

Cuantificación de los costes de política climática con modelos de equilibrio general computable

Los modelos de equilibrio general computable (EGC) permiten evaluar los efectos en la economía de medidas concretas de política. El objetivo de este artículo es ilustrar el uso de un modelo de EGC en el área de la política climática. Se evalúa con el modelo mundial GEM-E3 el coste de alcanzar la meta de la UE de limitar el aumento de la temperatura a dos grados centígrados respecto a los niveles preindustriales. El coste marginal de reducción se estima en 40 y 80 US\$/tCO₂-equivalente para los años 2020 y 2030, respectivamente. El PIB mundial se reduciría en tasa anual en un 0,11% en 2020 y en 0,17% en 2030, respecto al escenario base. La disminución en el bienestar en términos anualizados, se sitúa según los resultados del modelo en un 0,1% en 2020 y en un 0,15% para el año 2030.

Oreka orokor konputagarriaren ereduak (EGC) politikaren arloko neurri jakin batzuek ekonomian zer nolako eragina daukaten neurtzeko aukera eskaintzen dute. Eta artikulua helburua klimaren arloko politikan EGC eredu bat erabiltzea da. Artikuluan GEM-E3 eredu mundiala erabiliz, Europar Batasunak jarritako klimaren arloko helburu jakin batek, hau da, tenperaturak bi gradu zentigradutan gora egitea industrializazio aurreko garaia alderatuta, zer nolako kostua izango duen aztertzen da. Murriztearen kostu marjinala 40 eta 80 US\$/tCO₂ baliokiderena izango dela uste da, lehen kopurua 2020. urtearentzat eta bigarrena 2030.arentzat. Munduko Barne Produktu Gordina (BPD), urteroko tasaren arabera, 0,11 murriztuko da 2020an, eta 0,17 2030ean, oinarritzko abiapuntuarekin alderatuta. Ongizatean izango den beherakada, kopuruak urtetan banatuta, ondorengo izango da, ereduaren arabera: %0,1 2020. urtean, eta %0,15 2030ean.

Computable general equilibrium (CGE) models are regularly used for assessing the impacts of environmental policies on the economy. This article applies this methodology for global climate policy using the world GEM-E3 CGE model. An emissions reduction scenario meeting the EU 2 degrees target is designed with specific climate policy instruments, mainly relying on emissions trading. The marginal cost is estimated at 40 US\$/tCO₂-eq in 2020 and around double that figure for the year 2030. The GDP of the world economy would fall in annual terms by 0.11% in 2020 and 0.17% in 2030, compared to the baseline scenario. The world welfare would be annually reduced by 0.1% and 0.15% by 2020 and 2030, respectively.

ÍNDICE

17

1. Introducción
 2. El modelo de equilibrio general computable
 3. El escenario base y el escenario de reducción
 4. Resultados
 5. Conclusiones
- Referencias bibliográficas

Palabras clave: cambio climático, modelos de equilibrio general computable, política de clima post-2012.

Key words: climate change, computable general equilibrium models, post-2012 climate policy.

N.º de clasificación JEL: C68, Q52, Q54, Q01.

1. INTRODUCCIÓN

Tras la publicación del cuarto informe de evaluación del IPCC (2007) y la aprobación de la hoja de ruta de Bali, se ha abierto el proceso de negociación de un posible acuerdo de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para el periodo post-2012. La participación de la mayor parte de las grandes economías es clave para lograr estabilizar la concentración de GEI en la atmósfera, pero esta participación es voluntaria. Asumir o no compromisos internacionales de política de clima depende de la percepción que tenga cada país tanto respecto a los beneficios a

largo plazo que le puede reportar un acuerdo en términos de menores daños del cambio climático como, en el corto y medio plazo, a los costes de mitigar las emisiones.

Por ello el orden de magnitud así como la distribución regional de los costes de mitigación son variables fundamentales en las negociaciones internacionales sobre cambio climático. Cada país participante en las negociaciones realiza sus estimaciones de lo que le va a costar reducir las emisiones, coste que dependerá de las características específicas de su sistema económico, energético y medioambiental y, además, de los objetivos e instrumentos de la política climática concretos considerados.

En general, la política de mitigación debe responder a cuatro cuestiones: cuánto reducir las emisiones de GEI, cuándo hacerlo, cómo o con qué instrumentos, y quién asu-

* Los autores agradecen los comentarios de Bert Saveyn (IPTS). Las ideas expresadas en este documento son responsabilidad de los autores y no representan necesariamente puntos de vista de las instituciones a las que pertenecen.

me los costes de reducción de las emisiones. Las dos primeras cuestiones se refieren a los fines u objetivos de las políticas, mientras que las otras dos conciernen a la elección de los instrumentos de la política.

Hay diversos tipos de modelos cuantitativos para tratar de responder a estas cuestiones (véase e.g. Berck y Hoffmann, 2002; Hidalgo, 2005). Por una parte, los modelos de tipo ingenieril utilizan información muy detallada del sistema energético, caracterizándose de forma exhaustiva por ejemplo las tecnologías del sector eléctrico, como en el modelo POLES (*Prospective Outlook on Long-term Energy Systems*) que utiliza la Comisión Europea para evaluar las políticas de mitigación (Criqui, 1996). Por otra parte, los modelos de tipo económico o *top-down* son herramientas con sus fundamentos en la teoría económica. A su vez esta categoría de modelos se puede dividir en modelos de equilibrio parcial y modelos de equilibrio general. Los modelos de equilibrio general computable (EGC) se utilizan con frecuencia en la evaluación de los efectos de políticas públicas, como las políticas de comercio o la política de cambio climático.

El objetivo de este artículo es ilustrar el uso del método de EGC en el área de la política de clima. Se presentan los resultados del modelo de EGC GEM-E3 (Russ *et al.*, 2007)¹ que se usó para evaluar los efectos de la política que la Comisión Europea publicó recientemente en una comunicación sobre política mundial de lucha contra el cambio climático (Comisión Europea, 2007). En esta comunicación se plantea un

escenario mundial de reducción de emisiones en el horizonte 2030 que permita limitar el incremento de temperatura a dos grados centígrados.

El artículo se divide en cinco secciones, incluyendo la introducción. En la sección 2 se revisan los elementos esenciales de los modelos de EGC y, en particular, el modelo GEM-E3. En la sección 3 se presenta el escenario mundial de reducción de emisiones. La sección 4 analiza los resultados principales de la evaluación. La sección 5 finaliza con unas reflexiones generales sobre el método de EGC.

2. EL MODELO DE EQUILIBRIO GENERAL COMPUTABLE

2.1. El método de EGC

El método de EGC tiene tanto un sólido fundamento teórico como empírico (e.g. Shoven y Whalley, 1992). Por una parte, la teoría del equilibrio general proporciona el marco de análisis del comportamiento de los principales agentes económicos de la economía, a saber, los consumidores, las empresas, el sector público y el sector exterior. La teoría microeconómica fundamenta el comportamiento óptimo de los agentes decisores. El análisis en el contexto de competencia perfecta permite tener una referencia definida, aunque no sea del todo realista, de cuál será el nuevo equilibrio una vez los ajustes en todos los mercados han tenido lugar. Existen numerosas aplicaciones que se desvían del marco neoclásico, contemplando por ejemplo la existencia de rigideces e imperfecciones en los mercados (e.g. Roson, 2007).

El segundo pilar del modelo de EGC es la contabilidad nacional o, más concreta-

¹ Los resultados aquí presentados difieren ligeramente de los del estudio de impacto (*impact assessment*) que acompaña a la Comunicación al haberse realizado una mejora en la calibración del sector energético en el año base del modelo.

mente, las matrices de contabilidad social, extensiones de la tabla input-output para considerar las transacciones no sólo entre las empresas sino también todas las que se dan entre éstas y los otros tres agentes de la economía, (i.e. los consumidores, el sector público y el sector exterior).

La idea básica subyacente al análisis con modelos de EGC es utilizar una primera foto en equilibrio de la economía en un año determinado, conocido como año de referencia o base, y a partir de esta «foto de alta resolución» proporcionada por la contabilidad nacional, utilizar la teoría microeconómica para modelizar cómo reaccionarán los agentes económicos a un cambio en la política o a una perturbación exógena al sistema, como una alteración del precio de la energía. La interacción simultánea de todos los agentes en todos los mercados, incluyendo las relaciones comerciales entre países, conducirá a una nueva situación de equilibrio en la que se cumplirán las tres principales restricciones conceptuales de un equilibrio general competitivo. En primer lugar, todos los mercados (de bienes, servicios y factores productivos) se vacían, es decir, la oferta y demanda se igualan; en segundo lugar, las empresas no tienen beneficios extraordinarios; finalmente, las restricciones presupuestarias de los agentes se satisfacen; por ejemplo, el consumidor agota su renta tras su decisión óptima de gasto y ahorro. Hay que destacar que la transición desde el equilibrio inicial al nuevo no se puede estudiar con este tipo de modelos, será necesario recurrir a los modelos macroeconómicos.

Quizá habría que señalar que un tercer pilar de los modelos de equilibrio general computables ha sido la disponibilidad de potentes y eficaces programas de resolución de problemas numéricos, conocidos

como «solvers». Hace tan solo una década era necesario programar las rutinas de resolución para cada modelo específico.

Respecto a las principales ventajas de este tipo de modelos, además de la consistencia que conlleva la fundamentación microeconómica y las estadísticas de contabilidad nacional, se podría destacar su transparencia, flexibilidad y naturaleza estructural. Sin embargo, el requerimiento de utilizar las matrices de contabilidad social y el detallado aparato de programación representa una barrera de entrada al potencial analista en este campo.

Asimismo, en gran parte de los modelos de gran escala muchos parámetros (como los valores de las elasticidades de Armington o las elasticidades de sustitución en las funciones de producción) proceden de la literatura o son «estimaciones de expertos», debido a la imposibilidad de encontrar datos con la necesaria desagregación para estimarlos económicamente. Esta ausencia de validación empírica de ciertos parámetros se apunta como una limitación de este tipo de modelos. En este sentido, conviene señalar que la selección de las especificaciones funcionales (e.g. el tipo de función de producción y sus niveles de anidación) puede resultar más relevante que el valor de las elasticidades.

Otro aspecto a señalar es el papel fundamental que desempeñan las llamadas «reglas de cierre» de los modelos de EGC. Estas reglas están relacionadas con características institucionales de la economía y con interpretaciones del funcionamiento de los mercados. Un ejemplo de las primeras es la existencia de un sistema de tipos de cambio fijo o flexible. El que existan rigideces en el mercado de trabajo o no es un ejemplo del segundo tipo de reglas de cie-

re. Es conveniente realizar un estudio de sensibilidad de cómo se ven afectados los resultados del modelo cuando estas reglas se modifican.

Por último, la mayor parte de las aplicaciones de este tipo de modelos se realizan en un contexto de estática comparativa debido a las dificultades de interpretación y modelización que conlleva considerar un marco dinámico y, sobre todo, la adecuada modelización de los procesos de formación de las expectativas de los agentes económicos. En los modelos dinámicos de tipo recursivo las expectativas de los agentes sobre variables futuras se modelizan de forma exógena, como en el caso del modelo GEM-E3.

2.2. El modelo GEM-E3

El modelo GEM-E3 (*Computable General Equilibrium Model for Economy-Energy-Environment Interactions*) es un modelo computable de equilibrio general de gran escala, multiregional y multisectorial². El modelo mundial que se utilizan en la sección siguiente tiene 18 regiones, unidas por flujos de comercio bilateral, y 18 sectores productivos³.

Los flujos ligados a la actuación del sector público están incluidos con mucho detalle en GEM-E3, como los diversos impuestos, subvenciones y transferencias. El gasto público y su descomposición sectorial se determinan exógenamente, como en gran parte de los modelos de EGC.

El modelo GEM-E3 se ha aplicado a numerosas áreas, desde armonización de impuestos energéticos en Europa (Kouvaritakis *et al.*, 2003) hasta política de cambio climático (Russ *et al.*, 2005) y pertenece a la categoría de modelos conocida como E3 (*energy-economy-environment*), ya que se representa con gran nivel de detalle las interacciones entre la economía, el sistema energético y los aspectos medioambientales. La filosofía que subyace a su desarrollo es completar la modelización de los aspectos económicos de una sociedad con la consideración de la influencia de la energía en el sistema económico y sus efectos medioambientales, con un amplio abanico de medidas de política climática como son impuestos y mercados de comercio de emisiones.

Existen dos versiones principales del modelo GEM-E3: la europea y la mundial. La versión europea se utiliza para estudiar los efectos de política europeas en las economías de la UE⁴. En su última versión veinticuatro economías europeas están modelizadas de forma individual⁵, empleándose sobre todo las estadísticas de Eurostat. El comportamiento del resto del mundo se supone dado.

El modelo mundial GEM-E3 por su parte divide el mundo en dieciocho grandes regiones, incluyendo los grandes países en regiones de un único país, como los Estados Unidos, la Unión Europea, China e India. Los datos proceden del proyecto GTAP⁶ de la universidad americana de Purdue.

² El desarrollo de este modelo se inició al principio de la década de 1990, apoyándose en los fondos del programa JOULE de la Dirección General de Investigación de la Comisión Europea. El consorcio fue liderado por la *National Technical University of Athens* (NTUA), la *Catholic University of Louvain* (KUL) y el *Centre of European Economic Research* (ZEW).

³ Para descripciones detalladas del modelo véase Capros *et al.* (1997) y Van Regemorter (2005).

⁴ Por ejemplo véase en Comisión Europea (2008) el análisis con este modelo de la reciente evaluación de la propuesta de revisión de la Directiva europea sobre el sistema europeo de comercio de emisiones.

⁵ Malta, Luxemburgo y Chipre no están incluidos por su reducido tamaño.

⁶ *Global Trade Analysis Project* (GTAP). Véase <https://www.gtap.agecon.purdue.edu>

3. EL ESCENARIO BASE Y EL ESCENARIO DE REDUCCIÓN

En esta sección se explican los escenarios empleados en la evaluación de la política mundial climática planteada por la Comisión en enero del 2007 (Russ *et al.*, 2007). Se describen los supuestos del escenario base o de referencia y, además, se detalla la forma de construir el escenario de reducción de emisiones.

3.1. El escenario base

El año base del modelo es el 2001. El modelo está calibrado para reproducir en su primer periodo la matriz de contabilidad

social del año 2001 derivada del proyecto GTAP.

El modelo se ejecuta en periodos de cinco años hasta el año 2030, de forma que el PIB y las emisiones de CO₂ reproduzcan las del modelo POLES. En el escenario base de POLES las principales tendencias observadas en las últimas décadas se proyectan hacia el futuro como, por ejemplo, las mejoras en la eficiencia energética, la relativa desmaterialización de las economías desarrolladas y el proceso de convergencia económica de los países en vías de desarrollo. El cuadro n.º 1 representa las tasas de crecimiento para todas las regiones del modelo en el periodo 2005-2030. El cuadro n.º 2 recoge el crecimiento de las emisiones para el mismo periodo.

Cuadro n.º 1

Tasas de crecimiento anuales del PIB por regiones

	2005/2010	2010/2015	2015/2020	2020/2025	2025/2030
Canadá	3,11	2,71	2,38	2,20	1,71
Estados Unidos	3,30	3,05	2,79	2,54	1,86
Australia y Nueva Zelanda	2,54	2,53	2,67	3,02	2,51
Japón	1,63	1,75	1,99	2,50	1,95
UE27	2,16	2,02	1,91	1,84	1,32
Otros países europeos	2,30	2,44	2,69	2,88	2,39
Sur y este del Mediterráneo	4,81	3,96	3,71	3,09	3,84
Antigua Unión Soviética	6,84	5,04	3,76	3,95	2,84
Oriente medio	3,91	3,40	3,29	2,06	5,78
África media	3,90	3,84	4,10	4,73	4,99
Sudáfrica	3,90	4,10	4,16	4,80	4,52
India	5,17	4,71	4,90	4,74	5,06
China	5,98	5,00	4,55	4,24	3,88
Este y sudeste asiático	4,33	3,88	3,51	3,21	2,98
Resto de Asia	4,31	3,89	3,27	3,13	3,25
Méjico y Venezuela	3,75	3,71	4,30	4,62	4,92
Brasil	3,35	3,44	3,44	3,82	4,17
Resto de Latinoamérica	3,42	3,74	3,80	4,17	4,43
Mundo	3,15	2,95	2,83	2,77	2,44

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro n.º 2

Tasas de crecimiento anuales de las emisiones de GEI por regiones

	2005/2010	2010/2015	2015/2020	2020/2025	2025/2030
Canadá	1,33	1,88	1,37	1,25	0,66
Estados Unidos	1,72	2,46	1,60	1,27	0,44
Australia y Nueva Zelanda	-0,20	0,85	0,55	1,05	0,60
Japón	0,26	0,95	1,10	0,93	0,63
UE27	0,87	1,56	0,70	0,57	0,32
Otros países europeos	-0,07	0,64	0,72	1,10	0,70
Sur y este del Mediterráneo	2,85	2,03	2,36	1,35	1,90
Antigua Unión Soviética	2,52	2,97	1,57	0,73	0,04
Oriente medio	3,27	1,51	4,14	0,10	4,28
Africa media	2,27	1,81	2,43	2,47	2,94
Sudáfrica	1,57	1,61	1,97	2,06	2,16
India	4,38	3,53	3,28	3,15	3,28
China	3,56	3,63	3,14	2,06	1,59
Este y sudeste asiático	0,12	1,60	1,51	1,34	1,29
Resto de Asia	2,97	3,84	3,95	4,37	5,29
Méjico y Venezuela	2,27	1,31	2,32	2,38	2,46
Brasil	-2,45	-0,08	0,49	1,31	2,00
Resto de Latinoamérica	0,94	1,20	1,87	2,04	2,37
Mundo	1,94	2,38	2,01	1,53	1,41

Fuente: Elaboración propia.

Es importante señalar el notable aumento de las emisiones mundiales en el periodo 2005-2030, del orden del 60%.

En cuanto a las reglas de cierre del modelo, todos los mercados se suponen competitivos, el capital es móvil entre sectores dentro de una región pero no entre regiones, el saldo del sector público en porcentaje del PIB no cambia tras la política y, finalmente, la balanza por cuenta corriente puede modificarse. Esto último implica que parte del ajuste interno se puede realizar

con financiación del resto del mundo, es decir, con un deterioro de la balanza por cuenta corriente.

3.2. El escenario de reducción

Dos conjuntos de parámetros en el modelo caracterizan la política climática e influyen en los costes de mitigación. El primero de ellos se refiere a los objetivos de reducción de emisiones de GEI y el segundo a los instrumentos de política climática.

En cuanto a los objetivos, se define un escenario de reducción de emisiones mundiales de forma que se pueda alcanzar la meta de que el aumento de temperatura mundial no supere los dos grados centígrados respecto a los niveles preindustriales, objetivo de la UE. El escenario de reducción del modelo GEM-E3 sigue el escenario determinado para el modelo POLES (Gráfico n.º 1). Se observa que la senda de emisiones en el escenario de reducción es muy inferior a la del escenario base.

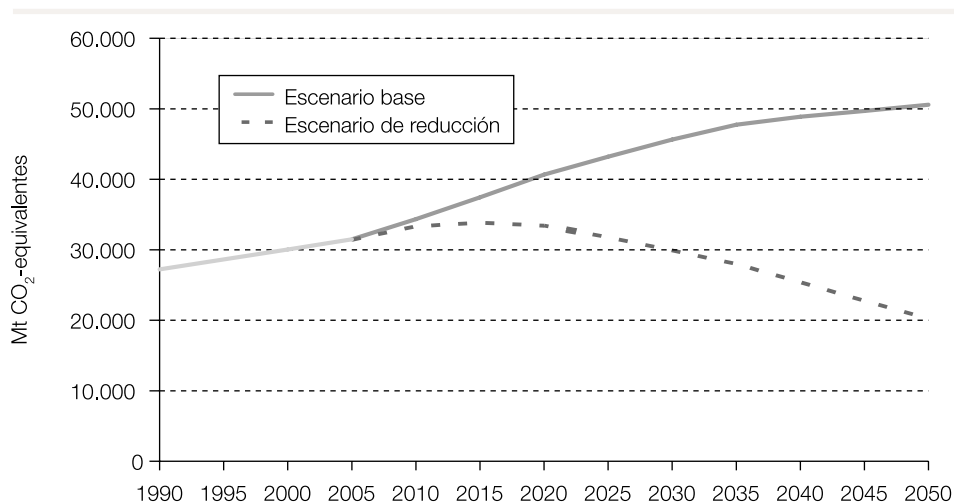
Además de fijarse los objetivos agregados a escala mundial para cada periodo, es preciso repartir los esfuerzos de mitigación entre las regiones del modelo. Esto se ha realizado en esta aplicación a través de un paso intermedio. Así, se definen tres grandes grupos

de países: los del Anejo 1 del Protocolo de Kioto, las economías en vías de desarrollo con elevado crecimiento y un tercer grupo formado por el resto del mundo. El primer grupo tiene un objetivo de reducción de emisiones desde el principio, mientras que el segundo sólo desde el año 2020 y el de países menos desarrollados sólo desde el 2030, y de forma gradual según se van desarrollando. La región menos desarrollada (África media) no tiene objetivo de mitigación.

En el escenario se supone que el grupo de los países del Anejo 1 cumplen con el protocolo de Kioto en el año 2010, en el año 2020 reducen sus emisiones en un 31% respecto a las del año 1990, en un 34% en el año 2025 y un 55% en el año 2030. El objetivo para los países del grupo

Gráfico n.º 1

Emisiones en el escenario base y de reducción (GHG reduction scenario)



Fuente: Russ *et al.* (2007).

Nota: Mt CO₂-equivalentes son las unidades de emisión megatoneladas equivalentes de CO₂.

2 en el año 2020 es que aumenten sus emisiones un 21% respecto a los niveles de 1990. En el año 2025 estabilizan las emisiones absolutas en el mismo nivel del objetivo del 2020 y en el 2030 decrecen casi hasta el nivel del año 1990. El objetivo del grupo 3 en el periodo 2030 es que las emisiones sean un 135% superiores a las de 1990.

El reparto de estos objetivos por regiones en el modelo se ha realizado siguiendo las emisiones históricas, principio conocido como «*grandfathering*». Para el grupo 1 se ha utilizado la media de las emisiones de los años 1990 y 2001, mientras que para el resto de grupos se han utilizado las emisiones del escenario base.

Por otra parte, la medida de política climática empleada es el comercio de emisiones. Los sectores intensivos en energía realizan comercio internacional de permisos. En el modelo estos sectores son el sector eléctrico, el sector de metales ferreos y no ferreos, el sector químico y el sector llamado en el modelo «otros sectores intensivos en energía», que incluye los minerales no metálicos y el sector pasta y papel. Para el resto de sectores el comercio está limitado a las fronteras de la región, es decir, los sectores no intensivos en energía comercian permisos entre sí pero dentro de cada una de las regiones definidas por el modelo. No pueden comprar o vender permisos a otras regiones.

Asimismo, se supone que desde el año 2020 cuatro países del grupo 3 pueden participar en el comercio mundial de emisiones, y por tanto vender permisos de emisión a los países del grupo 1 y 2. Estas regiones son Brasil, resto de Latinoamérica, Sudáfrica y China, que pese a no tener un objetivo de reducir emisiones hasta el año

2030 reducen emisiones desde el año 2020, aminorando los costes de mitigación de los países del resto de grupos.

4. RESULTADOS

En la cuadro n.º 3 se recogen para los años 2020 y 2030 los objetivos de reducción de emisiones (columnas «objetivo») y las reducciones efectivamente realizadas en el escenario de reducción (columnas «escenario»), siempre respecto a las emisiones del escenario base⁷. Casi todas las regiones del grupo 1 y 2 reducen sus emisiones en el escenario menos que sus objetivos respectivos, lo que indica que están comprando permisos al resto del mundo en el mercado internacional de permisos de emisión. La Antigua Unión Soviética en 2020 alcanza su objetivo únicamente con medidas de reducción internas.

En cuanto a las regiones del grupo 3, las cuatro regiones que pueden participar en el mercado internacional en el año 2020 (Brasil, resto de Latinoamérica, Sudáfrica y China) tienen por objetivo las emisiones correspondientes al escenario base. Reducen sus emisiones y venden derechos de emisión a los países de los grupos 1 y 2. China aparece como el principal suministrador de estos permisos pues reduce sus emisiones en el escenario en un 30% respecto al escenario base. En el año 2030 todos los países del grupo 3 tienen un objetivo de reducción del 12% respecto al escenario base y China reduce sus emisiones mucho más allá de su objetivo (en un 33%), vendiendo permisos. India y Sudáfrica tam-

⁷ Obsérvese que los cambios en las emisiones son respecto a las emisiones del escenario base en ese mismo año. En la anterior sección sin embargo se presentaban los objetivos de reducción de emisiones respecto a las emisiones del año 1990.

Cuadro n.º 3

Emissiones de GEI objetivo y en el escenario de reducción

		2020		2030	
		Emisiones GEI		Emisiones GEI	
		objetivo	escenario	objetivo	escenario
Grupo 1 (Anejo I)	Estados Unidos	-50	-40	-64	-52
	Canadá	-46	-36	-61	-50
	UE27	-37	-28	-52	-42
	Otros países europeos	-25	-22	-46	-41
	Antigua Unión Soviética	-38	-38	-53	-49
	Australia y Nueva Zelanda	-33	-26	-51	-40
	Japón	-37	-28	-54	-42
Grupo 2	Méjico y Venezuela	-23	-18	-45	-34
	Sur y este del Mediterráneo	-23	-22	-45	-35
	Oriente medio	-23	-22	-45	-39
	Este y sudeste asiático	-23	-21	-45	-36
Grupo 3	Brasil	0	-5	-12	-15
	Resto de Latinoamérica	0	-3	-12	-13
	China	0	-30	-12	-33
	Sudáfrica	0	-5	-12	-23
	India	0	0	-12	-23
	Resto de Asia	0	1	-12	-14
Africa media		0	2	0	6
Mundo		-24	-26	-37	-37

Fuente: Elaboración propia.

bién reducen sus emisiones significativamente por debajo de las de sus objetivos respectivos.

Los costes de reducir las emisiones de GEI y situarse en un escenario de emisiones compatible con el objetivo del aumento limitado de los dos grados centígrados se pueden medir con varios indicadores. En primer lugar, se considera el coste marginal de reducción, es decir, el coste que supone reducir la última tonelada de CO₂. Asimismo, se analizan el cambio en el bienestar de los consumidores y el cambio en el PIB respecto a los niveles respectivos en el es-

cenario base. El cambio en el bienestar o utilidad del consumidor representativo del país⁸ es posiblemente la medida natural del efecto de políticas o *shocks* en modelos de equilibrio general. El cambio en el PIB es una medida del grado de ajuste macroeconómico necesario para lograr la meta de reducción de emisiones.

El cuadro n.º 4 recoge el valor de estas variables en 2020 y 2030 para todas las re-

⁸ La utilidad del consumidor es una función del consumo del hogar, el ocio y el valor del consumo futuro (a través del ahorro)

Cuadro n.º 4

**Efectos sobre el bienestar y el PIB, respecto al escenario base
(en %)**

		2020		2030	
		Bienestar	PIB	Bienestar	PIB
Grupo 1 (Anejo I)	Estados Unidos	-1,4	-1,9	-3,4	-4,5
	Canadá	-2,5	-2,8	-6,0	-7,0
	UE27	-2,3	-2,1	-5,7	-5,0
	Otros países europeos	-1,2	-1,1	-2,9	-3,4
	Antigua Unión Soviética	-3,3	-4,5	-7,7	-10,3
	Australia y Nueva Zelanda	0,1	-1,4	-0,9	-4,5
	Japón	-1,0	-1,1	-3,0	-3,1
Grupo 2	Méjico y Venezuela	-1,6	-1,0	-5,1	-3,7
	Sur y este del Mediterráneo	-1,1	-1,7	-4,2	-5,7
	Oriente medio	-1,2	-1,8	-4,6	-5,3
	Este y sudeste asiático	-0,7	-1,1	-2,3	-3,4
Grupo 3	Brasil	-0,3	-0,6	-1,5	-2,2
	Resto de Latinoamérica	-0,3	-0,6	-1,4	-2,2
	China	0,3	-0,5	-0,8	-2,5
	Sudáfrica	0,7	-0,3	1,5	-1,0
	India	-0,9	-1,0	-1,6	-2,4
	Resto de Asia	-0,3	-0,5	-1,2	-1,9
Africa media		-0,8	-0,6	-2,0	-2,5
Mundo		-1,2	-1,7	-3,4	-4,2
Coste marginal		40,9		83,4	

Nota: Coste marginal en US\$ por tonelada de GEI-equivalente.

Fuente: Elaboración propia.

giones del modelo. En cuanto al coste marginal de reducción, éste se estima en 41 US\$/tCO₂-eq para 2020, duplicándose en el año 2030, debido a la mayor restricción de emisiones y a que la mayor parte del mundo tiene un objetivo de mitigación.

En cuanto a los cambios en bienestar de las regiones del grupo 1 y 2, en el año 2020 estos se sitúan entre una pérdida del 1% y el 3% respecto al bienestar del escenario base, salvo para la región Australia y Nueva Zelanda, que ve su nivel de bienestar casi inalterado. Las mayores dismi-

nuciones relativas de bienestar se dan en la Antigua Unión Soviética (3,3%), en Canadá y en la UE. Para el año 2030 las caídas de bienestar son mayores, llegando a casi el 8% en la Antigua Unión Soviética y en el entorno del 6% para Canadá y la UE. Si se anualizan estos cambios desde el año 2005, las reducciones de bienestar están en un rango del 0,25% al 0,35%.

Por su parte, en el año 2020 todas las regiones del grupo 3, salvo China y Sudáfrica, tienen una caída de su nivel de bienestar respecto al escenario base debido a

que la actividad económica mundial es menor. China y Sudáfrica mejoran su bienestar gracias a los ingresos que obtienen por la venta de permisos de emisión. En el año 2030, el modelo GEM-E3 proyecta unas disminuciones mayores de bienestar, salvo para Sudáfrica que continúa teniendo una mejora respecto al escenario base.

El ajuste macroeconómico necesario para alcanzar la meta mundial de reducción de emisiones se puede aproximar con el cambio en el PIB. Para la economía mundial el PIB se reduce en 1,2% y en un 3,4% respecto al escenario base en 2020 y 2030, respectivamente. En términos anualizados estas tasas se traducen en una disminución del 0,11% y 0,17%, respectivamente⁹.

Se estima que el PIB de la UE en el año 2020 está un 2,1% por debajo del nivel en el escenario base, que en términos anualizados para el periodo 2005-2020 se traduce en una reducción del 0,14%. Para el año 2030 la caída del PIB es del 5%, y del 0,21% en términos anualizados.

5. CONCLUSIONES

Este artículo ha ilustrado el uso de un modelo de equilibrio general computable, el modelo mundial GEM-E3, para computar el orden de magnitud de los costes de reducir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, de forma que se pueda seguir una senda de emisiones mundiales compatible con el objetivo de la UE de limitar el aumento de la temperatura media mundial a dos grados.

El principal resultado del ejercicio aplicado es que el coste marginal sería de unos 40\$ por tonelada de CO₂ equivalente en el año 2020 y del doble en el año 2030. La disminución en el bienestar en términos anualizados, respecto al escenario base, se sitúa en un 0,1% en 2020 y en un 0,15% para el año 2030. El cambio en el PIB mundial anualizado sería de un 0,11% en el año 2020 y de un 0,17% para el año 2030. Estas cifras están dentro del rango de estimaciones recogidas en el último Informe de Evaluación del IPCC (Peace y Weyant, 2008).

Antes de finalizar, hay que destacar algunas de las limitaciones metodológicas del análisis realizado a considerar cuando se interpretan los resultados. En primer lugar, las estimaciones de coste pueden tener un cierto sesgo dado que el modelo supone que no existen imperfecciones o ineficiencias de ningún tipo. En segundo lugar, como extensión se podría realizar un análisis de sensibilidad de la influencia de los supuestos del modelo en los resultados (véase Weyant (2000) y Peace y Weyant (2008)), incluyendo para el caso de modelos de EGC las reglas de cierre (e.g. el grado de movilidad del capital o la posibilidad o no de modificar los saldos por cuenta corriente).

Por último, y no por ello menos importante, hay que realizar una reflexión sobre la conveniencia de usar este tipo de modelos de tipo marginalista para evaluar los efectos de políticas que conllevan un gran cambio en la intensidad de emisiones de la economía.

Desarrollos adicionales del modelo conciernen la inclusión de un módulo eléctrico con las principales tecnologías de generación (incluyendo las renovables) así como la

⁹ Estas cifras se pueden comparar con la media de la tasa de crecimiento del PIB mundial en el periodo 1961-2006, que ha sido del 3,66%.

mejora en la modelización de las medidas y políticas de eficiencia energética. En este sentido, es un reto intentar mejorar los modelos de equilibrio general de forma que

permitan una modelización realista de políticas que afectan al comportamiento de los agentes económicos más allá de la influencia de los precios.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERCK, P. Y HOFFMANN, S. (2002): «Assessing the employment impacts of environmental and natural resource policy», *Environmental and Resource Economics* (22): 133-156.
- CAPROS, P. (1997): «The GEM-E3 model: Reference Manual». NTUA, E3M-Lab, Athens, disponible en <http://www.e3mlab.ntua.gr/manuals/GE-Mref.PDF>
- CRUIQU, P. (1996): «Prospective Outlook on Long-term Energy Systems». EUR 17358 EN, European Commission, Bruselas.
- COMISIÓN EUROPEA (2007): «Limiting Global Climate Change to 2 degrees Celsius. The way ahead for 2020 and beyond». Brussels, http://ec.europa.eu/environment/climat/future_action.htm
- (2008): «Commission staff working document accompanying document to the Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2003/87/EC so as to improve and extend the EU greenhouse gas emission allowance trading system Impact Assessment», http://ec.europa.eu/environment/climat/emission/pdf/com_2008_16_ja_en.pdf
- HIDALGO, I. (2005): «Introducción a los modelos de sistemas energéticos, económicos y medioambientales: descripción y aplicaciones del modelo POLES». *Revista de Economía Mundial* (13), pp 33-75.
- IPCC (2007): «Climate Change 2007: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment». Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104.
- KOUVARITAKIS, N., PAROUSSOS, L. Y VAN REGEMORTER, D. (2003): «The macroeconomic evaluation of energy tax policies within the EU, with the GEM-E3-Europe model». Estudio para la DG TAXUD de la Comisión Europea, http://ec.europa.eu/taxation_customs/resources/documents/economy/economy_taxation_final_report.pdf.
- PEACE, J. Y WEYANT, J. (2008): «Insights not numbers: the appropriate use of economic models». White paper del The Pew Center on Global Climate Change, <http://www.pewclimate.org/white-paper/economic-models-are-insights-not-numbers>.
- ROSON, R. (2007): «Introducing Imperfect Competition in CGE Models: Technical Aspects and Implications». *Computational Economics* (28), 29-49.
- RUSS, P., CISCAR, J.C. Y SZABÓ, L. (2005): «Analysis of Post-2012 Climate Policy Scenarios with Limited Participation». IPTS Technical Report Series EU 21758 EN <ftp://ftp.jrc.es/pub/EURdoc/eur21758en.pdf>
- RUSS, P., WIESENTHAL, T., VAN REGEMORTER, D. Y CISCAR, J.C. (2007): «Global Climate Policy Scenarios for 2030 and beyond – Analysis of Greenhouse Gas Emission Reduction Pathway Scenarios with the POLES and GEM-E3 models». JRC Reference Report, EUR 23032 EN, <http://ipts.jrc.ec.europa.eu/publications/pub.cfm?id=1510>.
- SHOVEN, J.B. Y J. WHALLEY (1992): «Applying General Equilibrium». Cambridge: Cambridge University Press.
- VAN REGEMORTER, D. (2005): «The GEM-E3 model, model description». <http://www.gem-e3.net/download/GEMmodel.pdf>
- WEYANT, J.P. (2000): «An introduction to the economics of climate change policy», The Pew Center on Global Climate Change, http://www.pewclimate.org/projects/econ_introduction.cfm.