{\psi-1/\psi} + a_4 X_4^{\psi-1/\psi})^{\psi/\psi-1}$ , donde  $a_1, a_2, a_3, a_4$  son parámetros y  $\sigma, \psi$  representan las elasticidades de sustitución entre los inputs.

#### 4. Comercio Internacional

Función Armington entre bienes importados y domésticos  $\forall(j, t)$

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

Función Transformación entre bienes exportados y domésticos  $\forall(j, t)$

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

Cierre del modelo con el Resto del Mundo  $\forall t$

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

#### 5. Crecimiento y Progreso tecnológico

Crecimiento exógeno de la oferta efectiva de trabajo  $\forall t$

$$\bar{L}_{t+1} = \bar{L}_t \cdot (1 - \delta) \quad [11]$$

Crecimiento endógeno del stock de capital  $\forall t$

$$K_{t+1} = K_t \cdot (1 - \delta) + I_t \quad [12]$$

Condición de transversalidad para el stock final de capital

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

Progreso tecnológico para emisiones de combustión y proceso  $\forall t$

$$\varphi_t^* = \varphi_{t_0}^* \cdot \frac{1}{1 + (\varphi_{t_0}^* / \varphi_{t_0}^* - 1) \cdot e^{-t}} \quad [14]$$

#### 6. Emisiones

Emisiones Productores  $\forall t$

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

Emisiones Consumidores  $\forall t$

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

Reducción de emisiones de proceso Productores  $\forall(j, t)$

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

7. Condiciones de Equilibrio de Mercado

Balance mercado bienes y servicios  $\forall(j, t)$

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

Balance mercado de capital  $\forall t$

$$\sum_{j=1}^J K_{j,t} = K_t \quad [19]$$

Balance mercado de trabajo  $\forall t$

$$\sum_{j=1}^J L_{j,t} = \bar{L}_t \quad [20]$$

Balance mercado de Ahorro/Inversión  $\forall t$

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

Balance mercado de permisos de emisión  $\forall t$

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



## Símbolos

### Índices

| Nombre | Entradas              | Descripción                   |
|--------|-----------------------|-------------------------------|
| j, jj  | 1, ..., J             | Sectores / Bienes y servicios |
| t      | 1, ..., T             | Periodos                      |
| e      | Carbón, Petróleo, Gas | Combustibles Fósiles          |

### Parámetros

| Nombre         | Descripción  |
|----------------|--|
| $g$            | Tasa de crecimiento de la oferta efectiva de trabajo                               |
| $\delta$       | Tasa de depreciación del capital   |
| $\sigma^Y$     | Elasticidad de sustitución entre Energía-Capital-Trabajo y Materiales              |
| $\sigma^{KLE}$ | Elasticidad de sustitución entre Energía y Capital-Trabajo                         |
| $\sigma^{KL}$  | Elasticidad de sustitución entre Capital y Trabajo                                 |
| $\sigma^E$     | Elasticidad de sustitución entre Electricidad y Combustibles Fósiles               |
| $\sigma^F$     | Elasticidad de sustitución entre Carbón, Petróleo y Gas Natural                    |
| $\sigma^U$     | Elasticidad de sustitución intertemporal de la utilidad instantánea                |
| $\sigma^C$     | Elasticidad de sustitución en el consumo entre bienes energéticos y no energéticos |
| $\sigma^{CE}$  | Elasticidad de sustitución en el consumo entre bienes energéticos                  |
| $\sigma^{CB}$  | Elasticidad de sustitución en el consumo entre bienes no energéticos               |
| $\sigma^B$     | Elasticidad de sustitución entre producción/consumo y emisiones de proceso         |
| $\sigma^A$     | Elasticidad de sustitución entre bienes importados y domésticos                    |
| $\sigma^T$     | Elasticidad de transformación entre bienes exportados y domésticos                 |
| $\tau_j^L$     | Tasa impositiva en el trabajo en el sector j                                       |
| $\tau_j^P$     | Tasas impositiva en la producción en el sector j                                   |
| $\tau_j^C$     | Tasa impositiva en el consumo en el bien j   |
| $T_i$          | Transferencias entre consumidores y gobierno en el periodo t                       |
| $\alpha_e$     | Coefficientes de emisión de combustión para los productores en el combustible e    |

|               |  |
|---------------|--|
| $\gamma_e$    | 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            |
| $\varphi_t^C$ | Progreso tecnológico en la intensidad de emisiones de combustión en el periodo t |
| $\varphi_t^P$ | Progreso tecnológico en la intensidad de emisiones de proceso en el periodo t    |

### VARIABLES ENDÓGENAS

| Nombre           | Descripción   |
|------------------|---|
| $Y_{j,t}$        | 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 input j en el sector j y en el periodo t                           |
| $Y_{j,t}^D$      | Demanda doméstica 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   |
| $U_t^A$          | Utilidad consumidores en el periodo t antes del abatimiento de las emisiones de proceso   |
| $C_{j,t}$        | Consumo privado del bien j en el periodo t  |
| $G_{j,t}$        | Gasto público del bien j en el periodo t  |
| $S_t$            | Ahorro consumidor representativo en el periodo t  |
| $I_{j,t}$        | Inversión en el sector j en el periodo t  |
| $T_t$            | Transferencias entre gobierno y consumidor representativo 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 del comercio internacional en el periodo t |
| $E_t^C$     | Precio de equilibrio de la inversión en el periodo t                                  |
| $E_t^P$     | Emisiones totales de combustión en el periodo t                                       |
| $E_{j,t}^P$ | Emisiones totales de proceso en el periodo t  |
|             | Emisiones de proceso del sector j en el periodo t                                     |

---

VARIABLES EXÓGENAS

---

| Nombre             | Descripción                                     |
|--------------------|---|
| $\bar{X}\bar{D}_t$ | Déficit de comercio en el periodo t             |
| $\bar{G}_t$        | Gasto público total en el periodo t             |
| $\bar{K}_o$        | Oferta de capital en el periodo inicial         |
| $\bar{L}_t$        | Oferta de trabajo en el periodo t               |
| $\bar{E}_t$        | Emisiones totales o permisos de emisión totales |

---

2. CUADROS Y DATOS

Cuadro A1: SAM PARA ESPAÑA 1995 (MILLONES €)

|              | Y1     | Y2   | Y3  | Y4     | Y5    | Y6    | Y7    | Y8    | Y9    | Y10   | Y11    | Y12    | Y13   | Y14  | Y15  |
|--------------|--------|------|-----|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|------|------|
| Y1           | 26758  | 0    | 0   | -19243 | -579  | -291  | 0     | 0     | -145  | -3    | 0      | 0      | 0     | 0    | -1   |
| Y2           | 0      | 1542 | 0   | -3     | -2    | -1    | -4    | -4    | -24   | -132  | -4     | -47    | -780  | 0    | 0    |
| Y3           | 0      | 0    | 130 | 0      | 0     | 0     | -4773 | 0     | 0     | 0     | 0      | 0      | 0     | 0    | -67  |
| Y4           | 0      | 0    | 0   | 1782   | 0     | 0     | 0     | 0     | -837  | 0     | 0      | -976   | 0     | 0    | 0    |
| Y5           | -4671  | 0    | 0   | 0      | 46260 | -415  | -37   | 0     | -206  | 0     | 0      | 0      | 0     | 0    | 0    |
| Y6           | -70    | -2   | -1  | 0      | -162  | 12554 | -70   | 0     | -404  | -100  | 0      | -689   | 0     | 0    | -8   |
| Y7           | -149   | -31  | 0   | -14    | -1409 | -248  | 13658 | -28   | -1040 | -255  | -358   | -1401  | 0     | 0    | -28  |
| Y8           | -387   | -56  | -4  | -4     | -175  | -37   | 7563  | -92   | -477  | -390  | -62    | -1756  | -179  | 0    | -11  |
| Y9           | -1504  | -55  | -4  | -116   | -1697 | -1681 | -807  | 0     | 21065 | -1374 | -1072  | -3808  | 0     | 0    | -104 |
| Y10          | -582   | 0    | 0   | -74    | -747  | -159  | -360  | -65   | -628  | 22913 | -5187  | -6320  | -339  | 0    | -46  |
| Y11          | -229   | -47  | -4  | -92    | -142  | -298  | -486  | -101  | -1023 | -1791 | 31104  | -2583  | 0     | 0    | -63  |
| Y12          | -113   | -9   | 0   | -25    | -678  | -16   | -81   | -9    | -215  | -656  | -273   | 48981  | 0     | -1   | -22  |
| Y13          | -323   | -4   | -2  | -43    | -406  | -217  | -301  | -174  | -588  | -660  | -413   | -794   | 11335 | -15  | -199 |
| Y14          | -2     | -7   | -2  | -4     | -83   | -49   | -97   | -26   | -250  | -155  | -49    | -277   | -239  | 861  | -1   |
| Y15          | -341   | 0    | 0   | -10    | -140  | -31   | -17   | 0     | -65   | -45   | 0      | 0      | 0     | -1   | 2457 |
| Y16          | -124   | -16  | 0   | -25    | -83   | -44   | -124  | -44   | -109  | -161  | -119   | 0      | 0     | 0    | -82  |
| Y17          | -542   | -40  | -1  | -159   | -2058 | -396  | -846  | 0     | -1030 | -1228 | -465   | -1919  | 0     | 0    | -10  |
| Y18          | -13    | -2   | -1  | -1     | -72   | -23   | -22   | -6    | -48   | -42   | -28    | -55    | 0     | 0    | -8   |
| Y19          | -4     | -2   | 0   | -2     | -83   | -34   | 0     | 0     | -133  | -71   | -130   | 0      | 0     | -1   | -4   |
| Y20          | -396   | -36  | 0   | -9     | -826  | -236  | -472  | -121  | -557  | -744  | -532   | -710   | 0     | 0    | -50  |
| Y21          | 0      | -63  | 0   | -168   | -4678 | -1816 | -2254 | -113  | -3672 | -2927 | -2806  | -4459  | -681  | 0    | -247 |
| Y22          | 0      | -3   | 0   | 0      | -24   | -72   | -56   | -68   | 0     | -108  | -321   | -513   | 0     | 0    | -20  |
| K            | -15519 | -419 | -99 | -584   | -6114 | -1663 | -2882 | -1494 | -3719 | -3635 | -2873  | -5881  | -7871 | -671 | -617 |
| L            | -2284  | -571 | -6  | -322   | -6643 | -3562 | -3486 | -295  | -4634 | -6258 | -14583 | -14003 | -1134 | -60  | -764 |
| Rk           | 850    | 11   | -4  | -25    | 946   | -94   | -78   | -119  | -598  | -15   | -210   | -297   | 227   | -7   | 2    |
| Rl           | -355   | -241 | -2  | -102   | -1541 | -873  | -998  | -123  | -1500 | -1326 | -1619  | -2493  | -339  | -16  | -174 |
| Rc           | 0      | 0    | 0   | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0      | 0     | 0    | 0    |
| Transf (T)   | 0      | 0    | 0   | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0      | 0     | 0    | 0    |
| Ahorro (S)   | 0      | 0    | 0   | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0      | 0     | 0    | 0    |
| Deficit (XD) | 0      | 0    | 0   | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0      | 0     | 0    | 0    |
| Total        | 0      | 0    | 0   | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0      | 0     | 0    | 0    |

Cuadro A1: SAM PARA ESPAÑA 1995 (MILLONES €) (continuación)

|              | Y16    | Y17   | Y18  | Y19  | Y20   | Y21    | Y22    | M      | X      | C      | G       | I      | Total  |
|--------------|--------|-------|------|------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|
| Y1           | -182   | 0     | 0    | -4   | 0     | 0      | -1159  | -142   | 5563   | -5973  | -4358   | 0      | -241   |
| Y2           | -3     | 0     | 0    | 0    | 0     | -4     | -4     | -5     | 213    | -706   | -40     | 0      | 0      |
| Y3           | -1     | -85   | 0    | 0    | -5    | 0      | 0      | 0      | 4809   | -8     | 0       | 0      | 0      |
| Y4           | -575   | 0     | 0    | 0    | 0     | 0      | -8     | -15    | 971    | -319   | -18     | 0      | 0      |
| Y5           | 0      | 0     | -29  | 0    | 0     | 0      | -13439 | -456   | 6481   | -6050  | -27438  | 0      | 0      |
| Y6           | -51    | -9    | -9   | -17  | -23   | -653   | -386   | -386   | 4634   | -4781  | -9684   | 0      | -129   |
| Y7           | -1562  | -43   | -3   | -17  | -305  | -3573  | -1107  | -53    | 4056   | -2877  | -3415   | 0      | -51    |
| Y8           | -92    | -353  | -96  | -122 | -30   | -152   | -248   | -2466  | 1715   | -1787  | -2391   | 0      | 0      |
| Y9           | -1972  | -62   | -7   | -1   | -248  | -1677  | -2466  | -13493 | 13493  | -10081 | -2935   | -2612  | -75    |
| Y10          | -5330  | -21   | 0    | -3   | -131  | -408   | -175   | -175   | 7611   | -6739  | -41     | 0      | -3169  |
| Y11          | -2945  | -77   | -3   | -9   | -242  | -1370  | -1832  | -1832  | 19000  | -11811 | -3744   | -69    | -21143 |
| Y12          | -9275  | -701  | -117 | -57  | -248  | -3083  | -941   | -941   | 16584  | -25791 | -10236  | -23    | -12995 |
| Y13          | -218   | -261  | -4   | -5   | -174  | -1583  | -771   | -771   | 130    | -23    | -4287   | 0      | 0      |
| Y14          | -1     | -3    | -3   | -1   | -3    | -34    | -19    | -19    | 855    | 0      | -413    | 0      | 0      |
| Y15          | -14    | -8    | 0    | 0    | -10   | -469   | -210   | -210   | 0      | 0      | -1096   | 0      | 0      |
| Y16          | 100059 | -152  | -8   | -14  | -108  | -8408  | -1353  | -1353  | 1      | -11    | -8186   | 0      | -80889 |
| Y17          | -1438  | 21818 | -16  | -53  | -882  | -2567  | -489   | -489   | 189    | -2001  | -5394   | -206   | -267   |
| Y18          | -17    | -19   | 1583 | -1   | -17   | -103   | -32    | -32    | 21     | -926   | -139    | -14    | -15    |
| Y19          | -96    | -5    | 0    | 3320 | -350  | -619   | -180   | -180   | 998    | -1863  | -646    | -95    | 0      |
| Y20          | -546   | -1160 | -417 | -923 | 20395 | -5092  | -1314  | -1314  | 1502   | -1934  | -5752   | -71    | 0      |
| Y21          | -8794  | -2988 | -101 | -417 | -2049 | 219791 | -6429  | -6429  | 7128   | -11010 | -145537 | -4117  | -21593 |
| Y22          | -165   | -39   | 0    | -6   | -235  | -790   | 91005  | 91005  | 109    | -126   | -13888  | -74680 | 0      |
| K            | -11181 | -7909 | -78  | -469 | -8494 | -87231 | -12501 | -12501 | 0      | 0      | 181910  | 0      | 0      |
| L            | -50667 | -5348 | -571 | -930 | -4992 | -68851 | -44308 | -44308 | 0      | 0      | 234272  | 0      | 0      |
| RK           | -1132  | -1085 | -2   | -6   | -231  | -6109  | -2783  | -2783  | 0      | 0      | 0       | 10759  | 0      |
| RL           | -3802  | -1490 | -117 | -269 | -1618 | -12409 | -13038 | -13038 | 0      | 0      | -23123  | 44445  | 0      |
| RC           | 0      | 0     | 0    | 0    | 0     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 23123   | 3560   | 0      |
| Transf (T)   | 0      | 0     | 0    | 0    | 0     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | -3560   | 0      | 0      |
| Ahorro (S)   | 0      | 0     | 0    | 0    | 0     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | -140567 | 0      | 140567 |
| Deficit (XD) | 0      | 0     | 0    | 0    | 0     | 0      | 0      | 0      | -96123 | 94817  | 1306    | 0      | 0      |
| Total        | 0      | 0     | 0    | 0    | 0     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       | 0      | 0      |

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A.2: PRODUCCIÓN, CONSUMO Y EMISIONES EN ESPAÑA, 1995

|    | Códigos<br>Simétrica 1995 (TIOS) | Producción<br>(M€)             | (%)     | Consumo Final<br>(M€) | (%)     | Emisiones CO2<br>(ktCO2 equiv.) | (%)     | Resto Emisiones<br>(ktCO2 equiv.) | (%)     | Emisiones Totales<br>(ktCO2 equiv.) | (%)     |        |
|----|----------------------------------|--------------------------------|---------|-----------------------|---------|---------------------------------|---------|-----------------------------------|---------|-------------------------------------|---------|--------|
| 1  | Agricultura, ganadería y pesca   | 26758                          | (3,8%)  | 4358                  | (1,7%)  | 12727                           | (5,5%)  | 47817                             | (51,4%) | 60544                               | (18,6%) |        |
| 2  | Extracción carbón                | 1542                           | (0,2%)  | 40                    | (0,0%)  | 315                             | (0,1%)  | 1103                              | (1,2%)  | 1418                                | (0,4%)  |        |
| 3  | Extracción crudo y gas           | 130                            | (0,0%)  | 0                     | (0,0%)  | 165                             | (0,1%)  | 15                                | (0,0%)  | 180                                 | (0,1%)  |        |
| 4  | Extracción otros minerales       | 1782                           | (0,3%)  | 18                    | (0,0%)  | 364                             | (0,2%)  | 18                                | (0,0%)  | 381                                 | (0,1%)  |        |
| 5  | Industria alimentación           | 46260                          | (6,5%)  | 27438                 | (11,0%) | 5602                            | (2,4%)  | 416                               | (0,4%)  | 6018                                | (1,9%)  |        |
| 6  | Industria textil                 | 12554                          | (1,8%)  | 9684                  | (3,9%)  | 1683                            | (0,7%)  | 565                               | (0,6%)  | 2248                                | (0,7%)  |        |
| 7  | Industria madera y papel         | 13858                          | (2,0%)  | 3415                  | (1,4%)  | 3828                            | (1,6%)  | 845                               | (0,9%)  | 4673                                | (1,4%)  |        |
| 8  | Industria refino petróleo        | 7563                           | (1,1%)  | 2991                  | (1,2%)  | 655                             | (0,3%)  | 10460                             | (11,2%) | 11114                               | (3,4%)  |        |
| 9  | Industria química                | 21065                          | (3,0%)  | 2935                  | (1,2%)  | 16089                           | (6,9%)  | 3792                              | (4,1%)  | 19880                               | (6,1%)  |        |
| 10 | Industria metálica               | 22913                          | (3,2%)  | 41                    | (0,0%)  | 19104                           | (8,2%)  | 4353                              | (4,7%)  | 23457                               | (7,2%)  |        |
| 11 | Industria maquinaria             | 31104                          | (4,4%)  | 3744                  | (1,5%)  | 2494                            | (1,1%)  | 622                               | (0,7%)  | 3116                                | (1,0%)  |        |
| 12 | Otras industrias                 | 48981                          | (6,9%)  | 10236                 | (4,1%)  | 48487                           | (20,9%) | 392                               | (0,4%)  | 48879                               | (15,0%) |        |
| 13 | Electricidad                     | 11335                          | (1,6%)  | 4287                  | (1,7%)  | 52732                           | (22,7%) | 7787                              | (8,4%)  | 60519                               | (18,6%) |        |
| 14 | Gas natural                      | 861                            | (0,1%)  | 413                   | (0,2%)  | 722                             | (0,3%)  | 557                               | (0,6%)  | 1279                                | (0,4%)  |        |
| 15 | Distribución agua                | 2457                           | (0,3%)  | 1096                  | (0,4%)  | 378                             | (0,2%)  | 111                               | (0,1%)  | 488                                 | (0,2%)  |        |
| 16 | Construcción                     | 100059                         | (14,1%) | 8186                  | (3,3%)  | 3199                            | (1,4%)  | 500                               | (0,5%)  | 3699                                | (1,1%)  |        |
| 17 | Transporte terrestre             | 21818                          | (3,1%)  | 5394                  | (2,2%)  | 14079                           | (6,1%)  | 6                                 | (0,0%)  | 14085                               | (4,3%)  |        |
| 18 | Transporte marítimo              | 1583                           | (0,2%)  | 139                   | (0,1%)  | 716                             | (0,3%)  | 85                                | (0,1%)  | 801                                 | (0,2%)  |        |
| 19 | Transporte aéreo                 | 3320                           | (0,5%)  | 646                   | (0,3%)  | 4019                            | (1,7%)  | 73                                | (0,1%)  | 4092                                | (1,3%)  |        |
| 20 | Anexos del Transporte            | 20395                          | (2,9%)  | 5752                  | (2,3%)  | 1035                            | (0,4%)  | 61                                | (0,1%)  | 1096                                | (0,3%)  |        |
| 21 | Servicios comerciales            | 41-44, 51-56, 58, 62-63, 68-71 | 219791  | (31,1%)               | 145537  | (58,2%)                         | 5780    | (2,5%)                            | 1758    | (1,9%)                              | 7538    | (2,3%) |
| 22 | Servicios no comerciales         | 39, 57, 59-61, 64-67           | 91005   | (12,9%)               | 13888   | (5,5%)                          | 2334    | (1,0%)                            | 7462    | (8,0%)                              | 9796    | (3,0%) |
| -  | Hogares                          | -                              | -       | -                     | -       | 35678                           | (15,4%) | 4254                              | (4,6%)  | 39932                               | (12,3%) |        |
|    | Total                            | 707134                         | (100%)  | 250238                | (100%)  | 232181                          | (100%)  | 93053                             | (100%)  | 325234                              | (100%)  |        |

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A3: ELASTICIDADES DE SUSTITUCIÓN PRODUCCIÓN,  
UTILIDAD Y COMERCIO INTERNACIONAL

|                |   |      |
|----------------|---|------|
| $\sigma^Y$     | Elasticidad de sustitución entre Inputs materiales y Energía-Capital-Trabajo    | 0    |
| $\sigma^{KEL}$ | Elasticidad de sustitución entre Energía y Capital-Trabajo                      | 0.5  |
| $\sigma^{KL}$  | Elasticidad de sustitución entre Capital-Trabajo                                | 1    |
| $\sigma^E$     | Elasticidad de sustitución entre Electricidad y Combustibles Fósiles            | 0.5  |
| $\sigma^F$     | Elasticidad de sustitución entre Carbón, Petróleo y Gas Natural                 | 1    |
| $\sigma^A$     | Elasticidad de sustitución entre bienes domésticos e importados                 | 3    |
| $\sigma^T$     | Elasticidad de transformación entre bienes domésticos y exportaciones           | 2    |
| $\sigma^U$     | Elasticidad de sustitución entre utilidad intertemporal                         | 0.5  |
| $\sigma^C$     | Elasticidad de sustitución entre consumo de bienes energéticos y no energéticos | 0.5  |
| $\sigma^{CE}$  | Elasticidad de sustitución en el consumo entre bienes energéticos               | 1    |
| $\sigma^{CB}$  | Elasticidad de sustitución en el consumo entre bienes no energéticos            | 1    |
| $\sigma^B$     | Elasticidad de sustitución entre producción y emisiones de proceso              | 0.08 |

Fuente: MIT-EPPA (Babiker *et al.*, 2001).

Cuadro A4: COEFICIENTES ESTÁNDARES DE CO2 Y USO DE  
COMBUSTIBLES FÓSILES PARA COMBUSTIÓN

|                        | Carbón | Petróleo | Gas   |
|------------------------|--------|----------|-------|
| Toneladas CO2 / Ktep   | 4,104  | 2,851    | 2,187 |
| Industria Química      | 69%    | 65%      | 38%   |
| Industria <sup>1</sup> | –      | 75%      | –     |

<sup>1</sup> Los sectores primarios, la construcción, el transporte y los servicios no se incluyen.

Fuente: Eurostat, 2005.



#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcántara, V. y Padilla, E. (2003): “Key sectors in final energy consumption: an input–output application to the Spanish case”, *Energy Policy*, 31(15), págs. 1673-1678.
- Alcántara, V. y Roca J. (1995): “Energy and CO2 emissions in Spain: Methodology of Analysis and some results for 1980-90”, *Energy Economics*, 17(3), págs. 221-230.
- Armington, P. (1969): “A theory of demand for products distinguished by place of production”, IMF Working Paper 16.

- Babiker, M.H., Mayer M., Wieng I.S. y Hyman, R.C. (2001): The MIT emissions prediction and policy analysis (EPPA) model, MIT Global Change Joint Program, Working Paper 71.
- Bye, B. (2000): "Environmental tax reform and producer foresight: An intertemporal computable general equilibrium analysis", *Journal of Policy Modeling*, 22(6), págs.719-752.
- Barro, R.J. y Sala-i-Martin, X. (1995): Economic growth, McGraw-Hill, New York.
- COM (2008): "Europe's climate change opportunity: 20-20 by 2020", 30 final, Comunicación de la Comisión Europea, Bruselas.
- Dellink, R.B. (2005): Modelling the costs of environmental policy: a dynamic applied general equilibrium assessment, Edward Elgar Publishing, Cheltenham.
- Dirkse, S.P. y Ferris, M.C. (1995): "The PATH solver: A non-monotone stabilization scheme for mixed complementarity problems", *Optimization Methods and Software*, 5, págs. 123-156.
- Ellerman, A. y Deceaux, A. (1998): Analysis of Post-Kyoto CO2 emissions trading using marginal abatement curves, MIT Global Change Joint Program, Working Paper 40.
- Eurostat (2005): Energy and environment statistics, European Statistic Office, Luxemburgo.
- Ginsburgh, V. y Keyzer, M.A. (1997): The structure of applied General Equilibrium Models, MIT Press, Cambridge.
- Faehn, T., Gómez-Plana, A. y Kverndokk, S. Can a carbon permit system reduce Spanish unemployment?, *Energy Economics*, 31(4), págs. 595-604.
- Gómez-Plana, A. (2007): "Política medioambiental y sustitución tecnológica entre inputs", *Hacienda Pública Española*, 181, págs. 9-28.
- González-Eguino, M. (2007): Impacto Económico del control del cambio climático en España, Estudios de la Fundación, Serie Tesis, FUNCAS.
- Hyman, R.C., Reilly, J.M., Babiker, M.H., De Másin, A. y Jacoby, H.D. (2003): "Modeling non-CO2 greenhouse gas abatement", *Environmental Modeling and Assessment*, 8, págs. 175-186.
- INE (2002a): Contabilidad Nacional de España. Serie Contable 1995-2000. Marco Input-Output, Instituto Nacional de Estadística, Madrid.
- INE (2002b): Estadísticas de Medio Ambiente, Cuentas Ambientales, Instituto Nacional de Estadística, Madrid.
- IPCC (2007): Summary for Policymakers: Climate Change 2007, Fourth Assessment Report, Cambridge University Press, 2007.
- Jones, C.I. (1995): "Time series tests of endogenous growth models", *Quarterly Journal of Economics*, 110, págs.495-525.
- Kehoe, P.J. y Kehoe T.J. (1994): "A Primer on Static Applied General Equilibrium Models," *Federal Reserve Bank of Minneapolis Quarterly Review*, 18(2), págs. 2-16.
- Lau, M.I., Pahlke, A. y Rutherford, T.F. (2002): "Approximating infinite-horizon models in a complementarity format: A primer in dynamic general equilibrium analysis", *Journal of Economic Dynamics and Control*, 26, págs. 577-609.
- Labandeira, J. y Labeaga, J. (2002): "Estimation and control of Spanish energy-related CO2 emissions: an input-output approach", *Energy Policy*, 30, págs. 597-611.
- Labandeira, X. y Rodríguez, M. (2006): "The effects of a sudden CO2 reduction in Spain", en De Miguel, C., Labandeira, X. y Manzano, B. (eds.): *Economic Modelling of Climate Change and Energy Policies*. Edward Elgar, Cheltenham.
- Löschel, A. (2002): "Technological change in economic models of environmental policy: a survey", *Ecological Economics*, 43(2), págs.105-126.



- Manresa A. y Sancho, F. (2005): "Implementing a double dividend: recycling ecotaxes towards lower labor taxes", *Energy Policy*, 33(12), págs.1577-1585
- Nordhaus, W.D. (1993): "Rolling the "DICE": An optimal transition path for controlling greenhouse gases", *Resource and Energy Economics*, 15, págs. 27-50.
- Ocaña, C. (2004): "Impacto del Protocolo de Kyoto sobre la Economía Española", *Revista interdisciplinar de gestión ambiental*, 63, págs. 12-26.
- Reilly, J., Mayer, M. y Harnisch, J. (2002): "Multiple Gas Control under the Kyoto Agreement", *Environmental Modeling and Assessment*, 7, págs. 217-229.
- Rutherford, T. y Paltsev, S. (2000): GTAP-EG: Incorporating energy statistics into GTAP format, Working Paper, University of Colorado.
- Shoven, J. y Whalley, J. (1992): *Applying General Equilibrium*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Stern (2006) *The economics of climate change: The Stern Review* HM Treasury, Cambridge University Press.
- Springer, U. (2003): "The Market for tradable GHG Permits under the Kyoto Protocol: a survey of model studies", *Energy Economics*, 25, págs. 527-551.
- Weyant, J.P. (1999): "The Costs of the Kyoto Protocol: a Multi-Model Evaluation", edited by John P. Weyant, *The Energy Journal*, special issue, 1999.
- Weyant, J.P. (2004): "Introduction and overview", *Energy Economics*, 26, 501-515.
- Weyant, J.P., F.C. de la Chesnaye y G.J. Blanford (2006): "Overview of EMF-21: Multigas mitigation and climate policy", *The Energy Journal*, special Issue, págs.1-32.
- Tarancón, M.A. y del Río González, P. (2007): "A combined input-output and sensitivity analysis approach to analyse sector linkages and CO2 emissions," *Energy Economics*, 29(3), págs. 578-597.
- UN (1997): *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*, United Nations, New York.

*Fecha de recepción del original: agosto, 2008*

*Versión final: octubre, 2009*

#### ABSTRACT

This study examines the economic impact of greenhouse gas mitigation in Spain using a dynamic Applied General Equilibrium model. The model captures the main energy and economic interactions and evaluates policies with a broad impact on economic activity. The article focuses on the impacts of the Kyoto Protocol. In order to investigate the costs of mitigation, we focus on key macroeconomic variables, on sectoral variables, energy mix and emission permit prices. Results show that the costs of achieving Kyoto in the long run, although not comparable to any environmental policy from the past, could be contained if a shift toward a less carbon intensive economy is induced; through improvements in energy efficiency, through changes in the energy mix and in production and consumption patterns and, finally, and crucially, through technological innovation.

*Key words:* Climate Change, Applied General Equilibrium Models, Spain.

*JEL Classification:* D58, H21, Q48.

