Universidad de Buenos Aires
Facultad de Ciencias Económicas
Biblioteca "Alfredo L. Palacios"

Cambio climático e incentivos a la innovación en tecnologías limpias: ¿puede más mercado corregir la mayor falla de mercado de la historia?

Gutman, Verónica

2007

Cita APA: Gutman, V. (2007). Cambio climático e incentivos a la innovación en tecnologías limpias: ¿puede más mercado corregir la mayor falla de mercado de la historia?. Buenos Aires : Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Económicas. Escuela de Estudios de Posgrado

Este documento forma parte de la colección de tesis de posgrado de la Biblioteca Central "Alfredo L. Palacios". Su utilización debe ser acompañada por la cita bibliográfica con reconocimiento de la fuente.
Fuente: Biblioteca Digital de la Facultad de Ciencias Económicas - Universidad de Buenos Aires

Tesis Posgrado 001502/0159

MAESTRÍA en ECONOMÍA

Facultad de Ciencias Económicas
Universidad de Buenos Aires

TESIS:

"Cambio Climático e incentivos a la innovación en tecnologías limpias: ¿puede más mercado corregir la mayor falla de mercado de la historia?"

Verónica Gutman

Directores de Tesis:

Martina Chidiak

Eduardo Scarano

Septiembre de 2007

CONTENIDOS

Introducción 1

Capítulo 1: El problema del Cambio Climático 8
1.1 Introducción 8
1.2 El "efecto invernadero aumentado" 8
1.3 Los riesgos del Cambio Climático: la evidencia científica 10
1.4 Esfuerzos realizados hasta el momento para mitigar el Cambio Climático 14
1.5 El estado actual de las negociaciones internacionales 17
1.6 Resumen 20

Capítulo 2: Marco conceptual: la Economía del Cambio Climático 22
2.1 Introducción 22
2.2 Caracterización económica del problema del Cambio Climático 23
2.3 Análisis de los impactos del Cambio Climático sobre el bienestar humano 26
2.4 Costos del Cambio Climático y costos y beneficios de la mitigación de GEI 28
2.5 Las incertidumbres que plantea el Cambio Climático 34
2.6 La elección de instrumentos para la mitigación de GEI 36
2.6.1 Eficiencia estática 38
2.6.2 Eficiencia dinámica 42
2.6.3 La relevancia de la flexibilidad en la elección de políticas climáticas 45
2.6.4 Evidencia empírica 46
2.7 La importancia de la innovación tecnológica 49
2.8 Resumen 58

Capítulo 3: Mercados de carbono e incentivos para la innovación y la inversión en tecnologías más limpias 61
3.1 Introducción 61
3.2 Los mercados de carbono 62
2.2.1. Mercados de Permisos 66
2.2.2 Mercados basados en proyectos 75
2.2.3 Proyecciones de precios para el primer período de compromiso del PK (2008-2012) 79
3.3 Incentivos para la innovación y la inversión en tecnologías limpias 82
3.3.1 Marco teórico: la Teoría de la inversión de la *q* de Tobin 82
3.3.2 El modelo 85
3.3.3 La importancia de lograr horizontes de largo plazo en materia de compromisos de reducción de emisiones 95
3.4 Resumen 97

Conclusiones 100

Bibliografía 109

Anexo matemático 114

Introducción

El presente trabajo se inspira en el problema del Cambio Climático, es decir, los cambios en el clima provocados por la acumulación en la atmósfera de gases de efecto invernadero (GEI) producidos por el hombre (CMNUCC, 1992).

En un contexto donde se considera que la innovación tecnológica es clave para controlar las emisiones de GEI, el trabajo busca analizar, específicamente, los incentivos que las señales de precios generadas en los recientemente creados "mercados de carbono" brindan a las firmas privadas para invertir en investigación y desarrollo (I&D) orientada a crear tecnologías más limpias.

El Cambio Climático se está volviendo cada vez más evidente a raíz de la mayor frecuencia de eventos naturales extremos. Los estudios que alertan sobre las consecuencias potencialmente catastróficas que podrían evidenciarse de continuar el patrón actual de emisiones de GEI (fundamentalmente, de dióxido de carbono -CO2-) a la atmósfera se multiplican. Un reciente informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés)[1] estima que, durante el próximo siglo, la temperatura promedio del planeta aumentará entre 1,1 y 6,4 grados como consecuencia de la acumulación de GEI. Esto ocasionará, entre otras cosas, aumentos en la frecuencia de las olas de calor y en la intensidad de los ciclones, mayores precipitaciones e inundaciones e incrementos en el nivel del mar (IPCC, 2007). Por su parte, el llamado "Informe Stern" (Stern, 2006), un estudio encargado por el gobierno británico y dirigido por el ex economista jefe del Banco Mundial, Nicholas Stern, sostiene que si la comunidad internacional no disminuye las emisiones de GEI a la atmósfera, en las próximas décadas los efectos del cambio climático podrían costar a las economías del mundo más que las dos guerras mundiales y desatar una crisis equivalente a la Gran Depresión de 1929, con 200 millones de víctimas por sequías e inundaciones y la desaparición del 40% de la fauna y flora esencial para los ecosistemas del planeta. Este informe constituye la contribución más completa al debate sobre el Cambio Climático desde el punto de vista económico y presenta evidencia central para el presente trabajo.

El Cambio Climático es considerado por muchos "la mayor falla de mercado" que se

[1] El IPCC es la "autoridad científica" en esta temática. Fue creado en 1988 por la Organización Mundial del Clima y el Programa de Naciones Unidas para el Medioambiente (PNUMA).

haya visto jamás (Stern, 2006; Kolstad, 2001). El mercado falla en generar y asignar una cantidad de emisiones de GEI socialmente óptima debido a que éstas constituyen una externalidad negativa derivada, históricamente, de la quema de combustibles fósiles para la producción industrial en los países desarrollados (PDs). Es decir, no existe, sin intervención, un precio de mercado para las emisiones de GEI.

La preocupación global por los efectos potenciales del Cambio Climático está creciendo notablemente[2]. Desde la primera Conferencia Mundial del Clima celebrada en Ginebra (Suiza) en 1979 se han sucedido varios intentos por frenar las emisiones globales de GEI. Los más notables han sido la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC) de 1992 y la firma del Protocolo de Kyoto (PK) a la CMNUCC en 1997, con su efectiva entrada en vigencia en febrero de 2005, a pesar de la negativa de EE.UU. a ratificar. El PK asigna límites de emisión a los PDs participantes para el período 2008-2012, ofreciéndoles la flexibilidad de poder cumplir con sus metas mediante la compra (o venta) de permisos de emisión provenientes de otros PDs o bien mediante la inversión en proyectos que reduzcan las emisiones de GEI en países en desarrollo (PEDs).

El problema que plantea el Cambio Climático es que posee ciertas características económicas que vuelven muy difícil el diseño e implementación de políticas óptimas. Es el resultado de una externalidad negativa de dimensión internacional, involucra el largo plazo -y, por ende, a las generaciones futuras-, plantea numerosas incertidumbres e impone una desigual distribución de costos y beneficios económicos y políticos a escala intertemporal y entre regiones. En este contexto, el principal desafío consiste en cómo definir la mejor manera de involucrar a todas las naciones y a sus ciudadanos en un esfuerzo global de largo plazo que movilice recursos y tecnología para proteger el clima global pero que garantice, al mismo tiempo, un crecimiento económico sustentable.

El crecimiento económico -basado esencialmente en el uso de combustibles fósiles para la generación de energía- tiene enormes impactos sobre la acumulación de GEI

[2] Cabe aclarar que existe aún cierto debate científico acerca de las causas del Cambio Climático. En particular, algunos científicos discuten el rol de las actividades humanas y la posibilidad de detenerlo cambiando los patrones productivos y de consumo actuales ya que consideran que es un fenómeno cíclico derivado de factores naturales -por ej., manchas solares- sobre los cuales el hombre no tiene posibilidad de incidencia alguna. Tal visión es presentada, por ejemplo, en el documental producido por Martin Durkin en 2007 orientado a refutar la teoría del calentamiento global antropogénico. No obstante, el presente trabajo parte del supuesto de que el Cambio Climático tiene un origen fundamentalmente humano, en base a lo que sostiene la gran mayoría de la comunidad científica internacional y los 191 países que ratificaron la CMNUCC.

en la atmósfera. Sin embargo, nadie está dispuesto a aceptar que la solución al problema del Cambio Climático radique en la reducción de las tasas de crecimiento globales. Por lo tanto, lo que se precisa es hallar nuevas maneras de reconciliar la actividad económica con la protección ambiental.

Tanto la literatura como el debate político internacional recientes sugieren que la mejor forma de lograr esta reconciliación es mediante el desarrollo y aplicación de nuevas tecnologías menos intensivas en GEI (IPCC, 2007; Stern, 2006; Schellnhuber, 2006; G8, 2005). Sin embargo, al considerar el potencial de la innovación tecnológica como posible solución al problema del Cambio Climático surge una nueva problemática: la existencia de dos fallas de mercado que hacen que la inversión privada en I&D orientada a crear nuevas tecnologías más limpias sea subóptima. Por un lado, la externalidad negativa de las emisiones de GEI. Dado que dichas emisiones no tienen un precio de mercado, ni las firmas ni los consumidores tienen incentivo a reducirlas (y, por lo tanto, habría poco mercado para nuevas tecnologías más limpias). Por el otro, cuando se produce una innovación y ésta se vuelve de dominio público se producen "derrames" (*spillovers*) de conocimiento y, por ello, no todos los beneficios derivados de la innovación pueden ser apropiados por el innovador (Popp, 2004).

En este contexto, la principal pregunta de investigación que guió el desarrollo de este trabajo es la siguiente: ¿Cómo se pueden brindar incentivos adecuados para que las empresas privadas intensivas en GEI desarrollen y/o incorporen tecnologías más limpias para reducir sus emisiones (y contribuyan a corregir la externalidad negativa que imponen sobre el uso de la atmósfera)? Este interrogante, claro está, compete tanto a las políticas nacionales como al marco internacional, puesto que el Cambio Climático constituye un problema global que requiere de la acción concertada internacional en base a compromisos voluntarios nacionales.

Si bien existen diferencias entre invertir en bienes de capital más limpios (adquisición) e invertir en I&D para crear bienes de capital más limpios (innovación), por motivos de simplicidad analítica en este trabajo se estudiará el comportamiento de firmas privadas donde ambas actividades se funden. Es decir, se limitará el análisis a grandes empresas pertenecientes a sectores intensivos en energía/emisiones de GEI en países industrializados (firmas productoras de servicios y *commodities* tales como energía eléctrica, petróleo, gas, pulpa y papel, metales, productos agrícolas y forestales, etc.) que son, a su vez, creadoras y proveedoras de tecnología a nivel internacional. De esta manera, el trabajo procurará analizar los incentivos que deben

brindarse a estas empresas para que sean innovadoras en materia ambiental (y adopten, por ende, procesos productivos menos contaminantes).

La literatura sobre regulación ambiental óptima sugiere que el mecanismo más eficiente a nivel nacional para lograr que las firmas internalicen los daños provocados por sus emisiones de GEI y, a la vez, incentivar la innovación tecnológica es mediante la imposición de un impuesto (pigouviano) a las emisiones (Kolstad, 2001; Azqueta, 2002; Chidiak, 2001). Sin embargo, este mecanismo "ideal" en la teoría es muy difícil de implementar en la práctica, debido a las fuertes resistencias que enfrenta por parte del sector privado y a la necesidad de coordinar la tasa del impuesto a nivel internacional. En segundo lugar, se ubica el comercio de permisos de emisión, un mecanismo que involucra el establecimiento de metas cuantitativas y que también supone el pago de un precio por tonelada de GEI emitida. Este sistema está cobrando importancia creciente en el marco de la entrada en vigencia del PK. Así lo demuestra el buen desempeño que han tenido los "mercados de carbono" surgidos en este marco a partir del año 2002 (EU ETS, NSW GGAS, CCX, UK ETS).

En este contexto, surgen algunas preguntas de investigación adicionales. En primer lugar, ¿qué incentivos puede brindar un sistema de comercio de permisos de emisión para que las firmas privadas realicen esfuerzos de innovación tecnológica en materia ambiental? Esta pregunta se relaciona con la posibilidad de que las firmas perciban algún tipo de beneficio al participar en un sistema de este tipo y con la identificación de los mecanismos que permitirían a una firma obtener beneficios por reducir emisiones e innovar.

En segundo lugar, cabe preguntarse acerca de las enseñanzas de la evidencia empírica reciente relativa a los mercados de carbono: ¿Funcionan adecuadamente dichos mercados? ¿Pueden generar señales de precios idóneas para corregir la externalidad negativa que imponen las firmas con sus emisiones de GEI? ¿Puede, en definitiva, corregirse la mayor falla de mercado de la historia, el Cambio Climático, mediante más mercado?

La premisa básica de este estudio -en línea con la literatura de economía ambiental revisada- es que un sistema global de mitigación del Cambio Climático basado en el comercio de permisos de emisión (que arroje un precio único de largo plazo para los GEI que se emitan) puede brindar un marco adecuado de incentivos para que el sector privado sea innovativo y reduzca en consecuencia sus emisiones de GEI. Esto se

debe a que, en un contexto como éste, el desarrollo de nuevas tecnologías más limpias le permitirá a las firmas, por un lado, cumplir con sus compromisos de mitigación en el tiempo a un menor costo y, por el otro, obtener ingresos extra en cada período derivados de la venta de permisos de emisión en el mercado.

En otras palabras, lo que este trabajo plantea es que si se establece un mercado global de permisos donde se comercialicen "derechos" a emitir existirá un incentivo a invertir en I&D orientada a crear tecnologías menos emisoras de GEI pues, a través de éstas, las firmas podrán disminuir los costos de cumplir con sus metas de reducción de emisiones en el tiempo y, a la vez, generar nuevos ingresos por la venta en el mercado de un nuevo producto: los permisos de emisión. De más está decir que, con un sistema de este tipo, cada país deberá lidiar con la existencia de ganadores y perdedores, pues mientras que las empresas innovadoras que logren desarrollar tecnologías más limpias y reducir así sus costos de mitigación de GEI se posicionarán con ventajas competitivas frente a las firmas no innovativas y con importante stock de capital hundido, estas últimas posiblemente deban cerrar.

No obstante, para que este sistema funcione, es preciso que los precios "del carbono" alcancen valores suficientemente altos y que brinden señales de largo plazo para la inversión, de forma tal de que se cubra, al menos, una buena proporción del período de amortización del capital fijo involucrado. Es decir, la inversión en bienes de capital (edificios, plantas energéticas, complejos industriales, etc.) tiene una larga vida útil (de varias décadas). Por lo tanto, si no se cree que las políticas climáticas serán permanentes en el tiempo, los empresarios no incurrirán en gastos para desarrollar e introducir nuevas tecnologías más limpias -salvo casos aislados de compromiso altruista con el medio ambiente-. El resultado puede ser una sobre inversión en infraestructura duradera intensiva en carbono que volverá mucho más difícil y cara la reducción de emisiones en el futuro (Stern, 2006). En otras palabras, para ser incorporadas en las decisiones de inversión de las firmas privadas, las señales de precios generadas en los mercados necesitan estar alineadas con los tiempos de rotación del capital fijo involucrado en tales decisiones (de muy largo plazo, en algunos casos).

Como ya se mencionó, el PK se basa en metas cuantitativas de emisión con comercio de permisos. Sin embargo, debido a las múltiples incertidumbres políticas que rodean su futuro, y al plazo relativamente breve de los compromisos que involucra (2008-2012), su continuidad está en duda. Por lo tanto, el PK no genera señales de largo

plazo (es decir, precios futuros del carbono) con un horizonte temporal suficiente como para dar un salto cualitativo en materia de incentivos a la inversión privada agregada dirigida al desarrollo de tecnologías más limpias.

Este trabajo no pretende realizar una evaluación crítica del Protocolo de Kyoto. Su objetivo es mucho más modesto: busca poner el foco en un tema clave para superar la actual encrucijada en materia de Cambio Climático que radica en otorgar incentivos adecuados a las empresas privadas para que éstas modifiquen sus patrones productivos e innovativos.

El trabajo involucra una puesta en contexto del problema, una revisión de literatura y un análisis teórico aplicado (un modelo de comportamiento de una firma emisora de GEI que participa en un sistema de mitigación basado en el comercio de permisos y que elige entre realizar o no esfuerzos de I&D para desarrollar tecnologías menos contaminantes).

En el Capítulo 1, la investigación comienza con una presentación del problema del Cambio Climático y sus peligros potenciales según la evidencia científica disponible. A continuación, se repasan los esfuerzos realizados hasta el momento para mitigar el Cambio Climático -esencialmente, la CMNUCC y el PK- y el estado actual de las negociaciones internacionales sobre el tema. En este punto, se destaca que, a pesar del panorama relativamente desalentador que éstas exhiben, en la práctica está cobrando importancia creciente el comercio de permisos de emisión en los emergentes “mercados de carbono”.

Seguidamente, el Capítulo 2 presenta el marco conceptual que contextualiza esta investigación: la “Economía del Cambio Climático”, una rama de la Economía Ambiental que procura diagnosticar el trasfondo económico del problema del Cambio Climático y ofrecer análisis tanto positivos como normativos para resolverlo. Se realiza, entonces, una caracterización económica del problema y se revisa la literatura que analiza sus impactos sobre el bienestar humano, los costos y beneficios de la mitigación de GEI, las incertidumbres que plantea el Cambio Climático y la elección de instrumentos económicos para la mitigación de GEI. En dicha discusión, se destaca la importancia de la flexibilidad espacio-temporal para resolver el problema al menor costo posible. Asimismo, se dedica una subsección especial para analizar la relevancia de la innovación tecnológica como herramienta para mitigar el Cambio Climático.

El Capítulo 3 analiza los incentivos que los "mercados de carbono" pueden brindar a las empresas privadas para que éstas inviertan en innovación y desarrollo de tecnologías más limpias. En la primera sección, se describen las características y el funcionamiento de estos nuevos mercados y se presentan algunas proyecciones de precios para el período 2008-2012. La siguiente sección presenta un modelo de optimización dinámica de una firma emisora de GEI. Se considera aquí el comportamiento de una empresa oligopólica *á la* Bertrand que pertenece a un sector intensivo en GEI y que debe cumplir con metas de reducción de emisiones pues participa de un sistema de comercio de permisos. Se analiza, entonces, a través de ecuaciones de inversión basadas en la Teoría de la *q* de Tobin (1969), qué incentivos enfrenta esta firma para ser innovadora en materia ambiental. El modelo introduce dentro del problema de optimización intertemporal tanto consideraciones ambientales como de innovación orientada al desarrollo de tecnologías menos intensivas en GEI. En este marco, se muestran cuáles son las potenciales ganancias que podría obtener una firma por innovar y participar en mercados de permisos. La teoría de Tobin, como es sabido, plantea que la tasa de inversión de una firma privada es función de *q*, el cociente entre su valor de mercado y el costo de reposición de sus activos. De esta manera, al enmarcar el modelo dentro la teoría de la *q* en lugar de hacerlo dentro la teoría de inversión neoclásica usualmente utilizada para abordar problemas microeconómicos, el modelo vincula formalmente los esfuerzos de innovación ambiental realizados por una firma privada emisora de GEI con posibles cambios en su valuación de mercado en el tiempo. Por último, se presentan algunas reflexiones relacionadas con la importancia de que existan señales de largo plazo en los mercados de carbono para incentivar a las firmas a invertir en I&D.

Finalmente, se presentan las conclusiones y un Anexo matemático relacionado con el modelo del capítulo 3.

Capítulo 1: El problema del Cambio Climático

1.1 Introducción

En este primer capítulo se describe el problema del Cambio Climático desde una perspectiva ecológica. Se comienza explicando en qué consiste el llamado "efecto invernadero aumentado" y, en segundo lugar, se comentan cuáles son los peligros potenciales de la concentración excesiva de GEI en la atmósfera de acuerdo a la evidencia científica disponible.

Finalmente, en las dos últimas secciones se repasan los esfuerzos realizados hasta el momento para mitigar el Cambio Climático -esencialmente, la CMNUCC y el PK- y se comenta cuál es el estado actual de las negociaciones internacionales sobre el tema, anticipando que el comercio de permisos de emisión está cobrando importancia creciente.

1.2 El "efecto invernadero aumentado"

El clima global está determinado tanto por factores naturales como humanos. La Tierra absorbe aproximadamente dos tercios de la radiación solar que recibe (refleja el resto) y esta absorción está determinada por los diferentes componentes del sistema climático (atmósfera, océano, hielo, tierra, flora y fauna). En el largo plazo, esta absorción está balanceada por la radiación saliente de la tierra y la atmósfera (IPCC, 2001).

Los factores naturales que afectan el balance entre la energía absorbida y emitida por la tierra son dos. El primero son los cambios producidos en las emisiones de energía del sol de acuerdo al ciclo solar de 11 años y el segundo es el llamado "efecto invernadero", es decir, el efecto "de trampa de calor" producido por la concentración de gases en la atmósfera. Los principales gases naturales de efecto invernadero son el vapor de agua (el principal contribuyente), el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O) y el ozono (O_3).

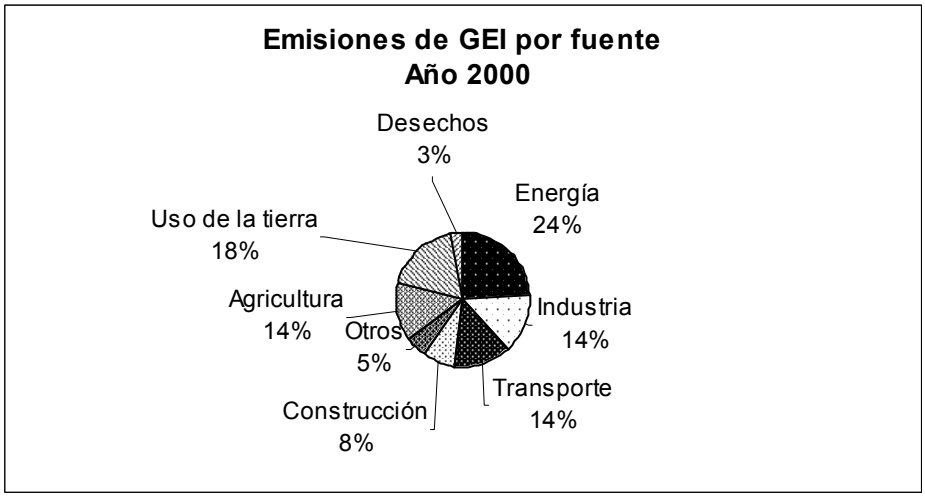
El efecto invernadero es una condición natural de la atmósfera de la Tierra y, de hecho, es lo que mantiene al planeta lo suficientemente cálido como para ser habitable. Sin embargo, la actividad humana genera mayores concentraciones de estos gases naturales así como emisiones de gases industriales fluorados -

clorofluorocarbonos (CFCs), hidrocarbonos fluorados (HFC), hidrocarburos perfluorados (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF6)-, provocando un "efecto invernadero aumentado" que puede derivar en cambios en el clima (aumentos en la temperatura global, cambios en el régimen de precipitaciones, humedad del suelo y nivel del mar, derretimiento de los cascos polares, etc.) (Chidiak, 2001).

El dióxido de carbono es el principal GEI antropogénico -explica el 60% de las concentraciones de GEI provocadas por el hombre- y es seguido por el metano, con el 20%. La producción y uso de combustibles fósiles explica tres cuartos de las emisiones antropogénicas de CO2, así como también las emisiones de metano y óxido nitroso. Por su parte, los procesos industriales producen fundamentalmente halocarbonos (CFCs, HFCs y PFCs) y hexafluoruro de azufre y los gases de combustión, ozono. Otras actividades humanas que poseen efecto potencial para afectar la temperatura global y provocar cambios en el clima son la deforestación y la desertificación, que modifican la cantidad de energía solar absorbida por la Tierra.

El principal sector económico emisor de GEI es la industria de generación eléctrica, que contribuye con el 24% del total. Dentro de ella, la fuente de energía más sucia (pero, a la vez, más económica) es el carbón. La segunda fuente de emisiones es la deforestación/desertificación, que contribuye con el 18%. En tercer lugar, se ubican el sector transporte, la agricultura y la industria, cada uno explicando el 14% de las emisiones totales. Finalmente, se ubica la construcción con el 8% de las emisiones, seguida por los desechos (basura), con el 3% (Stern, 2006) (valores para el año 2000).

Gráfico 1



Fuente: Stern (2006)

1.3 Los riesgos del Cambio Climático: la evidencia científica

En el año 2005 tuvo lugar en el Reino Unido una conferencia internacional llamada "Evitando el Cambio Climático: un simposio científico sobre la estabilización de GEI", en la cual se redefinió la conexión entre la concentración de GEI en la atmósfera y el aumento de temperatura máximo a partir del cual ya no podrán evitarse los efectos más serios del calentamiento global. El objetivo de esta Conferencia fue reunir los resultados de las últimas investigaciones mundiales acerca del esfuerzo que sería necesario realizar para alcanzar el objetivo de la CMNUCC de 1992: "lograr la estabilización de las concentraciones de GEI en la atmósfera a un nivel tal que se prevenga una interferencia antropogénica peligrosa sobre el sistema climático". Básicamente, en el seminario se exploraron dos cuestiones: cuáles serían los impactos principales derivados de diferentes niveles de Cambio Climático para distintas regiones y sectores y para el mundo en su conjunto y qué opciones tecnológicas existen para alcanzar la estabilización de GEI en diferentes niveles, tomando en consideración costos e incertidumbres.

Entre las conclusiones a las que se arribaron, la más significativa fue la obtención de una nueva definición del vínculo entre la concentración de GEI en la atmósfera y el aumento en los niveles de temperatura global. Previamente, el IPCC había concluido que podrían evitarse las consecuencias más dramáticas del Cambio Climático si la temperatura global promedio no aumentaba más que 2°C respecto de los niveles pre-industriales (1,5°C respecto de los niveles actuales), lo cual podría ocurrir si las concentraciones de GEI no superaban las 550 partes por millón (ppm)[3]. Sin embargo, en la Conferencia mencionada se concluyó que, de acuerdo a las proyecciones de los más recientes modelos climáticos, es muy probable que a un nivel de 550 ppm se exceda el aumento de 2°C en las temperaturas globales considerado "admisible" y que sería necesario estabilizar las emisiones por debajo de 400 ppm para obtener una relativa certeza de no exceder los 2°C. La estabilización de GEI incluso en 450 ppm sólo proveería una probabilidad del 50% de limitar el calentamiento global a 2°C (Schellnhuber, 2006).

Según las estimaciones más recientes, la concentración de CO2 en la atmósfera ha aumentado de 280 ppm desde antes de la revolución industrial (1750-1850) a 430 ppm en la actualidad y, si las emisiones continúan creciendo a la tasa actual, se estima que

[3] "Partes por millón" es una expresión utilizada para denotar concentraciones de elementos químicos de 1 en 999.999 (es decir, una partícula de una sustancia determinada por cada 999.999 de otras partículas).

la concentración de CO2 habrá alcanzado 550 ppm para el año 2050 y 800 ppm para el año 2100. Sin embargo, dependiendo de los cambios poblacionales, el crecimiento económico y las voluntades políticas, la concentración en este último año podría llegar a los 970 ppm y ya en el año 2035 podrían alcanzarse niveles de 550 ppm. Esto se debe a la aceleración del flujo anual de emisiones de GEI que se está registrando a nivel mundial debido, por un lado, a que las economías con altas tasas de crecimiento están invirtiendo en infraestructura intensiva en carbono y, por el otro, a que la demanda mundial de energía y transporte aumenta a pasos agigantados (IPCC, 2001, 2007; The Economist, 2006). Se estima que tres cuartas partes del aumento de emisiones durante los próximos años provendrá de países en desarrollo (PEDs), dos quintos sólo de China (de hecho, China ya habría superado a EE.UU. como principal fuente emisora de CO2).

Según Stern (2006), la estabilización de las emisiones en un nivel cercano a los 550 ppm requerirá que las emisiones globales alcancen un pico en los próximos 10-20 años y que luego caigan a una tasa de 1-3% anual, de modo tal que hacia el año 2050 las emisiones globales están 25% por debajo de los niveles actuales. Cabe recordar que estos recortes deberán ser realizados en el marco de una economía mundial 3 o 4 veces mayor que la actual. Por su parte, para lograr la estabilización en 450 ppm, las emisiones deberán alcanzar su pico en los próximos 10 años y luego caer a una tasa mayor al 5% anual, siendo las emisiones en 2050 70% inferiores a las actuales. No obstante, la estabilización en 450 ppm ya está prácticamente fuera de alcance, debido a que es muy probable que se alcance este nivel en los próximos 10 años y a que existen grandes dificultades para lograr las fuertes reducciones requeridas con las tecnologías actuales y las previstas en el corto plazo (además, los esfuerzos para reducir emisiones rápidamente serían muy costosos).

Las potenciales consecuencias climatológicas de una concentración de GEI que eleve la temperatura global promedio por encima de los 2°C respecto de los niveles pre-industriales son altamente inciertas, pero algunos efectos probables resultan particularmente alarmantes.

En primer lugar, podría aumentar el nivel del mar debido al derretimiento de los glaciares y a la expansión del agua a medida que ésta se calienta. Rahmstorf[4] (2006)

[4] Stefan Rahmstorf es miembro del Consejo Asesor sobre Clima Global del Gobierno Federal de Alemania. Este informe fue presentado en la 12º Conferencia de las Partes (COP) de la Convención

alerta que entre 1974 y 2005 el hielo del Océano Ártico se redujo un 20%[5]. Si bien el hielo del Ártico es hielo marino, por lo que el nivel del mar no cambiaría demasiado aún si éste se derritiera en su totalidad[6], el hielo de la Antártida (de 4,2 km de espesor) y el de Groenlandia (de 3 km) está casi en su totalidad sobre tierra. Algunas estimaciones sugieren que si todo el hielo de Groenlandia se derritiera, el nivel del mar crecería unos 7 metros. Por su parte, si el hielo de la sección oeste de la Antártida se derritiera, se sumarían unos 6 metros más. Pero si el hielo de la sección este de la Antártida se derritiera -cosa que, sin embargo, nadie cree factible en el futuro inmediato- el nivel del mar aumentaría alrededor de 70 metros. Es de destacar que, de acuerdo a algunas estimaciones, con sólo un metro de aumento en el nivel del mar se inundaría el 17% de la masa terrestre de Bangladesh y ciudades costeras como Londres se verían en graves problemas. Por su parte, el aumento en la temperatura del mar podría generar, entre otras cosas, la desaparición de los arrecifes de corales tropicales, los ecosistemas más ricos en especies de los océanos.

En segundo lugar, podrían verse afectadas las corrientes oceánicas, las cuales distribuyen calor por el planeta y, además, determinan los niveles de humedad y energía atmosféricas[7]. Una variación de la circulación oceánica podría inducir cambios climáticos substanciales y abruptos (es decir, desarrollados en menos de 30 años) a escala global. En especial, hay una gran preocupación sobre la posibilidad de que desaparezca la "Corriente Cálida del Golfo", la cual desplaza una gran masa de agua cálida procedente del Golfo de México hacia el Atlántico Norte, asegurando a Europa un clima cálido para la latitud en que se encuentra (la costa de Noruega en invierno, por ejemplo, es 20º C más cálida que latitudes similares en Canadá). Esta corriente es

---

Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), celebrada en Nairobi, Kenia en noviembre de 2006.

[5] En el año 2002, un área de hielo marino del Ártico del tamaño del estado norteamericano de Texas (Larsen B) desapareció abruptamente.

[6] Según el principio de Arquímedes, "todo cuerpo sumergido en un líquido experimenta un empuje vertical hacia arriba igual al peso del líquido desalojado". Esto quiere decir que cuando un cuerpo (por ejemplo, un glaciar) flota, su peso es igual al peso del volumen del agua desalojada, que corresponde al volumen de la parte sumergida del cuerpo. El hielo flota por el mismo motivo por el que flota el corcho o la madera: porque es menos denso que el agua (densidad = g/cm3). El agua aumenta de volumen cuando se congela, pero su masa sigue siendo la misma (es decir, si congelamos 1 kg de agua tendremos 1 kg de hielo). Por tanto, el volumen del trozo de hielo será mayor que el del agua desplazada por el hielo (aunque pesen lo mismo), por lo que la densidad del hielo (g/cm3) será menor que la del agua. Cuando el hielo se derrite, su volumen disminuye lo mismo que aumentó cuando se congeló y su densidad pasa a ser igual a la del agua en la que está inmerso. Ocupa, por lo tanto, el mismo volumen que el agua que había desalojado cuando era hielo, es decir, el mismo volumen que tenía la parte sumergida del hielo (en términos prácticos, si ponemos un cubito de hielo dentro un vaso con agua, el nivel del agua no cambiará cuando el hielo se derrita).

[7] El término "energía atmosférica" hace referencia a la fuerza del viento y el agua (elevación de agua por evaporación y movimiento de masas de aire entre zonas de diferente presión).

provocada por la acción combinada de vientos, el movimiento de rotación del planeta y una corriente profunda llamada "Circulación Termohalina" (CTH). La CTH lleva agua salada cálida desde los trópicos hacia el norte. Si ingresara en ella un fuerte caudal de agua dulce (por ejemplo, el proveniente del deshielo de Groenlandia) la sal se diluiría y su flujo se debilitaría, enfriando notablemente el hemisferio norte. Bryden et al (2005), científicos del Centro Oceanográfico de Southhampton, Reino Unido, hallaron que la CTH ya habría disminuido su caudal en un 30% entre 1998 y 2004.

En tercer lugar, si bien hasta hace poco se consideraba que los huracanes no estaban conectados directamente con el Cambio Climático, estudios recientes muestran que podría existir un nexo entre ambos fenómenos. Webster et al (2005) y Emanuel (2005) destacan que si bien no se ha podido comprobar científicamente que el calentamiento global incremente el número de huracanes, sí estaría comprobado que el aumento en la temperatura de la superficie marina hace crecer su fuerza destructiva: con un incremento de 0,5 grados centígrados se ha observado un aumento del 70% en la fuerza de los ciclones. Los primeros autores sostienen que ha habido un crecimiento de largo plazo en el número de huracanes de categoría 4 y 5 (intensos). Por su parte, Emmanuel (2005) afirma que la intensidad promedio de las tormentas atlánticas se ha duplicado durante los últimos 30 años.

Sin embargo, la principal preocupación de los científicos recae sobre los "espirales de retroalimentación" que podría provocar el calentamiento global, es decir, la posibilidad de que "un poco" de calentamiento dispare mecanismos que lleven a mayores grados de calentamiento y que, una vez que esa escalada haya comenzado, la humanidad pierda definitivamente la oportunidad de controlar la velocidad del cambio en el clima. Estos espirales son principalmente tres (Rahmstorf, 2006; The Economist, 2006):

i) La tendencia a que la Tierra absorba más energía de la que emite y se caliente aún más. Esto podría ocurrir porque las áreas blancas -hielos- reflejan la luz del sol y las oscuras la absorben. Por lo tanto, a medida que los hielos se derritan, quedarán más áreas oscuras expuestas, las cuales absorberán más calor;

ii) La menor absorción de CO_2 de los océanos. Esto podría ocurrir debido a que el agua fría absorbe más CO_2 que la cálida. De esta manera, a medida que las aguas se calienten, tenderán a absorber menos CO_2, dejando más en la atmósfera;

iii) La mayor emisión de CO_2 del suelo. El calentamiento global podría llevar a un

aumento exponencial en la actividad microbiana del suelo, lo que ocasionaría un crecimiento de sus emisiones mayor a lo que la vegetación podría absorber.

En este contexto, si bien algunos científicos aconsejan no exagerar el efecto potencial de la retroalimentación, otros alertan sobre la posibilidad de que el clima, en lugar de calentarse gradualmente, cambie de modo brusco y comience, en pocos años, una carrera desenfrenada hacia el caos climático.

La evidencia científica indica que es conveniente implementar hoy acciones de mitigación (abatimiento) de GEI, pues en un par de décadas puede que sea demasiado tarde para evitar que la humanidad y los ecosistemas resulten gravemente perjudicados por las secuelas del calentamiento global. Esto se debe a que el clima depende del stock atmosférico de GEI y la mayoría de los gases poseen largos períodos de permanencia en la atmósfera (50-200 años en el caso del CO2, 10 años para el metano, 65-130 años en el caso de los CFCs, 50.000 años para los PFCs (CF_4) y 150 años para el óxido nitroso (IPCC, 1990).

Climatológicamente, está claro que se debería apuntar hacia una cota de concentración de GEI inferior a 400 ppm. Sin embargo, cumplir con esta meta resulta prácticamente inviable, debido, esencialmente a los altísimos costos que una reducción abrupta en las emisiones representaría para las economías del mundo. En el siguiente capítulo se analizan con más profundidad estas cuestiones.

1.4 Esfuerzos realizados hasta el momento para mitigar el Cambio Climático

El primer esfuerzo global por coordinar acciones tendientes a estabilizar las emisiones de GEI de los PDs lo constituyó la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC), la cual fue delineada durante la Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo que tuvo lugar en Río de Janeiro, Brasil en 1992 y firmada por 154 países más la Unión Europea (UE) en Nueva York unos meses más tarde. En la CMNUCC, los países listados en el Anexo I[8] (CMNUCC, 1992) se comprometían a estabilizar sus emisiones de CO2, metano y óxido nitroso en

[8] Alemania, Australia, Austria, Bélgica, Bielorrusia, Bulgaria, Canadá, Dinamarca, España, Estados Unidos, Estonia, Rusia, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Islandia, Irlanda, Italia, Japón, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Nueva Zelanda, Noruega, Países Bajos, Polonia, Portugal, Rumania, Reino Unido, Suecia, Suiza, Turquía y Ucrania. Un enmienda de 1998 incluyó también a Croacia, Eslovaquia, Eslovenia, Liechtenstein, Mónaco y la República Checa.

los niveles de 1990 para el año 2000, de forma tal de lograr la estabilización de las concentraciones de GEI en la atmósfera a un nivel tal que se prevenga una interferencia antropogénica peligrosa sobre el sistema climático. El organismo responsable de la implementación de la CMNUCC sería la Conferencia de las Partes (COP), una asociación de todos los países miembros de la CMNUCC.

En este contexto, la firma del Protocolo de Kyoto a la CMNUCC en diciembre de 1997[9] representó el primer compromiso formal de los PDs para reducir sus emisiones antropogénicas de GEI[10], estableciendo metas cuantitativas individuales para los países incluidos en el Anexo I de la CMNUCC[11] y definiendo un objetivo global: las emisiones de GEI durante el primer período de compromiso (2008-2012) deberán ser un 5,2% inferiores a los niveles registrados en 1990. Para entrar en vigencia, el PK debía ser ratificado por al menos 55 partes de la CMNUCC, las cuales debían representar, como mínimo, el 55% del total de las emisiones de GEI contabilizadas en 1990. Esto ocurrió recién el 16 de febrero de 2005, con la ratificación de Rusia. Estados Unidos, uno de los principales contribuyentes a las emisiones globales de GEI, no ratificó, y tampoco lo hizo Australia.

El PK es el primer intento por crear un mecanismo global para la mitigación de GEI. Mediante este acuerdo, se crea un sistema llamado "*cap-and-trade"* (límites máximos y comercio) que funciona del siguiente modo. Se establece una meta global de reducción (emisiones 5,2% inferiores a los niveles de 1990) así como metas individuales para cada país. Cada gobierno impone límites de emisión a cada empresa contaminante radicada en su territorio mediante la distribución de permisos de emisión ("derechos a contaminar"). Pero dado que el impacto de los GEI sobre el calentamiento global no guarda relación con el lugar donde éstos son emitidos o reducidos, el PK contempla la inclusión de tres "mecanismos de flexibilidad" orientados a poder cumplir con los objetivos globales al menor costo posible. Estos mecanismos dan la opción a las industrias de elegir entre reducir domésticamente sus GEI o salir a comprar en el mercado el nivel necesario de reducciones, permitiendo, de esta forma, que las disminuciones de GEI tengan lugar en aquellos países donde los costos de

[9] Firmado en Kyoto, Japón, en el marco de la COP3.
[10] El PK tiene por objeto reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero: CO2, metano, óxido nitroso y tres gases industriales fluorados: hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF6).
[11] Las metas individuales de reducción de GEI fueron establecidas en el Anexo B del Protocolo de Kyoto y pueden ser consultadas en: http://unfccc.int/kyoto_protocol/background/items/3145.php

reducción por tonelada de dióxido de carbono equivalente (CO2e)[12] sean menores. Los mecanismos de flexibilidad del PK son tres:

i) El Sistema de Comercio de Permisos de Emisión (SCPE), mediante el cual los PDs alcanzados por compromisos cuantitativos pueden transar permisos de emisión -"Assigned Amounts Units" (AAUs)- entre ellos (las firmas que sobrecumplen sus metas y que, por lo tanto, tienen superávit de permisos pueden venderlos en el mercado a quienes subcumplen sus metas);

ii) El mecanismo de Implementación Conjunta (IC), mediante el cual los países Anexo I pueden comprar certificados de reducción de emisiones -"Emission Reduction Units" (ERUs)- generados por proyectos realizados en países de Europa del Este, quienes también enfrentan compromisos de reducción cuantitativos;

iii) El Mecanismo para un Desarrollo Limpio (MDL), a través del cual los países Anexo I pueden comprar certificados de reducción de emisiones -"Certificates of Emission Reduction" (CERs)- generados por proyectos realizados en PEDs, quienes no enfrentan -aún- metas de reducción obligatorias.

Paralelamente al PK, se han encarado otras iniciativas, la mayoría de ellas tendientes a fomentar el desarrollo de tecnologías más limpias (ver sección 2.7).

En la 11º Conferencia de las Partes de la CMNUCC (COP11, realizada en Montreal en diciembre de 2005) y primera reunión de las partes del PK luego de su entrada en vigencia, se establecieron dos mecanismos paralelos de negociación sobre las acciones futuras sobre Cambio Climático (ver Chidiak, 2006). Por un lado, el llamado "*Convention track",* un espacio de diálogo en el marco de la CMNUCC sobre la acción cooperativa de largo plazo. Por el otro, el llamado "*Kyoto track",* un ámbito de negociación sobre futuros compromisos de mediano plazo en el marco del PK. Sin embargo, en ambos espacios los diálogos iniciados no son muy alentadores, debido a que persisten posturas políticas enfrentadas en los principales países emisores de GEI

[12] El dióxido de carbono equivalente (CO2e) es la unidad universal de medida utilizada para indicar el Potencial de Calentamiento Global (GWP, por sus siglas en inglés) de los GEI, siendo el CO2 el gas de referencia contra el cual se miden los demás. El GWP es un indicador que define el efecto de calentamiento a lo largo del tiempo (la medida más usada es 100 años) que produce una liberación instantánea hoy de 1kg de un gas de efecto invernadero, en comparación con el causado por el CO_2. Tiene en cuenta la capacidad de cada GEI de intensificar el efecto invernadero así como su tiempo de permanencia en la atmósfera. Ejemplo de equivalencia: 1 tn de metano = 21 ton CO2e (es decir, el potencial de calentamiento global del CO2 para un horizonte de 100 años es 1, mientras que el del metano es 21).

que dificultan el logro de consensos. Estas dificultades son resumidas en la siguiente sección.

1.5 El estado actual de las negociaciones internacionales

Por un lado, EE.UU., el principal contribuyente a las emisiones globales de GEI (sólo recientemente superado por China), se niega a asumir compromisos cuantitativos de reducción de emisiones a menos que también lo hagan los PEDs (especialmente, China, India y Brasil). Por su gran peso relativo, su negativa debilita el alcance de cualquier otra iniciativa y genera preocupaciones en materia de pérdida de competitividad para otros PDs. EE.UU. sólo ha adoptado un objetivo nacional tendiente a reducir la intensidad de emisiones de GEI a través de la innovación tecnológica[13] (Chidiak, 2006). Sin embargo, esta actitud de inacción en materia de asunción de compromisos cuantitativos de reducción de GEI a nivel nacional contrasta con una floreciente actividad en los niveles más bajos de gobierno. La ciudad de Seattle, por ejemplo, ha impulsado una iniciativa para que las ciudades se comprometan a cumplir los compromisos de Kyoto, la cual fue firmada por 279 ciudades, y 9 estados del noreste han lanzado el *Regional Greenhouse Gas Initiative* (RGGI), un esfuerzo cooperativo orientado a reducir las emisiones de CO2 de las industrias energéticas mediante el desarrollo de una estrategia regional basada en un programa *cap-and-trade* con comercio de emisiones[14]. Además, luego del huracán Katrina -la mayor catástrofe natural de la historia de EE.UU., que en agosto de 2005 arrasó las costas de Luisiana, Misisipi y Alabama y sumergió bajo las aguas a Nueva Orleans- la opinión pública está virando hacia una actitud más proclive al cuidado del medioambiente (The Economist, 2006).

Por su parte, los PEDs -fundamentalmente, China, India y Brasil- se niegan a restringir sus opciones de crecimiento atándose a compromisos cuantitativos, menos aún si las principales economías contaminantes -y responsables históricas de las emisiones de GEI- no adoptan metas más ambiciosas.

[13] EE.UU. se ha comprometido a reducir su intensidad de emisiones por unidad de producto en un 18% entre 2002-2012. No obstante, según Chidiak (2006), en vista del liderazgo de EE.UU. en materia tecnológica, si este país continúa con esta tendencia, resultaría ser el principal contribuyente a la reducción de emisiones de GEI para el año 2030-2050 y el líder en eficiencia energética para el año 2050-2100, aún si los restantes países Anexo I aceptan compromisos más ambiciosos de reducción de emisiones.

[14] Ver http://www.rggi.org

Otros países, en especial los miembros de la Unión Europea (UE), destacan que es necesario asumir el liderazgo en materia de reducción de emisiones globales de GEI y fijar, tanto para sí mismos como para otros países industrializados, objetivos cuantitativos ambiciosos. Sin embargo, reconocen que sin la participación de EE.UU. y de los principales PEDs emisores no se logrará estabilizar las emisiones de GEI en niveles compatibles con el objetivo último de la CMNUCC.

Finalmente, existe un número creciente de países (por ejemplo, Australia o Canadá) que, siguiendo el ejemplo de EE.UU., argumentan que les resulta imposible aceptar los compromisos del PK debido a las devastadoras implicancias económicas y competitivas que éstos tendrían sobre sus economías. Incluso en países como Japón, que ya son parte del PK, se sostiene que el cumplimiento de sus objetivos nacionales de mitigación estará sujeto a lo que otros países industrializados estén dispuestos a comprometer (Chidiak, 2006).

En síntesis, los problemas que están trabando en la actualidad las negociaciones ambientales internacionales se relacionan en gran medida con aspectos económicos (costos de fijar compromisos ambiciosos). La discusión ya no trata sobre la importancia o la conveniencia de implementar acciones para frenar el Cambio Climático, sino de cómo hacerlo, dados los altísimos costos de reconversión de las industrias instaladas. Hasta hace unos años, no se sabía con certeza cuánto representaría en términos monetarios la asunción de compromisos, pero ahora aparece con claridad que la implementación de políticas y medidas “verdes” en cada país representa miles de millones de euros anuales y que genera cuantiosas pérdidas en términos de competitividad.

En este contexto, mientras que algunos analistas visualizan la posibilidad de que se estanquen o directamente colapsen las negociaciones en el marco de la CMNUCC y el PK, otros, más moderados, pronostican un escenario futuro donde coexistan los esfuerzos sobre Cambio Climático realizados en el marco de las Naciones Unidas con otros derivados de iniciativas orientadas al desarrollo y difusión de tecnologías menos intensivas en GEI. Algunos incluso recomiendan trasladar el énfasis del debate sobre niveles de compromisos cuantitativos hacia el de los esfuerzos necesarios para lograr una cooperación para el desarrollo y transferencia de tecnologías más limpias (ver sección 2.7). Los principales argumentos a favor de esta visión tecnológica como superadora de la de objetivos cuantitativos son que el desarrollo tecnológico permitirá reducir costos de mitigación futuros, permitiendo la adopción de objetivos más

ambiciosos posteriormente; que trasladará el eje de la discusión desde un tema polémico (cómo distribuir responsabilidades y cargas) a uno de cooperación y, finalmente, que dadas las incertidumbres sobre los costos y beneficios involucrados en los diferentes objetivos cuantitativos, pasar a discutir la escala de la difusión tecnológica necesaria para estabilizar emisiones puede contribuir a un diálogo más concreto y puede permitir la creación de instrumentos globales orientados al desarrollo y difusión de tecnologías en PDs y PEDs (Chidiak, 2006).

No obstante, los enfoques tecnológicos tienen, asimismo, ciertas desventajas. Primeramente, la efectividad ambiental de los planes tecnológicos es difícil de evaluar, debido a que la innovación y difusión de tecnologías también está sujeta a grandes incertidumbres. En segundo lugar, los incentivos para el desarrollo de tecnologías a gran escala deben surgir de adecuadas señales de precios (particularmente, costos por unidad de emisión de GEI), lo que difícilmente ocurra si no existen compromisos cuantitativos de mitigación u otras políticas globales concertadas. Finalmente, trasladar el eje de la discusión hacia las formas posibles de cooperación tecnológica no necesariamente reducirá la confrontación entre PDs y PEDs en materia de distribución de beneficios y condiciones de acceso a nuevas tecnologías (Chidiak, 2006).

Sin embargo, a pesar del panorama relativamente desalentador que exhiben las negociaciones internacionales, en la práctica está cobrando importancia creciente el comercio de derechos de emisión de GEI, un mecanismo tendiente a limitar las emisiones de GEI a través de un instrumento económico que supone el pago de un precio por tonelada de GEI emitida. De hecho, en los últimos años, se fueron creando diversos mercados ya sea como preparación para ingresar al mecanismo de mercado que entrará en vigencia junto con el primer período de compromiso del PK a partir de 2008 (tal es el caso del EU ETS) o bien para ganar experiencia aunque no se prevea en el mediano plazo la ratificación del PK (como los mercados voluntarios surgidos en EE.UU. -CCX- y Australia -NSW-) (ver sección 3.2). En el año 2006, se transaron en estos mercados más de USD 30 mil millones, triplicando lo transado en 2005. El volumen de transacciones observadas en dichos mercados estaría mostrando que varios países y actores privados han iniciado políticas activas a fin de cumplir con sus compromisos cuantitativos dentro o fuera del PK.

1.6 Resumen

En este primer capítulo se describió en qué consiste el problema del Cambio Climático desde una óptica ecológica.

En primer lugar, se explicó que existen factores tanto naturales como antropogénicos (humanos) que afectan el balance de energía absorbida y emitida por la Tierra. Entre los factores naturales figuran los cambios en las emisiones de energía del sol de acuerdo al ciclo solar de 11 años y el "efecto invernadero" producido por la concentración de gases naturales en la atmósfera (vapor de agua, dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y ozono). Entre los factores antropogénicos se encuentran las actividades humanas que generan mayores concentraciones de gases naturales así como emisiones de otros GEI (halocarbonos -CFCs, HFCs, PFCs- y hexafluoruro de azufre), los cuales provocan un "efecto invernadero aumentado" que puede derivar en cambios en el clima. Estas actividades son, fundamentalmente, la producción y uso de combustibles fósiles (que emiten CO2 -el principal GEI antropogénico-, óxido nitroso y metano), los procesos industriales (que producen halocarbonos y hexafluoruro de azufre) y la desertificación y deforestación (que modifican la cantidad de energía solar absorbida por la Tierra). La industria de generación eléctrica contribuye con el 24% del total de emisiones de GEI, seguida por la deforestación/desertificación (18%), el transporte, la agricultura y la industria (14% cada uno), la construcción (8%) y la generación de desechos (3%) (valores para el año 2000 citados en Stern, 2006).

En segundo lugar, se comentaron cuáles son los peligros potenciales de la concentración de GEI en la atmósfera de acuerdo a la evidencia científica disponible. Se explicó, primeramente, que, de acuerdo a los últimos resultados de modelos climáticos de simulación, para evitar las consecuencias más dramáticas del Cambio Climático, las concentraciones de GEI en la atmósfera no deben superar las 400 ppm. Estas estimaciones modifican otras anteriores que establecían que la concentración de gases podría alcanzar sin grandes riesgos las 550 ppm. No obstante, la estabilización en 400 ppm ya está fuera de alcance. Si las emisiones continúan creciendo a la tasa actual, la concentración de GEI alcanzará 550 ppm en el año 2050 y 800 ppm en el 2100; si el flujo anual de emisiones de GEI se acelera podrían alcanzarse niveles de 550 ppm ya en el año 2035.

Los principales riesgos climatológicos derivados de una concentración de GEI que eleve la temperatura global por encima de los 2°C respecto de los niveles pre-

industriales son, fundamentalmente, el aumento en el nivel del mar (provocado por el derretimiento de los glaciares y la expansión del agua a medida que ésta se calienta), el debilitamiento y eventual desaparición de la “Corriente Cálida del Golfo”, el aumento en la fuerza destructiva de los ciclones y, fundamentalmente, las “espirales de retroalimentación”, es decir, la tendencia a que la Tierra absorba más energía de la que emite y se caliente aún más, la menor absorción de CO2 de los océanos y la mayor emisión de CO2 del suelo, los cuales podrían provocar que el clima, en lugar de calentarse gradualmente, cambie de modo brusco y comience una carrera desenfrenada hacia el caos climático.

A continuación, en las siguientes dos secciones se repasaron los esfuerzos realizados hasta el momento para mitigar el Cambio Climático -esencialmente, la CMNUCC y el PK- y se comentó cuál es el estado actual de las negociaciones internacionales sobre el tema. En este punto, se destacó, por un lado, que a pesar del panorama relativamente desalentador que éstas exhiben, en la práctica están cobrando importancia creciente el comercio de permisos de emisión en los llamados “mercados de carbono” y, por el otro, que en el debate internacional la cooperación para el desarrollo y difusión de tecnologías más limpias constituye, para algunos, la gran alternativa política para lograr consenso a escala global.

Capítulo 2: Marco conceptual: la Economía del Cambio Climático

2.1 Introducción

En este capítulo se analiza por qué resulta conveniente analizar el problema del Cambio Climático desde una óptica económica. En primer lugar, porque la esencia de todos los problemas ambientales, incluyendo el Cambio Climático, está fuertemente asociada a factores económicos. El crecimiento poblacional, los patrones de producción y consumo y el crecimiento del ingreso imponen presiones sobre el medio ambiente en materia de emisiones de GEI (generación eléctrica, gases industriales, emisiones de los medios de transporte, etc.). En sentido inverso, el Cambio Climático amenaza con reducir el bienestar económico de la raza humana (y otras especies), debido a los impactos que éste puede tener sobre la disponibilidad de recursos, la infraestructura, los rendimientos agrícolas, etc.. En segundo lugar, porque el problema del Cambio Climático tiene su origen en fallas de mercado, es decir, en el hecho de que los mercados no dan lugar a la cantidad de emisiones socialmente deseable. Esto se debe a la presencia de externalidades (no existen precios de mercado para las emisiones), lo cual genera, a su vez, que no puedan realizarse análisis costo-beneficio de mercado para evaluar políticas de mitigación, debido a que el medio ambiente sano no posee -sin intervención- valor económico (deben cuantificarse *ad hoc* los daños ambientales y los beneficios de la mitigación). Frente a esto, la Economía ofrece un marco analítico que puede ayudar a los hacedores de política a decidir qué acciones realizar, en qué cuantía y mediante qué instrumentos (Kolstad, 2001; Stern 2006)

En este contexto, en la década de 1980 nace, como una rama de la Economía Ambiental[15], la Economía del Cambio Climático, una corriente teórica que procura diagnosticar el trasfondo económico del problema del calentamiento global y ofrecer análisis tanto positivos como normativos para resolverlo. Lo distintivo de esta corriente es que posee un objeto de estudio con rasgos únicos: el Cambio Climático es una cuestión de dimensión internacional que involucra el largo plazo, plantea numerosas incertidumbres e impone una desigual distribución de los costos y beneficios políticos según el tiempo y lugar. En este contexto, el diseño de políticas óptimas se vuelve sumamente difícil.

[15] La Economía Ambiental es la disciplina que estudia los problemas ambientales empleando la visión y las herramientas de la Economía. Sus primeros trabajos surgen a fines de la década de 1950 y principios de 1960, pero su verdadero despegue tuvo lugar recién en la década de 1970. Sin embargo, sus hallazgos no tuvieron influencia en la política ambiental hasta la década de 1990.

La literatura sobre el Cambio Climático tiene sus orígenes en Nordhaus (1982), el economista que planteó, por primera vez, que el uso de los recursos geofísicos y biológicos debería someterse al mismo análisis costo-beneficio que el resto de las actividades económicas. En su trabajo pionero, Nordhaus analiza cuán rápido debería permitir la economía global que aumenten las concentraciones de CO2 en un marco de crecimiento óptimo, estimando los costos de los daños que podrían provocar hipotéticamente las emisiones de GEI y comparando estos resultados con los costos de mitigación probables para diferentes opciones de política.

Durante los noventa, la literatura sobre el problema del Cambio Climático creció notablemente. En la actualidad, dentro de esta corriente teórica coexisten diferentes enfoques tanto para medir los beneficios y costos asociados con la reducción de emisiones de GEI como para analizar las incertidumbres involucradas en el estudio del problema y abordar cuestiones relacionadas con el diseño óptimo de la política ambiental (elección de instrumentos, flexibilidad, necesidad de coordinación internacional, etc.). En este capítulo se repasan brevemente estas cuestiones.

De esta manera, en la sección 2.2 se realiza una caracterización económica del problema del Cambio Climático y luego se resume la literatura existente en materia de análisis de los impactos del Cambio Climático sobre el bienestar humano (sección 2.3), costos y beneficios de la mitigación de GEI (sección 2.4), incertidumbres que plantea el Cambio Climático (sección 2.5), elección de instrumentos económicos para la mitigación (sección 2.6) e importancia de la innovación tecnológica como posible solución al problema (sección 2.7).

2.2 Caracterización económica del problema del Cambio Climático

Siguiendo a Chidiak (2001, 2006), el Cambio Climático presenta características económicas que vuelven muy difícil el diseño e implementación de políticas óptimas.

En primer lugar, se trata de un problema ambiental global, es decir que la concentración de GEI en la atmósfera no depende de dónde se generan -ni tampoco de dónde se mitigan- las emisiones. Esto implica que es necesaria la coordinación internacional para limitar el impacto de la emisión de gases. Sin embargo, ésta resulta extremadamente difícil de alcanzar, debido a que los impactos sociales y económicos del Cambio Climático no están ni estarán distribuidos uniformemente a lo largo del

globo (los peores daños los sufrirán, claramente, los PEDs, pues la capacidad de manejo y prevención de los desastres naturales disminuye con la pobreza).

En segundo lugar, el problema del Cambio Climático puede entenderse como el resultado de una externalidad negativa derivada fundamentalmente de la quema de combustibles fósiles para la producción industrial y de energía que tuvo lugar, desde los albores de la revolución industrial, en los PDs[16]. Es decir, que no existe un precio para el carbono en los mercados (sin intervención) que refleje los costos globales de las emisiones de GEI. Y los PDs, principales causantes y quienes se encuentran en mejor situación relativa para mitigar, no están dispuestos a pagar los costos necesarios para evitar los daños.

En tercer lugar, la limitación de los efectos del Cambio Climático puede verse como el equivalente a proveer un bien público global, pues todos los países se verían beneficiados de los esfuerzos internacionales orientados a controlar el recalentamiento (principio de no exclusión) sin disminuir los beneficios disponibles para el resto de los países (principio de no rivalidad). Sin embargo, en este punto, se plantean dos problemáticas adicionales: por un lado, que el nivel de provisión (privada) actual es subóptimo y requiere, por lo tanto, de una corrección por fuera de los mecanismos de mercado y, por el otro, que algunos países pueden adoptar un comportamiento de *free-rider*, procurando sacar provecho de los beneficios de evitar el calentamiento global pero sin asumir los costos de reducir las emisiones de GEI a nivel doméstico. Adicionalmente, cualquier intervención requiere, como ya dijimos, de la acción concertada voluntaria de todas las naciones, pues no existe una autoridad supranacional que pueda establecer políticas globales.

En cuarto lugar, estamos ante un problema stock-flujo: si bien la causa del calentamiento global son las emisiones de GEI, lo que determina la magnitud del Cambio Climático es la concentración de gases en la atmósfera. Esto ocurre porque, como ya mencionamos, los GEI poseen largos períodos de permanencia. Esto determina un problema temporal que pone en juego un principio de equidad

[16] Sin embargo, en los últimos años, los principales países emisores de GEI han sido los PEDs, fundamentalmente, China e India. Según un informe del Banco Mundial (2006), entre 1992 y 2002 las emisiones de CO2 globales crecieron un 15% debido al crecimiento de estas dos economías. China incrementó sus emisiones en un 33% durante el período mencionado y se convirtió recientemente en el país más contaminante del mundo. Mientras, la India aumentó su tasa de contaminación en un 57%. Es en este contexto que se enmarca uno de los principales argumentos actuales de los PDs que no quieren involucrarse en el esfuerzo global de mitigación de GEI (especialmente, EE.UU.): que ninguna iniciativa será suficiente si no se involucran los esfuerzos de estos "nuevos contaminadores" (recordemos que el PK no impone compromisos vinculantes sobre los PEDs).

intergeneracional, pues los efectos completos de la concentración de GEI -así como de los esfuerzos de mitigación que se encaren hoy- se verán recién en dos siglos. No obstante, a nivel político, el debate sólo involucra decisiones en materia de reducción de GEI que podrían implementarse durante el transcurso de este siglo, lo que implica que se pretende encarar un problema de largo plazo con medidas de corto plazo. Más aún, quienes toman decisiones hoy saben que la capacidad de limitar los impactos del Cambio Climático de las generaciones futuras depende de los esfuerzos que realice la generación actual y que, por un lado, deben afrontar los costos de la acción sin percibir una gran proporción de los beneficios (que se verán dentro de muchos años) pero que, por el otro, si no actúan hoy pueden generar efectos irreversibles sobre el medio ambiente y limitar severamente las posibilidades de las generaciones futuras de enfrentar las consecuencias devastadoras del Cambio Climático.

En quinto lugar, puede considerarse que el problema del Cambio Climático se deriva de la falta de asignación y protección de los derechos de propiedad sobre la atmósfera y los recursos naturales de uso público en los PEDs (en este último caso, esto ha resultado en una sobreexplotación de los mismos con el fin de proveer de materias primas a bajo costo a los PDs) (Chichilnisky, 1994).

En sexto lugar, la comprensión humana del problema del Cambio Climático está sujeta a numerosas incertidumbres y limitaciones de información, tanto en lo que respecta a aspectos físicos y biológicos como a cuestiones socioeconómicas (ver sección 2.5). En este contexto, lo primero que se debe tener en cuenta al analizar las posibilidades de resolver el problema del Cambio Climático es que las acciones de mitigación de GEI implican gastar dinero hoy a cambio de obtener beneficios inciertos y, en parte, en un futuro remoto, pues no se sabe cuánto CO2 el mundo continuará emitiendo (lo que dependerá de los esfuerzos que se realicen para mitigar emisiones), con qué velocidad aumentarán las temperaturas en respuesta a mayores concentraciones de CO2 (lo que dependerá de los mecanismos de retroalimentación) ni qué efectos precisos tendrá el Cambio Climático sobre las economías (lo que dependerá, entre otras cosas, de las posibilidades de adaptación a los efectos que no podrán ser evitados).

Finalmente, está claro que las industrias de aquellos países que encaren acciones de mitigación de GEI enfrentan altos riesgos de perder competitividad debido a los mayores costos productivos que involucran estas actividades (costos de proveerse de materias primas más limpias pero más caras, de desarrollar procesos menos

contaminantes, costo de oportunidad del tiempo de los ingenieros ambientales y científicos, costos de operar tecnologías para el tratamiento de residuos, etc.). A nivel de firma, existe el riesgo de perder *market share* y ganancias y, a nivel país, de generar una relocalización de industrias hacia países no sujetos a requerimientos ambientales.

2.3 Análisis de los impactos del Cambio Climático sobre el bienestar humano

Las consecuencias potenciales del Cambio Climático (aumento de las temperaturas promedio, mayor frecuencia de temperaturas extremas, deshielo de glaciares, etc.) tendrán, inevitablemente, impactos físicos sobre la actividad económica y la vida humana, fundamentalmente en términos de acceso al agua potable, producción de alimentos y uso de la tierra y recursos naturales.

Según Stern (2006), el derretimiento de los glaciares aumentará inicialmente el riesgo de inundaciones y, posteriormente, reducirá considerablemente los reservorios de agua potable, amenazando eventualmente a un sexto de la población mundial predominantemente en las zonas costeras de parte de Asia (India, Bangladesh y Vietnam), partes de China, Sudamérica (en especial, los Andes), pequeñas islas del Caribe y el Pacífico, Tokio, Nueva York, El Cairo y Londres. El derretimiento de capas de hielo amenazará eventualmente las tierras donde hoy vive 1 de cada 20 personas. Para mediados de este siglo, 200 millones de personas podrían verse permanentemente desplazadas debido a los aumentos en el nivel del mar, las mayores inundaciones y las sequías más extensas.

El calentamiento global, asimismo, disminuirá los rendimientos de las cosechas, especialmente en África, lo que limitará la capacidad de producir alimento de miles de millones de individuos. Con aumentos de las temperaturas de 4°C o más la producción global de alimentos se verá seriamente afectada.

A su vez, siempre siguiendo a Stern (2006), el aumento en las temperaturas incrementará las muertes por desnutrición y golpes de calor y, si no se adoptan medidas de control efectivas, las enfermedades transmitidas por insectos (malaria, dengue) podrían expandirse aún más.

Por su parte, los ecosistemas serán particularmente vulnerables al Cambio Climático, con el 15-40% de las especies entrando en peligro de extinción con sólo 2°C de calentamiento. Asimismo, la acidificación de los océanos, un resultado directo del aumento de los niveles de CO2, tendrá importantes efectos sobre los ecosistemas marinos, con posibles consecuencias adversas sobre los stocks ictícolas.

También destaca Stern (2006) que el calentamiento puede inducir cambios repentinos en los patrones climáticos regionales tales como las lluvias monzónicas[17] en el Sur de Asia o el fenómeno de El Niño[18], cambios que tendrán severas consecuencias sobre la disponibilidad de agua y sobre las inundaciones en regiones tropicales, y que la selva amazónica podría verse severamente afectada con aumentos de temperatura de 2°-3°C.

La literatura, siguiendo a Goulder y Pizer (2006), divide a los posibles efectos que el Cambio Climático tendrá sobre el bienestar humano en dos grandes categorías: daños de mercado y daños fuera del mercado.

Los daños de mercado hacen referencia a los impactos que los potenciales cambios en los precios o cantidades de las mercancías (derivados de potenciales cambios en la productividad) tendrán sobre el bienestar. Para medirlos, existen básicamente dos aproximaciones: el enfoque de la Función de Producción, que analiza el impacto de estos cambios sobre las diferentes industrias postulando funciones de producción que dependen de variables climáticas, y el enfoque de la Utilidad, el cual analiza los efectos de los cambios directamente sobre una medida aproximada de bienestar (no vía función de producción).

Los daños fuera del mercado, por su parte, incluyen la pérdida directa de utilidad provocada por un clima más inhóspito y por la destrucción de los ecosistemas y la biodiversidad. Para medir estos daños, se suelen emplear métodos de declaración de preferencias o entrevistas de modo tal de estimar la disponibilidad a pagar de los agentes para evitar distintos tipos de perjuicio. Los métodos de preferencia revelada

[17] Las lluvias monzónicas son las provocadas por cambios estacionales en la dirección de los vientos. Son una característica dominante de los climas de bajo latitud que van desde África Occidental hasta el Océano Pacífico occidental.

[18] El fenómeno de "El Niño" alude a la aparición de corrientes oceánicas cálidas en las costas de América y a la alteración del sistema global océano-atmósfera que se origina en el Océano Pacífico Ecuatorial (es decir, en una franja oceánica cercana al Ecuador), generalmente durante un periodo comprendido entre diciembre y marzo. Este fenómeno se presenta a intervalos de dos a siete años y se caracteriza porque se producen cambios en la dirección y en la velocidad de los vientos y porque se desplazan las zonas de lluvia en la región tropical.

en este caso enfrentan numerosas dificultades, pues los impactos de no-mercado pueden no alterar precios ni cantidades y, por lo tanto, imposibilitar la medición de cambios en el bienestar de manera indirecta.

2.4 Costos del Cambio Climático y costos y beneficios de la mitigación de GEI

El análisis costo-beneficio, como es sabido, busca identificar y valorar la totalidad de los efectos económicos generados por un determinado proyecto u opción de política, reduciendo los impactos a una medida común -generalmente monetaria- y descontando los flujos futuros esperados a lo largo del tiempo. Este tipo de análisis constituye el pilar básico del estudio económico de problemas ambientales y de alternativas de regulación ambiental (Azqueta, 2002).

En el caso específico del Cambio Climático, el análisis costo-beneficio implica evaluar si los beneficios derivados de la reducción de GEI (daños evitados del Cambio Climático y co-beneficios potenciales de implementar políticas de mitigación -aumento de la eficiencia energética, menor contaminación local, etc.-) serán mayores o menores que los costos provocados por los efectos del calentamiento global sobre las economías del mundo más los costos de implementar medidas de mitigación de GEI (Stern, 2006).

Puesto que el análisis costo-beneficio involucra la actualización de flujos futuros esperados, la elección de la tasa de descuento constituye una variable de gran relevancia. En el análisis convencional, un dólar gastado hoy vale más que un dólar gastado dentro de un año, debido a que se supone, además de un sesgo de preferencia individual por el presente, que el crecimiento económico hará que la gente sea más rica el año entrante. Esta preferencia se expresa con una tasa de descuento que, si es establecida en su nivel “normal” -digamos, entre 3% y 10%-, hace que los beneficios obtenidos luego de 50 años tengan escaso peso. Esto suele no tener demasiada importancia debido a que la mayor parte de las inversiones privadas tiene horizontes de 20-50 años.

Sin embargo, en el caso del Cambio Climático, es muy probable que los peores efectos se vean dentro de 50 años o más, por lo que, si se utiliza una tasa de descuento “normal”, la mitigación del Cambio Climático no sería una actividad rentable. Sin embargo, si se utiliza una tasa de descuento que iguale los beneficios

futuros con los actuales (por ejemplo, tasas de descuento decrecientes) el costo social del carbono -es decir, el costo (en valor presente) de los posibles impactos asociados con una unidad adicional de emisión de GEI- se vuelve mucho mayor y la mitigación, más atractiva. Por lo tanto, la utilización de una tasa de descuento de estas características es justificada en el análisis costo-beneficio relacionado con el Cambio Climático tanto desde una perspectiva ética (los intereses de las futuras generaciones valen tanto como los de la generación actual) como desde el punto de vista económico (las consecuencias de no llevar a cabo acciones hoy pueden ser tan catastróficas que no podría asumirse un crecimiento económico normal en el futuro) (Stern, 2006; Newell y Pizer, 2001, 2002).

En lo que respecta a los costos de reducir las emisiones de GEI, éstos dependen de muchos factores, por ejemplo, cuánto puede reducirse la demanda energética a través de la implementación de medidas de eficiencia, cuánto pueden sustituirse combustibles fósiles por otros que liberen menos cantidades de CO2 por unidad de energía producida, cuánto pueden reemplazarse bienes intensivos en energía por otros menos demandantes, a qué velocidad puede reducirse el precio de las energías renovables, cómo se diseñan y aplican las políticas ambientales y si los gobiernos pueden enviar o no correctas señales a los mercados (Stern, 2006; The Economist, 2006). Cuanto más alto sea el potencial de sustitución, menor será el costo de cumplir con una determinada meta de reducción de emisiones. Una cuestión adicional incumbe a la velocidad a la cual puede lograrse la disminución de GEI: reducir emisiones gradualmente resulta más barato que hacerlo precipitadamente, debido a que el stock de bienes de capital actual puede ser reemplazado por nuevas tecnologías más limpias al final de su ciclo de vida, en vez de hacerlo prematuramente. En este sentido, según Stern (2006), los costos de estabilizar las emisiones en 500-550 ppm CO2e serían aproximadamente un tercio del costo de hacerlo en 450-500 ppm CO2e.

Siguiendo a Goulder y Pizer (2006), existen en la literatura dos enfoques para abordar las opciones y costos de mitigación de GEI. Por un lado, los modelos de tecnología energética “desde abajo hacia arriba” (“*bottom-up”)*, los cuales analizan las tecnologías utilizadas en procesos o productos energéticos específicos concentrándose en un sector o en un pequeño grupo de sectores. Por lo tanto, ofrecen poca información sobre la capacidad de sustituir energía en general y sobre cómo afectan los cambios en los precios de los bienes intensivos en energía las demandas finales de esos bienes. Por el otro, los modelos económicos más amplios “desde arriba hacia abajo”

("*top-down*"), que incluyen a los modelos de equilibrio general computable. Estos modelos analizan las interrelaciones entre los costos de los combustibles, los métodos de producción y las elecciones de los consumidores, ofreciendo poco detalle sobre procesos o productos energéticos específicos. Es de destacar que, en los últimos años, se ha intentado reducir la brecha entre ambos tipos de modelos, ganando generalidad los primeros y detalle los segundos.

Sin embargo, si bien estos modelos de costos sirven para efectuar evaluaciones de costo-efectividad de políticas alternativas para alcanzar una determinada meta de reducción de emisiones, no alcanzan para relacionar los costos de mitigación con sus potenciales beneficios. Para ello, existen los modelos de "análisis integrado" (IAM por sus siglas en inglés, "*Integrated Assessment Models*"), los cuales relacionan las emisiones y concentraciones de GEI con posibles cambios en temperaturas, precipitaciones, etc. y consideran, a su vez, cómo estos cambios impactarían sobre la producción y la utilidad. Muchos de estos modelos son de optimización dinámica, por lo que buscan hallar la trayectoria temporal de emisiones que maximizaría los beneficios netos, en algunos casos bajo restricciones sobre las temperaturas o las concentraciones de gases.

Al presente, el estudio que mejor ha analizado los costos del Cambio Climático y los costos y beneficios de la mitigación de GEI es, claramente, Stern (2006). Este autor sostiene que la mitigación del Cambio Climático es técnica y económicamente viable y que debe ser vista como una inversión, un costo incurrido en el presente y en las próximas décadas para evitar los riesgos de posibles consecuencias severas e irreversibles en el futuro.

Stern (2006) examina los costos y beneficios económicos asociados con el Cambio Climático desde tres perspectivas diferentes:

1) Un enfoque "desde abajo hacia arriba", mediante el cual compara estimaciones de los daños que podrían provocar los impactos físicos del Cambio Climático sobre la economía, la vida humana y el ambiente con los costos de tecnologías y estrategias de mitigación específicas;

2) Un enfoque "basado en modelos", en el cual considera las interacciones entre el sistema climático y la economía global mediante ejercicios de simulación;

3) Un enfoque "basado en precios", a través del cual compara los costos marginales de mitigación con el costo social del carbono.

El enfoque "desde abajo hacia arriba" Stern lo adopta en los capítulos 3, 4 y 5 -donde analiza los impactos heterogéneos del cambio climático- y en los capítulos 8 y 9 - donde estima la escala y los costos de posibles estrategias de mitigación.

Específicamente, en el Capítulo 5 Stern (2006) estima los costos de los daños que los acontecimientos climáticos extremos (tormentas, huracanes, inundaciones, sequías, olas de calor) posiblemente impondrán sobre los PDs, sugiriendo que los mismos podrían alcanzar el 0,5-1% del PBI mundial por año a mediados de siglo (aumentando desde entonces si el planeta continúa recalentándose[19]). El autor destaca, sin embargo, que quienes sufrirán más y más tempranamente los efectos del Cambio Climático serán los países más pobres, debido a que las regiones en desarrollo se encuentran en desventaja geográfica (ya son, en promedio, más cálidas que las regiones desarrolladas y sufren de mayor variabilidad en el régimen de precipitaciones); que los PEDs (particularmente, los más pobres) dependen casi enteramente de la agricultura -el sector económico más sensible al clima- y poseen una inadecuada provisión de salud así como servicios públicos de baja calidad y que sus bajos ingresos y alta vulnerabilidad hacen que la adaptación a los efectos del Cambio Climático sea particularmente difícil. De más está decir que esto constituirá un gran obstáculo para la reducción de la pobreza.

Por su parte, en el Capítulo 9 Stern (2006) sugiere que el costo anual de alcanzar reducciones de emisiones de forma tal de estabilizar las concentraciones de GEI en 500-550 ppm CO2e para el año 2050[20] será cercano al 1% del PBI mundial de ese año (unos USD 930 mil millones), con un rango que podrá variar entre -1% (contribución

[19] Stern (2006) sugiere, por ejemplo, que un incremento del 5-10% en la velocidad de los huracanes (ligado al aumento de la temperatura de los mares) duplicaría los costos anuales actuales en EE.UU.; que en el Reino Unido las pérdidas anuales sólo por inundaciones podrían crecer del actual 0,1% del PBI a 0,2-0,4% del PBI si las temperaturas promedio suben 3°-4°C y que las olas de calor sufridas por Europa en el año 2003, donde murieron 35.000 personas y las pérdidas agrícolas alcanzaron los USD 15 mil millones, podrían ser moneda corriente para mediados de siglo. Asimismo, este autor menciona que las mayores temperaturas enfrentarían a las economías desarrolladas con mayores riesgos de shocks financieros (por ejemplo, los crecientes costos de los eventos climáticos extremos afectarían los mercados financieros globales a través de aumentos en los costos y volatilidad de los seguros).

[20] Esto corresponde a una reducción de las emisiones totales de GEI del 25% respecto de los niveles de 2002 (de 24 GtCO2/año a 18 GtCO2/año) y se asocia con un ahorro de 43 GtCO2 de emisiones de combustibles fósiles en relación con la línea de base (lo que se proyecta que ocurrirá en ausencia de actividades de mitigación), a un costo de mitigación promedio de USD 22/tCO2/año para el 2050 (1 gigatonelada (Gt) = mil millones de toneladas).

positiva al crecimiento) y 3,5%[21]. Estas estimaciones se basan en el análisis de 4 opciones tecnológicas de mitigación: 1) reducción de emisiones no relacionadas con la quema de combustibles fósiles (uso de la tierra, agricultura, desechos), las cuales explican el 40% de las emisiones globales de GEI y presentan importantes oportunidades de mitigación a bajo costo (particularmente, la deforestación evitada); 2) reducción de la demanda de productos y servicios intensivos en emisiones; 3) mejora de la eficiencia energética (ie., obtención de los mismos productos con menor cantidad de insumos); 4) cambio hacia el uso de tecnologías menos emisoras de GEI y reducción de la intensidad de carbono en la producción.

Stern destaca, por un lado, que si bien estos números son potencialmente grandes en términos absolutos, son relativamente pequeños en relación al nivel y a la expansión del producto económico mundial que, se espera, tendrá lugar durante los próximos 50 años y, por el otro, que la no-mitigación del cambio climático impondrá amenazas significativas sobre el crecimiento mundial.

En segundo lugar, el enfoque "basado en modelos" se adopta en los capítulos 6 (donde se estiman monetariamente los impactos del cambio climático sobre el bienestar) y 10 (donde se estiman los costos de mitigación asociados con la estabilización de emisiones en 500-550 ppm mediante modelos de simulación).

En el capítulo 6 Stern estima los costos que los impactos físicos del Cambio Climático tendrán sobre la economía, la vida humana y el ambiente. Para ello, utiliza un modelo de análisis integrado (el PAGE2002 IAM) y deriva una medida de costo en términos de pérdida de ingreso[22], sugiriendo que el Cambio Climático reducirá el bienestar global

[21] Este rango responde a los supuestos que se hagan respecto del paso de la innovación tecnológica y la eficiencia con la cual las políticas podrán ser aplicadas a lo largo del globo. Cuanto más rápido tenga lugar la innovación y cuanto mayor sea la eficiencia de las políticas, menores serán los costos.

[22] El PAGE2002 (*Policy Análisis of the Greenhouse Effect 2002*) IAM produce estimaciones basadas en simulaciones de Monte Carlo: corre cada escenario miles de veces eligiendo aleatoriamente cada vez un set de parámetros inciertos a partir de rangos pre-determinados de valores posibles. De esta manera, el modelo genera una distribución de probabilidades para los resultados en vez de una estimación puntual. El modelo incluye impactos de mercado (sobre la agricultura, energía, etc.) e impactos de no mercado (efectos sobre el ambiente y la mortalidad humana), así como la posibilidad de impactos climáticos catastróficos. Específicamente, el modelo toma como línea de base una proyección de crecimiento anual promedio del PBI de 1.9% y corre 1000 estimaciones de una medida del PBI global donde se le restan los costos de los daños del Cambio Climático y de adaptación para el período 2001-2200, obteniendo así una distribución de probabilidad del ingreso global neto de los daños del Cambio Climático y de los costos de adaptación. Esta distribución de probabilidad es transformada en una medida de PBI per cápita dividiendo cada estimación por la población estimada (suponiendo un crecimiento poblacional anual de 0.6%), la cual es transformada, a su vez, en una medida de consumo global per cápita restándole una tasa de ahorro del 20% (supuesto arbitrario). Suponiendo una función de utilidad U(t)=ln C(t), se calcula entonces la

en una medida equivalente a una reducción de 5-20% en el consumo per cápita desde ahora y para siempre[23]. Estas estimaciones son claramente superiores a las derivadas de modelos anteriores, los cuales no consideraban los riesgos asociados con aumentos en las temperaturas superiores a los 2,5ºC. Estos modelos sugerían que los costos de los efectos del Cambio Climático no superarían el 1,5-2% del PBI global (1-1,5% en PDs y 2-9% en PEDs).

Por su parte, en el Capítulo 10 Stern (2006) compara las estimaciones de costos de mitigación de GEI provenientes de diversos modelos macroeconómicos disponibles en la literatura. Estos modelos parten de diferentes supuestos -los cuales reflejan las incertidumbres existentes tanto en el mundo real como en las visiones acerca de la estructura apropiada de modelización- y arrojan, por lo tanto, diferentes rangos de estimaciones. Sin embargo, ninguno contradice la conclusión central de que es posible mitigar el Cambio Climático a un costo cercano al 1% del PBI global. En las simulaciones consideradas, los mayores costos provienen de aquellos modelos que suponen limitadas oportunidades de sustitución, poco aprendizaje tecnológico y escasa flexibilidad acerca de cuándo y dónde recortar emisiones.

Finalmente, en el enfoque "basado en precios" Stern compara el "costo social" del carbono (es decir, el impacto de emitir una unidad extra de carbono en cualquier momento sobre el valor presente de la utilidad o bienestar esperado) con los costos marginales de mitigación de GEI. Si el "precio" de las emisiones (el costo social) es mayor que el costo de detener la emisión de una unidad extra de carbono (costo marginal de mitigación) vale la pena realizar acciones de mitigación pues éstas generarán un beneficio neto. En otras palabras, si el costo marginal de mitigación es

---

utilidad global ponderada por la población global integrando $W = \int_{t=1}^{\infty} N(t)U(t)e^{-\delta t}dt$. Para el horizonte de modelización 2001-2200, calculan la utilidad total descontada como la suma de las utilidades descontadas en cada año individual: $W = \sum_{t=1}^{2200} N(t)U(t)e^{-\delta t}$ y aproximan la utilidad del año 2200 a infinito suponiendo una tasa de crecimiento del consumo per cápita de 1.3% anual y población constante. La utilidad esperada está dada entonces por la media de la utilidad total descontada desde 2001 a infinito a lo largo de 1.000 estimaciones. Finalmente, miden la pérdida en el bienestar futuro esperado debido al Cambio Climático hallando el "Equivalente de Crecimiento Balanceado" (BGE, por sus siglas en inglés) de la trayectoria de consumo descontada, es decir, el nivel de consumo per cápita que, creciendo a una tasa constante (1.3% anual) generaría la misma utilidad actual en el futuro. De esta manera, restan el BGE de una trayectoria de consumo con Cambio Climático y otra sin él. La diferencia es el costo del Cambio Climático, medido en términos de una pérdida permanente de consumo desde ahora y para siempre.

[23] El rango de 5-20% depende de si se incluyen o no impactos de no-mercado, si se consideran o no efectos climáticos de retroalimentación y si se toman en cuenta o no los impactos distribucionales (el hecho de que los países más pobres serán quienes sufran los mayores impactos).

menor que el costo marginal del daño de largo plazo causado por el Cambio Climático, será rentable invertir en mitigación.

Los cálculos de Stern (2006) sugieren que el costo social del carbono en una trayectoria *business-as-usual* (BAU) -es decir, donde las actividades productivas y los niveles de emisiones sean iguales a los actuales- es mucho mayor que los costos marginales de mitigación hoy. Las estimaciones del PAGE2002 sugieren que el costo social del carbono estaría en el orden de 85 USD/tCO2[24], mientras que los costos de varias opciones de mitigación disponibles actualmente (deforestación evitada, ciertos procesos industriales, desechos -sitios de relleno y tratamiento de aguas-, forestación y reforestación, agricultura, cambios en el manejo de la tierra) estarían en el rango de 1-27 USD/tCO2. Además, es factible que el costo social del carbono continúe creciendo con el tiempo, debido a que los daños marginales aumentan con el incremento de los stocks de GEI en la atmósfera.

El Informe concluye, por lo tanto, que los beneficios derivados de la mitigación serán mucho mayores que sus costos y que ignorar el problema del Cambio Climático hoy podría dañar el crecimiento económico en este siglo y el siguiente. Además, dificultaría -o, directamente, imposibilitaría- la reversión de los efectos del calentamiento global en el futuro. Por lo tanto, abordar el problema del Cambio Climático hoy constituye la mejor estrategia para apuntalar el crecimiento económico en el largo plazo y puede hacerse sin limitar las aspiraciones de crecimiento de los países ricos ni de los pobres. Cuanto antes se encaren acciones efectivas, menos costosas éstas serán.

2.5 Las incertidumbres que plantea el Cambio Climático

Las incertidumbres respecto de los costos y beneficios derivados del Cambio Climático son múltiples (ver Chidiak, 2006). Existe incertidumbre, por ejemplo, respecto de la magnitud ecológica del daño que podría efectivamente generarse como consecuencia del Cambio Climático, de los efectos posibles de la retroalimentación, del horizonte temporal a partir del cual los daños provocados al medio ambiente se volverían irreversibles, del nivel al que se deberían estabilizar las concentraciones de GEI de modo tal de evitar impactos dramáticos sobre el medio ambiente, de los costos que efectivamente demandaría el cumplimiento de compromisos cuantitativos de

[24] Si, en cambio, en lugar de mantenerse en una trayectoria BAU el mundo se trasladara hacia otra con un objetivo de estabilización de 450-550 ppm, el costo social del carbono caería a USD 25-30.

mitigación y adaptación (costos de las tecnologías), de la efectividad que verdaderamente tendrían las acciones de mitigación para frenar el calentamiento global y, en lo que respecta al marco político, sobre qué se podrá negociar y acordar en el futuro. Asimismo, existe incertidumbre sobre si las tecnologías existentes alcanzan para lograr la estabilización de las emisiones en los niveles de concentración requeridos o si se precisa de nuevas tecnologías aún no creadas (es decir, no se sabe con certeza si es necesario incrementar los niveles de innovación tecnológica o si basta con difundir las tecnologías existentes) (ver sección 2.7). Muchas de estas incógnitas son más acentuadas en los PEDs, puesto que estos países enfrentan mayores limitaciones de conocimiento en cuanto a su real vulnerabilidad frente a los efectos del Cambio Climático y a las posibilidades, costos y beneficios de los esfuerzos que podrían eventualmente encarar.

Las incertidumbres inherentes al problema del Cambio Climático plantean dudas respecto de si es conveniente embarcarse hoy en actividades de mitigación o si es preferible esperar hasta que algunos de los interrogantes sean resueltos. En este aspecto, la teoría económica sugiere que, si no existen costos fijos ni irreversibilidades, se deberían mitigar GEI hoy hasta el punto en que los costos marginales de mitigación y los daños marginales se igualen (Kolstad, 2001; Azqueta, 2002). Sin embargo, el Cambio Climático involucra costos fijos y decisiones irreversibles tanto en materia de costos (en términos de las inversiones realizadas en tecnologías menos intensivas en CO2) como de daños (en términos de emisiones acumuladas). Estos factores pueden derivar en la conveniencia de una mayor intensidad de acción o inacción, dependiendo de la magnitud de los respectivos valores hundidos. Empíricamente, los modelos analíticos y numéricos tienden a recomendar el inicio de acciones de reducción de emisiones de GEI en el presente, debido a la existencia de costos marginales de mitigación despreciables en contraste con daños ambientales potencialmente grandes (Goulder y Pizer, 2006).

No obstante, existen varias críticas a este planteo. Lomborg (2001) afirma que, dados los inciertos retornos de llevar a cabo acciones contra el Cambio Climático, sería mejor gastar ese dinero en inversiones que arrojen beneficios ciertos hoy. Por ejemplo, dado que es más factible que el Cambio Climático haga más daño en los países más pobres, este autor plantea que sería más conveniente invertir en estos países en cuestiones tales como educación, infraestructura, etc., que no sólo beneficiarían a la población pobre hoy sino que también les proveería herramientas para lidiar con los potenciales riesgos del Cambio Climático. Su argumento se basa en que la

vulnerabilidad de un país como Bangladesh a un aumento de tan sólo un metro en el nivel del mar se basa en su condición de país pobre, que hace que haya muchos establecimientos agrícolas de subsistencia alrededor de la Bahía de Bengala en lugar de muchas oficinas y fábricas en ciudades alejadas del mar, como ocurre en Corea del Sur, por ejemplo. Por lo tanto, la mejor protección para Bangladesh sería el desarrollo, y cualquier cosa que reduzca su tasa de crecimiento (incluyendo la mitigación del Cambio Climático) volvería al país más vulnerable frente a los efectos del calentamiento global.

No obstante, la respuesta de quienes ven en el Cambio Climático una amenaza con altas probabilidades de materialización es que este planteo tiene sólo una parte de verdad, pues el principal problema del Cambio Climático es que podría derivar en consecuencias muchísimo más graves que un aumento de un metro en el nivel del mar. Si estas posibilidades más extremas son incluidas en los cálculos y si se promedian los daños potenciales con los moderados, los efectos "protectores" del desarrollo económico pierden relevancia respecto de los beneficios derivados de la acción de mitigación directa (Stern, 2006; The Economist, 2006).

En este contexto, ha surgido una variedad de modelos numéricos sofisticados para lidiar explícitamente con el problema de la incertidumbre (ver Goulder y Pizer, 2006). Algunos utilizan simulaciones de Monte Carlo, en las cuales el modelo es resuelto repetidamente utilizando cada vez un set diferente de valores de los parámetros, los cuales son elegidos al azar a partir de una distribución probabilística pre-asignada. Este enfoque produce una distribución de probabilidad para distintos resultados de política, lo cual permite arrojar cierta luz sobre cuál sería el diseño de medidas más apropiado. Estos modelos probabilísticos suelen dar como resultado óptimo políticas climáticas más agresivas que las que surgen de los análisis determinísticos.

2.6 La elección de instrumentos para la mitigación de GEI

Siguiendo a Chidiak (2001), Azqueta (2002) y Kolstad (2001), los instrumentos de política disponibles para promover la reducción de emisiones de GEI pueden ser categorizados de la siguiente manera:

1) Instrumentos económicos: influyen en el comportamiento de los emisores mediante el otorgamiento de incentivos económicos. Incluyen:

- Impuestos por unidad de emisión (generalmente conocido como "impuesto Pigouviano[25]");
- Subsidios (a la reducción de emisiones, al desarrollo de nuevas tecnologías más limpias, etc.) por unidad de mitigación;
- Sistemas de permisos de emisión negociables (se emiten permisos por la cantidad total de emisiones permitidas y se distribuyen entre las firmas -ya sea de manera gratuita ("*grandfathered*") o mediante subasta-, pudiendo transar estos permisos en un mercado).

Estos instrumentos pueden ser clasificados como de "precio" (impuestos, subsidios) o de "cantidad" (sistema de permisos negociables), según la decisión de política que involucren. Los primeros se basan en la introducción de un precio ligado a la conducta que se quiere desestimular o fomentar: la empresa puede emitir GEI, pero paga por ello (o se le paga para que deje de hacerlo). Los segundos se basan en un racionamiento vía cantidad y en la creación de mercados: el regulador fija los niveles máximos de emisión admisibles y permite que los agentes negocien entre ellos permisos previamente otorgados.

2) Instrumentos regulatorios: imponen límites sobre el comportamiento de los emisores. Incluyen:

- Prohibiciones (de insumos, procesos o productos);
- Estándares de performance (por ejemplo, determinación de cantidades de uso de energía por unidad de producto);
- Estándares o cuotas de emisión (emisiones máximas tolerables);
- Estándares tecnológicos (obligación de uso de determinadas tecnologías para ciertos procesos).

Los estándares o cuotas son considerados también instrumentos "de cantidad", pues imponen límites cuantitativos a las emisiones.

3) Acuerdos voluntarios: las firmas se comprometen a reducir sus emisiones por encima de lo requerido por ley. Estas aproximaciones permiten al contaminador elegir el objetivo de política o bien los medios para alcanzarlos (ver Chidiak, 2001 para un análisis en profundidad sobre este instrumento).

4) Instrumentos de provisión de información: incluyen, por ejemplo, campañas de difusión gubernamentales sobre el uso eficiente de la energía.

[25] Pigou fue el primer economista en recomendar el uso de un impuesto para corregir una externalidad negativa.

5) Instrumentos de etiquetado: proveen información a usuarios y consumidores de que un determinado producto o proceso productivo es "ambientalmente amigable" o "eficiente energéticamente" mediante una etiqueta o sistema de certificación.

Existen básicamente cuatro criterios para comparar y elegir entre las alternativas mencionadas:

a) **Eficacia** (que se consiga alcanzar el objetivo propuesto sin causar daños ambientales de otro tipo, en otro lugar o en otro momento);
b) **Flexibilidad** (que las medidas seleccionadas puedan adaptarse con rapidez a cambios en la situación de referencia);
c) **Equidad** (que las medidas posean un impacto redistributivo homogéneo);
d) **Eficiencia** (que se puedan minimizar los costos de toda índole en que incurre la sociedad para alcanzar el objetivo propuesto).

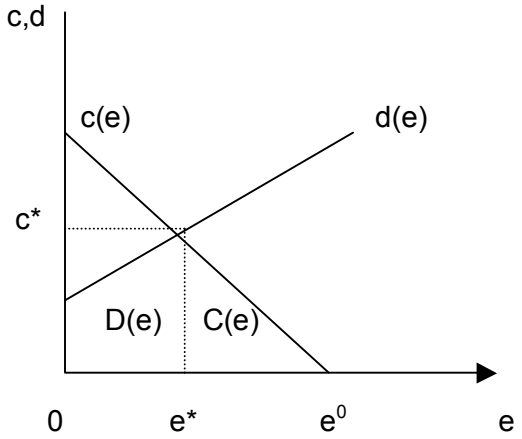
Como es sabido, el criterio más utilizado dentro de la teoría económica para elegir entre instrumentos de política ambiental es la eficiencia. Concretamente, se suele usar el concepto de "eficiencia de Pareto", es decir, que sea imposible mejorar el bienestar de un individuo sin empeorar el de al menos otro. Este criterio no toma en cuanta la equidad sino sólo que no haya desperdicio en la asignación de recursos en la sociedad.

Se suele analizar, entonces, si los instrumentos de política ambiental cumplen con el criterio de eficiencia tanto desde un punto de vista estático (habilidad para alcanzar la optimalidad de Pareto en el corto plazo, es decir, tomando como dados la tecnología, el capital y el número de firmas que operan en el mercado) como dinámico (habilidad para alcanzar la optimalidad en el largo plazo, es decir, considerando las inversiones de las firmas en capital y tecnología y sus decisiones en materia de I&D). Específicamente, la literatura suele comparar los instrumentos mencionados de acuerdo a dos conceptos relacionados con el criterio de eficiencia: i) "costo-eficiencia" (qué instrumento alcanza un determinado objetivo ambiental a un mínimo costo) y ii) "costo-efectividad" (qué instrumento alcanza el mayor nivel de protección ambiental a un costo dado).

2.6.1 Eficiencia estática

El análisis económico teórico (ver Chidiak, 2001) generalmente considera un regulador benevolente que maximiza el bienestar social (o minimiza el costo social) seleccionando el nivel de emisiones (e) que minimiza la suma de los daños provocados por las emisiones (en términos monetarios) -D(e)- y los costos de mitigación de GEI -C(e)- (esto implica balancear el daño ambiental que las emisiones provocan a la sociedad con los costos de mitigación que enfrentan las firmas). La condición de primer orden que arroja este problema (condición de optimalidad de Pareto) es c(e*)=d(e*) (Figura 1).

Figura 1
Determinación del nivel óptimo de emisiones



Fuente: Chidiak (2001)

Es decir, que el óptimo social requiere que el costo social marginal del daño -d(e*)- sea igual al costo marginal de mitigación privado -c(e*)-. En este punto, no pueden reducirse ni los costos de mitigación ni los daños ambientales sin imponer a la sociedad o a los contaminadores costos excesivamente altos. Para niveles de emisión superiores a e* la sociedad enfrentará un costo marginal superior al de los contaminadores, mientras que para niveles inferiores a e* ocurrirá lo contrario.

La solución óptima (e*) puede ser alcanzada mediante un instrumento de precio (un impuesto c* por unidad de emisión o un subsidio c* por unidad de mitigación) o bien de cantidad (un estándar de emisión e* o un sistema de permisos negociables, repartiendo un total de e* permisos entre los n contaminadores).

Sin embargo, si el regulador se enfrenta a contaminadores heterogéneos (con diferentes costos de mitigación), el problema de política ya no consistirá sólo en determinar el nivel agregado óptimo de emisiones (e*) sino también la distribución

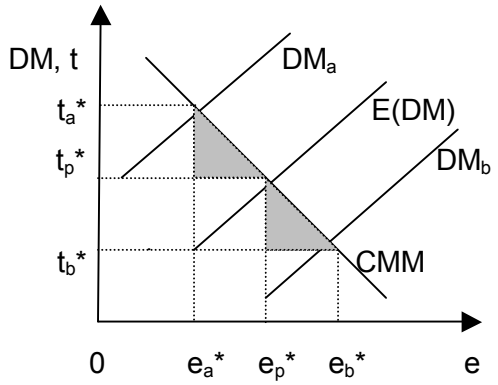
óptima de los esfuerzos de mitigación entre los diferentes tipos de contaminadores. En este caso, sólo un impuesto o un sistema de permisos negociables permitirán alcanzar el resultado óptimo (es decir, el nivel óptimo de emisiones agregadas de manera costo-efectiva). La implementación de un estándar o cuota de emisión requerirá grandes esfuerzos de mitigación por parte de contaminadores que enfrentan altos costos (es decir, siempre será beneficioso transferir unidades de mitigación desde las firmas con mayores costos hacia las de menores costos, hasta que sus costos marginales de mitigación se igualen). Por su parte, los subsidios requerirán de financiamiento público.

Cabe mencionar en este punto que, en lo que respecta al impacto fiscal de las diferentes opciones de política, la recomendación teórica para lograr una mayor eficiencia es utilizar los ingresos derivados de los instrumentos ambientales para financiar reducciones de impuestos distorsivos pre-existentes (impuestos sobre los ingresos, ventas, etc.) mediante una redistribución en forma de suma fija (*lump sum*) y no utilizar los ingresos para financiar *ad hoc* políticas ambientales (créditos blandos para nuevas tecnologías, subsidios a víctimas de daños, etc.). Sino, se estarían creando incentivos que podrían modificar el comportamiento de las firmas en sectores intensivos en GEI (por ejemplo, un aumento en la tasa de entrada de empresas). En este sentido, los impuestos al carbono y los sistemas de permisos con subasta que empleen los ingresos generados para disminuir la carga de impuestos existentes tendrán una ventaja en relación a los subsidios (y a los sistemas de permisos otorgados gratuitamente), los cuales precisan de la elevación de otros impuestos para ser financiados (Goulder y Pizer, 2006).

Ahora bien, cuando el regulador toma decisiones de política bajo incertidumbre, su objetivo ya no consiste en determinar la política óptima sino más bien en minimizar los errores de política que pueden resultar de su disponibilidad de información limitada. Por más que elija la política más eficiente dada la información disponible ex-ante, su elección puede volverse ineficiente ex-post, dados los verdaderos parámetros de política.

En términos de eficiencia estática, si el regulador posee incertidumbre respecto del daño marginal (DM) que provocarán las emisiones de GEI a la atmósfera, un impuesto pigouviano y un sistema de permisos negociables serán equivalentes. Como muestra la Figura 2, la incertidumbre sobre el daño marginal implica que dos funciones de daño (alto y bajo) pueden ser posibles (DM_a y DM_b), con un valor esperado igual a E(DM).

Figura 2
Elección de instrumentos bajo incertidumbre sobre el daño marginal

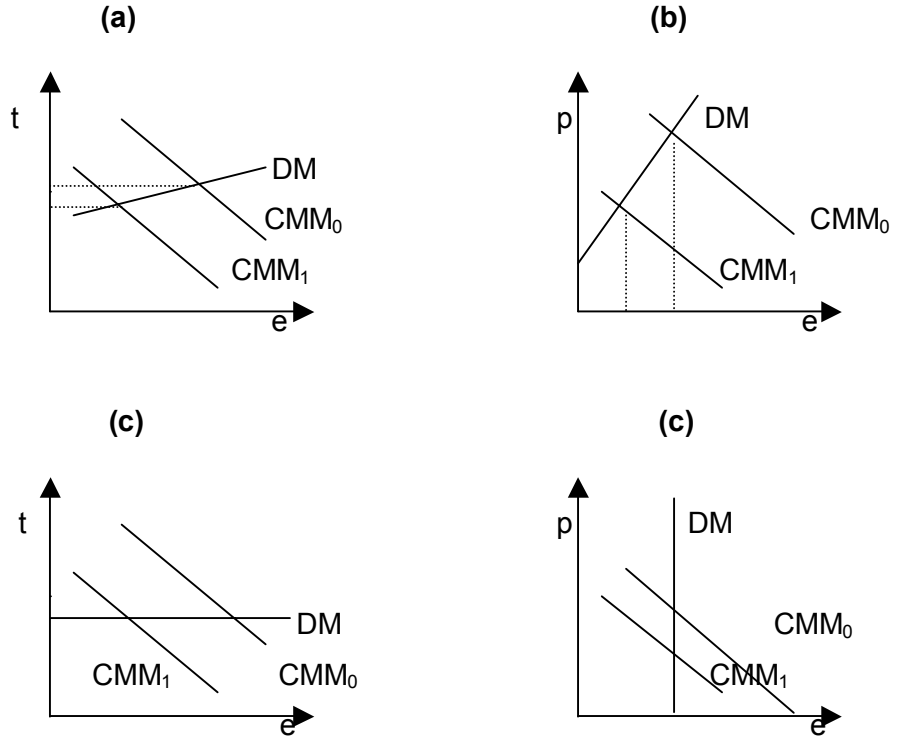


Fuente: Chidiak (2001)

En ambos casos, el resultado agregado será el nivel de emisiones promedio e_p^* a un costo marginal de t_p^*. Por lo tanto, ya sea que ex-post resulte que se "sobre" o se "sub-mitigó" (es decir, que DM_b o DM_a respectivamente resulte ser la verdadera curva de daño marginal), el error de política (los triángulos sombreados) será igual bajo los dos instrumentos.

Sin embargo, si el regulador posee incertidumbre respecto de los costos marginales de mitigación (CMM) que enfrentan las firmas privadas, la elección de un instrumento de precio o de cantidad arrojará resultados diferentes en materia de errores de política esperados: cuando la curva de costo marginal de mitigación sea más empinada que la curva de daño marginal (es decir, cuando sea relativamente más importante no errar en materia de precios), los instrumentos de precio (impuestos) minimizarán los errores de política esperados (imponen un techo a los costos de mitigación) y serán, por lo tanto, óptimos desde el punto de vista de la eficiencia (Figura 3.a). En el caso contrario, cuando la curva de daño marginal sea más empinada que la de costo marginal (es decir, cuando los errores en materia de cantidad de emisiones resulten ser más costosos), será el sistema de permisos negociables el instrumento preferido (pues impone un techo a las emisiones) (Figura 3.b). En los casos extremos de curva de daño marginal horizontal (Figura 3.c), establecer un impuesto asumiendo CMM_0 no involucrará error de política alguno si los costos resultan ser CMM_1. De manera similar, si la curva de daño marginal es vertical, establecer un instrumento de cantidad (por ejemplo, un sistema de permisos) no arrojará errores de política (Figura 3.d).

Figura 3
Elección de instrumentos bajo incertidumbre en los costos marginales de mitigación



Fuente: Chidiak (2001)

Las estimaciones empíricas de curvas de costos de mitigación y de daños marginales globales esperados son controversiales. Sin embargo, la literatura sugiere que, para el rango de niveles de mitigación y emisiones considerado (alta mitigación y valores relativamente bajos de emisiones globales) la curva de CMM sería relativamente empinada mientras que la de DM permanecería aplanada (ver trabajos citados en Chidiak, 2001 y Goulder y Pizer, 2006). Sin embargo, se destaca que la curva de DM puede volverse empinada una vez que se alcance un umbral de emisiones a partir del cual se disparen riesgos climáticos irreversibles. Por lo tanto, un impuesto sobre las emisiones de GEI sería, por el momento, más eficiente que un sistema de permisos negociables, es decir, que es preferible que el nivel de emisiones permanezca incierto (que es el resultado bajo un impuesto) antes de que el precio marginal de la reducción de emisiones permanezca incierto (que es el resultado bajo un sistema de permisos).

2.6.2 Eficiencia dinámica

Desde el punto de vista de la eficiencia dinámica, es decir, la habilidad para alcanzar la eficiencia en el largo plazo mediante decisiones de inversión e I&D, el análisis

teórico se focaliza en los efectos de los diferentes instrumentos de política sobre el desarrollo tecnológico y la estructura industrial, lo que implica analizar no sólo las decisiones de contaminación sino también aquéllas que afectan la innovación y la estructura de los mercados de productos (ver Chidiak, 2001).

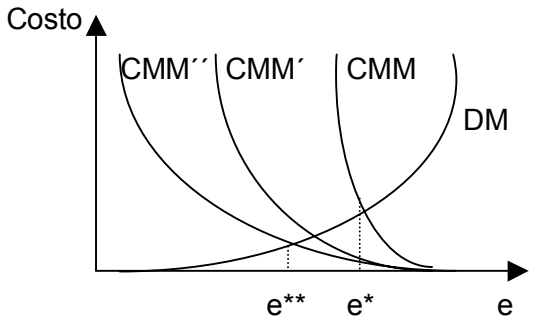
El análisis básico de eficiencia dinámica sugiere que los impuestos pigouvianos y los sistemas de comercio de permisos son los instrumentos que permiten alcanzar soluciones óptimas, pues proveen señales de precios que hacen que las firmas enfrenten incentivos apropiados para la innovación tecnológica y las decisiones de entrada y salida a la industria: si las emisiones se vuelven costosas, por un lado las firmas contaminantes serán reemplazadas por otras más "limpias" y, por el otro, las empresas tendrán mayores incentivos a desarrollar tecnologías menos emisoras de GEI.

Siguiendo a Chidiak (2001), en lo que respecta a los efectos sobre la estructura industrial en el largo plazo, la literatura destaca, en primer lugar, que los impuestos y los subsidios no proveen iguales incentivos para reducir las emisiones de GEI: los últimos crean beneficios extraordinarios en la industria, fomentando la entrada de nuevas empresas y generando, eventualmente, emisiones acumuladas a largo plazo mayores en vez de menores a nivel agregado. En segundo lugar, en relación al modo de otorgamiento de los permisos de emisión, se menciona que éstos deben ser subastados y no repartidos gratuitamente a fin de alcanzar la estructura industrial óptima (es decir, el número óptimo de empresas): si los permisos son repartidos gratuitamente, el número de firmas será demasiado alto. En tercer lugar, la literatura resalta las ventajas de los impuestos sobre la regulación directa (cuotas de emisión) en cuanto a la carga financiera total que deben enfrentar las empresas emisoras de GEI: una cuota hace que las firmas incurran en costos de mitigación sólo en la cuantía que exceda el nivel de emisiones permitido. Un impuesto, en cambio, hace que las firmas paguen por cada una de las unidades de GEI que emiten, imponiendo un peso financiero total mayor. Por lo tanto, dado que los beneficios bajo una cuota son mayores que bajo un impuesto, eventualmente más empresas entrarán a la industria y generarán, en el largo plazo, emisiones agregadas mayores que bajo un impuesto.

En cuanto a los efectos de los diferentes instrumentos de política sobre la innovación tecnológica, Chidiak (2001) cita los hallazgos de Milliman y Prince (1989), la clásica referencia en esta materia. Estos autores destacan que el efecto completo del cambio tecnológico a nivel de firma puede descomponerse en tres efectos: la innovación ("los

descubrimientos significativos que poseen aplicabilidad inter-firma"), la difusión ("la adopción de la nueva tecnología entre firmas") y la respuesta óptima de agencia (es decir, la respuesta de los reguladores a estas innovaciones). La Figura 4 ilustra los diferentes componentes del efecto total involucrado en el paso de e* (el óptimo social previo al cambio tecnológico) a e** (el óptimo social luego del cambio tecnológico).

Figura 4
Efecto total del cambio tecnológico sobre los costos marginales de mitigación y el nivel óptimo de emisiones



Fuente: Chidiak (2001)

La innovación traslada hacia abajo la curva de costo marginal de mitigación desde CMM hasta CMM´, mientras que la difusión vuelve a trasladarla hasta CMM´´. Por su parte, la respuesta óptima de agencia será el ajuste necesario de política (en el número de permisos, tasa del impuesto, nivel de la cuota o del subsidio) que garantice el movimiento hasta e**.

En este marco, los autores comparan los incentivos a la innovación que proveen los diferentes instrumentos de política comparando el cambio en la carga financiera que enfrenta una firma bajo cada instrumento antes y después de la innovación (comparan resultados de estática comparativa más que efectos dinámicos). La principal conclusión de su análisis es que los permisos de emisión subastados proveen los mayores incentivos para la innovación y la difusión. Su desempeño es mejor que el de los impuestos debido a las potenciales ganancias financieras que surgen para las firmas innovadoras derivadas de la posible venta de los permisos "que les sobran" en el mercado. Los impuestos y los subsidios se ubican en segundo lugar y proveen incentivos a la innovación similares. Los permisos repartidos gratuitamente y el control directo (cuotas) ocupan las posiciones tercera y cuarta, respectivamente.

Chidiak (2001) destaca, sin embargo, que estos resultados surgen de suponer mercados competitivos, costo cero de innovación y apropiabilidad completa de los beneficios de la innovación y que existen contribuciones más recientes que arrojan resultados más controversiales en lo que respecta al impacto de los diferentes instrumentos sobre la innovación tecnológica. Algunos autores destacan, por ejemplo, que si se consideran costos de innovación y efectos dinámicos explícitamente, el mercado de permisos provee incentivos para sub-invertir en I&D, pues el regulador "expropia" las rentas derivadas de la innovación, y que se precisa de un subsidio para inducir el nivel óptimo de actividad innovativa. Otros hallan que en un entorno competitivo (es decir, con un gran número de empresas tomadoras de precios) todos los instrumentos proveen los mismos incentivos a la innovación siempre y cuando haya una respuesta regulatoria óptima y que, a lo sumo, el ranking dependerá de la habilidad de las firmas para imitar la innovación, los costos de la innovación, la pendiente de la curva de daño marginal y el número de empresas. Finalmente, otros abogan por la utilización de un *policy-mix,* es decir, una combinación de instrumentos (permisos o impuestos + subsidios) para corregir, por separado, las diferentes fallas de mercado (externalidades) que están bajo análisis: las emisiones de GEI y la inapropiabilidad total de los beneficios derivados de la innovación.

En la sección 2.7 se analiza con mayor profundidad la importancia del cambio tecnológico para la mitigación del Cambio Climático.

2.6.3 La relevancia de la flexibilidad en la elección de políticas climáticas

La literatura remarca la importancia de dotar a las firmas y/o naciones de flexibilidad para buscar oportunidades de mitigación donde y cuando sea más económico (ver Goulder y Pizer, 2006). Esta flexibilidad puede ser alcanzada incluyendo en el programa la mayor cantidad de fuentes de emisión como sea posible así como proveyendo oportunidades a las empresas de cumplir con sus obligaciones permitiendo la mitigación de diferentes GEI (algunos modelos sugieren que la mitad de las reducciones alcanzables a un costo de USD 5-10 por tonelada de CO2e corresponden a gases distintos del CO2) a lo largo del tiempo (debido a que las consecuencias climáticas se deben a las concentraciones acumuladas de gases y no a las emisiones anuales, la teoría resalta que el intercambio de emisiones temporalmente no afectaría el medioambiente siempre que la cantidad acumulada de emisiones no varíe y que esta flexibilidad permitiría una elección temporal eficiente en respuesta al recambio de capital y al progreso tecnológico) y más allá de las fronteras

nacionales (dado que las consecuencias climáticas de la emisión de GEI no dependen de dónde se encuentre la fuente, en términos de eficiencia económica se recomienda que los sistemas sean lo más abarcativos geográficamente posible, priorizando las políticas federales por sobre las estaduales y la coordinación internacional por sobre las iniciativas domésticas).

Asimismo, se destaca que la mitigación de GEI no es la única solución posible al problema del Cambio Climático sino que el secuestro de carbono tanto biológico (eg., forestación) como geológico (eg., inyección de CO2 en reservorios vacíos de petróleo o gas) puede contribuir considerablemente (no obstante, se menciona que si bien el secuestro biológico constituye una respuesta económica de corto plazo, el geológico representa una alternativa muy costosa en el presente, pero que podría formar parte de una política de largo plazo si se logra disminuir sus costos).

2.6.4 Evidencia empírica

A diferencia del resto de las áreas de política ambiental, donde existe un uso extendido de regulaciones directas, al analizar la experiencia internacional en materia de aplicación de políticas climáticas para la mitigación de GEI se observa una creciente utilización de instrumentos económicos, fundamentalmente, sistemas de comercio de permisos de emisión y, en menor medida, impuestos (Chidiak, 2001).

El uso de sistemas de comercio de permisos está ganando creciente relevancia a partir de la entrada en vigencia del PK. Como ya mencionamos, el PK contempla la inclusión de tres mecanismos de flexibilidad: el Sistema de Comercio de Permisos de Emisión (SCPE), que permite el intercambio de permisos entre países Anexo I, el MDL y el mecanismo de IC. Los últimos dos involucran la generación de certificados de reducción de emisiones de GEI provenientes de proyectos en PEDs y países de Europa del Este, respectivamente, permitiendo su compra por parte de países Anexo I. En este contexto, se observa, fundamentalmente desde el año 2004, un creciente volumen de comercio tanto de permisos como de certificados basados en proyectos en mercados que se fueron creando ya sea como preparación para el primer período de compromiso del PK (2008-2012) o bien por compromisos voluntarios pero vinculantes en países que no lo ratificaron aún. En el Capítulo 3 se analiza en detalle el desempeño reciente de estos mercados. Aquí sólo mencionaremos que el diseño de estos sistemas difiere, por el momento, de las prescripciones teóricas esbozadas en las secciones anteriores, en el sentido de que no explotan todo el potencial de

eficiencia del instrumento: en lugar de ser subastados, los permisos se otorgan gratuitamente en función de las emisiones pasadas de las firmas participantes.

Por su parte, han tenido lugar algunos intentos -no todos ellos fructíferos- por introducir impuestos a la energía o al carbono a nivel nacional. Cabe mencionar, en primer lugar, la iniciativa de algunos países nórdicos en la década de 1990. En 1991, Suecia impuso un impuesto de USD 100/tn en el uso de petróleo, carbón, gas natural y otros combustibles y Finlandia, Noruega y los Países Bajos la siguieron posteriormente. En estos casos, se observó, mayoritariamente, que su implementación tampoco cumplió con las recomendaciones de la teoría económica: los impuestos no fueron redistribuidos de manera neutral en forma de suma fija (de forma tal de no afectar los incentivos de los contaminadores a reducir emisiones) y, en muchos casos, no fueron establecidos de acuerdo a estimaciones de daños marginales sino en función de metas recaudatorias y fueron aplicados junto con regulaciones directas (Chidiak, 2001). Por su parte, en el año 2001 el Reino Unido introdujo el *Climate Change Levy,* un impuesto al uso de energía utilizada en el sector no residencial (industria, comercio y sector público) que apunta a incentivar a estos agentes a mejorar la eficiencia energética y reducir sus emisiones de GEI.

Asimismo, hubieron varios “intentos fallidos” por implementar impuestos a las emisiones. Los casos más emblemáticos fueron el “impuesto BTU” propuesto por Bill Clinton, el impuesto al CO2 de la UE y el impuesto al carbono sugerido más recientemente por Nueva Zelanda. En primer lugar, Bill Clinton propuso en 1993 implementar un impuesto a todos los productos energéticos basados en el contenido calórico (BTU, *British Termal Unit*) de cada uno de los combustibles. El impuesto afectaría al carbón, el gas natural, la energía nuclear, la hidro-electricidad, así como a la energía importada. La iniciativa enfrentó fuerte oposición (especialmente de las empresas petroleras, pero no sólo de ellas) y nunca llegó a entrar en vigencia (el Congreso terminó aprobando una ley muy limitada en sus efectos). En segundo lugar, la UE propuso también a mediados de los noventa la implementación de un impuesto 50/50 sobre emisiones específicas de CO2 y sobre la energía en general (carbón, petróleo, gas natural y energía nuclear). Los estados miembros, sin embargo, no lograron acordar una estrategia consensuada de implementación. Finalmente, en 2005 Nueva Zelanda propuso la introducción de un impuesto por tonelada de CO2e que entraría en vigencia en abril de 2007 y que afectaría a la mayoría de los sectores económicos, con la excepción de las emisiones de metano provenientes de las prácticas agrícolas y aquéllas actividades intensivas en carbono que adoptasen las

mejores prácticas internacionales en materia de estándares de emisiones. Sin embargo, la iniciativa sufrió una fuerte oposición y la idea fue finalmente descartada luego de las elecciones que tuvieron lugar en 2005.

Como destaca Chidiak (2001), la evidencia empírica sugiere que se pierden sustanciales ganancias de eficiencia debido al diseño que exhiben las políticas climáticas en vigencia y, peor aún, a la imposibilidad de implementar instrumentos económicos en ciertos casos. La autora revisa, entonces, una gama de literatura que en vez de adoptar un enfoque prescriptivo (como el de las secciones anteriores) para analizar la implementación de políticas climáticas adopta un enfoque positivo y procura identificar las razones que están detrás del comportamiento de política observado en el "mundo real".

Las principales conclusiones que surgen de la literatura revisada en Chidiak (2001) son dos. En primer lugar, que existe un rango más amplio de objetivos de política y de criterios de selección de instrumentos que resultan relevantes para la toma de decisión en la práctica y que van más allá del criterio de eficiencia destacado en la literatura teórica. Estos son fundamentalmente tres:

1) La equidad: en términos de los efectos distributivos de los diferentes instrumentos de política, los económicos están en desventaja frente a la regulación directa, pues implican una mayor carga financiera total. Asimismo, estas políticas aumentan inevitablemente los precios de la energía, lo que impacta particularmente sobre aquellos agentes con menor capacidad de sustitución (sectores intensivos en energía, hogares de bajos ingresos, etc.);

2) Los costos administrativos y la factibilidad de implementación: muchas recomendaciones de política ignoran los costos administrativos involucrados en la introducción y manejo de los diversos instrumentos;

3) La aceptabilidad política: la necesidad de que los diferentes grupos que enfrentarán los nuevos instrumentos los acepten.

En segundo lugar, que existen ciertos grupos de presión que juegan un rol muy relevante en el proceso de formulación e implementación de políticas. De esta manera, los grupos que son altamente afectados por los efectos distributivos negativos de los

instrumentos económicos tendrán un incentivo a organizarse y hacer *lobby* contra su introducción (enfoque de economía política).

2.7 La importancia de la innovación tecnológica

Debido a que el clima depende del stock atmosférico de GEI y a que la mayoría de los gases, como ya mencionamos, poseen largos períodos de permanencia en la atmósfera, el Cambio Climático es un problema inherentemente de largo plazo. En este contexto, la innovación tecnológica se vuelve una cuestión central dentro del abanico de consideraciones políticas.

Según la literatura existente, las fuentes para disminuir las emisiones de CO2 y ahorrar energía a través del cambio tecnológico son, fundamentalmente, dos: la "descarbonización" de los servicios energéticos y la reducción de la intensidad energética de las actividades económicas (Bosetti et al, 2006; Stern, 2006). La segunda fuente, claramente, resulta más complicada de contabilizar, pues involucra actividades de I&D en otros sectores distintos de la industria energética.

El cambio tecnológico, como es sabido, es un proceso largo, incierto y riesgoso. La incertidumbre afecta tanto a la tasa como a la dirección del cambio así como al potencial para crear nuevas tecnologías, en el sentido de que no se sabe cuánto responderán éstas a los esfuerzos de I&D (Bosetti et al, 2006). A su vez, dados los derrames (*spillovers*) de conocimiento que se generan durante la investigación, desarrollo y difusión de nuevas tecnologías, la apropiabilidad de los beneficios por parte de las empresas innovadoras es incompleta, lo que provoca niveles de inversión privada en innovación subóptimos (Popp, 2004).

El debate internacional actual acerca de la importancia de las tecnologías para lograr objetivos de mitigación del Cambio Climático gira en torno a cuál es el rol de los nuevos desarrollos tecnológicos -y, en menor medida, de la aplicación de las tecnologías ya disponibles- para lograr la estabilización de emisiones. Este debate se encuentra sintetizado en Chidiak (2006).

Esta autora destaca, en primer lugar, que la temática de la tecnología se encuentra fuertemente presente en el marco de la CMNUCC. Tanto ésta (en su art. 4.5) como el PK (art. 10.c) establecen el compromiso de que los países industrializados procuren

promover, facilitar y financiar la transferencia tecnológica o el acceso al conocimiento para desarrollar nuevas tecnologías de menor impacto ambiental a los PEDs. Con este horizonte, dentro de la CMNUCC se han comenzado a desarrollar actividades en esta dirección, siendo la más notable la creación del Grupo de Expertos sobre Transferencia de Tecnologías (EGTT por sus siglas en inglés)[26].

En segundo lugar, Chidiak (2006) destaca que si bien desde la perspectiva de los PDs el desarrollo y adopción de tecnologías menos intensivas en carbono constituye la clave para lograr la estabilización de GEI en el largo plazo (pues esto permitiría reducir los costos de mitigación y lograr así una mayor compatibilidad entre protección del sistema climático y desarrollo sustentable), sin embargo existen visiones contrapuestas. Por un lado, se encuentra EE.UU., quien defiende, desde hace varios años, la postura de que debe perseguirse de manera coordinada el objetivo de desarrollo tecnológico. Este país es señalado, de hecho, como el líder en materia de política tecnológica y de promoción de la acción privada en el desarrollo de tecnologías relacionadas con el cambio climático[27]. Por el otro, se ubican países como Japón y la Unión Europea, quienes opinan que, sin negar la relevancia de la tecnología, se debe, de todas formas, coordinar objetivos cuantitativos de reducción de emisiones en línea con lo adoptado en el PK.

En vista de esta larga "disputa", la visión del debate internacional actual es que la cooperación tecnológica resultaría una alternativa y no un complemento a los compromisos cuantitativos. Como ya comentamos, para algunos la cooperación para el desarrollo y difusión de tecnologías constituye directamente la gran alternativa política para lograr consenso a escala global, dado el lento desarrollo del diálogo y la posibilidad de que se llegue a un estancamiento en las negociaciones sobre futuros compromisos cuantitativos para el período posterior al año 2012 en el marco de Naciones Unidas. En este contexto, cambiar el foco desde la adopción de compromisos cuantitativos hacia la cooperación tecnológica permitiría lograr aceptabilidad política global.

Chidiak (2006) plantea, en tercer lugar, que existe debate acerca de si es necesario desarrollar nuevas tecnologías para lograr la estabilización de emisiones o si alcanza con difundir las tecnologías ya conocidas. La autora, en este punto, hace especial

[26] El EGTT fue creado con el fin de contribuir a la implementación del art. 4.5 de la Convención y hacer recomendaciones al órgano Subsidiario de Asesoramiento Científico y Tecnológico de la misma.
[27] Se considera que la inversión pública y privada norteamericana en estos temas es la de mayor envergadura a escala mundial.

referencia a tres trabajos que defienden esta última visión. El primero es un informe de la Agencia Internacional de la Energía (IEA, por sus siglas en inglés)[28], el cual concluye que sería posible casi estabilizar las emisiones de GEI para el año 2050 en un nivel 8% superior al de 2003 en base a las tecnologías ya disponibles (eficiencia energética, tecnologías más limpias para la generación de energía, cambios en el mix de combustibles, captura y almacenamiento de carbono y utilización de biocombustibles en el transporte) y que si se logra que algunas tecnologías en actual desarrollo alcancen escala comercial y se difundan ampliamente, las emisiones podrían incluso reducirse en un 18% respecto de ese año base. El segundo es un estudio de Socolow (2006), quien estima que se lograrían reducir 1.000 millones de ton C/año aplicando a gran escala tecnologías que están actualmente en proceso de desarrollo[29]. Estas tecnologías se refieren fundamentalmente a eficiencia energética (vehículos eficientes, uso más reducido de vehículos, edificios eficientes, plantas de carbón eficientes), cambio de combustibles (reemplazo de plantas a carbón por plantas a gas natural), captura de CO2 (en plantas de generación de energía, plantas de hidrógeno y captura geológica), energía nuclear (reemplazo de energía en base a carbón), energías renovables (eólica, fotovoltaica o en base a hidrógeno para reemplazar plantas a carbón), biocombustibles y tecnologías del sector forestal y agrícola (siembra directa, reducción de la deforestación y reforestación). El tercero es un trabajo de Metz & van Vuuren (2006), quienes destacan que podrán cumplirse los objetivos de estabilización de la concentración de emisiones en base a tecnologías conocidas siempre y cuando éstas se implementen a través de políticas eficientes, es decir, que minimicen los costos de lograr dicho objetivo mediante, por ejemplo, estrategias multigas, participación máxima de países en una estrategia de comercio de permisos de emisión y selección del timing óptimo para la incorporación de políticas.

Para finalizar, esta autora menciona que, en términos prácticos, ya han tenido lugar numerosos desarrollos de cooperación tecnológica entre PDs, sean éstos partes del PK o no, los cuales, en algunos casos, involucran a algunos PEDs. En general, se trata de acuerdos de cooperación gubernamental y público-privada, algunos de los

[28] La IEA asesora a sus 26 países miembros en temas relacionados con energías limpias. Con sede en París, fue fundada durante la crisis del petróleo de 1973-74 con el objetivo inicial de coordinar medidas de emergencia. Desde entonces, su rol se ha ampliado para incorporar temas de análisis relacionados con la seguridad energética, el desarrollo económico y la protección ambiental. Actualmente, su foco de trabajo son las políticas sobre cambio climático, reformas de mercado, colaboración en materia de tecnologías energéticas y alcances para el resto del mundo, especialmente para los mayores productores y consumidores de energía tales como China, India, Rusia y los países de la OPEC (*Organization of the Petroleum Exporting Countries*) (ver http://www.iea.org).

[29] Se estima que el desafío de estabilizar emisiones (en el nivel del año 2005) requerirá la reducción de las mismas en 7.000 millones de tonC/año entre 2005 y 2055 (ver Chidiak, 2006).

cuales se enmarcan en el proceso de la CMNUCC y otros no. Las iniciativas relacionadas con la CMNUCC/PK involucran, por ejemplo, el *Climate Technology Initiative*[30], el *Annex I Expert Group*[31] (ambos en el marco de la IEA), el *Regional Forum on Environmentally Sustainable Transport*[32], el *Asia-Pacific Network for Global Change Research*[33], el *Asia Pacific Seminar on Climate Change*[34] y la fijación del objetivo de diálogo y fomento de cooperación tecnológica sobre Cambio Climático que tuvo lugar en el marco de la reunión del Grupo de los 8 (G8) realizada en Gleneagles (Escocia) en 2005. Por su parte, entre las iniciativas no relacionadas con la CMNUCC se incluyen, por ejemplo, el *Asia-Pacific Partnership on Clean Development and Climate*[35], *Methane to Markets*[36], el *Carbon Sequestration Leadership Forum*[37], el *Generation IV International Forum*[38], el *International Partnership for a Hydrogen Economy*[39], *FutureGen*[40], *Renewable Energy and Energy Efficiency Partnership*[41] y *Energía de Fusión*[42].

---

[30] Colabora con el EGTT y la Secretaría de la Convención.

[31] Este grupo ha elaborado un informe sobre cooperación tecnológica relacionada con la energía.

[32] Fue lanzado por Japón en 2004. Participan China, Corea, Mongolia y los 10 países de la *Association of Southeast Asian Nations* (ASEAN): Vietnam, Malasia, Tailandia, Laos, Singapur, Indonesia, Filipinas, Cambodia, Myanmar y Brunei Darussalam.

[33] Fue creado en 1996 para apoyar la investigación en la región.

[34] Seminario realizado desde hace 15 años bajo el auspicio de Japón.

[35] Impulsado y conducido por EEUU y con la participación de China, India, Japón, Australia y Corea, este espacio propone un enfoque de acciones voluntarias con amplia participación del sector privado para crear nuevas oportunidades de inversión, fortalecer capacidades locales y superar barreras a la introducción de tecnologías limpias y más eficientes. Su objetivo declarado es trabajar conjuntamente para desarrollar, aplicar y transferir tecnologías más limpias y eficientes que permitan enfrentar los desafíos nacionales en materia de reducción de la pobreza, seguridad energética y cambio climático. Sus temas centrales, por lo tanto, son prácticamente los mismos que los de la CMNUCC: cooperación tecnológica; transferencia de tecnologías; colaboración para crear ambientes propicios para el desarrollo; difusión, aplicación y transferencia de tecnologías y prácticas existentes y en gestación; fortalecimiento de capacidades –capacitación y fortalecimiento institucional- y búsqueda de oportunidades para incluir al sector privado en los esfuerzos.

[36] Iniciativa de EE.UU. que busca trabajar cooperativamente con el sector privado en todo el mundo para identificar emisiones de metano evitables en pérdidas de sistemas de transporte de gas y petróleo, minas de carbón y rellenos sanitarios a fin de capturarlo y aprovecharlo para la generación de energía. Acompañan esta iniciativa tanto PDs como PEDs: Argentina, Australia, Brasil, China, Colombia, India, Italia, Japón, México, Nigeria, Rusia, Ucrania y el Reino Unido.

[37] Iniciativa lanzada por EE.UU. en 2003 que apunta al desarrollo de tecnologías costo-efectivas para la separación y captura de dióxido de carbono para su transporte y almacenamiento de largo plazo. El objetivo del foro es facilitar el acceso amplio a dichas tecnologías a escala internacional e identificar y solucionar problemas relacionados con la captura y almacenamiento del carbono. Cuenta con la participación de la Unión Europea y de otros 15 países.

[38] Es una asociación multilateral impulsada por EE.UU. para promover la cooperación internacional orientada a la investigación y desarrollo de generación de energía nuclear más segura, menos costosa y con menor impacto ambiental local.

[39] Iniciativa orientada a implementar a escala internacional el proyecto de EE.UU. sobre uso del hidrógeno como combustible. El objetivo es lograr la disponibilidad de vehículos con celdas de combustible a escala comercial hacia el año 2020.

[40] Iniciativa anunciada por EE.UU. en 2003 que apunta a generar electricidad en base a carbón sin emisiones.

[41] Iniciativa público-privada surgida durante la Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sustentable de Johannesburgo (2002) que apunta a acelerar y expandir el mercado global para energías renovables y

Por su parte, en Stern (2006) el rol de las tecnologías en la mitigación del Cambio Climático ocupa un lugar relevante: se le dedica un capítulo entero a resaltar la relevancia de acelerar la innovación tecnológica y otro para discutir la importancia de promover la cooperación tecnológica a nivel internacional.

En cuanto a la primera cuestión, Stern (2006) destaca que la externalidad que produce el impacto ambiental de los GEI exacerba las imperfecciones de mercado existentes, limitando los incentivos a desarrollar tecnologías menos intensivas en carbono. Por lo tanto, se requiere del apoyo público a la I&D, tanto para el desarrollo de tecnologías nuevas como para la difusión de las existentes, en especial en ciertos sectores ambientalmente sensibles.

En línea con lo mencionado en Chidiak (2006), Stern (2006) destaca que la estabilización de emisiones de GEI en la atmósfera requerirá del desarrollo de tecnologías más eficientes y menos intensivas en carbono y que si bien varias de estas tecnologías ya están disponibles, sus costos son mayores que las opciones actuales basadas en combustibles fósiles. Por lo tanto, la prioridad urgente consiste no sólo en desarrollar tecnologías nuevas sino también reducir el costo de las tecnologías existentes de modo tal de volverlas competitivas. Para esto último, la innovación resulta también crucial.

Stern (2006) comienza definiendo entonces a la "innovación ambiental" como "aquélla que tiene lugar en las tecnologías o procesos ambientales que controlan las emisiones contaminantes o que alteran los procesos productivos de modo tal de reducir o prevenir emisiones". Estas tecnologías se distinguen por el rol vital que desempeñan en la preservación del bien público que es el medioambiente sano. De esta manera, la existencia de externalidades ambientales genera que la innovación sea subóptima o, al menos, más lenta.

Según este autor, para que las acciones de mitigación del Cambio Climático alcancen la escala requerida se precisa un cambio masivo hacia tecnologías nuevas o

tecnologías de eficiencia energética. EE.UU. participa como un miembro más pero resulta clave por ser el principal productor y consumidor de energía renovable. Cuenta con el apoyo de 17 países y adoptó status de ONG.

[42] Proyecto de investigación internacional para aprovechar la promesa que ofrece la energía de fusión nuclear. Participan EE.UU., la Unión Europea, Rusia, Japón, China y Corea del Sur.

mejoradas en sectores clave tales como la generación eléctrica, el transporte y el uso de la energía.

La innovación en el sector energético resulta crucial para “descarbonizar” la economía global. Este sector debería reducir sus emisiones de CO2e al menos en un 60% para el año 2050 a fin de alcanzar una trayectoria de estabilización de emisiones de 550 ppm. Sin embargo, existen numerosas fallas de mercado y barreras a la innovación en este sector, fundamentalmente:

i) El hecho de que la electricidad es un producto final homogéneo y que pocos consumidores están dispuestos a pagar cargos extra por el producto “descarbonizado”, lo que impide a las empresas financiar los mayores costos (de aprendizaje) iniciales asociados al lanzamiento de todo nuevo producto;

ii) Problemas de infraestructura: por un lado, las redes eléctricas nacionales suelen estar hechas a medida de plantas energéticas centralizadas, por lo que aquellas tecnologías que no sean compatibles con estas redes pueden enfrentar trabas para ingresar al mercado (por más que en sí mismas sean comercialmente viables). Por el otro, la captura y almacenaje de carbono requerirá de nueva infraestructura para el transporte de grandes cantidades de CO2, lo que implicará costos significativos;

iii) Existencia de distorsiones de mercado, fundamentalmente, subsidios directos e indirectos a las tecnologías basadas en combustibles fósiles (la IEA estima que los subsidios mundiales a la energía alcanzaron los USD 250 mil millones en 2005, de los cuales USD 90 mil millones correspondieron a productos del petróleo). Estos subsidios impiden internalizar la externalidad negativa que imponen los GEI y afectan los incentivos a innovar, pues reducen las expectativas de los innovadores de que sus productos serán capaces de competir con las opciones existentes.

iv) La naturaleza de la competencia dentro del mercado no fomenta la innovación: generalmente, un número limitado de empresas (a veces sólo una) domina el mercado eléctrico, al tiempo que la distribución eléctrica es un “monopolio natural”. Esta baja competencia suele derivar en bajos niveles de innovación, debido a que existe poca presión para ganar ventajas respecto de los competidores. Asimismo, la regulación que suele tener el mercado energético reduce el incentivo a invertir en innovación, pues existe riesgo de que el regulador impida a las firmas apropiarse completamente de los beneficios derivados de la inversión en innovación.

Estas barreras no sólo afectan el proceso de desarrollo de nuevas tecnologías sino también la difusión de las tecnologías existentes y pueden reducir la efectividad de las políticas diseñadas para internalizar la externalidad generada por las emisiones de GEI, pues inhiben el poder del mercado para incentivar un cambio hacia tecnologías menos carbono intensivas aún cuando éstas sean costo-efectivas (y especialmente si no lo son).

En lo que respecta a la innovación en el sector transporte -segmento responsable del 14% de las emisiones globales de GEI y la fuente emisora de más rápido crecimiento debido a la constante expansión del automóvil y del transporte aéreo-, Stern (2006) resalta que la misma ha estado dominada por mejoras incrementales en las tecnologías existentes que dependen del petróleo pero que éstas han sido más que contrarrestadas por el aumento en la demanda y la transición hacia vehículos más potentes y pesados. A su vez, el autor menciona que existe un "encierro" alrededor de las tecnologías existentes debido a inercias de comportamiento (consumidores acostumbrados a estas tecnologías, mayor eficiencia en el uso de los combustibles fósiles como fuente de energía, mejoras en la combustión interna de los motores, existencia de redes de distribución del petróleo, etc.). Sin embargo, se destaca que podría existir una mayor actividad innovativa en el sector de transporte terrestre mediante incentivos de mercado (por ejemplo, impuestos altos y estables a los combustibles que incentiven el desarrollo de vehículos híbridos y/o más eficientes, incentivos impositivos y/o subsidios que fomentan el desarrollo y uso de biocombustibles e hidrógeno, etc.) y que estos desarrollos serían importantes para lograr la reducción de emisiones también en los sectores de transporte aéreo, marítimo y ferroviario.

En otros sectores (iluminación, cemento, construcción, agricultura, ganadería, industria química y farmacéutica) la innovación también juega un rol central para reducir emisiones, al posibilitar, por ejemplo, mejoras en la eficiencia energética, prácticas de cultivo sustentables, reducción de emisiones de GEI de fertilizantes, aumento del almacenaje de carbono en suelos, utilización de energía de biomasa y reducción de las emisiones de metano del ganado mediante nuevas prácticas de alimentación y cría.

En lo que respecta a las implicancias de la innovación tecnológica para el diseño de políticas, Stern (2006) destaca que el rol de los gobiernos debería limitarse a proveer

un marco estable de incentivos, pues la mayor parte del desarrollo y difusión de nuevas tecnologías tendrá lugar en el sector privado. En este sentido, las políticas deberían apuntar a lograr la viabilidad comercial de un portfolio de opciones tecnológicas de bajo contenido de carbono con el fin de evitar el riesgo de enfrentar altos costos de mitigación en el futuro. El desarrollo temprano de alternativas tecnológicas económicamente viables volvería, por un lado, la curva de costo marginal más elástica y, por el otro, permitiría evitar la "confinación" del stock de capital dentro de estructuras altamente emisoras de GEI durante décadas. Asimismo, el autor destaca la importancia de expandir las políticas de incentivos a la difusión tecnológica.

Los gobiernos pueden fomentar el cambio tecnológico en la industria y la comunidad científica mediante variados instrumentos: la imposición de un precio para el carbono (impuestos al carbono; comercio de permisos de emisión; implícitamente, regulaciones); mayor apoyo a la I&D (tanto en institutos de investigación públicos como en el sector privado); apoyo a la inversión en comercialización temprana en algunos sectores; reducción de barreras de no-mercado e institucionales para la difusión de nuevas tecnologías, etc.

En cuanto a las incertidumbres (tanto respecto del Cambio Climático como del desarrollo tecnológico, así como de la irreversibilidad de las inversiones en bienes de capital más limpios), Stern (2006) argumenta que las mismas no serán reducidas de manera exógena con el simple paso del tiempo, sino que será necesario combatirlas endógenamente mediante el *feedback* y la experiencia que provee la inversión en I&D.

Por su parte, en el capítulo 24 de su informe, Stern (2006) analiza la importancia de promover la cooperación tecnológica público-privada y a nivel internacional, destacando que la misma puede ayudar a acelerar el desarrollo y adopción de tecnologías menos carbono-intensivas, fomentar la difusión de conocimiento y la división de los riesgos implícitos en las grandes inversiones en I&D y reducir el costo global de alcanzar los objetivos de estabilización de emisiones.

La cooperación tecnológica puede ser utilizada, asimismo, para monitorear el paso del progreso tecnológico, fomentando la diversidad en el portfolio de tecnologías de mitigación que se desarrolle y asegurando que no se realicen inversiones desproporcionadas en tecnologías particulares o en función de intereses regionales. A su vez, puede jugar un rol vital en materia de adaptación. Por ejemplo, el desarrollo y difusión de variedades agrícolas mejoradas y de sistemas de cultivo e irrigación más

eficientes pueden reducir los costos de adaptación al Cambio Climático en el sector agrícola; las mejoras en el diseño, materiales y técnicas de construcción pueden mejorar la resistencia de la infraestructura y el desarrollo urbano y el progreso científico y tecnológico que logre mejorar la calidad de las predicciones climáticas puede permitir el desarrollo de respuestas adaptativas más efectivas a los eventos naturales extremos.

Según Stern (2006), la cooperación tecnológica puede adoptar varias formas: difusión de información y conocimiento (entre PDs y entre PDs y PEDs), identificación y coordinación de prioridades de I&D entre diferentes programas nacionales, firma de acuerdos formales para dividir los riesgos y costos de invertir en nuevas tecnologías, acuerdos informales para la acción en paralelo, nexos entre universidades y redes de investigación, etc..

Para finalizar, cabe mencionar algunas cuestiones referidas a la modelización de la innovación tecnológica dentro de la teoría económica. Ésta ha avanzado considerablemente desde las primeras aproximaciones que la consideraban exógena hasta la mayoría de los enfoques actuales que la consideran endógena, es decir, resultante de las decisiones de los agentes económicos. Siguiendo a Bosetti et al (2006), algunos de los modelos existentes permiten que la tasa o dirección del progreso tecnológico responda endógenamente a las intervenciones de política, otros se focalizan en el cambio tecnológico basado en la I&D privada (incorporando conexiones entre las intervenciones de política, los incentivos a la I&D y los avances en el conocimiento), al tiempo que otros enfatizan el *learning-by-doing*, donde los costos de producción disminuyen a medida que aumenta el producto (con la idea de que el incremento del producto está asociado con el aprendizaje).

En lo que respecta específicamente al cambio tecnológico endógeno que resulta relevante para el abordaje del problema del Cambio, Popp (2004) remarca que la literatura se divide esencialmente en dos: la Teoría de la Innovación y la Teoría del Crecimiento Endógeno. La primera tiene un foco esencialmente microeconómico: analiza las firmas individuales e industrias y resalta los incentivos e ineficiencias que resultan de la imposibilidad de apropiarse totalmente de los beneficios de la actividad innovativa. En el otro extremo, el foco de la segunda es macroeconómico: analiza cómo la inversión en innovación realizada por agentes privados puede ser una fuente de crecimiento económico agregado. Ambas teorías, sin embargo, destacan la

importancia del conocimiento como bien público y de los derrames (*spillovers*) como causantes de la subinversión en innovación.

2.8 Resumen

En este capítulo se abordó el análisis del Cambio Climático desde una óptica económica, destacando que la esencia del problema está fuertemente asociada a factores económicos, que el calentamiento global tiene su origen en fallas de mercado y que, frente a esto, la Economía ofrece un marco analítico que puede ayudar a los hacedores de política a decidir qué acciones realizar, en qué cuantía y mediante qué instrumentos. En este contexto, se introdujo el marco conceptual de la presente investigación: la Economía del Cambio Climático, una rama de la Economía Ambiental que procura diagnosticar el trasfondo económico del problema del calentamiento global y ofrecer un análisis tanto positivo como normativo para resolverlo.

De esta manera, en la primera sección se realizó una caracterización económica del problema del Cambio Climático, destacando que éste presenta características económicas que vuelven muy difícil el diseño e implementación de políticas óptimas: se trata de un problema ambiental global que implica la necesidad de coordinación internacional; es el resultado de una externalidad negativa derivada fundamentalmente de la quema de combustibles fósiles para la producción industrial y de energía que tuvo lugar históricamente en los PDs; la limitación de sus efectos puede verse como el equivalente a proveer un bien público global, lo que implica que el nivel de provisión (privada) actual es subóptimo y que algunos países puedan adoptar un comportamiento de *free-rider*; constituye un problema stock-flujo que determina un problema temporal que pone en juego un principio de equidad intergeneracional; se deriva de la falta de asignación y protección de los derechos de propiedad sobre el uso de la atmósfera y los recursos naturales de uso público en los PEDs; la comprensión humana del problema está sujeta a numerosas incertidumbres y las industrias de aquellos países que encaren acciones de mitigación de GEI enfrentan altos riesgos de perder competitividad (*market share* y relocalización de industrias).

A continuación se resumió la literatura existente en materia de análisis de los impactos del Cambio Climático sobre el bienestar humano, los costos y beneficios de la mitigación de GEI, las incertidumbres que plantea el Cambio Climático, la elección de instrumentos económicos para la mitigación y la importancia de la innovación

tecnológica como posible solución al problema.

Se destacó, en primer lugar, que las principales consecuencias potenciales del Cambio Climático sobre la actividad económica y la vida humana se verán, fundamentalmente, en materia de acceso al agua potable, producción de alimentos y uso de la tierra y recursos naturales: aumento del riesgo de inundaciones, reducción de reservorios de agua potable, disminución de rendimientos de las cosechas, incremento de muertes por desnutrición y golpes de calor, expansión de las enfermedades transmitidas por insectos, destrucción de ecosistemas terrestres y marinos, cambios repentinos en los patrones climáticos regionales, etc.

En segundo lugar, se describieron cuestiones relacionadas con el análisis costo-beneficio en el caso específico del Cambio Climático, destacando, entre otras cosas, que la utilización de tasas de descuento convencionales hace que la mitigación del Cambio Climático no constituya una actividad rentable, por lo que debe recurrirse a otras variantes (por ejemplo, tasas decrecientes). Esto se justifica tanto por una cuestión ética (los intereses de las futuras generaciones valen tanto como los de la generación actual) como económica (las consecuencias de no llevar a cabo acciones de mitigación hoy pueden ser tan catastróficas que no podría asumirse un crecimiento económico normal en el futuro). A continuación se resumieron las principales conclusiones del llamado “Informe Stern” (Stern, 2006), el estudio que, al presente, mejor ha analizado los costos del Cambio Climático y los costos y beneficios de la mitigación de GEI. Sus estimaciones sugieren que los costos de mitigación del Cambio Climático no sobrepasarán el 1% del PBI global, mientras que la no-mitigación podría costar al mundo hasta el 20% del PBI global.

En tercer lugar, se mencionaron algunas de las numerosas incertidumbres que plantea el problema del Cambio Climático en materia de magnitud ecológica de los posibles daños, horizontes temporales, niveles de estabilización de concentraciones de GEI, costos de mitigación y adaptación, efectividad de las acciones, marco político y tecnologías, planteando que si bien esto genera dudas respecto de si es conveniente embarcarse en el presente en actividades de mitigación o si es preferible esperar hasta que algunos de los interrogantes sean resueltos, la mayoría de los estudios teóricos recomiendan el inicio de acciones de mitigación hoy.

En cuarto lugar, se analizaron los instrumentos de política disponibles para la mitigación de GEI. Se destacó entonces que si bien los instrumentos económicos

(impuestos y permisos de emisión) son las opciones favoritas desde el punto de vista teórico, la presencia de incertidumbres (sobre los daños y costos marginales de mitigación) así como la consideración de otros criterios además del de eficiencia para la toma de decisiones (equidad, costos de administración, aceptabilidad política) hacen que la elección de instrumentos no sea unívoca y que, en la práctica, la implementación de políticas climáticas difiera de las prescripciones teóricas. En particular, se anticipó que los sistemas de comercio de permisos de emisión están ganando importancia creciente a partir de la entrada en vigencia del PK, pero que, a diferencia de lo recomendado por los modelos teóricos, los permisos en estos sistemas son repartidos gratuitamente.

Finalmente, se resaltó la importancia de la innovación tecnológica para la mitigación de GEI. Se mencionó, primeramente, que el debate internacional actual acerca de la importancia de las tecnologías para lograr objetivos de mitigación del Cambio Climático gira en torno a cuál es el rol de los nuevos desarrollos tecnológicos y si es suficiente con la difusión de las tecnologías ya disponibles para lograr la estabilización de emisiones. Asimismo, se destacó que, en términos prácticos, ya han tenido lugar numerosos desarrollos de cooperación tecnológica entre PDs, sean éstos partes del PK o no, los cuales, en algunos casos, involucran a algunos PEDs. Finalmente, se destacó que en el Informe Stern el rol de las tecnologías en la mitigación del Cambio Climático -específicamente, la relevancia de acelerar la innovación tecnológica y la importancia de promover la cooperación tecnológica a nivel internacional- ocupa un lugar relevante.

Capítulo 3: Mercados de carbono e incentivos para la innovación y la inversión en tecnologías más limpias

3.1 Introducción

Este capítulo propone analizar los incentivos que los "mercados de carbono" pueden brindar a las empresas privadas para que éstas inviertan en innovación, desarrollo e incorporación de tecnologías más limpias. Para ello, se revisa, en primer lugar, el desempeño que han tenido estos nuevos mercados en los años recientes y, en segundo lugar, se desarrolla un modelo analítico que estudia de manera formal las interrelaciones entre las empresas privadas emisoras de GEI, la existencia de un sistema de comercio de permisos y las ventajas que se derivan de realizar esfuerzos de innovación ambiental.

En pocas palabras, lo que este capítulo plantea es que si una firma emisora de GEI que participa de un sistema de comercio de permisos realiza esfuerzos de I&D a fin de crear nuevas tecnologías más limpias podrá obtener una doble ganancia de eficiencia. Por un lado, podrá disminuir su costo de cumplir con sus compromisos cuantitativos de reducción de GEI. Por el otro, si logra disminuir sus emisiones más allá de los límites permitidos, podrá obtener una ganancia "extra" derivada de la venta de los permisos "que le sobran" en el mercado. Estas ganancias serán tanto estáticas (en cada período) como dinámicas (en el tiempo).

Como ya anticipamos, nos limitaremos a analizar empresas de sectores intensivos en energía/emisiones de GEI de países industrializados (países Anexo I) que enfrentan compromisos cuantitativos de mitigación por participar en un sistema de comercio de permisos (el PK, por ejemplo)[43]. Nos referiremos, básicamente, a firmas en PDs productoras de servicios y *commodities* tales como energía eléctrica, petróleo, gas, pulpa y papel, metales, productos agrícolas y forestales, etc. que son, a su vez, creadoras y proveedoras de tecnología a nivel internacional.

En este marco, la primera sección de este capítulo describe las características y el funcionamiento de los mercados de carbono. Se analizan aquí separadamente los mercados de permisos y los mercados de certificados basados en proyectos y se

[43] Los incentivos necesarios para que las empresas de PEDs adopten comportamientos "verdes" merecen un trabajo de investigación aparte.

presentan algunas proyecciones de precios para el período 2008-2012 (primer período de compromiso del PK).

A continuación, la siguiente sección presenta el ya mencionado modelo de optimización dinámica de una empresa emisora de GEI que opera en un mercado oligopólico a la Bertrand y que debe cumplir con metas de reducción de emisiones. En este contexto, considerando ecuaciones de inversión basadas en la Teoría de la *q* de James Tobin, se muestra que esta firma puede obtener ganancias de eficiencia si es ambientalmente innovadora y que estas ganancias repercuten positivamente en la evolución en el tiempo de su valuación de mercado. Previamente, en la subsección 3.3.1 se presenta un análisis esquemático de la Teoría de la inversión de la *q* de Tobin.

3.2 Los mercados de carbono[44]

Tal como su nombre lo indica, en estos mercados se realizan "transacciones de carbono", es decir, contratos de compra y venta donde una parte paga a otra por una cantidad determinada de reducción de emisiones de GEI, ya sea en la forma de permisos de emisión o bien de créditos provenientes de la realización de proyectos en países de Europa del Este o PEDs.

Las transacciones de carbono pueden agruparse, por lo tanto, en dos grandes categorías: por un lado, las transacciones basadas en permisos, donde el comprador (firmas o estados regulados) adquiere permisos de emisión creados y asignados por reguladores bajo regímenes *cap-and-trade.* Por el otro, las transacciones basadas en proyectos, donde el comprador adquiere certificados de reducción de emisiones derivados de la realización de proyectos que demuestren que mitigan GEI en comparación de lo que hubiera ocurrido en ausencia de los mismos.

Por lo tanto, cada empresa sujeta a compromisos cuantitativos de reducción de GEI enfrenta la decisión de cómo cumplir con sus obligaciones. Algunas reducirán emisiones internamente de modo tal de cumplir con sus metas asignadas. Otras invertirán y actualizarán su stock de capital de modo tal de mitigar más allá de lo permitido y generar así permisos extra para vender en el mercado. El resto, en

[44] Esta sección está basada fundamentalmente en Banco Mundial (2006, 2007), Fundación JIN (2006) y Powernext Carbon (2006).

cambio, hallará mayor racionalidad en salir a comprar permisos o bien importar certificados de reducción de emisiones provenientes de la realización de proyectos en PEDs y/o Europa del Este.

Existen en la actualidad varios mercados de carbono fragmentados que involucran tanto permisos como certificados basados en proyectos. Cada uno de ellos es complejo y está influido tanto por el desarrollo de políticas y regulaciones como por *fundamentals* de mercado. Exhiben diferentes grados de desarrollo en diferentes partes del mundo y dependen fuertemente de la evolución de las propias políticas nacionales y regionales que les dieron origen.

Los mercados de permisos más importantes que existen en la actualidad son cuatro y fueron creados por políticas regulatorias nacionales (tal es el caso del EU ETS) o bien por compromisos voluntarios pero vinculantes que impusieron restricciones sobre las emisiones (actuales o anticipadas) a nivel nacional o subnacional (UK ETS, CCX, NSW):

- El *European Union Emission Trading Scheme* (EU ETS), creado el 1° de enero de 2005 con el fin de que los países miembros de la Unión Europea ganen experiencia y se prepararen para cumplir con sus compromisos en el marco del PK. Los permisos que se transan en este mercado son llamados *European Union Allowances* (EUAs);
- El *New South Wales GHG Abatement Scheme* (NSW GGAS), un esquema de comercio de emisiones estadual de Australia creado en enero de 2003 con el objetivo de reducir las emisiones de GEI asociadas con la producción y uso de electricidad;
- El *Chicago Climate Exchange* (CCX), el único mercado voluntario de Estados Unidos orientado a reducir las emisiones de GEI, creado en 2003;
- El *United Kingdom Emissions Trading Scheme* (UK ETS), un esquema de comercio de emisiones de participación voluntaria creado en el Reino Unido en marzo de 2002.

Por su parte, los principales mercados de certificados basados en proyectos son dos, ambos nacidos de los mecanismos de flexibilidad contemplados en el PK:

- El mercado de *Certificates of Emission Reductions* (CERs), los certificados de reducción de emisiones que emanan de proyectos realizados en PEDs en el marco del MDL;

- El mercado de *Emission Reductions Units* (ERUs), los certificados creados por proyectos realizados en países de Europa del Este en el marco del mecanismo de IC.

Tanto los permisos de emisión como los certificados de reducción de emisiones tienen una alta credibilidad ambiental. Los primeros, porque establecen una estructura flexible para alcanzar el nivel deseado de desempeño ambiental establecido por el límite máximo de emisiones permitido (el "*cap")* y, los segundos, porque son creados utilizando metodologías aprobadas y son certificados independientemente por una autoridad reconocida antes de ser emitidos. De hecho, hubo un fuerte crecimiento en los mercados de carbono durante el 2005 gracias a que la primera fase del EU ETS -lanzada en enero de 2005- y la entrada en vigencia del PK -seis semanas después- aumentaron la certeza y credibilidad regulatoria de la iniciativa de mitigación global.

La demanda en estos mercados se deriva, fundamentalmente, del nivel del tope máximo de emisiones impuesto, es decir, del número de permisos emitidos (AAUs bajo el PK, EUAs en el marco del EU ETS, etc.). Este tope a las emisiones debe ser fijado de manera tal de que no sea demasiado ambicioso para ser incumplible pero tampoco demasiado permisivo para ser inútil. Idealmente, el nivel debe ser determinado sobre la base de la mejor información científica disponible para alcanzar los objetivos últimos de la CMNUCC.

En este contexto, los principales compradores de permisos y certificados son, actualmente, gobiernos interesados en cumplir con sus compromisos de Kyoto, compradores europeos privados interesados en el EU ETS, empresas japonesas con compromisos voluntarios bajo el *Keidanren Voluntary Action Plan on the Environment*[45], multinacionales norteamericanas que operan en Japón y Europa o que se preparan para participar del RGGI del noreste de EE.UU. o el *California Assembly Bill 32* (que establece un tope estadual a las emisiones), compañías energéticas y grandes consumidores regulados por el mercado australiano de NSW y empresas norteamericanas con objetivos de reducción voluntarios pero vinculantes en el CCX.

[45] El "Keidanren Voluntary Action Plan on the Environment" compila desde 1997 planes voluntarios de grupos industriales en cuatro áreas: Calentamiento Global, Residuos, Gestión ambiental y Conservación Ambiental en Actividades de Negocios fuera del país. En particular, 41 sectores industriales se comprometieron a reducir para el año 2010 emisiones de CO2 en un 75% respecto de las emisiones industriales de 1990 (lo que equivale a un 42% respecto de las emisiones del país en su conjunto). En 1998, el Plan fue incorporado al paquete de políticas públicas para la mitigación del cambio climático, especificando varias medidas para cumplir con el compromiso de reducir las emisiones de GEI en un 6% respecto de 1990 durante 2008-2012 (ver http://www.keidanren.or.jp/).

Asimismo, existe un creciente segmento minorista que vende reducciones de emisiones (ERs) a individuos y empresas (bancos, emisores de tarjetas de crédito, fondos de inversión privados) que buscan compensar sus propias exigencias de emisiones.

Cabe mencionar algunas cuestiones críticas acerca de los mercados de permisos. Una tiene que ver con el hecho de que, como ya se mencionó, actualmente éstos son repartidos gratuitamente en lugar de ser subastados, lo que hace que los contaminadores simplemente pasen los costos extra a los consumidores. Otra tiene que ver con el horizonte temporal del PK (hasta el año 2012), el cual es demasiado corto para hacer que proyectos de largo plazo como ser la inversión en plantas de generación eléctrica más limpias sean rentables.

En el año 2006 se transaron en estos mercados cerca de USD 30 mil millones, tres veces más que en el año 2005 (ver Tabla 1). El mercado estuvo claramente dominado por la venta y reventa de EUAs, llegando las transacciones en el EU ETS a un valor de USD 25 mil millones. En el CCX y el NSW se transaron también valores record. Por su parte, las actividades basadas en proyectos -especialmente en el marco del MDL y el mecanismo de IC- alcanzaron un valor de alrededor de USD 5 mil millones en 2006.

Según Banco Mundial (2007), el impacto más promisorio de los mercados de carbono ha sido sobre la innovación, pues las empresas han comenzado a apostar al mercado emergente de rápido crecimiento de las inversiones con orientación ambiental. Una estimación de esta fuente sugiere que la inversión en tecnologías limpias registrada en 2006 alcanzó el valor record de USD 70,9 mil millones, con grandes inversiones (y anuncios) por parte de bancos de inversión de renombre.

Tabla 1:
Volúmenes y valores transados en los principales mercados de carbono (2005 y 2006)

	2005		2006	
	Volumen (MtCO2e)	Valor (MUSD)	Volumen (MtCO2e)	Valor (MUSD)
	Permisos			
EU ETS	321	7.908	1.101	24.357
NSW GGAS	6	59	20	225
CCX	1	3	10	38
UK ETS	0	1	0.3	sd
Subtotal	**328**	**7.971**	**1.131**	**24.620**
	Transacciones basadas en proyectos			
MDL primario	341	2.417	450	4.813
MDL secundario	10	221	25	444
IC	11	68	16	141
Otros	20	187	17	79
Subtotal	**382**	**2.893**	**508**	**5.477**
Total	**710**	**10.864**	**1.639**	**30.097**

Fuente: Banco Mundial (2007)

2.2.1. Mercados de Permisos

Los programas de permisos de emisión de GEI difieren entre sí en múltiples aspectos, fundamentalmente en términos de:

i) El nivel del tope de emisiones permitido, lo que determina, en definitiva, la demanda del mercado;

ii) El tipo de comercio permitido (por ejemplo, permisos sólo locales como en el UK ETS o regionales como en el EU ETS);

iii) Su ámbito sectorial (por ejemplo, sólo el sector energético como en el NSW, grandes instalaciones intensivas en energía en el EU ETS o toda la economía, como en el UK ETS);

iv) La flexibilidad geográfica y temporal (uso de créditos provenientes de PEDs y otros PDs y/o la posibilidad de trasladar los permisos no usados a futuros períodos de cumplimiento -"*banking*"-).

Como se observa en la Tabla 1, El EU ETS continúa siendo el más prominente de los mercados de permisos, tanto en términos de volumen como de valor financiero transado. Sus efectos derrame se hacen sentir en los demás mercados de permisos (el NSW y el CCX crecieron considerablemente durante 2006) y también en los mercados basados en proyectos.

2.2.1.1 *European Union Emissions Trading Scheme* (EU ETS)

La primera fase del EU ETS fue lanzado el 1° de enero de 2005 como una prueba piloto para ayudar a la Unión Europea y a sus estados miembros a ganar experiencia y prepararse para cumplir con sus compromisos de Kyoto. En su Fase I (2005-2007), este esquema reguló las emisiones de CO2 de instalaciones que representan cerca del 40% de las emisiones totales de la UE, estableciendo un tope de 6.600 millones de tn para el período. A Alemania se le asignó casi un cuarto de las EUAs otorgadas, mientras que al Reino Unido, Polonia e Italia se les dio cerca del 10% a cada una. En cuanto al reparto de permisos por sectores, el sector energético recibió cerca del 55% de los mismos, los sectores de minerales (cemento, vidrio y cerámica) y metales (fábricas de acero) recibieron cerca del 12% cada uno y la industria del petróleo y gas, casi el 10% (BM, 2006).

En los albores del surgimiento del mercado en los años 2003 y 2004, sólo existían algunas pocas transacciones a futuro que respondían, básicamente, a expectativas políticas y regulatorias más que a *fundamentals* de mercado. En ese momento, las expectativas en cuanto a la rigidez de los Planes Nacionales de Asignación (NAPs, por sus siglas en inglés)[46], la aceptación o no de créditos provenientes del MDL y del mecanismo de IC, la voluntad política de la Comisión Europea para asegurar la integridad y operación del esquema y la entonces abierta pregunta de si Rusia ratificaría el PK influían sobre la dirección de los precios y volúmenes transados. Actualmente, lo que condiciona al mercado es, fundamentalmente, la incertidumbre respecto de las asignaciones para la Fase II del EU ETS (2008-2012) y del régimen que regirá luego del 2012.

En cuanto a los f*undamentals* actuales del EU ETS, la demanda hoy día es

[46] Los gobiernos de cada estado miembro de la UE debieron elaborar Planes Nacionales de Asignación donde constara el número total de permisos que sería creado en el período en cuestión (en este caso, 2005-2007) y la distribución de los mismos entre las plantas individuales. Estos planes debían ser aprobados por la Comisión de la UE.

consecuencia directa por una parte, de la rigidez de los NAPs impuestos para la Fase I (los cuales, se considera, fueron establecidos en niveles razonablemente generosos como para fomentar la participación de las industrias en la Fase II) y, por la otra, los NAPs impuestos para la Fase II (los estados miembros debieron presentar sus NAPs para el período 2008-2012 a la Comisión de la UE a fines de junio de 2006).

La demanda, es decir, el nivel de esfuerzo necesario para permanecer dentro de los límites máximos de emisiones permitidos, varía en función de, por un lado, la tasa de crecimiento industrial, el producto y las medidas de eficiencia que se implementen para reducir las emisiones de GEI y, por el otro, de los patrones climáticos y el precio de los combustibles.

Para ilustrar la correlación que existe entre los precios de los EUAs, el clima y los precios del petróleo y el gas consideremos lo siguiente. Los inviernos duros en Europa aumentan, por un lado, la demanda de calefacción y, a la vez, reducen la generación de energía proveniente de fuentes hidroeléctricas. Esto induce a una mayor actividad de las plantas energéticas a carbón y gas durante las horas pico y genera una mayor emisión de GEI por parte de estas instalaciones, provocando que los EUAs otorgados a ellas sean insuficientes y que deban salir a comprar permisos al mercado. Esto aumenta la demanda de permisos y, por ende, el precio de los EUAs. En los casos en que la sustitución entre carbón y gas es factible, las industrias comparan el *spread* de ambos recursos (es decir, la diferencia entre el precio -máximo- de la energía y el costo del combustible utilizado -carbón o gas-) para determinar qué tipo de plantas entrarán en funcionamiento en las horas pico. Dadas las restricciones impuestas sobre las emisiones, estos *spreads* deben ser corregidos para contabilizar el precio de los EUAs correspondientes a las emisiones generadas en la producción de energía (cabe recordar que el carbón es un combustible más contaminante que el gas).

Por lo tanto, al menos en teoría, la fijación de un tope máximo de emisiones debería conllevar a una mejora en el comportamiento ambiental: la demanda adicional de EUAs debería impulsar su precio tan arriba que la generación a carbón debería dejar de ser rentable respecto de la generación a gas. Sin un precio del carbono a considerar, los altos precios del gas en Europa hacen que el carbón sea la única alternativa disponible para cubrir los picos de demanda energética en los meses de invierno. Sin embargo, con un precio del carbono en la ecuación, los generadores comparan el precio del gas versus el del carbón más el precio de los EUAs. Para seguir generando energía a partir de la utilización de carbón, las empresas deben

comprar más EUAs para cubrir su posición, impulsando hacia arriba los precios de los permisos. Esto, a su vez, aumenta el precio de la electricidad para los consumidores europeos, creándoles un incentivo a ahorrar energía. Asimismo, los altos precios de los EUAs envían señales a los PEDs y fomentan la importación de CERs a la UE.

Sin embargo, hay que mencionar que en el invierno de 2006 la demanda energética se disparó pero el *spread* a favor del carbón (es decir, el costo de generar energía a partir del carbón) luego de ser ajustado por el precio del carbono requerido para cubrir las emisiones extra aún excedió el *spread* correspondiente a la generación energética a partir de gas natural, por lo que continuó la tendencia a generar energía a partir de plantas a carbón en horas pico. Esto ocurrió debido al alto precio del gas natural, por problemas en el acceso al gas y conflictos energéticos[47].

Una mayor certeza respecto del nivel esperado del *cap* para futuros períodos enviaría una señal de más largo plazo a los mercados y les daría a las industrias una mayor seguridad al momento de tomar su decisión respecto de cómo responder estratégicamente a la regulación. Esto, junto con una mayor claridad en lo que respecta a la complementariedad[48], enviaría mejores señales respecto de la posibilidad de acceder a los mercados de carbono europeos y proveería indicación a los desarrolladores de proyectos en PEDs y economías en transición respecto de la demanda futura.

De todas maneras, la Fase I del EU ETS ha sido un experimento positivo en materia de comercio de emisiones orientado a mitigar emisiones de GEI y ha dejado importantes enseñanzas para futuras etapas tanto del EU ETS como de otros programas. La contribución más importante de este mercado posiblemente haya sido que los participantes tomaron conciencia de que existe una restricción al carbono, mientras que antes emitían GEI sin limitaciones.

[47] En especial, el conflicto Rusia-Bielorrusia y Rusia-Ucrania. Rusia y Bielorrusia han mantenido una guerra energética similar al conflicto que protagonizó el primer país con Ucrania a principios del 2006, cuando Rusia quiso aumentar los precios del crudo que le vende a Ucrania y este último, en represalia, cortó el oleoducto que transporta, a través de su territorio, el petróleo que los rusos venden a la UE, dejando sin suministro de gas a media docena de estados miembros en pleno invierno. En el caso del conflicto Rusia-Bielorrusia, los países más perjudicados fueron Alemania y Polonia, así como también Ucrania, la República Checa y Eslovaquia.

[48] La complementariedad es una política establecida por un gobierno nacional para limitar el porcentaje de su compromiso de reducción de emisiones que puede ser alcanzado mediante los mecanismos de flexibilidad de Kyoto (comercio de permisos, MDL y mecanismo de IC).

El sistema demostró que una señal de precio del carbono que represente las expectativas del mercado sobre el nivel de la restricción y el esfuerzo relativo requerido para cumplirla puede tener éxito en estimular la mitigación de GEI, tanto en Europa como en los PEDs. Ellerman y Buchner (2006) sugieren que las emisiones de CO2 en 2005 se redujeron en 50-200 MtCO2 (en comparación con las emisiones de línea de base de 2005 y no del tope de emisiones impuesto para 2005). Por su parte, una encuesta de Point Carbon (2007) indica que el 65% de los entrevistados iniciaron actividades internas de mitigación en sus empresas como resultado del EU ETS en 2006 (contra sólo el 15% en 2005). El alto precio del carbono durante el primer año de la Fase I, junto con una mayor conciencia sobre los riesgos del Cambio Climático, mayores preocupaciones sobre seguridad energética y altos precios de los combustibles contribuyeron a la mitigación.

Sin embargo, se puso en evidencia que el tope de emisiones impuesto para 2005-2007 era demasiado laxo. Las emisiones verificadas en 2005 fueron 3% inferiores a la cantidad total asignada para ese año (sin embargo, seis estados miembros -Grecia, Austria, Irlanda, Italia, España y el Reino Unido- emitieron 180 MtCO2e por encima de su tope). Sectorialmente, el sector energético y de calefacción fue el único que incumplió sus metas, en alrededor de 35 MtCO2e. Los datos preliminares de emisiones verificadas para 2006 indicarían también un sobrecumplimiento de metas para ese año, si bien menor, debido a los más estrictas topes impuestos para 2006 y las mayores emisiones registradas respecto de 2005.

Durante 2006, el EU ETS vio triplicar los valores transados respecto del año anterior (USD 24,4 mil millones en 2006 versus USD 7,9 mil millones en 2005). Esto ocurrió a pesar de la caída del 10% en los precios promedio de los EUAs, de USD 24,7 en 2005 a USD 22,1 en 2006. Asimismo, se amplió el ámbito geográfico del mercado para incluir a nuevos estados miembros de la UE, aumentó el número y tipo de participantes y tuvieron lugar transacciones más complejas (incluyendo, por ejemplo, opciones sobre las EUAs y *swaps* entre EUAs y CERs). El sobrecumplimiento de metas registrado, sumado a la regla que no permite acreditar cumplimiento mediante EUAs-I luego del año 2007 y al hecho de que las plantas energéticas terminaron cubriendo su posición para la Fase I, llevó a una continua reducción de precios de los EUAs-I a lo largo de 2006. Como resultado, las expectativas del mercado y la señal de precios de la Fase I estuvieron basadas en supuestos incorrectos sobre la restricción de emisiones y derivaron en una alta volatilidad.

El volumen mensual promedio transado en el EU ETS entre julio de 2005 y mayo de 2006 fue de 50 millones de tCO2, superando los 80 millones de tn en abril y mayo. Sin embargo, luego de la primera publicación de informes de verificación de emisiones que tuvo lugar el 15 de mayo de 2006 y que resultó en un sobrecumplimiento de metas por 68,8 millones de tn, el volumen negociado cayó a 43 millones en junio de 2006.

Los precios de los EUAs siguieron una tendencia similar. Luego de un pico de USD 34/tCO2 en julio de 2005, se mantuvieron en USD 24-30/tCO2 hasta diciembre, generalmente por encima de los USD 25. Entre enero y abril de 2006, los precios promedio fueron de USD 28-32/tCO2, con un pico de USD 36/tCO2 en abril. Sin embargo, en mayo, el precio promedio cayó a USD 17,77/tCO2, si bien en junio hubo una muy leve recuperación, con un precio promedio de USD 18/tCO2. Pero a fines de 2006 y principios de 2007 el precio de los permisos cayó a niveles de USD 4 o menos, a medida que las plantas cubrían sus posiciones para toda la Fase I. Como ya se mencionó, la imposibilidad de utilizar los permisos de la Fase I para acreditar cumplimiento en la Fase II contribuyó a que los EUAs-I casi no tuvieran valor al final de la Fase I.

Por lo tanto, en abril de 2006 el mercado de los EUAs comenzó a virar desde los permisos de la Fase I hacia los de la Fase II. En mayo de 2006, el volumen de permisos de la Fase II transados representaba el 20% del total. Esta participación fue creciendo gradualmente durante el resto del año, llegando a representar el 50% de los EUAs transados en diciembre de 2006 y el 75% en marzo de 2007.

Por su parte, los precios de los EUAs-II se recuperaron a mediados de 2006 y se mantuvieron en una banda de USD 20-25, con la expectativa de que la Comisión Europea impondría topes de emisiones más severos para la Fase II. Los principales determinantes de los precios de los EUAs-II han sido, por lo tanto, las expectativas respecto de las decisiones de la Comisión, especialmente en relación a dos parámetros clave: el tope de emisiones impuesto a cada estado miembro y el límite a importar créditos MDL e IC dentro del programa.

Hasta el momento, las decisiones tomadas respecto de 19 NAPs impusieron restricciones más severas: un tope (*cap*) anual 5,8% inferior a las emisiones verificadas en 2005. A su vez, se dispuso que la penalidad por incumplimiento se elevará de los €40 actuales a €100. Asimismo, se decidió un importante cambio de diseño: la posibilidad de guardar EUAs-II para acreditar cumplimiento en períodos

futuros ("*banking"*), lo que traerá continuidad al EU ETS y posiblemente fomente mitigación adicional por parte de las plantas dependiendo de su situación actual y de sus expectativas de los precios futuros del carbono. Otra evolución significativa ha sido la introducción de la aviación dentro del esquema para vuelos intra-UE (desde 2011) y para todos los vuelos que despeguen o aterricen en la UE (desde 2012). Se espera que esta medida reduzca 183 MtCO2e por año hacia el 2020.

2.2.1.2 *New South Wales GHG Abatement Scheme* (NSW GGAS)

El NSW GGAS es un esquema de comercio de emisiones estadual de Australia creado con el objetivo de reducir las emisiones de GEI hasta 2012 asociadas con la producción y uso de electricidad.

Desde enero de 2005, tanto los minoristas como los grandes consumidores de electricidad deben cumplir metas de reducción de emisiones de GEI derivadas de la producción de energía que proveen o utilizan, pudiendo cumplir con sus metas mediante la compra de *NSW Greenhouse Abatement Certificates* (NGACs). Los NGACs son generados a través de las siguientes actividades: generación eléctrica con bajas emisiones, mayor eficiencia energética, actividades que resultan en un menor consumo de electricidad o en generación *in-situ*, secuestro de carbono en biomasa y energías renovables. No se permiten al momento otras formas de crédito como MDL o IC (sin embargo, se han registrado algunas ventas de CERs a Australia). La multa por incumplimiento ha sido de aproximadamente USD 9 para el año 2006. Sin embargo, todos los participantes han cumplido sus metas.

El NSW GGAS es el segundo mayor mercado luego del EU ETS, con cerca de 20,2 millones de certificados transados a lo largo de 2006 por un valor estimado de USD 225,4 millones. Esto representó un aumento de 3,3 veces respecto de los volúmenes transados en 2005 y de 3,8 veces respecto del valor de 2005.

Las principales incertidumbres relacionadas con el programa dependen de los desarrollos que tendrán lugar a nivel nacional, lo cual puede afectar la elegibilidad y el valor de los NGACs. En noviembre de 2005, se anunció que el esquema sería extendido hasta 2020 y posteriormente sobre una base de períodos de 15 años aunque no se alcance un acuerdo en materia de adopción nacional de un enfoque para el manejo de las emisiones de GEI. En agosto de 2006 se delineó una propuesta

para instalar un tope (*cap*) nacional y un sistema de comercio para el sector energético a comenzar en el 2010, incorporando certeza regulatoria mediante una previsibilidad a 10 años sobre los topes, que fue rechazada por el Primer Ministro. Éste lanzó como alternativa el Grupo de Trabajo sobre Comercio de Emisiones (*Task Group on Emissions Trading*) para reportar conclusiones a fines de mayo de 2007.

En febrero de 2007, varios estados llamaron a adoptar un sistema nacional de comercio de emisiones, con o sin el apoyo del gobierno federal (BM, 2007).

2.2.1.3 *Chicago Climate Exchange* (CCX)

El CCX es el único mercado voluntario de Estados Unidos orientado a reducir las emisiones de GEI. Es un sistema de comercio autorregulado diseñado y gobernado por sus propios miembros. Los miembros del CCX asumen compromisos voluntarios pero que son legalmente obligatorios. Su Fase I comprendió el período 2003-2006 y la Fase II está prevista para 2007-2010.

Para el final de la Fase I (diciembre de 2006), todos los miembros debían haber reducido sus emisiones directas en 4% respecto del período de línea de base 1998-2001. Por su parte, la Fase II requerirá que todos los miembros reduzcan para 2010 6% sus emisiones por debajo de los valores de línea de base.

El tope de emisiones impuesto para la Fase I decrecía a una tasa anual de 1% respecto de la línea de base, lo que implicaba que cada año la meta se volvía un poco más estricta. Sin embargo, el tope no pareció ser demasiado restrictivo. En 2004, por ejemplo, todos los participantes pudieron cumplir sus metas sin excesivo comercio de permisos.

La actividad en este mercado ha sido limitada. En 2005, los volúmenes negociados fueron incluso inferiores a los transados en 2004 (1.45 millones tCO2 en 2005 contra 2.24 millones en 2004), ascendiendo el valor de mercado en 2005 a USD 2,83 millones. Los precios, por su parte, fluctuaron entre USD 1.30 y USD 2.82, con un promedio de USD 1.95.

Sin embargo, en 2006 el CCX registró transacciones record por 10,3 MtCO2 (7 veces más que en el año 2005) por un valor de USD 38,1 millones (13 veces más que en el

año anterior), subiendo el precio promedio mensual continuamente durante todo el año: de USD 1,73 en enero de 2006 a USD 4,5 en julio, estabilizándose en USD 4-4,2 durante el resto del año. A comienzos de 2007, se registraron precios de USD 3,7.

Dadas las nuevas iniciativas regionales que comienzan a tomar forma en los Estados Unidos, la cantidad de miembros del CCX creció de 127 en enero de 2006 a 237 a fines de ese año. Los nuevos miembros manifestaron interés en comenzar a familiarizarse con el comercio de permisos.

Asimismo, el mercado ha mostrado interés en expandir sus actividades a otros esquemas y regiones. A mediados de marzo de 2006, por ejemplo, el CCX anunció la formación del *New York Climate Exchange* (NYCX) y del *Northeast Climate Exchange* (NECX) para desarrollar instrumentos financieros relevantes para el RGGI. A su vez, se pusieron de manifiesto lazos más fuertes con el EU ETS en mayo, mediante una transacción de 1.000 EUAs provenientes de este mercado. Asimismo, se realizaron intercambios de certificados provenientes de proyectos de India, China y Nueva Zelanda. Sin embargo, preocupados por la posibilidad de que el EU ETS inunde el CCX con EUAs-I muy baratos, el CCX suspendió su relación con el EU ETS en diciembre de 2006. Más recientemente, el CCX anunció que buscaba extender su alcance a Asia y Oceanía.

2.2.1.4 *United Kingdom Emissions Trading Scheme* (UK ETS)

El lanzamiento de este esquema de comercio de emisiones en el Reino Unido tuvo lugar en marzo de 2002, antes que en la UE. Fue el primer sistema de comercio doméstico de GEI de base nacional, con participación voluntaria. El gobierno ha negociado, paralelamente, Acuerdos de Cambio Climático (*Climate Change Agreements* -CCA-) con empresas que asuman metas relacionadas con ahorros de energía a cambio de una reducción del 80% del *Climate Change Levy*. De esta manera, las empresas que enfrentan metas de reducción de emisiones en el marco del CCA pueden utilizar el UK ETS para comprar o vender permisos. Las penalidades por incumplimiento incluyen la eliminación del descuento al impuesto así como la reducción de los permisos. Sólo se permite el comercio de créditos domésticos.

Durante el período 2002-2004, este esquema logró reducir emisiones por un total de 5,9 millones de tn y, a lo largo de su período de vigencia (hasta fines de 2006), se

esperaba lograr reducciones por un total de 12 millones de tn de CO2e.

Entre abril de 2005 y marzo de 2006 este mercado mostró actividad limitada: todos los participantes directos registraron cumplimiento. Esto se debió, básicamente, a que los participantes suelen ser vendedores naturales de permisos, pues éstos aceptan asumir compromisos de cumplimiento de metas sólo en la medida en que les resulta factible cumplirlas.

Luego del primer cuatrimestre de 2005 (fecha límite del período de cumplimiento para el año 2004), los precios *spot*, que habían alcanzado valores cercanos a USD 9 a principio de año, cayeron a casi USD 4 en mayo (2005 no fue un año de cumplimientos).

Durante 2006, se transaron cerca de 320.000 tCO2e en este mercado. La mayor parte del comercio tuvo lugar entre diciembre de 2006 y febrero de 2007, dada la fecha de verificación de cumplimiento de emisiones fijada para el 8 de marzo de 2007. Por este motivo, los precios en el mercado han tenido recientemente un leve repunte, alcanzando valores cercanos a los USD 4,7. Sin embargo, algunas empresas elegibles para el EU ETS optaron por dejar el UK ETS y unirse al mercado europeo en enero de 2007.

El cortoplacismo del esquema, sumado a las incertidumbres que rodean su futuro, no han resultado de ayuda para que las empresas tomen decisiones de inversión con un horizonte temporal mayor a 5 años.

2.2.2 Mercados basados en proyectos

En contraste con la alta volatilidad registrada en el EU ETS, los activos basados en proyectos mostraron una mayor estabilidad de precios durante 2006 y los volúmenes transados exhibieron un continuo crecimiento. Las transacciones primarias basadas en proyectos alcanzaron las 493 MtCO2 durante 2006 (30% por encima de las registradas en 2005) por un valor de USD 5 mil millones (90% más que en 2005) (ver Tabla 1).

Los precios de los certificados basados en proyectos permanecieron relativamente altos y estables a pesar de la gran volatilidad del mercado de EUAs: USD 10,9 para

los CERs[49,50] (un aumento del 52% respecto de 2005) y USD 8,7 para los ERUs (+45% respecto de 2005). Un factor relevante que explicó esta estabilidad ha sido el poder de mercado de China, quien mantuvo una política de precios informal basada en la elevación del piso mínimo a USD 10,4 - 11,7. Esta política resultó aceptable para los compradores europeos privados, si bien no así para algunos compradores japoneses.

Cerca del 91% de las transacciones en los mercados de certificados basados en proyectos provinieron del MDL (450 MtCO2, un aumento del 32% respecto de los volúmenes de 2005). La demanda europea y japonesa, así como la formación de precios bajo el EU ETS enviaron una clara señal de precios e incentivaron el desarrollo de proyectos MDL en PEDs. De esta manera, aún con sus limitaciones, el MDL proveyó un vehículo efectivo para que los PEDs participen en los esfuerzos globales orientados a reducir las emisiones de carbono.

Desde una perspectiva histórica, desde 2002 se transaron a través del mercado primario MDL 920 MtCO2e (el equivalente al 20% de las emisiones de la UE-15 en 2004), por un valor de USD 8 mil millones. Los proyectos de reducción de HFC-23 y de destrucción de óxido nitroso correspondieron a aproximadamente la mitad de los volúmenes transados, al tiempo que las transacciones de certificados provenientes de proyectos basados en energías renovables y eficiencia energética explicaron cerca del 21%. Asia dominó el mercado MDL con cerca del 80% de los volúmenes transados, liderada por China, quien proveyó el 61% de los CERs comprados por los PDs desde 2002. Las energías renovables (tanto hidro como eólica y biomasa) contribuyeron con el 16% de la reducción acumulada de volúmenes de emisiones desde 2002.

Asimismo, en 2006 aumentó el interés de los compradores por los créditos de proyectos de IC provenientes de economías en transición, con 16,7 MtCO2e transadas (45% de aumento respecto de los niveles de 2005) por un valor de USD 141 millones. Estimaciones preliminares para el año 2007 indicarían que sólo en los tres primeros meses de este año se habrían transado volúmenes equivalentes. Rusia, Ucrania y Bulgaria proveyeron más del 60% de los volúmenes transados.

[49] La mayoría de las transacciones de CERs se ubicó durante 2006 en el rango USD 8-14.

[50] En los mercados secundarios, los precios de los CERs fueron aún mayores: USD 14,3 - 19,5. Los mercados secundarios de CERs consisten principalmente en portfolios de CERs con entrega garantizada, con todo el riesgo de entrega asumido por el vendedor. Los principales participantes en estos mercados son instituciones financieras y grandes jugadores energéticos (incluyendo tanto empresas sujetas a compromisos como especuladores -fondos de inversión, etc.-). Los CERs secundarios cotizaron con un 10-30% de descuento respecto del índice EUA y, más recientemente, han sido transados a precio flotante con un descuento del 25% respecto del EUA dic-´08.

El Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) mantiene una base de datos de los proyectos (UNEP/RISOE "*pipeline*") con los documentos de diseño de proyecto que han sido presentados para pedir validación. Esta base de datos ha crecido de 1.500 proyectos en enero de 2006 a 1.800 proyectos a fines de marzo de 2007. Si todas las reducciones de emisiones provenientes de los proyectos del "*pipeline*" fueran efectivamente transadas, realizadas y entregadas, el volumen de entregas esperadas para 2012 podría estar cerca de los 1.500 millones de CERs. Con una demanda adicional (proveniente, por ejemplo, de Canadá o de mercados voluntarios) el crecimiento del número de proyectos en el *pipeline* podría ser aun mayor.

En lo que respecta a los compradores de certificados, los europeos han dominado el mercado primario MDL e IC con el 86% de participación (versus el 50% en 2005). Por su parte, los compradores japoneses redujeron su presencia a sólo el 7% en 2006 (cabe mencionar que en años anteriores los compradores europeos y los japoneses exhibían *market shares* similares).

Dentro de Europa, el Reino Unido lideró el mercado con cerca del 50% de los volúmenes basados en proyectos, elevando su participación respecto del 15% del 2005 y consolidándose como el centro financiero del carbono a nivel mundial (la City de Londres es la sede de un número importante de instituciones financieras globales). Italia, quien entró al mercado en 2005 con el 1,5% del mercado, incrementó sus compras durante 2006 hasta alcanzar el 7%, especialmente a través de adquisiciones de empresas privadas. Por su parte, España ha mantenido una participación estable del 6-7% en 2005 y 2006, al tiempo que Austria representó el 3% en 2006.

Durante este último año, los principales compradores de activos MDL fueron privados, estando el 90% de las compras de 2006 explicadas especialmente por bancos y fondos de carbono europeos. En contraste, el mercado de IC ha estado dominado por compradores públicos (principalmente, Países Bajos, Dinamarca y Austria), representando el 92% de las transacciones de 2006 (versus el 80% en 2004 y 2005).

Desde 2003, las compras de la UE han explicado dos tercios del mercado MDL y de IC, al tiempo que Japón ha representado el 30%.

En cuanto a los vendedores de certificados, en 2006 China continuó dominando el mercado, explicando el 61% de las transacciones (reduciendo ligeramente su participación respecto del 73% en 2005). A continuación se ubicó India con el 12%, recuperándose del 3% del año previo. Asia como un todo representó el 80% del mercado. América Latina sólo representó el 10% de las transacciones en el marco del MDL, con Brasil explicando el 4%. Por su parte, la participación de África se mantuvo constante en alrededor del 3%.

Los precios promedio vigentes en el EU ETS (mercado de permisos) durante 2006 han sido claramente superiores a los precios de los CERs y ERUs del MDL e IC (mercados de certificados basados en proyectos) (USD 22,1 versus USD 10,9 y USD 8,7 respectivamente). Esto se debe, fundamentalmente, a que los permisos de emisión enfrentan menores costos de transacción y menores riesgos que los certificados basados en proyectos. En primer lugar, un certificado, a diferencia de un permiso negociable, no existe legalmente hasta que no es emitido y su emisión depende de que sea aprobado por verificadores y reguladores tanto de los países compradores como vendedores. De esta manera, los proyectos considerados bajo el MDL y el mecanismo de IC deben ser ejecutados -y financiados- siguiendo un estricto plan de acción para que los certificados sean materializados cuando y donde sean requeridos. Por lo tanto, el volumen de CERs y ERUs emitido por la realización de un proyecto determinado está sujeto a incertidumbre, pues depende de la efectiva performance del proyecto y de su verificación (se ha observado, por ejemplo, que algunos de los primeros certificados emitidos habían sobreestimado los volúmenes que los proyectos iban efectivamente a generar). En segundo lugar, un CER o ERU no se considera válido para acreditar cumplimiento hasta tanto no sea entregado y acreditado en la cuenta del registro MDL del respectivo país Anexo I, lo cual depende de que el *International Transaction Log* (ITL)[51] esté operacional. Existe preocupación por las posibles demoras en la implementación del ITL, lo que pone en duda que los certificados puedan estar disponibles en tiempo y forma. En tercer lugar, una vez que un CER o ERU es acreditado en el registro no puede ser transferido antes de 2008. Por el contrario, no existen barreras para transar y entregar EUAs cuando y donde sea necesario, siempre y cuando los registros nacionales estén conectados. Finalmente, cabe mencionar que no todos los tipos de proyectos MDL son aceptados en el EU ETS (los proyectos forestales, por ejemplo, no son aceptados).

[51] El ITL es un sistema electrónico de registro de transacciones de permisos y créditos.

Asimismo, se observan diferencias (históricas) de precios entre los CERs y los ERUs. En 2004, los ERUs eran contratados a un precio algo más alto que los CERs (US$ 5,95 contra US$ 5,15). Sin embargo, durante el 2005, el precio promedio de los ERUs fue de US$ 5,51 mientras que el de los CERs fue de US$ 7,51. Durante ese año, el precio más alto pagado por un ERU primario fue de US$ 7,32, un valor más bajo que el precio promedio de los CERs (US$7.51) y que el precio máximo pagado por un CER en el mismo período (US$ 24). Por su parte, y como ya mencionamos, en 2006, se observaron precios promedio de USD 10,9 para los CERs y de USD 8,7 para los ERUs, siendo estos últimos transados en USD 6,6 - USD 12,4, un rango menor que los CERs primarios (USD 6,8-USD 24,75) y secundarios (USD 10,75-USD 27). Estas diferencias parecen deberse a la falta de claridad del marco institucional del mecanismo de IC que involucra riesgos regulatorios y soberanos, en especial el hecho de que los proyectos de IC no requieren de la certificación independiente de terceras partes previo a la emisión de un ERU, lo que levanta ciertas dudas respecto de su credibilidad ambiental.

2.2.3 Proyecciones de precios para el primer período de compromiso del PK (2008-2012)

Las estimaciones de precios de permisos de emisión para el período 2008-2012 están en el rango de USD 4-34/tCO2, dependiendo de si se incluyen o no en la estimación los créditos provenientes de Rusia y otras economías de Europa del Este ("aire caliente[52]") y de si se considera o no la inclusión de CERs y ERUs.

DKW (2003), por ejemplo, pronostica precios de los AAUs de USD 30/tCO2 para el período 2008-2012. Este alto valor estimado responde a varios motivos: la alta probabilidad de que se prohíba la contabilización de créditos de "aire caliente", la intención de países como Alemania y el Reino Unido de comprometerse a cumplir metas aún más ambiciosas que las impuestas por el PK, las pocas opciones de mitigación disponibles en sectores distintos al energético y el reducido espacio de negociación que en principio tendrían los países Anexo I para obtener asignaciones de permisos más generosas.

En segundo lugar, JP Morgan (2003) pronostica precios de permisos de, como

[52] El concepto de "aire caliente" ("hot air") hace alusión al exceso de permisos de emisión que fue otorgado a Rusia y otros países de Europa del este que se unieron a la UE en 2004. El bajo crecimiento de estas naciones derivó en emisiones mucho menores a las esperadas.

máximo, USD 34 para el primer período de compromiso del PK. En promedio, sin embargo, esta consultora prevé que existirá una presión a la baja en caso de que se permita la contabilización de créditos "hot air" y de certificados provenientes de proyectos MDL y del mecanismo de IC.

Similarmente, KPI (2003) predice precios de AAUs de USD 31/CO2 en caso de que los CERs y ERUs no sean admitidos y de USD 6-14/tCO2 en caso de que sí lo sean.

Por su parte, la consultora ECON (2004) pronostica precios de los permisos de emisión de entre USD 6-16/t CO2 para 2008-2012. La estimación de US$ 16 está basada en una proyección de demanda de permisos de emisión de 219 millones de tCO2, en un escenario en el cual todos los requerimientos de mitigación caen sobre los sectores cubiertos en el ETS (Emission Trading Scheme)[53] de EU-25 (es decir, incluyendo a los países de Europa del Este) y donde se asignan los permisos en función de las emisiones *business-as-usual* (las que se estima se generarán si se continúa la actividad industrial normal) proyectadas al 2010. En cambio, si se considera una asignación de permisos proporcional a la participación de los sectores ETS y NTS (N*on Trading Scheme)* en las emisiones totales de EU-15 (es decir, sin incluir en los requerimientos de mitigación a los países de Europa del este) la demanda se reduciría a 143 millones de tCO2 y el precio de equilibrio, a USD 9. Finalmente, con una asignación más generosa de permisos para los nuevos estados miembro de la UE, una gran oferta de CERs y ERUs y la inclusión de “aire caliente” instrumento de cantidad el precio podría caer incluso por debajo de los USD 6/tCO2.

En quinto lugar, ICF (2005) estima que los precios de los AAUs en 2008-2012 se ubicarán en torno de los USD 12/tCO2, debido a que: i) los esquemas de comercio de emisiones se profundizarán y masificarán, permitiendo la entrada de más participantes al mercado con curvas de costos de mitigación diversas que harán que los costos de cumplimiento para los participantes decrezcan; ii) el creciente uso de créditos MDL impondrá presión bajista sobre el nivel de mitigación necesario y asegurará un precio del carbono menor; iii) la introducción en el mercado de AAUs provenientes de Rusia y Ucrania ("hot air") y iv) la implementación de opciones de mitigación costo-efectivas de gran escala en el sector energético europeo como resultado de la aceleración del pasaje de carbón a gas y la puesta en funcionamiento de nuevas plantas de energía

[53] A la fecha, las industrias incluidas en el EU ETS 2005-2007 son: actividades energéticas, refinerías, producción y procesamiento de metales ferrosos, cemento, vidrio, cerámica, pulpa y papel. Se espera incluir al sector de transporte aéreo para la fase 2008-2012.

de ciclo combinado[54] en mercados específicos, que harán descender aún más el precio del carbono. En este escenario, el volumen de emisiones evitadas sería de 250 millones de tCO2 por año. Si, en cambio, no se incluyeran los créditos "hot air" pero sí un uso intensivo del mercado MDL, los precios serían algo superiores a los USD 24/tCO2 y las emisiones evitadas estarían cerca de los 800 millones de toneladas por año.

Finalmente, CSFB (2003) es quien provee las estimaciones más bajas de precios de permisos para 2008-2012: USD 11/tCO2 para EU-15, USD 8 si se incluyen los créditos "hot air" y USD 4/tCO2 si se agregan los CERs y ERUs.

En cuanto a los precios futuros de los CERs y los ERUs, existen muy pocas estimaciones disponibles. De hecho, se encontró un sólo trabajo con proyecciones para 2008-2012: Grubb et al (2003), quien pronostica precios de USD 12-30 para proyectos de energía renovable y de USD 6-18 para proyectos forestales, de conversión de gas y modernización de calderas. En este trabajo se sugiere, contrariamente a lo que se viene observando en los mercados, que podría existir una prima a favor de los certificados basados en proyectos por sobre los permisos, debido a que los primeros estarían asociados con inversiones reales en proyectos y ganancias ambientales certeramente medidas, mientras que el comercio de permisos de emisión consistiría sólo en un intercambio de papeles. A su vez, este autor prevé que los CERs cotizarán por encima de los ERUs, pues serán percibidos como importantes contribuidores a las necesidades de desarrollo en regiones pobres y estarán sujetos a procedimientos internacionales más rigurosos para su acreditación.

Cabe mencionar en este punto que los resultados de los modelos macroeconómicos de costos de mitigación citados en Stern (2006) arrojan precios de largo plazo para el carbono considerablemente más altos. Estos modelos muestran que, para lograr la estabilización de emisiones en 500-550 ppm CO2e, los precios del carbono pueden comenzar en niveles bajos pero deben subir hasta un promedio de USD 360/tCO2 para el año 2030 y ubicarse en el rango de USD 180-900/tCO2 hacia el año 2050, a

[54] En las plantas de ciclo combinado coexisten dos ciclos termodinámicos en un mismo sistema, uno cuyo fluido de trabajo es el vapor de agua y otro cuyo fluido es un gas producto de una combustión. El ciclo de gas genera energía eléctrica mediante una turbina de gas y el ciclo de vapor de agua lo hace mediante una o varias turbinas de vapor. De esta manera, se utilizan los gases de escape a alta temperatura de la turbina de gas para aportar calor a una caldera generadora de vapor, la cual alimenta, a su vez, la turbina de vapor. La principal ventaja de utilizar el ciclo combinado es su alta eficiencia, ya que se obtienen rendimientos superiores al rendimiento de una central de ciclo único y mucho mayores que los de una de turbina de gas.

medida que el costo social del carbono aumente y sea necesario fomentar la inclusión de opciones de mitigación más costosas para cumplir con los objetivos de mitigación (Stern, 2006; Cap. 10).

3.3 Incentivos para la innovación y la inversión en tecnologías limpias

En esta sección se analizan de manera formal los incentivos que los mercados de carbono pueden brindar a las firmas privadas para realizar actividades de I&D orientadas a crear tecnologías más limpias. Para ello, se utilizará un modelo de optimización dinámica de una empresa emisora de GEI que opera en un mercado oligopólico *á la* Bertrand y que debe cumplir con metas de reducción de emisiones, considerando ecuaciones de inversión basadas en la Teoría de la *q* de Tobin. Se concluirá que, si existe un sistema de comercio de permisos, esta firma, si es innovadora, puede obtener ganancias de eficiencia que repercuten positivamente en la evolución en el tiempo de su valuación de mercado.

En este contexto, en la primera subsección se describe brevemente el marco teórico de la teoría de inversión de la *q* de Tobin y, en la segunda, se presenta el modelo.

3.3.1 Marco teórico: la Teoría de la inversión de la *q* de Tobin

Siguiendo a Hayashi (1982), durante los últimos treinta años la literatura acerca de la inversión privada ha estado dominada por dos teorías: la Teoría Neoclásica originada por Jorgenson (1963) y la Teoría de la *q* sugerida por Tobin (1969).

La Teoría Neoclásica de la inversión parte del supuesto de que las firmas maximizan el valor presente (descontado) de sus flujos de caja netos (su beneficio), sujeto a la restricción tecnológica que impone la función de producción. Jorgenson (1963) fue quien desarrolló la primera versión del enfoque neoclásico de la inversión, derivando el stock de capital óptimo bajo los supuestos de retornos constantes a escala y producto determinado exógenamente. Sin embargo, el supuesto de producto exógeno era inconsistente con el supuesto de competencia perfecta y llevaba a que la teoría no pudiera determinar la tasa de inversión óptima sino que, en cambio, ésta dependiera de un mecanismo de ajuste de stocks *ad hoc*. Lucas (1967), Gould (1968), Uzawa (1969) y Treadway (1969) reconocen este punto e introducen en el problema el costo

de instalación de los nuevos bienes de inversión. Así, en esta "nueva" formulación, el stock de capital está dado para la firma en cada momento del tiempo debido a la existencia de costos de ajuste. Lo único que la empresa puede controlar en cada instante, por lo tanto, es su tasa de inversión.

La teoría alternativa sugerida por Tobin establece que la tasa de inversión es función de *q*, el cociente entre el valor de mercado de una empresa y el costo de reposición de sus activos. Si el valor de mercado sólo refleja los activos registrados de la empresa, la *q* de Tobin valdrá 1. Si la *q* es mayor que 1, esto significa que el valor de mercado refleja activos no medidos o no registrados de la compañía (perspectivas positivas de desempeño futuro, especulación, etc.). Si, en cambio, la *q* es menor que 1, esto significa que el mercado está subvaluando a la firma por debajo del valor de reposición de sus activos. En este contexto, valores altos de *q* alientan a las firmas a invertir más en bienes de capital, pues estos terminan "valiendo" más que el precio pagado por ellos. Así, cada empresa invertirá hasta que cada dólar gastado en la compra de bienes de capital aumente su valor de mercado en más de un dólar. Sin embargo, no todas las inversiones serán realizadas inmediatamente, pues existen costos de ajuste y desfasajes de implementación.

En el largo plazo, la condición de equilibrio es $q = 1$, es decir, que el capital sea valuado a su costo de reposición.

Formalmente, Tobin (1969) demuestra que:

(1) $\frac{\partial q}{\partial M} > 0$

(2) $\frac{\partial q}{\partial R} > 0$

(3) $\frac{\partial q}{\partial r_M} < 0$

(4) $\frac{\partial q}{\partial Y} < 0$

Es decir, un aumento en la cantidad de dinero (*M*) es expansionista, causando incrementos en el valor del capital existente y estímulos a la inversión; un incremento en la eficiencia marginal del capital (*R*) aumenta su precio; una suba de la tasa de interés real del dinero (r_M) disminuye el valor del capital y, por último, el equilibrio en el mercado de activos requiere de una menor valuación del capital cuanto más alto sea el nivel de ingreso (*Y*) relativo al stock de activos.

Tobin (1969) afirma expresamente que “la tasa de inversión -la velocidad a la cual los inversores desean incrementar el stock de capital- debe estar relacionada, en cualquier caso, con *q*, el valor del capital relativo a su costo de reposición” (Tobin, 1969, p.21).

Por lo tanto, según este enfoque, la forma principal en que las políticas y los eventos en general afectan a la demanda agregada es a través de los cambios que éstos generan en la valuación de los activos físicos en relación a su costo de reposición.

No obstante, muchos autores afirman que la Teoría de la *q* es, en realidad, equivalente a la teoría neoclásica de la inversión “modificada” (con costos de instalación) o, más específicamente, que la teoría de inversión de la *q* puede derivarse del supuesto de que las firmas maximizan su valor presente de mercado.

Como ejemplo de estos desarrollos vale citar, en primer lugar, a Yoshikawa (1980), quien muestra que la Teoría de la *q* puede ser derivada del comportamiento maximizador de una firma tomando en cuenta explícitamente los costos de ajuste. Al mismo tiempo, sin embargo, este autor demuestra que la teoría de Tobin (1969) difiere de la de Jorgenson (1963) en la medida en que, a diferencia del segundo, el primero explica cómo la inversión es motivada por un aparente desequilibrio de corto plazo, i.e. la divergencia entre el valor del capital evaluado en el mercado financiero y el precio de los bienes de capital.

En segundo lugar, cabe mencionar a Hayashi (1982), quien integra ambas teorías de la inversión -la neoclásica y la de la *q* de Tobin- en un modelo general de maximización del valor presente de una firma derivando la tasa óptima de inversión como función de *q*. En esta misma línea trabaja Summers (1981). Ambos autores demuestran que la teoría de inversión de la *q* puede derivarse suponiendo que la firma toma decisiones de inversión y producción con el objetivo de maximizar su valor de mercado y que el valor de *q* -tal como es medido en los mercados financieros- está fuertemente ligado con el precio sombra del nuevo capital.

Vale remarcar en este punto que, en realidad, la teoría de Tobin no es operacional en la medida en que la *q* no es observable pues, estrictamente, es una *q* marginal: el ratio del valor de mercado de una unidad adicional de capital sobre su costo de reposición. Lo que sí es observable, en cambio, es la *q* promedio, es decir, el cociente entre el

valor de mercado del capital existente y su costo de reposición. Por tal motivo, los trabajos empíricos basados en la teoría de la *q* han utilizado la *q* promedio como variable proxy de la *q* marginal (ver, por ejemplo, von Furstemberg, 1977).

Sin embargo, Hayashi (1982) demuestra que la *q* marginal y la *q* promedio son esencialmente equivalentes en el caso en que la firma sea tomadora de precios y su función de producción e instalación sean homogéneas. Sin embargo, si la firma es fijadora de precios entonces el *q* promedio será mayor que el *q* marginal en una cuantía equivalente a su renta monopólica.

3.3.2 El modelo

Consideremos el comportamiento de una empresa perteneciente a algún sector intensivo en GEI que debe cumplir con metas de reducción de emisiones. Por las características de los mercados que estamos considerando -recordemos que hablamos, básicamente, de industrias productoras de servicios y *commodities* en PDs que son altamente emisoras de GEI (energía eléctrica, petróleo, gas, etc.)- podemos suponer que nuestra empresa opera en un oligopolio de Bertrand. En este tipo de estructura de mercado existen pocas empresas y muchos consumidores, las firmas venden bienes idénticos al costo marginal, la competencia se da vía la fijación de precios -el supuesto de comportamiento es que las empresas fijan sus precios tomando como dados los precios de las demás firmas-, los consumidores poseen información perfecta, no existen costos de transacción, hay barreras a la entrada y el equilibrio es el de la competencia perfecta (precio igual a costo marginal).

Nuestra firma produce un bien de consumo *X* (por ejemplo, electricidad) con precio *p* para lo cual utiliza una tecnología que se describe mediante la siguiente función de producción:

(1) $X = F(N,K)$

N y *K* son, respectivamente, un vector de insumos variables (trabajo, materias primas) y un índice de capital fijo compuesto por maquinarias, instalaciones y recursos gerenciales. Se asume que la función *F* es homogénea de grado 1 y que los rendimientos son constantes a escala.

El costo unitario de producción de *X* es:

(2) $c = wN + rK$

donde *w* es el vector de precios de los insumos y *r* es el costo del capital.

La producción de *X* involucra la emisión de GEI que causan daños ambientales. Dado que la firma enfrenta metas de emisión (que, suponemos, son inferiores a sus niveles actuales de emisiones) se ve obligada a realizar actividades de mitigación (incorporación de sistemas y equipos de tratamiento de efluentes gaseosos, remediación, mejoras de eficiencia en el uso de la energía, reemplazo o modificación de procesos productivos, sustitución de insumos o materias primas contaminantes -por ejemplo, carbón por gas natural-, etc.).

En ausencia de actividades de mitigación, las emisiones de la firma se normalizan de manera tal de que las mismas sean 1. La cantidad de emisiones que la firma efectivamente reduce por unidad de producto se denota *e.* Por lo tanto, las emisiones netas de la empresa serán X(1-*e*), es decir, lo que emite menos lo que mitiga por unidad de producto multiplicado por la cantidad de producto.

Se supone que a la firma se le entrega de manera gratuita una cantidad de permisos de emisión equivalente a 1-*e,* es decir, se la obliga a mitigar en la cuantía *e* (suponemos que este nivel de mitigación se establece en función de lo que resulta óptimo para la empresa -ver más adelante-).

La mitigación, claro está, implica un costo, el cual suponemos cuadrático (por simplicidad analítica) e igual a:

(3) $A = ae^2/2$

*c*on $a>0$ y costo marginal de mitigación positivo e igual a *ae* (siguiendo a Azqueta, 2002; Kolstad, 2001; Chidiak, 2001 y Parry, 1997 este es un hallazgo empírico típico: cuanto mayor sea la reducción de emisiones que se quiere lograr, mayor será el costo por unidad de GEI mitigada).

Cuando la firma emite GEI (aún en la cuantía permitida 1-e) genera un daño ambiental igual a:

(4) H = $h(1-e)$

donde $h>0$ representa el daño ambiental marginal. H sería, entonces, el valor del "impuesto pigouviano óptimo" que haría que la firma internalice la totalidad de las emisiones que genera (es decir, si se le impusiera a la firma un impuesto de magnitud H ésta pagaría por todo el daño ambiental que produce por unidad de producto).

De (2) y (3) tenemos que el costo total de la firma será:

(5) C = c+A = $wN + rK + ae^2/2$

es decir, la suma de los costos de producción más los costos de mitigación.

Se considera, para simplificar, que nuestra empresa financia sus inversiones (I) mediante la retención de ganancias (es decir, no toma deuda bancaria ni emite obligaciones negociables). El precio de los bienes de inversión es igual a p_I.

Se asume que la firma actúa con el objetivo de maximizar sus beneficios en un horizonte intertemporal. Para ello, en cada momento del tiempo, la gerencia toma decisiones respecto de las variables N, I y e (insumos y mano de obra, montos de inversión y niveles de reducción de emisiones de GEI). El stock de capital, K, viene determinado por el comportamiento pasado de la empresa.

Del stock de capital "heredado" del pasado y de las decisiones tomadas en el presente la firma deriva una cierta tasa de beneficio por unidad de tiempo (la expresión entre corchetes en la ecuación (6)). Esta expresión representa, en otras palabras, la tasa a la cual se generan los beneficios en cada momento t como resultado de poseer K y decidir respecto de N, I y e.

En el momento inicial $t=0$ los beneficios totales que la firma espera obtener durante su vida esperada (desde el momento 0 hasta el momento terminal T) estarán dados, entonces, por la siguiente expresión (por motivos de simplicidad se han suprimido los subíndices "t"):

(6) $V(K,N,I,e) = \int_0^T [pF(K,N) - wN - rK - \frac{ae^2}{2} - p_I I]e^{-\rho t} dt$

es decir, la suma de las tasas a las cuales los beneficios se generarán en cada instante futuro descontadas al momento presente (ρ es la tasa descuento) y agregadas para todos los instantes.

La ecuación (6) puede interpretarse como la expresión dinámica del valor actual neto (VAN) de una firma, es decir, el valor presente de la sumatoria de sus flujos de caja (ingresos menos egresos) proyectados descontados al momento t=0. En esta notación, sin embargo, *N*, *I* y *e* no representan magnitudes estáticas sino trayectorias temporales de las variables de decisión desde el momento inicial hasta T y la expresión entre corchetes no se reduce a un número, sino que simboliza una tasa instantánea (de beneficio).

Como ya mencionamos, en cada instante del tiempo la firma puede elegir las trayectorias de *N, I* y *e* pero no puede tomar decisiones respecto del stock de capital K. Por lo tanto, existirá una restricción de acumulación de capital que puede expresarse diciendo que la tasa de cambio del stock de capital en cada instante del tiempo será función de la inversión realizada en cada momento *t* (consideraremos que la tasa de depreciación física del capital es igual a cero). Siguiendo a Summers (1981), definimos la ecuación de acumulación de capital de la firma de la siguiente manera:

(7) $\dot{K} = I(q)K$

donde, como ya dijimos, *q* es el ratio "valor de mercado/costo de reposición de los activos", I(1) = 0 y $I'_q > 0$.

El supuesto de que la tasa de crecimiento de la inversión $\frac{\dot{K}}{K}$ depende de *q* asegura que el aumento del stock de bienes de capital es independiente de la escala de la economía (es decir, sólo se describe una relación tecnológica).

Por su parte, los supuestos $I'_q > 0$ y I(1) = 0 implican que, para invertir, los empresarios exigirán que cada dólar invertido aumente el valor de mercado de la empresa en más de un dólar.

Las fórmulas (6) y (7) expresan la esencia del problema de decisión que enfrenta la

firma en un contexto dinámico: elegir las trayectorias temporales de *N*, *I y e* de manera tal de maximizar *V*(*K,N,I,e*) (el VAN de la empresa), tomando en cuenta la restricción de capital y el efecto de sus variables de decisión tanto sobre las tasas instantáneas de beneficio como sobre el stock de capital futuro.

Por lo tanto, la firma procurará maximizar (6) sujeta a la restricción impuesta por (7).

Las condiciones de primer orden para la optimalidad son las siguientes (ver en Anexo matemático la resolución detallada del problema):

(8) $\frac{\partial F}{\partial N} = \frac{w}{p}$

(9) $\lambda K = p_I$

(10) $ae = 0$

(11) $\dot{\lambda} = -p\frac{\partial F}{\partial K} + r + (\delta + \rho)\lambda$

(12) $\dot{K} = I(q)K$

(13) $\lambda(T) = 0$

La ecuación (8) es la condición de productividad marginal, que establece que los insumos (materias primas, mano de obra) serán incorporados hasta que su producto marginal iguale a su precio.

La ecuación (9) indica que, en el óptimo (y considerando K=1), el precio sombra o valor marginal del capital (*λ*) -que representa el valor de mercado de una unidad de capital de la firma- será igual al costo de reposición de una unidad de capital (p_I) (ver anexo matemático). En la terminología de Tobin, esta ecuación implica que la *q* será igual a 1 (valor de mercado de la firma igual al costo de reposición de sus activos), por lo que no habrá incentivo a invertir.

La ecuación (10) define la reducción de emisiones óptima para la firma, que será cero (es decir, si a la firma no la obligan a reducir emisiones, su nivel de mitigación, y, por ende, su costo marginal de mitigación, será nulo).

La (11) es la ecuación de movimiento de λ (precio sombra del capital) y define su evolución, es decir, la tasa a la cual el valor de una unidad de capital cambia con el tiempo[55].

La ecuación (12) es la restricción, la ecuación de movimiento de K.

Finalmente, la ecuación (13) es la condición de transversalidad[56] correspondiente a un estado terminal K(T) libre en un momento terminal fijo (T). Lo que la ecuación implica es que el precio sombra del capital, es decir, la contribución del capital a los beneficios al final del período, es cero. La lógica de esto radica en que el valor del capital para la firma emana de su potencial para generar productos (y beneficios). Por lo tanto, todo stock de capital que exista en el momento terminal T estará presente demasiado tarde para hacerlo trabajar y generar beneficios, por lo que no tendrá valor económico. Dado el horizonte de planeación T, sólo los beneficios realizados en el período (0,T) serán de relevancia.

Ahora bien, siguiendo a Hayashi (1982), definimos el ratio *q* de Tobin de la siguiente manera (ver Anexo):

(14) $q = \frac{\lambda}{p_I}$

y, de aquí, derivamos la ecuación de movimiento de *q*:

(15) $\dot{q} = (\rho - \hat{p}_I)q + \frac{r}{p_I} - \frac{p}{p_I}\frac{\partial F}{\partial K}$

Las ecuaciones de movimiento del sistema en términos de *K* y *q* estarán dadas, entonces, por (7) y (15).

---

[55] Cuando se sigue la trayectoria de acumulación de capital óptima, el capital genera productos valiosos, es decir, contribuye a la generación de beneficios, a la misma tasa a la cual pierde valor (se deprecia). Por lo tanto, el precio sombra será igual al valor presente descontado de los beneficios futuros que generará una unidad de capital hoy. En esta formulación, este beneficio se manifiesta en el aumento en la capacidad productiva de la firma, representado por $\frac{\partial F}{\partial K}$ (la expresión figura con un signo negativo debido a que, al depreciarse, el capital contribuye cada vez menos a la generación de beneficios).

[56] Las condiciones de transversalidad limitan las soluciones en los problemas de optimización dinámica, descartando aquéllas que no cumplen con determinados requisitos (por ejemplo, en este caso, las soluciones con precios sombra del capital distintos de cero en el momento terminal). Estas condiciones entran en el análisis cuando el estado o el momento terminal (o ambos) son variables.

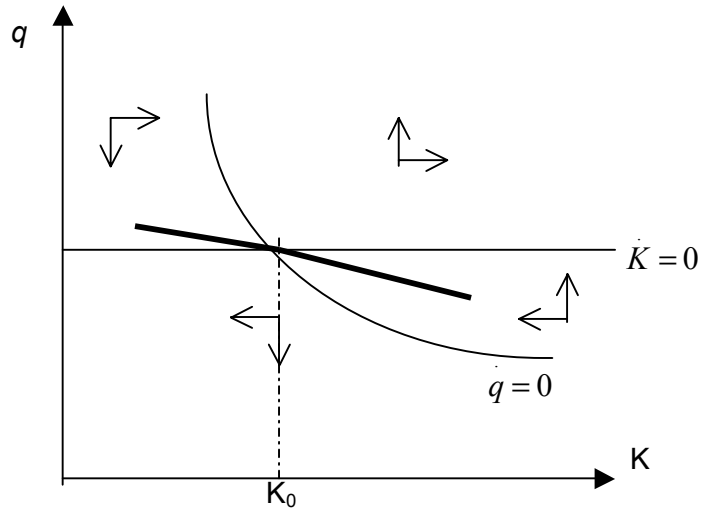
Imponiendo en (7) y (15) las condiciones $\dot{K} = 0$ y $\dot{q} = 0$ se hallan las propiedades de estado estacionario del sistema, que serán:

(16) $q = 1$ (dentro de la lógica de la teoría de la *q* de Tobin, I = 0 cuando *q*=1)

(17) $r = p\frac{\partial F}{\partial K} + \dot{p}_I - \rho . p_I$ (dado q=1)

Representando estas ecuaciones en un diagrama de fases, tenemos que:

Figura 5



Observamos que existe un equilibrio de punto de silla con una trayectoria -representada por la línea más gruesa- a lo largo de la cual el sistema converge al estado estacionario.

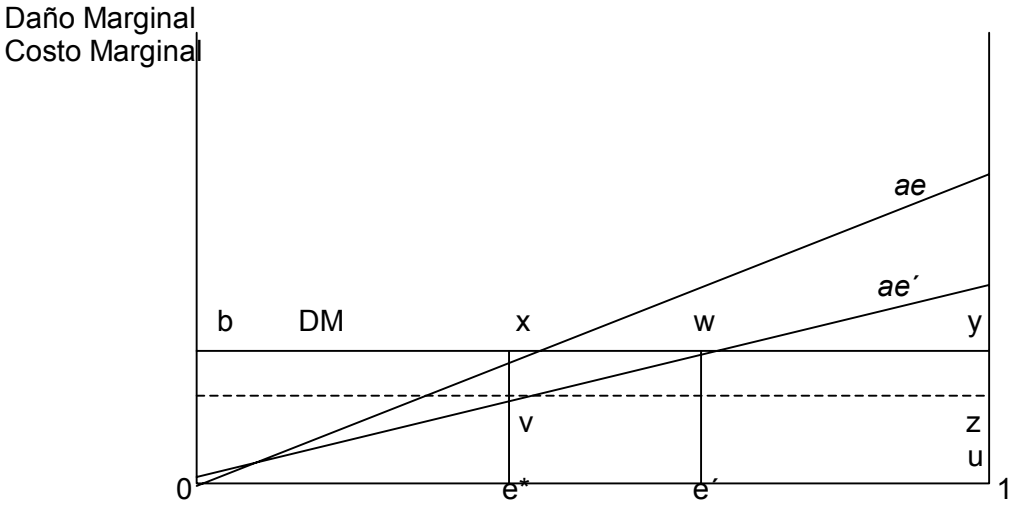
Este es el esquema correspondiente a una firma que no realiza esfuerzos de innovación para desarrollar tecnologías más limpias, sino que sólo cumple con la obligación de reducir sus emisiones de GEI incorporando en sus costos totales los costos de mitigación de gases. A continuación analizaremos qué ocurre si la empresa en cuestión decide realizar esfuerzos de I&D y logra desarrollar tecnologías menos intensivas en GEI que disminuyan sus costos de mitigación. Analizaremos este caso siguiendo a Parry (2001).

Cabe realizar en este punto dos aclaraciones. En primer lugar, que no modelizamos

aquí la opción que enfrenta la firma entre mitigar emisiones internamente o comprar permisos en el mercado (esto complicaría el análisis formal inútilmente y no contribuiría a esclarecer el punto fundamental que queremos demostrar, que realizar esfuerzos de innovación en materia ambiental le permite a la firma obtener ganancias mediante dos canales: la reducción de sus costos de mitigación y el aumento de sus ingresos a través de la venta de permisos en el mercado). Dado que la empresa mitigará o comprará permisos en función de lo que le resulte más barato -costo marginal por unidad de mitigación vs precio de la tonelada de GEI- supondremos aquí que el costo de mitigar internamente es menor que el costo unitario de comprar permisos en el mercado. En segundo lugar, tampoco modelizamos la decisión de ser innovador o no (es decir, no desarrollamos una regla de decisión para invertir en I&D); sólo modelizamos las ganancias que pueden derivarse de la innovación (lo cual puede sentar las bases para una regla de decisión).

Consideremos la Figura 6, donde el eje horizontal mide la reducción proporcional de emisiones alcanzada por la firma (e) y el vertical, los costos y beneficios de hacerlo en términos monetarios. Están graficadas las curvas de costo marginal de mitigación sin innovación (*ae*) y con innovación (*ae´*) así como la curva de daño marginal (DM). Esta última se supone plana pues se consideran las emisiones de una empresa en un solo país (y, como ya mencionamos, una firma considerada individualmente contribuye poco a la acumulación global de GEI). El nivel óptimo de mitigación inicial será *e*,* donde *ae* y DM se intersectan. A la firma se le otorgan permisos de emisión por una cuantía igual a (1-e*).

Figura 6



Supongamos un escenario de dos períodos. En el primero, la firma realiza I&D para desarrollar nuevas tecnologías más limpias. Estas tecnologías más eficientes en GEI, al ser utilizadas en el siguiente período, empujarán hacia abajo la curva de costo marginal de mitigación hasta *ae´*, desplazando el nivel óptimo de mitigación hasta *e´*, donde *ae´* intersecta a DM (suponemos que las ganancias de eficiencia que permiten reducir los costos de mitigación son mayores que los costos de innovación).

Esta situación le genera a la firma un doble beneficio.

Por un lado, se reduce su costo marginal de mitigación (*ae*) en el triángulo *0xv* -de 0xe* a 0ve*-, lo que genera una disminución en el costo marginal total de la empresa (*CM = w + r + ae + h*). En palabras más simples, a la firma le resultará ahora y en adelante más barato cumplir con sus metas de reducción de GEI.

Por el otro, al ser ahora su nivel óptimo de mitigación *e´* pero tener asignados permisos por (1-*e**) (siendo *e´>e**), la empresa podrá vender su excedente de permisos en el mercado, obteniendo ingresos adicionales por dicha venta. Formalmente, se introduce un componente adicional en la ecuación de beneficios (*B*) de la firma, correspondiente a las reducciones de CO2e adicionales y a los precios asociados a la tonelada de gas mitigado. En (6):

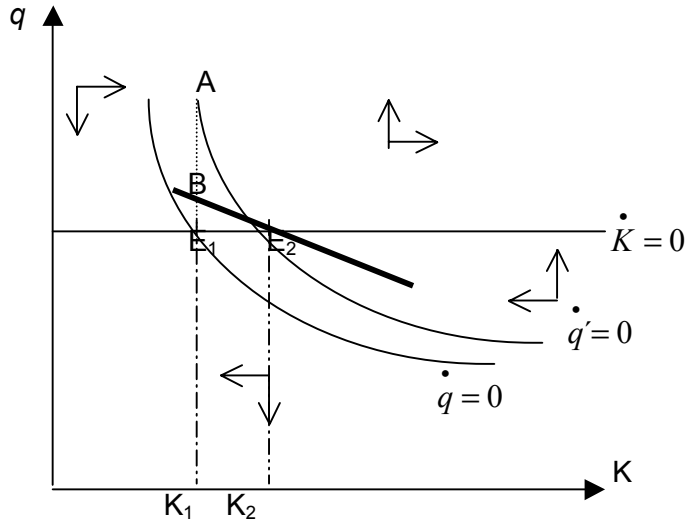
(18) $B = pF(K,N) + p_C \Delta e - wN - rK - \frac{ae^2}{2} - p_I I$

donde p_C es el precio de la tonelada de CO2e mitigado y Δe la reducción adicional de GEI (es decir, por encima de la meta asignada a la empresa) alcanzada por la firma (es decir, $\Delta e = e' - e^*$), medida en tn de CO2e. Considerando que cada permiso de emisión equivale a una tn de GEI reducida, Δe simboliza, asimismo, la cantidad de permisos de emisión vendidos por la firma en el mercado.

A los efectos de nuestro análisis dinámico, interesa el efecto que la reducción en el tiempo del costo marginal de mitigación (*ae*) tiene sobre la firma. La reducción de *ae* genera una caída en el costo marginal total (CM) de la empresa. Puesto que la firma opera en un oligopolio de Bertrand, donde las empresas fijan sus precios en función de su costo marginal, la reducción de este último permitirá a la empresa ganar en eficiencia y fijar un precio menor, ganando, en consecuencia, cuota de mercado. En la ecuación (15) se observa que esta reducción en el precio genera un aumento en $\dot{q}$ (la

evolución en el tiempo del ratio “valor de mercado de la firma/costo de reposición de sus activos”), lo que se refleja en un salto hacia arriba de la curva $\dot{q} = 0$ en la Figura 7.

Figura 7



Como se muestra en el gráfico, el valor de *q* “saltará” de E_1 a B y, a medida que el stock de capital se acumule y su producto marginal disminuya, el sistema convergerá a E_2, donde *q* será de nuevo igual a su valor de equilibrio (esta trayectoria asume que las firmas poseen previsión perfecta y que toman en cuenta las pérdidas de capital que tienen lugar a medida que el capital se acumula).

En síntesis, vemos que en un esquema global de mitigación con metas cuantitativas y comercio de permisos de emisión una empresa innovadora que logre desarrollar tecnologías menos intensivas en GEI podrá obtener una doble ganancia: una derivada de la reducción en el tiempo de sus costos de reducción de emisiones (desplazamiento hacia debajo de su curva de costo marginal de mitigación) y otra derivada del aumento de los ingresos en cada período por la venta de su excedente de permisos en el mercado.

Cabe destacar que estas ganancias se verán reducidas en un contexto dinámico debido a lo que Milliman y Prince (1989) llaman “la respuesta óptima de agencia”, es decir, la reacción de los reguladores frente a la reducción en los costos de mitigación, que los debería llevar a ajustar (hacia abajo) el nivel de emisiones permitidas en el próximo período (esto, sin embargo, permitiría a escala global un avance continuo en

la frontera del conocimiento).

Del análisis efectuado hasta aquí pueden extraerse varias conclusiones. En primer lugar, que es posible que una firma que enfrenta metas de reducción de emisiones con comercio de permisos obtenga ganancias: si es innovadora en materia ambiental y logra desarrollar tecnologías más eficientes en GEI, podrá reducir sus costos de mitigación en el tiempo y obtener ingresos adicionales provenientes de la venta de permisos en el mercado.

En segundo lugar, que en un sistema de estas características habrá, inevitablemente, ganadores y perdedores. Ganarán las empresas innovadoras que puedan reemplazar su capital instalado por equipos más eficientes y perderán las firmas no innovativas con capital hundido.

En tercer lugar, que lo que se debe intentar lograr desde la política pública es generar los incentivos correctos. Esto compete tanto a las políticas nacionales como al marco internacional, pues, como ya mencionamos, el Cambio Climático es un problema global que requiere de la asunción de compromisos voluntarios nacionales. En este contexto, para que un sistema de mitigación global basado en metas cuantitativas (nacionales pero acordadas internacionalmente) y mercados de carbono (globales) brinde incentivos adecuados deben cumplirse dos condiciones: que las señales de precios sean permanentes en el tiempo y que el precio por tonelada de carbono sea lo suficientemente alto. Sobre este último tema se reflexiona en la siguiente sección.

3.3.3 La importancia de lograr horizontes de largo plazo en materia de compromisos de reducción de emisiones

Hasta aquí, lo que hemos visto es que mediante un sistema de mitigación del Cambio Climático basado en el comercio de permisos de emisión se puede inducir a las firmas privadas a que desarrollen tecnologías menos intensivas en GEI, pues las mismas pueden obtener ganancias por ello.

Sin embargo, para que esto realmente funcione, debe tomarse en cuenta un punto fundamental: es preciso contar con señales de largo plazo que sean percibidas como permanentes en el tiempo. La lógica de esto radica en que la inversión en bienes de capital e I&D involucra el largo plazo. La vida útil media de los equipos en sectores

intensivos en capital así como las inversiones en infraestructura involucra varias décadas, por lo que una empresa no invertirá en el desarrollo de tecnologías más limpias si no tiene un panorama más o menos claro sobre qué ocurrirá en materia ambiental a nivel local e internacional en un período que exceda, al menos, el tiempo de amortización de su inversión.

Por lo tanto, para que el valor del carbono sea realmente incorporado a las decisiones de inversión de las firmas privadas, las señales regulatorias necesitan reflejar este horizonte temporal. Las firmas deben prever que en el largo plazo las reglas no cambiarán (o, al menos, que los precios de la tonelada de carbono serán crecientes en el tiempo) y que seguirá siendo necesario realizar esfuerzos de mitigación. Sino, dudosamente querrán incurrir hoy en gastos de inversión que no le reportarán ganancias mañana. En otras palabras, las firmas deben tener (relativa) seguridad de que podrán recuperar en el futuro la inversión en tecnologías limpias que realicen hoy, mediante la reducción de los costos futuros de mitigación y la venta de permisos de emisión. Ninguna empresa incurrirá en cuantiosos gastos y potenciales pérdidas de competitividad para cumplir con una regulación que posiblemente deje de estar en vigencia en pocos años. Si no pueden imputar beneficios futuros, difícilmente les cierre la ecuación económica en materia de innovación e inversión en tecnologías limpias.

Por todo lo anterior, un componente fundamental que debe estar presente en todo sistema de incentivos que se diseñe para modificar el comportamiento contaminante de las firmas privadas es una estructura de precios de largo plazo del carbono que envíe señales claras en materia de “premios” por la realización de esfuerzos ambientales innovativos, de manera tal de que el carbono sea incluido definitivamente en los cálculos de las empresas emisoras de GEI.

No obstante, la existencia de esta estructura de precios de largo plazo depende de que exista continuidad en el tiempo en los requerimientos de cumplir con compromisos cuantitativos de reducción de emisiones. Puesto que los mercados de carbono surgen por la necesidad de cumplir con metas ambientales, si no hay obligación de cumplir con ellas no habrá empresas que deban salir a comprar permisos de emisión porque sus propios esfuerzos de mitigación no alcanzan. Sin demanda no habrá mercado y sin mercado desaparecerá el canal a través del cual una firma innovativa en materia ambiental puede obtener ganancias (pues no existirá un ámbito donde vender los derechos de emisión que le “sobran” por haber logrado reducir emisiones más allá de su límite permitido). Asimismo, si no se prevé una continuidad en las exigencias en

materia de cumplimiento de compromisos de mitigación, es decir, si parece improbable que en el futuro siga siendo obligatorio reducir emisiones, se pierde el incentivo a buscar mejoras de eficiencia dinámicas pues ¿cuál es el sentido de reducir costos futuros de mitigación si en el futuro posiblemente no sea obligatorio realizar esfuerzos de mitigación?

En otras palabras, una firma innovadora puede obtener ganancias en un sistema de comercio de permisos siempre y cuando exista un horizonte de largo plazo contra el cual proyectar beneficios a futuro derivados de su inversión en tecnologías limpias hoy. Y esto depende de que se acuerden metas globales de mitigación mucho más allá del año 2012. Sin acuerdo de metas no habrá señales (precios) de largo plazo en los mercados.

En este contexto, surge un nuevo interrogante, que no pretendemos responder en este trabajo: ¿Cómo lograr que exista un marco de continuidad en las negociaciones internacionales de forma tal de que se generen señales de largo plazo en los mercados de permisos? Esta pregunta se liga estrechamente con la discusión académica -y política- actual sobre cómo darle continuidad a las iniciativas de mitigación del Cambio Climático luego del fin del primer período de compromiso del PK (2012). La mayoría de las propuestas que se están barajando se relacionan con la inclusión de los países en desarrollo (PEDs) en el esfuerzo global de manera vinculante y con una posible migración desde el cumplimiento de metas cuantitativas hacia la cooperación para el desarrollo, transferencia y difusión de tecnologías menos intensivas en GEI (ver Chidiak, 2006).

3.4 Resumen

En este capítulo se analizaron los incentivos que los mercados de carbono pueden brindar a las empresas privadas para que éstas inviertan en innovación y desarrollo de tecnologías más limpias.

En este marco, la primera sección describió las características y el funcionamiento de los recientemente creados “mercados de carbono”, analizando lo acontecido en los mercados de permisos y de certificados basados en proyectos durante 2005 y 2006. Se mencionó que los mercados de permisos más importantes que existen en la actualidad son cuatro y que fueron creados por políticas regulatorias nacionales (EU

ETS) o bien por compromisos voluntarios pero vinculantes que impusieron restricciones sobre las emisiones actuales o anticipadas a nivel nacional o subnacional (UK ETS, CCX, NSW). Por su parte, se dijo que los principales mercados de certificados basados en proyectos son dos, el MDL y el IC, ambos surgidos de los mecanismos de flexibilidad del PK.

En el año 2006 se transaron en estos mercados cerca de USD 30 mil millones, triplicando lo comercializado en el año 2005. El mercado estuvo dominado por la venta y reventa de EUAs (permisos transados en el EU ETS), alcanzando un valor de USD 25 mil millones. Por su parte, las transacciones basadas en proyectos ascendieron a alrededor de USD 5 mil millones. Cabe destacar que, aún con sus limitaciones, el MDL proveyó un vehículo efectivo para que los PEDs participen en el esfuerzo global orientado a reducir las emisiones de carbono.

Los precios promedio vigentes en el EU ETS (mercado de permisos) durante 2006 han sido claramente superiores a los precios de los CERs y ERUs del MDL e IC (mercados de certificados basados en proyectos): USD 22,1 versus USD 10,9 y USD 8,7 respectivamente. Esto se debe, fundamentalmente, a que los permisos de emisión enfrentan menores costos de transacción y menores riesgos que los certificados basados en proyectos. Asimismo, se han observado diferencias (históricas) de precios entre los CERs y los ERUs, las cuales parecen deberse a la falta de claridad del marco institucional del mecanismo de IC que involucra riesgos regulatorios y soberanos.

Para el período 2008-2012, primer período de compromiso del PK, las estimaciones de precios de permisos de emisión están en el rango de USD 4-34/tCO2, dependiendo de si se incluyen o no en la estimación los créditos provenientes de Rusia y otras economías de Europa del Este ("hot air") y de si se considera o no la inclusión de CERs y ERUs. Cabe resaltar que los modelos macroeconómicos citados en Stern (2006) sugieren que, para lograr la estabilización de emisiones en 500-550 ppm CO2e, los precios del carbono deben alcanzar valores promedio de USD 360/tCO2 para el año 2030 y ubicarse en el rango de USD 180-900/tCO2 hacia el año 2050.

La siguiente sección de este capítulo analizó de manera formal la discusión conceptual esbozada hasta aquí. Se presentó, entonces, un modelo de optimización dinámica de una empresa emisora de GEI que opera en un mercado oligopólico a la Bertrand y que debe cumplir con metas de reducción de emisiones. Considerando ecuaciones de inversión basadas en la Teoría de la *q* de James Tobin, se analizó si esta firma puede

obtener algún tipo de ganancia por ser ambientalmente innovadora.

El modelo planteó que si una firma enfrenta compromisos cuantitativos de reducción de emisiones debe sumar a sus costos totales los gastos correspondientes a la realización de actividades de mitigación de GEI. Sin embargo, si la firma realiza esfuerzos de I&D y logra crear nuevas tecnologías más limpias que le permitan reducir sus emisiones más allá de los límites permitidos podrá obtener una doble ganancia. Por un lado, podrá obtener ganancias de eficiencia relacionadas con la reducción de su costo de cumplir con sus compromisos en el tiempo (los esfuerzos de innovación orientados a producir nuevas tecnologías más limpias permitirán a la firma trasladar hacia abajo su curva de costo marginal de mitigación en sucesivos períodos). Por el otro, si la firma emite por debajo de su máximo permitido podrá vender en el mercado su excedente de permisos de emisión, obteniendo ingresos extra en cada período (si puede mitigar por encima de lo exigido podrá introducir un componente adicional en su ecuación de ingresos, el cual será función de los precios pagados en el mercado por cada tonelada de CO2e mitigada y de la cantidad de emisiones de GEI "extra" que logre reducir). Cabe aclarar que no se pretendió modelizar aquí la regla privada de decisión de innovar o no, sino sólo las ganancias que pueden derivarse de la innovación.

Se terminó resaltando, no obstante, que si bien un sistema de mitigación global basado en mercados de carbono podría otorgar incentivos adecuados para que las firmas privadas mejoren su *performance* ambiental, para que éstos sean suficientes deberían cumplirse, en principio, dos condiciones: que el precio por tonelada de carbono sea lo suficientemente alto y que las señales de precios sean de largo plazo y permanentes en el tiempo. Y se remarcó que esto último depende de que se acuerden metas globales de mitigación más allá del año 2012. Sin acuerdo de metas no habrá señales de largo plazo en los mercados.

Conclusiones

A lo largo de este trabajo se han revisado cuestiones relacionadas con el problema del Cambio Climático desde una perspectiva económica, prestando especial atención a las interrelaciones que existen entre las decisiones de los agentes privados en materia de inversión en tecnologías más limpias y las señales de precios que surgen de los recientemente creados "mercados de carbono".

En los últimos tiempos se viene desarrollando una importante masa crítica de apoyo público a los esfuerzos de mitigación del Cambio Climático. Esto se debe, fundamentalmente, a la abrumadora evidencia científica de los estudios que alertan sobre las consecuencias futuras devastadoras del calentamiento global y, en parte, al informe de Nicholas Stern (2006), el cual permitió estimar monetariamente los costos globales que impondrán sobre la economía mundial tanto la acción como la inacción en materia de reducción de gases de efecto invernadero. Específicamente, el "Informe Stern" muestra la importancia de abordar el problema del Cambio Climático desde una óptica económica, pues la inexistencia de un precio del carbono imposibilita toda evaluación costo-beneficio de mercado de las políticas que se puedan proponer para mitigar el calentamiento global. En este sentido, el Informe le "pone un precio" al Cambio Climático y facilita la valoración de las propuestas orientadas a reducir las emisiones de GEI.

Así, la Ciencia y la Economía están comenzado a acercar posiciones y a sugerir que el Cambio Climático posiblemente sea el problema ambiental, económico y político más grave y severo que deberemos enfrentar como comunidad mundial durante los próximos años. La pregunta del millón es cómo resolverlo, considerando que presenta características que vuelven muy difícil el diseño e implementación de políticas óptimas. La literatura disponible muestra que:

- **Es un problema ambiental global** (la concentración de GEI no depende de dónde se generan o mitigan las emisiones. Por lo tanto, es necesaria la coordinación internacional. Sin embargo, ésta es muy difícil de alcanzar debido a que los impactos sociales y económicos del Cambio Climático no se distribuirán uniformemente a lo largo del globo. Los peores daños los sufrirán, claramente, los PEDs).

- **Es el resultado de una externalidad negativa derivada de la producción industrial en PDs** (no existe en los mercados -sin intervención- un precio del carbono que refleje los costos globales de las emisiones de GEI).
- **Es un problema stock-flujo** (la causa del problema son las emisiones de GEI pero lo que determina la magnitud del problema es la concentración -acumulación- de GEI en la atmósfera, pues los gases tienen larga permanencia).
- **Es un problema temporal que pone en juego un principio de equidad intergeneracional** (quienes toman decisiones hoy deben afrontar costos de acción sin casi percibir beneficios) **e intrageneracional** (los efectos del Cambio Climático durante los próximos años afectarán sobre todo a los PEDs; los PDs -principales causantes y quienes se encuentran en mejor situación relativa para mitigar- no están dispuestos a pagar los costos necesarios para evitar dichos daños).
- **Se deriva de la falta de asignación y protección de los derechos de propiedad sobre el uso de la atmósfera y sobre los recursos naturales en PEDs** (los cuales han sido sobreexplotados para proveer materias primas a bajo costo a los PDs).
- **Plantea numerosas incertidumbres** (respecto de la magnitud ecológica del daño que podría efectivamente generarse como consecuencia del Cambio Climático, del nivel al que se deberían estabilizar las concentraciones de GEI de modo tal de evitar impactos dramáticos, de cuáles son los instrumentos disponibles para alcanzar tales niveles de concentración, del horizonte temporal a partir del cual los daños provocados al medio ambiente se volverían irreversibles, de los costos que efectivamente demandaría el cumplimiento de compromisos cuantitativos de mitigación y adaptación, de la efectividad que verdaderamente tendrían las acciones de mitigación para frenar el calentamiento global y, en lo que respecta al marco político, sobre qué se podrá negociar y acordar en el futuro). Por lo tanto, **mitigar implica gastar dinero hoy a cambio de obtener beneficios inciertos y, en parte, en un futuro remoto**.
- **Limitar los efectos nocivos del Cambio Climático es equivalente a proveer un bien público global** (todos los países se beneficiarían –principio de no exclusión- sin disminuir los beneficios para el resto de las naciones -principio de no rivalidad-. Esta característica de bien público implica, por un lado, que la provisión (privada) actual de un ambiente sano es subóptima y, por el otro, que existen problemas de *free-riding* -todos procuran sacar provecho de los beneficios de evitar el calentamiento global pero sin asumir los costos de reducir las emisiones de GEI a nivel doméstico-).

- **Las actividades de mitigación pueden implicar pérdidas de competitividad para las empresas y países que las realicen** (pérdida de *market share* y relocalización de industrias hacia PEDs sin compromisos en el marco del Protocolo de Kyoto).

Las soluciones posibles al problema del Cambio Climático que se están analizando -y, en pequeña medida, implementando- abarcan fundamentalmente opciones energéticas que van desde el uso eficiente de la energía y las energías renovables hasta el uso limpio del carbón y el secuestro biológico y geológico del carbono. La mayoría de estas opciones están relacionadas, de una forma u otra, con el desarrollo de nuevas tecnologías menos intensivas en GEI, lo que implica que la innovación tecnológica constituye un pilar fundamental dentro de cualquier estrategia de mitigación del Cambio Climático (Stern, 2006; Chidiak, 2006; Goulder y Pizer, 2006; Popp, 2004). El análisis efectuado aquí mostró que los esfuerzos de innovación resultan de vital importancia y que se encuentran en el centro del debate internacional actual.

Sin embargo, al considerar el potencial de la innovación tecnológica como posible solución al problema surgen fallas de mercado que hacen que la inversión privada en investigación y desarrollo (I&D) orientada a crear nuevas tecnologías más limpias sea subóptima (Stern, 2006; Popp, 2004). Por un lado, el hecho ya mencionado de que las emisiones de GEI constituyen una externalidad ambiental (sin intervención, no tienen un precio de mercado), por lo que ni las firmas ni los consumidores tienen incentivo a reducirlas (es decir, habría poco mercado para las nuevas tecnologías más limpias que se generen en el contexto actual). Por el otro, el hecho de que cuando tiene lugar una innovación y ésta se vuelve de dominio público se producen derrames de conocimiento que hacen que no todos los beneficios derivados de la innovación puedan ser apropiados por el innovador.

Por lo tanto, gran parte del problema del Cambio Climático radica en la falta de incentivos para el cambio tecnológico orientado a la creación y adopción de tecnologías más limpias. En este sentido, los mercados de carbono -a través de la generación de precios de largo plazo que reflejen los costos globales de las emisiones de GEI- pueden contribuir a fomentar la I&D, modificando los actuales patrones de inversión y trasladando a la economía global hacia una trayectoria productiva menos carbono-intensiva. Este es el punto fundamental que plantea este trabajo.

En este marco, a lo largo de estas páginas se ha procurado responder la siguiente pregunta: ¿Cómo se pueden brindar incentivos adecuados para que las empresas privadas intensivas en GEI desarrollen y/o incorporen tecnologías más limpias para reducir sus emisiones (y contribuyan a corregir la externalidad negativa que imponen sobre el uso de la atmósfera)?

Al comienzo de esta investigación se planteó la hipótesis de que un sistema global de mitigación del Cambio Climático basado en el comercio de permisos que arroje un precio único de largo plazo para el carbono puede brindar un marco adecuado de incentivos para inducir un cambio tecnológico en el sector privado que lo lleve a reducir sus emisiones de GEI, pues en un contexto como éste las firmas privadas pueden obtener ganancias de eficiencia si son innovadoras en materia ambiental.

La literatura teórica sobre regulación ambiental óptima sugiere que los mecanismos más eficientes para corregir las externalidades negativas que imponen las emisiones de GEI y, a la vez, contribuir a incentivar la innovación tecnológica son la imposición de un impuesto (pigouviano) a las emisiones (instrumento de precio) o el comercio de permisos de emisión (instrumento de cantidad) (ambos mecanismos implican el pago de un precio por tonelada de GEI emitida). La elección de uno u otro instrumento depende de las pendientes relativas de las curvas de costo marginal de mitigación (que indica el costo que le representa a una firma reducir una unidad adicional de GEI) y de daño marginal (que indica el daño -en términos monetarios- que le causa a la sociedad la emisión de una unidad más de GEI). Si la primera es más empinada que la segunda, es decir, si resulta más importante no errar en materia de precios, el instrumento recomendado será el impuesto. Y éste parece ser el caso, según la evidencia disponible, para el Cambio Climático.

Sin embargo, la imposición de un impuesto a las emisiones enfrenta alta resistencia por parte del sector privado (así lo demuestra, por ejemplo, el intento fallido de Bill Clinton de establecer el “impuesto BTU”) y requiere coordinar la tasa del impuesto a nivel internacional. Esto nos reafirma que el análisis de recomendaciones teóricas debe ser siempre acompañado por consideraciones de economía política relacionadas con la factibilidad y aceptabilidad de las propuestas. En cambio, lo que se observa en la práctica es que está cobrando importancia creciente el comercio de permisos de emisión.

Este hecho disparó preguntas de investigación adicionales, que estamos ahora en condiciones de responder.

En primer lugar, ¿qué incentivos puede brindar un sistema de comercio de permisos de emisión para que las firmas privadas realicen esfuerzos de innovación tecnológica en materia ambiental?

Los sistemas de permisos de emisión negociables son instrumentos de política ambiental que influyen en el comportamiento de los emisores de GEI mediante el otorgamiento de incentivos económicos: se emiten permisos por la cantidad total de emisiones autorizadas (“*cap”)* y se distribuyen entre las firmas -ya sea de manera gratuita o mediante subasta-, pudiendo éstas comercializarlos en un mercado. En lo que respecta a la decisión de política que involucran, estos sistemas son clasificados como “instrumentos de cantidad” debido a que se basan en un racionamiento cuantitativo de las emisiones.

Los sistemas de comercio de permisos proveen un mecanismo de flexibilidad para que las empresas que enfrentan metas de reducción de emisiones puedan cumplir con ellas al menor costo posible, pues les permite decidir entre reducir emisiones internamente o comprar permisos en el mercado (lo que les resulte más barato). De esta manera, se logra alcanzar el objetivo de mitigación propuesto por el límite máximo de emisiones permitido al menor costo agregado posible (es decir, se cumple con el criterio de costo-eficiencia).

Estos sistemas incentivan a las firmas emisoras de GEI a ser innovadoras en materia ambiental al brindar la posibilidad de vender permisos “extra” en el mercado. De esta manera, se abre una oportunidad de negocio para aquellas firmas que logren reducir sus emisiones en exceso de lo exigido y tengan, por lo tanto, permisos para vender. En este sentido, resulta clave las señales que puedan enviar los mercados que se creen para comercializar estos permisos: los precios por tonelada de carbono deben ser suficientemente altos y permanentes en el tiempo.

De esta forma, los mercados que surgen como consecuencia de la creación de los sistemas de permisos de emisión constituyen el canal a través del cual pueden materializarse las ganancias de eficiencia derivadas de la innovación ambiental (es en ellos donde se transan los permisos) y, a su vez, donde se crean las señales (precios del carbono) para inducir mayores esfuerzos de I&D.

Así, si una firma es innovadora en materia ambiental y logra desarrollar tecnologías menos carbono-intensivas que le permitan reducir sus emisiones más allá de los límites permitidos podrá obtener una doble ganancia. Por un lado, podrá obtener ganancias de eficiencia derivadas de la reducción de su costo de cumplir con sus compromisos en el tiempo (traslado hacia abajo de su curva de costo marginal de mitigación). Por el otro, podrá generar ganancias derivadas de la venta de permisos de emisión en el mercado (si la firma emite por debajo de su máximo permitido podrá vender en el mercado su excedente de permisos de emisión, obteniendo ingresos extra en cada período). Esta fue una de las principales conclusiones del modelo de optimización dinámica desarrollado en este trabajo.

En cuanto a la segunda pregunta, relativa a las enseñanzas de la evidencia empírica reciente sobre los mercados de carbono, ¿funcionan adecuadamente dichos mercados? ¿Pueden generarse señales de precios adecuadas en estos mercados para corregir la externalidad negativa que imponen las firmas con sus emisiones de GEI?

Los mercados de carbono surgidos en el marco de la entrada en vigencia del PK vienen experimentando un crecimiento sostenido desde el año 2004. Existen en la actualidad varios mercados fragmentados que involucran tanto permisos como certificados basados en proyectos. En el año 2006 se transaron en ellos cerca de USD 30 mil millones, triplicando lo comercializado en el año 2005. El más importante ha sido el mercado de permisos de la Unión Europea (EU ETS), el cual explicó el 83% del valor total transado en 2006.

Varios analistas concluyen que el financiamiento que estos mercados proveen se está convirtiendo en un vehículo eficaz para canalizar fondos hacia inversiones dirigidas a la innovación tecnológica, bajo la "zanahoria" de tener que cumplir con las metas de emisión impuestas por el PK o bien por los sistemas voluntarios nacionales o estaduales en vigencia (BM, 2007; 2006). En este sentido, la experiencia reciente del EU ETS, NSW, CCX, UK ETS y de los mercados de certificados MDL e IC estaría demostrando que los sistemas *cap-and-trade* basados en el uso de mecanismos de mercado (como el comercio de permisos) pueden brindar incentivos adecuados para ayudar a mitigar el Cambio Climático.

Sin embargo, dado que la inversión en bienes de capital e I&D involucra el largo plazo, las señales de precio creadas en estos mercados necesitan reflejar este horizonte temporal. Y debido a que el PK sólo contempla -al menos por el momento- el período 2008-2012 y enfrenta múltiples incertidumbres políticas en lo que respecta a su futuro, no logra generar aún precios futuros del carbono que permitan dar un salto cualitativo en materia de incentivos a la inversión privada agregada dirigida al desarrollo de tecnologías más limpias.

En cuanto a la última pregunta planteada -¿puede, en definitiva, corregirse la mayor falla de mercado de la historia, el Cambio Climático, mediante más mercado?- podemos resumir algunos resultados.

Del análisis realizado podemos concluir que con "más mercado", es decir, con la maduración, consolidación y expansión de los mercados de carbono existentes y la creación de otros nuevos que logren arrojar altos precios para el carbono en el largo plazo, se podría contribuir a corregir la enorme falla de mercado que representa el Cambio Climático.

Por lo tanto, la principal conclusión que se desprende de esta investigación es que nuestra hipótesis de trabajo no puede ser rechazada: tanto la revisión de literatura realizada como el modelo matemático desarrollado brindan evidencia en el sentido de que si existe un mercado global de permisos donde se comercialicen "derechos" a emitir en función del desempeño ambiental de cada empresa existirá un incentivo a invertir en I&D para crear tecnologías menos emisoras de GEI, pues a través de éstas se pueden disminuir los costos privados de cumplir con la regulación en el tiempo y, a la vez, generar nuevos ingresos por la venta de permisos en el mercado, impulsando de esta forma un cambio de trayectoria global hacia un sendero menos intensivo en GEI.

Sin embargo, cabe reiterar que, en la práctica, los mercados existentes a la fecha no logran proveer señales con un horizonte temporal suficientemente extenso como para que las firmas puedan proyectar beneficios a futuro derivados de la inversión en tecnologías limpias hoy. Y esto es consecuencia de que no se ha logrado acordar aún metas globales de mitigación más allá del año 2012. Por lo tanto, hoy por hoy, la simple existencia de los mercados en su forma actual resulta insuficiente: se precisa de la voluntad política internacional para acordar metas globales de mitigación más allá del año 2012, pues sin acuerdo de metas no habrá señales (ni mercados) de largo

plazo.

En síntesis, este trabajo procuró mostrar que un tema clave para superar la actual encrucijada en materia de Cambio Climático radica en otorgar incentivos adecuados a las empresas privadas para que éstas modifiquen sus patrones productivos e innovativos de modo de reducir sus emisiones de GEI. Esto podría lograrse, en principio, con un sistema de comercio de permisos de emisión (como el previsto en el Protocolo de Kyoto) pero en el marco de un arreglo político e institucional mundial que garantice la continuidad de la iniciativa y se refleje en la existencia de una estructura de precios "del carbono" que arroje valores suficientemente altos y que brinde señales de largo plazo para la inversión. Asimismo, se procuró resaltar la importancia de la innovación tecnológica como parte de la solución del problema, analizar los incentivos específicos que proveen los mercados de permisos e identificar los canales a través de los cuales las empresas emisoras de GEI pueden obtener ganancias si son innovadoras en materia ambiental.

De más está decir que quedan abiertos muchos interrogantes, siendo el principal de ellos: ¿Cómo lograr que exista un marco de continuidad en los esfuerzos internacionales para mitigar el Cambio Climático? La respuesta a esta pregunta excede el marco del presente trabajo, pues debe buscarse en los intereses, prioridades y voluntades políticas de los decisores de las principales economías del mundo.

Para finalizar, resulta oportuno resaltar los dos principales aportes que se ha buscado realizar mediante este trabajo. En primer lugar, se ha introducido formalmente dentro del problema de optimización intertemporal de una firma tanto consideraciones ambientales como de innovación orientada al desarrollo de tecnologías menos intensivas en GEI. Y en segundo lugar, al haber enmarcado el modelo de optimización dinámica en la teoría de inversión de la *q* de Tobin en lugar de hacerlo dentro de la teoría de inversión neoclásica usualmente utilizada para abordar problemas microeconómicos, se ha buscado vincular formalmente los esfuerzos de innovación realizados por firmas privadas que enfrentan metas de reducción de emisiones con posibles cambios positivos en su valuación de mercado en el tiempo (es decir, los canales -aumento de ingresos y reducción de costos- a través de los cuales operan los incentivos a innovar en un contexto de *cap-and-trade*).

En conclusión, la idea fundamental que surge de este trabajo es que proveyendo

incentivos correctos es posible que la economía global se mueva hacia una trayectoria menos intensiva en GEI donde el crecimiento económico, la maximización del beneficio privado y el cuidado del medio ambiente sean compatibles.

Bibliografía

Azqueta, D. (2002): Introducción a la Economía Ambiental, Ed. Mc Graw Hill, Madrid

Banco Mundial-IETA (2007): “State and trends of the carbon market 2007”, mayo 2007, disponible en: http://carbonfinance.org/docs/Carbon_Trends_2007-_FINAL_-_May_2.pdf

Banco Mundial-IETA (2006): “State and trends of the carbon market 2006”, mayo 2006, disponible en: http://www.ieta.org/ieta/www/pages/download.php?docID=1667

Bosetti, V.; Carraro, C. y M. Galeotti (2006): “Stabilisation Targets, Technical Change and the Macroeconomic Costs of Climate Change Control”, Fondazione Eni Enrico Mattei, Nota di Lavoro N° 2.2006

Bryden, H.; Longworth, H. y S. Cunningham (2005): "Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation", *Nature,* Vol. 25, pp. 655-657

Chiang, A. (1984): Métodos fundamentales de Economía Matemática, Ed. McGraw Hill, Nueva York

Chiang, A. (1992): Elements of Dynamic Optimization, Ed. McGraw Hill, Nueva York.

Chichilnisky, G. (1994): “North-south trade and the global environment”, *American Economic Review,* Vol. 84, pp. 851-74

Chidiak, M. (2001): "A positive analysis of voluntary agreements to reduce industrial greenhouse-gas emissions", Tesis de Doctorado en Economía Industrial, defendida el 23/10/2001, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris

Chidiak, M. (2006): “Negociaciones post 2012. ¿Cuál es el rol de los países en desarrollo?”, documento elaborado para la Unidad de Cambio Climático de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, septiembre de 2006

CMNUCC (1992): Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático, disponible en http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf

CSFB (2003): “European carbon trading - utilities to get a boost”, Sector Review European Utilities, 8 October 2003

DKW (2003): “Emission Trading - Carbon Derby Part II”, Dresder Kleinwort Wasserstein Securities Limited, UK.

Dorfman, R. (1969): “An Economic Interpretation of Optimal Control Theory”, *American Economic Review,* Vol. 59, pp. 817-831.

Durkin, M (2007): “El gran fraude del calentamiento global”, documental emitido en el Canal 4 británico el 8 de mayo de 2007, disponible en http://archivodocumental.wordpress.com/2007/05/18/el-gran-fraude-del-calentamiento-global/

ECON (2004): “EU Emissions Trading Scheme and the Effect on the Price of Electricity”, ECON Report 2004-081, Stockholm

Ellerman, A. y B. Buchner (2006): “Over-Allocation or Abatement? A Preliminary Analysis of the EU Emissions Trading Scheme Based on the 2005 Emissions Data”, Report Nº 141, MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Cambridge

Emanuel, K. (2005): Divine wind: the history and science of hurricanes, Oxford University Press

Fundación JIN (2006): “Magazine on the Kyoto Mechanisms”, Vol. 12, Nº 2, Julio 2006, Paterswolde, the Netherlands

G8 (2005): Documentos sobre cambio climático de la Cumbre de Gleneagles, disponibles en http://www.g8.gov.uk/servlet/Front?pagename=OpenMarket/ Xcelerate/ShowPage&c =Page&cid=1119518704554

Gould, J. (1968): “Adjustment Costs in the Theory of Investment of the Firm”, *Review of Economic Studies*, Vol. 35, pp 47-56

Goulder, L. y W. Pizer (2006): “The Economics of Climate Change”, *Resources for the Future*, Discussion Paper 06-06

Grubb, M. (2003): “The Economics of the Kyoto Protocol”, *World Economics*, Vol 4, Nº 3, Julio-septiembre.

Hayashi, F. (1982): "Tobin´s Marginal q and Avarage q: a Neoclassical Interpretation", *Econometrica,* Vol. 50, N° 1, pp. 213-224

ICF Consulting (2005): "Analyzing the Price of Carbon in 2008-2012: Its Widespread Impacts"), disponible en: http://www.icfi.com/publications/perspectives-2005/price-carbon.asp

IPCC (1990): "Climate change: the IPCC scientific assessment", Cambridge University Press, New York

IPCC (2001): "Climate Change 2001. The scientific basis", Eds. J. T. Houghton, Y. Ding, M. Nogua, D. Griggs, P. Vander Linden, K. Maskell, Cambridge Univ. Press., Cambridge, U.K

IPCC (2007): "Climate Change 2007: The physical Science Basis - Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", disponible en http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html.

Jorgenson, D. (1963): "Capital Theory and Investment Behavior", *American Economic Review,* Vol. 53, pp. 47-56

JP Morgan (2003): "CO2 emissions: no windfall for European utilities", Global Equity Research, London

Kolstad, C. (2001): Economía Ambiental, Oxford University Press, México

KPI (Kyoto Protocol Implementation) (2003), Technical Report: "Impacts of Linking JI and CDM Credits to the European Emission Allowance Trading Scheme" (KPI-ETS), prepared by Patrick Criqui, CNRS-IEPE (France) and Alban Kitous, ENERDATA S.A. (France) for Directorate General Environment, May 2003.

Lomborg, B. (2001): The Skeptical Environmentalist: Measuring the Real State of the World, Cambridge University Press

Lucas, R. (1967): "Adjustment Costs and the Theory of Supply", *Journal of Political Economy,* Vol. 75, pp. 321-334

Metz, B. y D. von Vuuren (2006): “How and at What Costs can Low Level Stabilization be Achieved? An Overview”, en Schellnhuber et al (2006)

Milliman, S. y R. Prince (1989): “Firm incentives to promote technological change in pollution control”, *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 17, pp. 247-265.

Newell, R. y W. Pizer (2001): "Discounting the benefits of climate change mitigation. How much does uncertain rates increase valuations?", *Economics Technical Series*, Pew Center on Global Climate Change, disponible en: http://www.rff.org/Documents/RFF-RPT-disbenefits.pdf

Newell, R. y W. Pizer (2002): “Discounting the benefits of Climate Change policies using uncertain rates”, Resources for the Future, Issue 146, disponible en http://www.rff.org/Documents/RFF-Resources-146-discount.pdf

Nordhaus, W. (1982): “How fast should we graze the global commons?”, *American Economic Review, Vol.* 72, pp. 242-46

Parry, I. (1997): “Pollution Regulation and the Efficiency Gains from Technological Innovation”, Resources for the Future, Discussion Paper 98-04

Parry, I. (2001): “On the implication of technological innovation for Environmental policy”, Resources for the Future, Discussion Paper 01-44

Point Carbon (2007): “Carbon 2007 - A new climate for Carbon trading”, K. Roine and H. Hasselknippe (eds), Point Carbon, Oslo

Popp, D. (2004): “R&D subsidies and climate change policy: is there a “free lunch?”, Nacional Bureau of Economic Research, Working Paper 10880

Powernext Carbon (2006): “Tendances Carbon: The European carbon market monthly bulletin”, Issues 1-5

Rahmstorf, S. (2006): "Los futuros océanos", documento presentado en la 12º Conferencia de las Partes (COP) de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) celebrada en Nairobi, Kenia en noviembre de 2006.

Schellnhuber, H. (Ed.) (2006): Avoiding Dangerous Climate Change, Cambridge University Press

Socolow, R. (2006): “Stabilization Wedges: An Elaboration of the Concept”, en Schellnhuber y otros (2006)

Stern, N. (2006): “Stern Review on the Economics of Climate Change: What is the Economics of Climate Change”, Discussion Paper, 31, enero 2006

Summers, L. (1981): “Taxation and Corporate Investment: a q Theory Approach”, *Brookings Papers on Economic Activity*, Vol. 1981, Nº 1, pp. 67-140

The Economist (2006): “The heat is on: A special report on climate change”, 9-15 de septiembre

Tobin, J. (1969): “A General Equilibrium Approach to Monetary Theory”, *Journal of Money, Credit and Banking,* N° 1, pp. 15-29

Treadway, A. (1969): “On rational entrepreneurial behaviour and the demand for investment”, *Review of Economic Studies*, Vol. 36, pp 227-240

Uzawa, H. (1969): “Time preference and the penroes effect in a two-class model of economic growth”, *Journal of Political Economy,* Vol. 77, pp. 628-652

Webster, P.; Holland, G.; Curry, J. y H. Chang (2005): "Changes in Tropical Cyclone Number, Duration, and Intensity in a Warming Environment", *Science*, Vol. 309 (5742), 1844-1846.

Yoshikawa, H. (1980): “On the “q” theory of investment”, *American Economic Review,* Vol. 70, Nº 4 (Sep., 1980), pp. 739-743

Anexo matemático

Los desarrollos que se presentan a continuación están basados en Chiang (1984, 1992), Dorfman (1969) y Parry (2001).

El problema de optimización dinámica de una firma emisora de GEI que enfrenta metas cuantitativas de reducción de emisiones consiste en maximizar en *t=0*:

(1a) $$V(K,N,I,e)=\int_0^T [pF(K,N)+h(1-e)-wN-rK-\frac{ae2}{2}-p_I I]e^{-\rho t}dt$$

sujeta a:

(2a) $$\dot{K}=I(q)K$$

V(K,N,I,e) es el funcional objetivo que representa el valor presente de la función de beneficios. *K(t)* es la variable de estado que representa el stock de capital (sobre el cual la firma no tiene influencia en ningún momento del tiempo). *N, I* y *e* son las variables de control que representan las decisiones que la firma toma en cada instante en materia de insumos (incluida la mano de obra), inversión y mitigación de GEI, respectivamente. *ρ* es la tasa de descuento que se aplica a lo largo del tiempo y T es el momento terminal (en este caso, la vida esperada de la empresa).

En el momento t=0 la firma posee un stock de capital inicial igual a K_0 y, dado que no se exige que el capital al final del período cumpla con ningún requisito en particular, K(T) es libre.

Según la Teoría del Control Óptimo, este problema se resuelve por el principio del máximo, el cual involucra la construcción de un hamiltoniano:

(3a) H = $$[pF(K,N)+h(1-e)-wN-rK-\frac{ae2}{2}-p_I I]e^{-\rho t}+\mathrm{m}\,[I(q)K]$$

donde *m* es una variable auxiliar o de coestado semejante al multiplicador lagrangiano. Como tal, *m* informa sobre la sensibilidad de la solución a los cambios en la restricción midiendo el precio sombra de la variable de estado asociada (en este caso, K).

Dorfman (1969) muestra que $m = \frac{\partial V^*}{\partial K}$, siendo V* el valor máximo que puede tomar el funcional objetivo V. Por lo tanto, *m* representa la tasa a la cual el beneficio máximo cambia de un momento a otro en función de la cantidad de capital disponible en cada momento, es decir, la cantidad en la cual aumenta el valor máximo posible del beneficio de la firma como consecuencia de un aumento unitario en el stock de capital (en otras palabras, *m* representa el valor marginal del capital). *m* puede tomar diferentes valores en diferentes momentos del tiempo, por lo que, en realidad, su correcta notación es *m*(t).

El análisis de la función hamiltoniana (ecuación 3a) permite examinar las distintas vías a través de las cuales las variables *N, I, e* y *K* operan sobre el beneficio de la firma. El primer término -el que figura entre corchetes- describe la contribución directa de *N, I* y *e* al beneficio, mientras que el segundo término -el que aparece multiplicado por *m*- mide el cambio en el beneficio producido por el cambio en el stock de capital ($\dot{K}$) debido a la contribución indirecta de *I.* De esta manera, el hamiltoniano permite captar la contribución total al beneficio que resulta de la elección de *N, I* y *e* dados un cierto stock de capital y un cierto valor de su precio sombra.

Puesto que la función integrando en (3a) contiene un factor de descuento $e^{-\rho t}$, debemos armar un "hamiltoniano valor presente" igual a $H_{VP} = e^{\rho t}H$. Así:

(4a) $$H_{VP} = [pF(K,N) + h(1-e) - wN - rK - \frac{ae2}{2} - p_I I(q)] + \lambda[I(q)K]$$

donde $\lambda = me^{\rho t}$ es la nueva variable de coestado (todo lo explicado más arriba para *m* se aplica a λ).

La función hamiltoniana se maximiza siguiendo el principio del máximo de Pontryagin, el cual requiere maximizarla respecto de las variables de control *N, I* y *e* en cada momento del tiempo y armar dos ecuaciones diferenciales de primer orden en la variable de estado K y en la variable auxiliar λ. De esta forma, las condiciones del principio del máximo serán:

(5a) $$\frac{\partial H}{\partial N} = p\left(\frac{\partial F}{\partial N}\right) - w = 0 \Rightarrow \frac{\partial F}{\partial N} = \frac{w}{p}$$ (condición de productividad marginal)

(6a) $\frac{\partial H}{\partial I} = -p_I + \lambda K = 0 \Rightarrow \lambda K = p_I$ (condición de inversión cero)

(7a) $\frac{\partial H}{\partial e} = -ae - h = 0 \Rightarrow ae = -h$ (condición de reducción óptima de emisiones)

(8a) $-\frac{\partial H}{\partial K} + \rho\lambda = \dot{\lambda} = -p\frac{\partial F}{\partial K} + r + \rho\lambda$ (ecuación de movimiento de λ)

(9a) $\frac{\partial H}{\partial \lambda} = \dot{K} = I(q)K$ (ecuación de movimiento de K)

(10a) λ(T) = 0 (condición de transversalidad)

La explicación detrás de la interpretación de la ecuación (6a) es la siguiente. Hayashi (1982) y Summers (1981) muestran que el precio sombra del capital (λ) multiplicado por la cantidad de capital (K) es igual al valor de mercado de la firma (V*) (ver más abajo). Por lo tanto, dentro de la lógica de la teoría de Tobin, si el valor de mercado de una firma (para evaluarlo en términos marginales consideremos K=1) es igual al costo de reposición de sus bienes de capital (p_I) esto implica que el ratio *q* será igual a 1, por lo que no habrá incentivo a invertir.

La relación entre λ y el valor de mercado del capital es demostrada por los autores mencionados de la siguiente manera. Ellos parten de una función de producción X=F(N,K) y de una función de beneficios *V* simplificada que sólo contempla la decisión de la firma en materia de insumos variables, es decir:

(11a) $V = \int_0^{\infty} (pX - wN)e^{-\rho t}dt$

cuya condición necesaria de óptimo será:

(12a) $\frac{\partial V}{\partial N} = p\left(\frac{\partial X}{\partial N}\right) - w = 0 \Rightarrow \frac{\partial X}{\partial N} = \frac{w}{p}$

Bajo el supuesto de que *F* es homogénea, (12a) es equivalente a:

(13a) $f(k) - f'(k)k = \frac{w}{p}$

puesto que:

$$\frac{X}{\mathrm{N}} = F\left(1, \frac{K}{N}\right) = f(k) \qquad \text{siendo } k = \frac{K}{N} \quad \text{y} \quad \frac{\partial k}{\partial N} = -\frac{K}{N^2}$$

$$\Rightarrow X = f(k)N = F\left(\frac{K}{N}\right)N$$

$$\Rightarrow \frac{\partial X}{\partial N} = f`(k)\left(-\frac{K}{N^2}\right)N + f(k) = -f`(k)k + f(k)$$

Haciendo:

(14a) *r = f´(k)*

Tenemos que (11a) (maximizada) es igual a:

(15a) $V^* = \int_0^\infty prKe^{-\rho t}dt = \frac{prK}{\rho}$

puesto que de (13a):

$$w = p\left[f(k) - f'(k)k\right] = p\left[\frac{X}{N} - r\frac{K}{N}\right] \Rightarrow$$

En (11a):

(16a) $$V^* = \int_0^\infty (pX - wN)e^{-\rho t}dt = \int_0^\infty \left(pX - \underbrace{\left\{ p\left[\frac{X}{N} - r\frac{K}{N}\right]\right\}}_{w} N \right) e^{-\rho t}dt =$$

$$= \int_0^\infty (pX - p[X - rK])e^{-\rho t}dt = \int_0^\infty prKe^{-\rho t} = \frac{prK}{\rho}$$

V* es, entonces, el valor de mercado de la firma en el momento t cuando se sigue la trayectoria óptima de N.

El principio del máximo (ver Dorfman, 1969) implica que:

(17a) $\lambda = \frac{\partial V^*}{\partial K} = \frac{pr}{\rho} \Rightarrow r = \frac{\lambda \rho}{p}$

De (16a) tenemos que:

(18a) $r = \frac{V^* \rho}{pK}$

Por lo tanto, de (17a) y (18a):

(19a) $\lambda K = V^*$

De esta manera, el precio sombra del capital (λ) -el valor marginal de una unidad de capital- multiplicado por la cantidad de capital es igual al valor de mercado maximizado de la firma V* (asumiendo que la empresa maximiza *V* de manera tal que *V*=*V**).

Sobre esta base, y siguiendo a Hayashi (1982), definimos el ratio *q* de Tobin (recordemos que la *q* es un valor marginal) como:

(20a) $q = \frac{\lambda}{p_I}$ (valor de mercado -marginal- de la firma/precio de los bienes de inversión)

$\Rightarrow \lambda = q.p_I \Rightarrow \dot{\lambda} = \dot{q}\, p_I + q\, \dot{p}_I \Rightarrow$

(21a) $\dot{q} = \frac{\dot{\lambda}}{p_I} - q \frac{\dot{p}_I}{p_I}$

De (21a), (8a) y (20a) y definiendo $\hat{p}_I = \frac{\dot{p}_I}{p_I}$ tenemos que:

(22a) $\dot{q} = (\rho - \hat{p}_I)q + \frac{r}{p_I} - \frac{p}{p_I}\frac{\partial F}{\partial K}$

Las ecuaciones de movimiento del sistema en términos de *K* y *q* están dadas, entonces, por (2a) y (22a), que son, en definitiva, ecuaciones diferenciales de primer orden con coeficientes variables, homogénea en el caso de K y no homogénea y con término variable en el caso de $\dot{q}$:

(23a) $\dot{K} - I(q)K = 0$

(24a) $\dot{q} - (\rho - \hat{p}_I)q = \frac{r}{p_I} - \frac{p}{p_I}\frac{\partial F}{\partial K}$

Por lo tanto, las soluciones (trayectorias temporales de equilibrio) serán (ver Chiang, 1984; Cap. 14):

(25a) $K(t) = Ae^{I(q)t}$

(26a) $q(t) = e^{-\int(\rho - \hat{p}_I)dt}\left(A + \int\left(\frac{r}{p_I} - \frac{p}{p_I}\frac{\partial F}{\partial K}\right)e^{\int(\rho - \hat{p}_I)dt}dt\right)$

Imponiendo en (2a) y (22a) las condiciones $\dot{K} = 0$ y $\dot{q} = 0$ se hallan las propiedades de estado estacionario del sistema, que serán:

(27a) $q = 1$ (dentro de la lógica de la teoría de la *q* de Tobin, I = 0 cuando *q*=1)

(28a) $r = p\frac{\partial F}{\partial K} + \dot{p}_I - \rho.p_I$ (dado q=1)

Al representar estas ecuaciones en un diagrama de fases en *q* y *K* vemos, en primer lugar, que la curva de demarcación $\dot{K} = 0$ es una línea recta en q=1.

En lo que respecta a $\dot{q} = 0$, su inclinación puede determinarse por la regla de la

función implícita: $\left.\frac{dq}{dK}\right|_{\dot{q}=0} = -\frac{\partial \dot{q}}{\partial K} \Big/ \frac{\partial \dot{q}}{\partial q}$

29a) $\frac{\partial \dot{q}}{\partial q} = \rho - \hat{p}_I$

30a) $\frac{\partial \dot{q}}{\partial K} = -\frac{p}{p_I}\frac{\partial^2 F}{\partial K}$

Salvo eventos extraordinarios, podemos asumir que la tasa de crecimiento del precio de los bienes de inversión ($\hat{p}_I$) no será alta y puede, de hecho, suponerse que será menor a 0,03-0,15, un valor "normal" para la tasa de descuento (ρ). Por lo tanto:

31a) $\frac{\partial \dot{q}}{\partial q} > 0$

Por su parte, $\frac{p}{p_I} > 0$ será siempre no negativo debido a que se trata de un cociente de precios, mientras que $\frac{\partial^2 F}{\partial K} < 0$, pues la productividad marginal del capital es positiva pero decreciente. De esta manera:

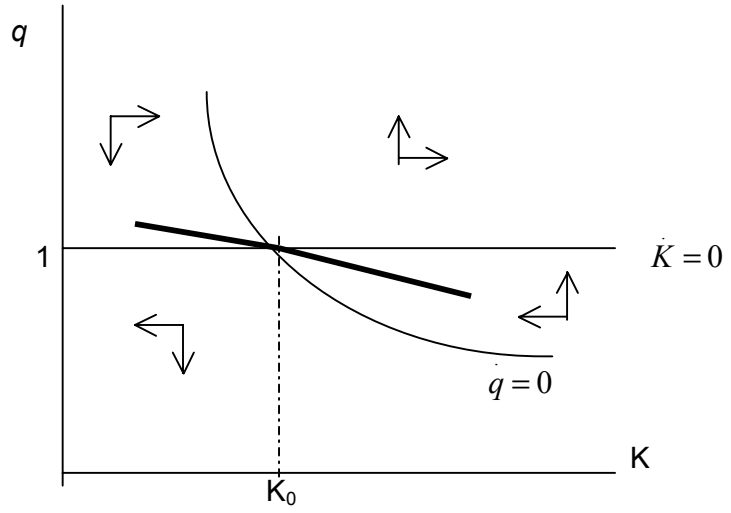
32a) $\frac{\partial \dot{q}}{\partial K} > 0$

y

33a) $\left.\frac{dq}{dK}\right|_{\dot{q}=0} = -\frac{\partial \dot{q}}{\partial K} \Big/ \frac{\partial \dot{q}}{\partial q} < 0$

Es decir, que $\dot{q} = 0$ tendrá pendiente negativa. De esta manera:

Figura A



En la figura A, las flechas indican la dirección de movimiento del sistema cuando el mismo no está en equilibrio.

En primer lugar, vemos que $\frac{\partial \dot{K}}{\partial K} = I(q)$ será mayor o menor que cero según *q* sea mayor o menor que 1, respectivamente. En este sentido, por encima de la recta $\dot{K}=0$, donde q>1, la inversión será positiva, por lo que K estará aumentando a lo largo del tiempo ($\dot{K}>0$). Esto es lo que indican las flechas horizontales que apuntan hacia la derecha por encima de la curva de demarcación $\dot{K}=0$. Por el contrario, K estará decreciendo por debajo de $\dot{K}=0$ ($\dot{K}<0$).

En segundo lugar, tenemos que $\frac{\partial \dot{q}}{\partial q} > 0$, lo que implica que cuando q aumenta (a la derecha de $\dot{q}=0$), $\dot{q}$ estará aumentando ($\dot{q}>0$) y viceversa.

Observamos que existe, entonces, un equilibrio de punto de silla con una trayectoria -representada por la línea más gruesa- a lo largo de la cual el sistema converge al estado estacionario.