



ESTUDIOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN AMÉRICA LATINA

# De los cambios cuadráticos a los cambios exponenciales

Relación entre estructura  
económica y sostenibilidad

Tommaso Ciarli  
María Savona



NACIONES UNIDAS

CEPAL





# De los cambios cuadráticos a los cambios exponenciales

## Relación entre estructura económica y sostenibilidad

Tommaso Ciarli  
María Savona



Este documento fue preparado por Tommaso Ciarli y María Savona, consultores de la Unidad de Cambio Climático, de la División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), en el marco de las actividades del Programa EUROCLIMA (CEC/14/001), con financiamiento de la Unión Europea.

Ni la Unión Europea ni ninguna persona que actúe en su nombre es responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en esta publicación. Los puntos de vista expresados en este estudio son de los autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista de la Unión Europea.

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de la Organización.

## Índice

Lista de Siglas .....	5
Resumen Ejecutivo.....	7
Introducción .....	11
Definiciones .....	15
I. Hechos empíricos estilizados relativos a los cambios estructurales y el desarrollo sostenible: evidencia, métodos y fuentes de datos .....	17
A. El origen: el desarrollo económico y la curva ambiental de Kuznets.....	19
B. Desglose de las tendencias de la intensidad energética: cambios sectoriales y tecnológicos.....	21
1. Métodos de descomposición: un breve inventario .....	21
2. Tendencias Empíricas .....	22
C. ¿La tercerización entraña la desmaterialización? Mitos y realidades .....	27
D. La relación entre el cambio estructural mundial y el comercio .....	30
E. Desarrollo sostenible, comercio y equidad .....	34
F. Transformaciones ecológicas y empleo: las repercusiones de la normativa ambiental en el mercado laboral .....	36
G. Resumen de la evidencia empírica .....	38
II. ¿De qué sirve modelar el cambio estructural cuando se estudia el desarrollo sostenible? .....	41
A. Seis facetas del cambio estructural y su relación con la sostenibilidad .....	42
1. Sectores .....	42
2. Organización industrial .....	43
3. Cambios tecnológicos .....	44
4. Cambios técnicos .....	46
5. Demanda .....	47
6. Instituciones.....	48
III. La sostenibilidad y el cambio estructural: un examen de los modelos económicos .....	49
A. Modelos de evaluación integrada (IAM) y modelos de equilibrio general computables (CGE).....	50
1. Modelos IAM.....	50
2. Modelos CGE .....	53

B.	Modelos SCM.....	57
C.	Modelos EMK.....	61
D.	Modelos EABM.....	64
1.	Modelos macro-micro.....	65
2.	Micromodelos de innovación.....	71
E.	Resumen: hacia un marco micro-macro que aborde los cambios estructurales.....	74
IV.	Un marco micro-macro que aborda los cambios estructurales.....	77
V.	La modelación de los cambios estructurales y la sostenibilidad: una advertencia.....	81
VI.	Políticas.....	83
A.	La utilización de modelos para la formulación de políticas sobre sostenibilidad y cambio estructural.....	83
B.	Evidencia empírica de la adopción de políticas en materia de sostenibilidad.....	85
1.	Instrumentos de mitigación y mecanismos de estímulo.....	85
2.	Normativas ambientales: el uso y abuso de la curva MAC.....	86
3.	Combinación de políticas públicas.....	87
C.	Implicaciones para las políticas de América Latina.....	88
VII.	Conclusiones.....	91
	Bibliografía.....	93
	Anexo Bibliografía utilizada en el capítulo I y para calcular la curva ambiental de Kuznets.....	103
Cuadros		
Cuadro 1	Aspectos del cambio estructural: cambios esenciales para la sostenibilidad ambiental.....	45
Cuadro 2	Los cambios estructurales según diferentes clases de modelos.....	56
Cuadro 3	La modelación de cambios estructurales específicos según diferentes clases de modelos.....	73
Gráficos		
Gráfico 1	Patrones de convergencia entre consumo energético e intensidad energética, 1992-2007.....	23
Gráfico 2	Países seleccionados: análisis de descomposición de índices de países con una acotada intensidad energética inicial y una ínfima reducción del consumo, 1995-2007.....	24
Gráfico 3	Países seleccionados: comparación del nivel de actividad y de eficiencia e intensidad energética, 1970-2010.....	25
Gráfico 4	América Latina y el Caribe: comparación del nivel de intensidad energética, 1970-2010.....	26
Gráfico 5	Países seleccionados: emisiones totales de GEI producidas por las exportaciones, por sector, 2008.....	32
Gráfico 6	Países seleccionados: empleo creado por las exportaciones, por sector, 2008.....	33
Diagramas		
Diagrama 1	Intercambio de emisiones por puestos de trabajo.....	34
Diagrama 2	Los mercados y los componentes económicos de los modelos de equilibrio general computables.....	54
Diagrama 3	Estructura básica de un modelo de equilibrio general computable.....	55
Diagrama 4	Dinámica fundamental de un macro modelo ecológico keynesiano.....	62

## Lista de Siglas

BEET	Balanza de Emisiones Producidas por el Comercio
CAK	Curva Ambiental de Kuznets
EABM	Modelo Evolutivo Multiagente
GEI	Gas de Efecto Invernadero
IDA	Análisis de Descomposición de Índices
LMDI	Método División de la Media Logarítmica
MAB	Beneficio Marginal de la Reducción
MAC	Costos Marginales de la Reducción
MFA	Análisis del Flujo de Materiales
Modelo CGE	Modelo Computado de Equilibrio General
Modelo DSGE	Modelo de Equilibrio General Dinámico Estocástico
Modelo EMK	Modelo de Macroeconomía Ecológica Keynesiana
Modelo IAM	Modelo de Evaluación Integrada
Modelo SCM	Modelo de Cambio Estructural
MRCI	Índice de la Tasa de Cambio Media
SDA	Análisis de Descomposición Estructural
UE-15	Unión Europea pre-2004
UE-27	Unión Europea pos-2004



## Resumen Ejecutivo

**Al estudiar la relación entre el cambio estructural y la sostenibilidad, se deben tener en cuenta diferentes aspectos interconectados inherentes al cambio estructural.**

La mayoría de los análisis empíricos del cambio estructural y la sostenibilidad abordan solo una de estas facetas a la vez. El cambio estructural ocurre en múltiples niveles de la economía e involucra numerosos factores como: cambios en los sectores, la organización industrial, los cambios tecnológicos, el empleo, la demanda y las instituciones. Debido a su interrelación, reviste crucial importancia examinar el nexo entre el cambio estructural y la sostenibilidad por medio de modelos que permitan endogenizar sus relaciones. De igual modo, los análisis empíricos deberían dar cuenta de la magnitud y la profundidad de los efectos que ciertos aspectos del cambio estructural ejercen sobre el medio ambiente.

**Uno de los principales hechos empíricos estilizados y publicados en la literatura especializada —la curva ambiental de Kuznets (CAK)— sobre la disociación entre el crecimiento económico, por un lado, y la intensidad de la energía y las emisiones, por otro, presentan una vasta heterogeneidad entre los países.**

En líneas generales, este desacoplamiento (entre el crecimiento y la intensidad energética) se produce desde hace cuatro décadas, aunque el promedio mundial oculta un elevado grado de heterogeneidad transfronteriza: la disociación entre estos factores solo tuvo lugar efectivamente en un acotado número de países. La tendencia descendente seguida por la intensidad energética en todo el mundo se puede atribuir al hecho de que algunos países con una intensidad menor crecieron en a mayor velocidad en vez de una caída efectiva global del ratio entre el consumo energético y el PIB. Existen incluso países donde se produjo un incremento de la intensidad energética, como en el caso de África y América Latina. Si se analizan las sustancias que contaminan el medio ambiente (como el dióxido de carbono) se observa que la mayoría de los países latinoamericanos exhiben una curva ambiental en forma de N. Por lo tanto, las pruebas parecen demostrar que en el caso de América Latina la curva ambiental resulta ser menos alentadora que las teorías que postulan la presencia de una curva de Kuznets tradicional.

**La evidencia relativa al comercio mundial y la intensidad de las emisiones y la energía tiende a corroborar la hipótesis del paraíso de la contaminación: el desplazamiento de la carga ambiental del Norte Global hacia el Sur.**

Pese a que las pruebas no revisten una unanimidad contundente, esta hipótesis resulta tener una validez general, aunque solo en el caso de algunos contaminantes y para ciertos períodos. El desplazamiento de la carga ambiental vinculada al comercio entre el norte y el sur, y las grandes diferencias entre las normativas ambientales apoyan la conjetura de que no se produjo a escala planetaria el efecto

descrito por la curva de Kuznets. Aún así, persiste una profunda incertidumbre: ¿los países en desarrollo seguirán las mismas curvas que exhibieron y exhiben los países desarrollados? Las naciones latinoamericanas corren el riesgo de convertirse tanto en exportadores netos de bienes intensivos en materiales, como en destino final de productos sucios.

**Las pruebas que corroboran la existencia de un vínculo entre la tercerización y la desmaterialización de las economías parecen resistir todo intento de refutación, pese al rendimiento relativamente mediocre logrado por el sector de los servicios en función de los cambios tecnológicos destinados a reducir la intensidad energética y las emisiones.**

En los países miembros de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE), los niveles generales de intensidad energética descendieron en los últimos 30 años gracias a un giro sectorial hacia los servicios, no obstante la falta generalizada de mejoras en materia de eficiencia energética en la mayoría de estos sectores. Por ende, existe un potencial desaprovechado, pues se podría lograr una reducción de la intensidad energética, que depende de la potencial convergencia por la que pudieran atravesar los servicios para garantizar una mejora intersectorial en la eficiencia energética.

**Es preciso advertir a los responsables de la formulación de las políticas del Sur Global para que estén al tanto de la mirada ecológica septentrional.**

Este punto de vista tiende a minimizar el desplazamiento ambiental del Norte al Sur, en un contexto donde se alienta a los países en desarrollo a esforzarse por alcanzar el desarrollo sostenible confiando solo en la absoluta ventaja competitiva que gozan en materia de recursos naturales. Las consecuencias a largo plazo de un juego sistemático en el que en el Sur se canjean empleos por emisiones probablemente acarrearán asimetrías persistentes y ensanchará el abismo entre el Norte y el Sur. Esta situación se desprende de la trampa de la especialización en la que podría caer el Sur, lo que conduciría al deterioro ambiental de las relaciones de intercambio postulado por la hipótesis de Prebisch.

**La normativa ambiental orientada a facilitar las transiciones hacia un mundo ecológico trae aparejados efectos beneficiosos para la demanda de calificaciones verdes.**

Si bien se limita a los Estados Unidos, la evidencia sugiere que las reglamentaciones ambientales en favor de una transición hacia este mundo verde resultan favorables tanto para la demanda de aptitudes ecológicas como para el giro hacia calificaciones de mayor dificultad para realizar tareas no rutinarias. En cambio, se puede inferir que la falta de apoyo a una transformación ecológica tal vez entrañe no solo una trampa de la especialización sino también una trampa de las calificaciones, que impedirá a los países actualizar las competencias de los trabajadores de su mercado laboral.

**La mayoría de los modelos de economía ambiental se basan en un conocimiento parcial del cambio estructural.**

El modelo de evaluación integrada (IAM) y el modelo computado de equilibrio general (CGE) permiten entender a fondo la relación entre la actividad económica y el impacto ambiental. Sin embargo, a causa de los supuestos restrictivos relacionados con las conductas representativas, una racionalidad absoluta y el restablecimiento del equilibrio del mercado, no logran dar cuenta de algunos de los aspectos más sobresalientes de los cambios estructurales y de su impacto ambiental. Así, en los casos en que se abordan estos cambios, se trata de mutaciones marginales en lugar de modificaciones de la estructura.

**La mayoría de los modelos que representan los cambios estructurales abordan sendas de desarrollo sin obstáculos o con un número acotado de modificaciones en su estructura, mientras que solo algunos toman en cuenta los cambios sectoriales o tecnológicos.**

La mayor parte de estos modelos se enfocan en la composición sectorial de las economías: algunos solo en un par de sectores —contaminantes y no contaminantes— y otros, en unos cuantos sectores, al estilo de los modelos de insumo-producto y de los CGE. Los trasposos de recursos o mano de obra entre distintos sectores se ven motivados por diferentes incentivos, por lo general relacionados con el costo de producción, o con el consumo de recursos cada vez más escasos o que ejercen externalidades negativas. No obstante, dado que un gran porcentaje de estos modelos también

presuponen un estado de equilibrio y conductas representativas típicas de diferentes sectores, son incapaces de dar cuenta de las transiciones ambientales y de los cambios tecnológicos drásticos. Solo un par de modelos radicalmente diferentes abordan otros aspectos del cambio estructural, como la organización industrial de la producción, los cambios en la estructura insumo-producto y el nacimiento de nuevos sectores intermedios.

**Los modelos macroeconómicos ecológicos integran aspectos relativos a la dinámica del empleo.**

Como corolario de un debate reciente entre macroeconomistas keynesianos, se sugirió adoptar modelos macroeconómicos que incluyan una dinámica ecológica para entender cabalmente las interacciones entre los resultados macroeconómicos y la sostenibilidad. Por consiguiente, los modelos macroeconómicos keynesianos tal vez proporcionen una alternativa alentadora que complementen a otros enfoques al dar cuenta de nuevas facetas del cambio estructural, en especial si hacen hincapié en la dinámica de la demanda y el empleo. Estos modelos también dan cuenta de los desequilibrios a corto plazo, lo que constituye un aspecto fundamental en estos cambios.

**Los modelos evolutivos de agentes múltiples son los que mejor permiten estudiar los diversos aspectos del cambio estructural.**

Los modelos evolutivos con agentes heterogéneos y no totalmente racionales, y con una dinámica que no está en perfecto equilibrio invalidan tres supuestos básicos de todas las demás clases de modelos y permiten analizar los cambios estructurales en función de los cambios en las poblaciones, el estado del sistema (no necesariamente en equilibrio), nuevas tecnologías y estructuras tecnológicas irreversibles. Los escasos macromodelos elaborados hasta el momento que incluyen algún componente ambiental explotan solo algunos aspectos de la heterogeneidad. La faceta más avanzada del cambio estructural es el cambio tecnológico en función de las actividades de investigación y desarrollo destinadas a obtener tecnologías más limpias; las innovaciones drásticas; los procesos aleatorios, agrupados y no lineales; y la incertidumbre inherente a la invención de nuevas tecnologías. También se modelan los aspectos del cambio estructural relacionados con la demanda en función de la distribución de los ingresos —como un resultado de las elecciones de los hogares y las empresas— y las preferencias de los consumidores. Algunos de los aspectos institucionales y microeconómicos del cambio estructural han sido sometidos a estudios más minuciosos basados en modelos y micromodelos que abordaban las innovaciones ambientales y las transiciones tecnológicas.

**Sin embargo, no existe un modelo perfecto, por lo que los encargados de formular las políticas públicas deben incorporar en su labor elementos de incertidumbre y una pluralidad de resultados.**

Un modelo constituye una abstracción de la realidad, una herramienta analítica. Si bien en este trabajo se propone un modelo que captura gran parte de la complejidad inherente a la interacción entre diferentes aspectos del cambio estructural, y entre estos cambios y la sostenibilidad ambiental, estas dinámicas son complejas e impredecibles. Se deben presentar al menos dos advertencias serias respecto de la utilización de modelos y el análisis de hipótesis. En primer lugar, los resultados de cualquier modelo dependerán de las hipótesis que se utilicen. Todos los modelos presentan puntos flacos, un abanico de parámetros indeterminados y diversas elecciones que ejercen una incidencia significativa sobre los resultados obtenidos. En segundo lugar, independientemente de la precisión y complejidad de los modelos, jamás se les debe utilizar para crear percepciones o expectativas de fiabilidad absoluta con el objeto de sugerir políticas perfectas para el futuro lejano. Los modelos se deben usar para llevar a cabo análisis a corto plazo, y con mucha cautela y reconociendo la incertidumbre inherente para simular hipótesis para un mañana muy distante. Incluso es menester utilizar los complejos modelos evolutivos, que incorporan elementos de incertidumbre y puntos de inflexión, para entender los cambios a corto plazo.

**Es preciso que se formulen conjuntos de políticas públicas que incluyan, en forma continua y oportuna, normas ambientales basadas tanto en los precios como en otros factores, y que apoyen la innovación ambiental, acompañadas de una estrategia creíble con la mirada puesta en un horizonte temporal lejano.**

Es posible que la legislación ambiental favorezca la adopción de innovaciones ambientales —y así mejore la competitividad empresarial y compense los costos iniciales en que se debe incurrir para cumplir con las disposiciones— en un contexto de avances tecnológicos dinámicos, una normativa orientada a reducir las emisiones y caracterizada por su seguridad jurídica y credibilidad, y un mercado competitivo que impulsa a las empresas a utilizar por los menos innovaciones que les permitan poner coto a los gastos. Se plantea que un conjunto prudente de políticas ambientales debería incluir instrumentos pertinentes, complementarios y congruentes, un nivel adecuado de diversidad tecnológica, una correcta selección de elementos de fijación de precios y plazos cuidadosamente establecidos. Las normas ambientales siempre tienen que complementarse con políticas específicas a fin de estimular la innovación ambiental y evitar así las repercusiones que contrarresten estas medidas, como la paradoja verde y los efectos rebote.

**¿Cuán útiles resultan las curvas de los costos marginales de la reducción (curvas MAC) para la formulación de políticas?**

Si bien resultan atractivas por su sencillez —a menudo excesiva—, las curvas MAC adolecen de varios defectos, incluida la falta de transparencia respecto de las hipótesis principales sobre la que descansa, la incapacidad de incorporar los cambios tecnológicos y la dinámica de los costos, en particular cuando los gastos proyectados son inciertos y muy lejanos en el tiempo, y la dificultad de abordar y evaluar los costos sociales o los beneficios secundarios.

**Es preciso llevar cabo mayores investigaciones a fin de garantizar la comparabilidad internacional de las hipótesis y los instrumentos de política desde el punto de vista empírico.**

En años recientes, la OCDE elaboró un índice que mide el nivel de rigurosidad ambiental de diversos instrumentos. Si bien necesariamente entrañan una simplificación de la multidimensionalidad de las políticas ambientales, estos indicadores permiten comparar los efectos de diferentes políticas como una función de su nivel de rigurosidad en contextos nacionales muy disímiles.

## Introducción

En este trabajo se analiza el nexo entre dos tipos de cambio: los estructurales y los climáticos. Dado que varios factores relacionados con ambos ejercen una influencia recíproca, en este estudio se aborda un número exponencial de relaciones. Desde el punto de vista empírico, estas relaciones se han estudiado tradicionalmente de a pares, por ejemplo, la forma en que repercute en la intensidad energética agregada el hecho de haber abandonado el sector manufacturero para dedicarse a los servicios. En la primera sección de este trabajo, se investiga y analiza de manera selectiva la evidencia empírica que arroja luz sobre varios de estos vínculos. Desde una mirada teórica, los modelos económicos elaborados por diferentes corrientes presentan variaciones sustanciales respecto de los cambios estructurales y climáticos que abordan con base a la forma en que fueron modelados. En la segunda sección se examinan y comparan estas diferencias.

Por medio de un análisis selectivo de la evidencia empírica, se justifica el por qué conviene encarar las complejas relaciones entre varios aspectos de los cambios estructurales y climáticos bajo un marco de modelación. Además, se analiza el abordaje de dichas relaciones en la bibliografía y, por último, se sugiere cómo con algunos modelos de sistemas complejos en evolución se puede abordar parte de esta diversidad.

El principal argumento de este trabajo plantea que para llegar a entender más a fondo el nexo entre el desarrollo económico y el crecimiento, por un lado, y la sostenibilidad, por el otro, se requieren modelos y evidencia empírica que capturen diversas facetas del cambio estructural así como sus interrelaciones (o coevolución). La mayoría de los componentes del cambio estructural traen aparejadas modificaciones a menudo impredecibles, tanto por las condiciones de la estabilidad a corto plazo como por la relación entre la actividad económica y el impacto ambiental. Además, los cambios ocurridos en la estructura de la economía son irreversibles, resultan costosos y presentan un patrón de dependencia condicionado por el pasado es decir, que determinan los cambios futuros. Resulta crucial identificar estas interacciones mediante un análisis en diferentes niveles para entender las consecuencias que ciertos cambios estructurales ejercen sobre el medio ambiente. Por ejemplo, si se presta atención únicamente a los cambios en la conformación sectorial de una economía, se pasa por alto el efecto que las conductas de los consumidores —como los ingresos, la distribución o las preferencias— pueden ejercer en dichos cambios y sus repercusiones en la organización industrial, el cambio tecnológico, el comercio o el transporte, entre otros factores. Algunos investigadores ya han esgrimido argumentos similares, pero no se ha analizado con minuciosidad la manera en que los cambios estructurales se abordan en los estudios empíricos o teóricos. Por ejemplo, van den Bergh y Gowdy (2000) plantearon hace tiempo la necesidad de contar con una teoría que vincule las distintas facetas de los cambios ocurridos en una sociedad como: las técnicas productivas,

los insumos primarios e intermedios, los patrones de consumo e inversión, y los avances tecnológicos. De manera similar, Ayres y van den Bergh (2005) sostienen que el crecimiento económico tiene que venir de la mano del cambio estructural, lo que entraña una constante creación de productos y el desarrollo de nuevas tecnologías productivas, así como cambios en el grado de eficiencia y de desmaterialización que de manera implícita, reclaman un análisis pormenorizado de estos aspectos.

En años más recientes, Sassi y otros (2010) también concluyeron que conviene modelar las complejas relaciones existentes entre la estructura de las economías y las transformaciones ambientales, basados en la idea de que el riesgo de un desarrollo no sostenible proviene en última instancia del efecto que en conjunto son ocasionados por factores tan diversos como el cambio climático, la energía, la seguridad alimentaria, la modificación de la cubierta terrestre o el dualismo social en las zonas urbanas y rurales. A su vez, estos factores dependen de la dinámica de consumo y de las tecnologías provenientes de sectores como la energía, el transporte, la construcción o la producción de alimentos, y de los riesgos provocados por la escasez de recursos primarios o por la transformación del medio ambiente. Por ende, el reto consiste en introducir un análisis sectorial en un marco económico común que tome en cuenta su interrelación, en un mundo donde las transiciones demográficas y económicas se suceden a un ritmo acelerado (pág. 6)<sup>1</sup>.

Si bien resulta interesante, en este trabajo no se aborda el debate surgido entre los defensores de la economía ecológica y la economía ambiental, ni el debate entre los economistas neoclásicos y no neoclásicos, a menos que atañen a las diferencias obtenidas en distintos estudios al analizar la relación entre los cambios estructurales y la sostenibilidad, así como los resultados de dichos análisis. En cambio, en este trabajo se examinan de manera selectiva los aportes empíricos y teóricos de quienes investigan el nexo entre la sostenibilidad y el desarrollo económico —o el crecimiento— que emana de los cambios estructurales. Como se verá en los próximos capítulos, el abordaje del cambio estructural adoptado en este trabajo —una combinación de distintos cambios no marginales que jamás ocurren en una situación de equilibrio— no coincide fácilmente con algunos de los supuestos básicos de la economía neoclásica ambiental ni con los macromodelos de otras corrientes. En un trabajo anterior, van Ruijven y otros (2008) analizaron sucintamente la medida en que los modelos energéticos mundiales dan cuenta de los cambios estructurales relevantes para los países en desarrollo. Tomando en consideración un número acotado de cambios estructurales relacionados, sobre todo, con la energía, que incluyen el uso de combustibles tradicionales, la electrificación, los cambios sectoriales (agregados), la distribución de los ingresos, la economía informal y el agotamiento de los recursos. En este trabajo, se utilizó un conjunto más amplio de cambios estructurales: se tomaron como referencia las investigaciones de Matsuyama (2008), y de Saviotti y Gaffard (2008), y luego se adoptó como base el modelo inicial elaborado por Ciarli y otros (2010). El centro de atención está puesto principalmente en los aspectos económicos, que repercuten en la sostenibilidad. También se compararon muchos más modelos que van Ruijven y otros (2008), y se abarcaron diversas familias de trabajos basados en modelos típicos de una variedad de corrientes, como los modelos de evaluación integrada (IAM), los modelos computados de equilibrio general (CGE), de innovación, de cambio estructural (SCM), poskeynesianos y de agentes múltiples. Al igual que en la obra de van Ruijven y otros (2008), este trabajo no tuvo como objeto una minuciosidad extrema: se abarcaron aspectos relativos al cambio estructural que se estiman relevantes tanto para el desarrollo económico como para la sostenibilidad ambiental, para lo cual se pasó revista a una muestra de modelos de cada clase.

Al examinar distintos modelos y cómo dan cuenta de aspectos críticos de la sostenibilidad en un trabajo previo, Köhler y otros (2006a) hallaron que los modelos disponibles no brindaban una explicación satisfactoria del cambio tecnológico, sobre todo en lo concerniente a la difusión de las tecnologías, la incertidumbre inherente a la innovación, un patrón de dependencia condicionado por el pasado, y la heterogeneidad de actores y tecnologías. En el presente trabajo se abordan estos aspectos, incluidos los

---

<sup>1</sup> Si bien los autores del presente trabajo valoran el deseo de alcanzar esa ambiciosa meta, creen que las herramientas utilizadas para elaborar el marco conceptual no permitieron a los investigadores estar a la altura de su objetivo, tal como se explica a continuación.

modelos más recientes que encararon las propiedades del cambio tecnológico puestas de relieve durante largos años en las investigaciones acerca de las economías de la innovación y los estudios sobre el tema.

En síntesis, en este trabajo se efectúan los siguientes aportes:

En primer lugar, se brinda una visión general donde se evalúa la evidencia empírica que da cuenta de las relaciones entre los cambios estructurales y la sostenibilidad. Tras presentar las controversias surgidas en torno de la macrorrelación entre el desarrollo económico y la sostenibilidad ambiental en la sección A, se examina la evidencia relativa a algunos aspectos del cambio estructural, a saber: los factores sectoriales y técnicos (sección B), la tercerización y la desmaterialización (sección C), el comercio internacional (sección D), la distribución internacional de los ingresos y la contaminación (sección E), y el empleo (sección F).

En segundo lugar, se plantean argumentos teóricos para justificar por qué diversos aspectos del cambio estructural guardan un vínculo estrecho con la sostenibilidad ambiental, para lo cual en el resumen se presentan seis factores diferentes desagregados en varios componentes y cambios. Dado que muchos de estos aspectos tienen una fuerte interrelación, se argumenta que deberían estar integrados en un único modelo a fin de garantizar una evaluación adecuada de los efectos que la actividad económica ejerce sobre la sostenibilidad.

En tercer lugar, en el capítulo I se examinan cinco familias de modelos económicos que abordaron el papel de la producción y el consumo en la sostenibilidad ambiental, y se abarcó la totalidad de los modelos tradicionales conocidos por los autores. En particular, se pasó revista a los modelos IAM, CGE, SCM, los modelos de macroeconomía ecológica que siguen la tradición keynesiana (modelos de macroeconomía ecológica poskeynesiana o EMK), y los modelos evolutivos multiagentes o de agentes múltiples (EABM). En el caso de cada categoría de modelo, se sometieron a un análisis los cambios estructurales que entrañan —cambios endógenos— y sus limitaciones.

Luego, sobre la base de estas conclusiones, se propone un marco teórico y los elementos que deberían comprenderse en los modelos de cambio estructural y de sostenibilidad, y se ofrecen ejemplos de modelos existentes. Este marco tiene sus raíces en las investigaciones de Ciarli y otros (2010). El capítulo III, dedicado a los ejercicios de modelización, se cierra con un breve análisis de las limitaciones que enfrenta el modelo propuesto.

A continuación, en el capítulo IV se pone el foco en las principales políticas públicas estudiadas en la literatura especializada, seguidas de las consecuencias para las políticas instrumentadas por los países de América Latina, en especial sobre la base de la evidencia empírica. Por último, se presentan las conclusiones.

Sin embargo, antes de atacar de lleno el objeto de este trabajo, en la sección de definiciones se delimitan los dos principales temas abordados: la sostenibilidad y el cambio estructural.



## Definiciones

### Sostenibilidad

No existe sólo una definición de este término, porque las existentes están asociadas a valores normativos; se basan en sistemas económicos, ambientales y sociales de amplitud relativa (Leach y otros, 2010b); y difieren con las de otras disciplinas, como la ecología, la economía ambiental, la agricultura y los estudios sobre el desarrollo (Scoones y otros, 2007). Resulta vital reconocer estas disimilitudes para alcanzar la sostenibilidad, pues ésta permite aumentar el pluralismo a la hora de determinar el valor de las políticas (Stirling, 2011). No obstante, como en este trabajo ya se abordaron varios enfoques metodológicos y múltiples definiciones del cambio estructural, se utilizará una amplia definición en aras de tener mayor flexibilidad.

Se adoptará la definición de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (1987), que se enmarca dentro de la dinámica del desarrollo: el desarrollo sostenible es aquel que satisface las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para atender las suyas.

O, si se toma en cuenta la igualdad y las oportunidades de desarrollo de quienes no han sacado provecho del medioambiente con la misma intensidad que los países industrializados, se puede utilizar la definición de Tester y otros (2005): una armonía dinámica entre la disponibilidad equitativa de bienes y servicios intensivos en energía y la preservación de la Tierra para las generaciones venideras.

Estas definiciones entrañan cierta tensión entre los sistemas económicos, sociales y ambientales, que pueden inspirar diferentes objetivos en distintos momentos, con metas que apuntan en sentidos dispares en lo atinente al uso de los recursos naturales (incluidos los ecosistemas), su distribución y la incorporación de las futuras generaciones en el balance de la sostenibilidad. Con el objeto de dar cuenta de las relaciones entre los diferentes sistemas, conviene recurrir a una definición amplia del cambio estructural que abarque distintos aspectos tanto económicos como sociales.

### Cambio estructural

La definición usual de cambio estructural se basa en la hipótesis de los tres sectores (Fisher, 1939): un cambio en el valor agregado o el traspaso de un empleo del sector agrícola al manufacturo y posteriormente al de los servicios. Desde la Revolución Industrial, la mayoría de las economías experimentan este cambio conforme atraviesan el proceso de desarrollo económico.

En la bibliografía sobre desarrollo económico se puede hallar una interpretación similar, que considera a la manufactura como una condición *sine qua non* —ya sea implícita o explícita— del

crecimiento económico (Ciarli y Di Maio, 2014). La referencia explícita a la industrialización se encuentra, por ejemplo, en el modelo del sector dual o modelo de Lewis (Lewis, 1954), en las primeras teorías del desarrollo (Chenery y otros, 1986; Hirschman, 1961; Rosenstein-Rodan, 1943) y en las teorías del crecimiento propugnadas por la escuela keynesiana (Kaldor, 1957).

Sin embargo, la reducción a una hipótesis de tres sectores quizá resulte simplista, pues oculta una serie de cambios en la estructura de la economía, fundamentales para entender el proceso de desarrollo económico y su sostenibilidad (en función de la definición presentada en la sección precedente). En primer lugar, tanto la industrialización como la tercerización (servitización) vienen de la mano de un proceso de urbanización (Harris y Todaro, 1970). En segundo lugar, desde hace mucho tiempo el desarrollo económico se asocia a la división del trabajo (Smith, 1958; Greif, 2006), el cual modifica la relación entre los sectores (coeficientes de insumo-producto) y las empresas, y altera la forma en que se organizan las compañías y la producción (Lazonick, 1979; von Tunzelmann, 1995). En tercer lugar, los cambios en los sectores y en la división del trabajo modifican los vínculos comerciales que entablan los países y las relaciones de intercambio, que representan otra dimensión significativa del desarrollo económico (Prebisch, 1949; Singer, 1950). En cuarto lugar, los cambios sectoriales e institucionales vienen acompañados de cambios técnicos marginales y radicales (Freeman, Clark y Soete, 1982; Mokyr, 2007; Rosenberg, 1974). En quinto lugar, resulta crucial que los bienes y servicios nuevos y menos costosos vengán acompañados por cambios en la composición de la demanda (Berg, 2002; Maddison, 2003), la estructura social y la distribución de los ingresos. En sexto lugar, cabe esperar que los cambios en la organización del proceso productivo, el comercio, las tecnologías, la demanda y la distribución de los ingresos se den junto con cambios en las instituciones (North, 2005; Chang, 2011; Bowles, 1998), la organización de las sociedades (McCloskey, 2009), los mercados de trabajo y las relaciones laborales (Lazonick, 1994), y el orden económico internacional (Galeano, 1980). Entre otros autores, Ciarli y otros (2010), y Ciarli (2012) demostraron que diversos aspectos del cambio estructural desempeñan funciones diferentes en el crecimiento económico. Resulta primordial tener en cuenta que algunos de estos aspectos preceden al crecimiento económico, mientras que otros lo siguen, y que diferentes factores interactúan de forma tal que resulta engañoso evaluar el papel de cada uno de ellos en forma aislada. En estos modelos, los autores adoptan dos definiciones igualmente amplias de cambio estructural. La primera (Matsuyama, 2008), habla de un cambio complementario en diversos aspectos de la economía, como la composición sectorial de los productos y la mano de obra, la organización de la industria y el sistema financiero, la distribución de los ingresos y la riqueza, los factores demográficos, las instituciones políticas e incluso, del sistema de valores de la sociedad.

La segunda (Saviotti y Gaffard, 2008, pág. 115), explica que se trata de un cambio en la estructura del sistema económico, es decir, un cambio en sus componentes y sus interacciones. Estos componentes comprenden ciertos bienes o servicios y otras actividades e instituciones, como las tecnologías, los diferentes tipos de conocimiento y la forma que adoptan las organizaciones, entre otros factores.

En este punto también se sugiere que, para entender la relación entre el desarrollo sostenible y el cambio estructural, es preciso tomar en cuenta una serie de aspectos conexos al cambio estructural y sus repercusiones en los aspectos complementarios de la sostenibilidad. En concordancia con Saviotti y Gaffard (2008), se plantea que no resulta significativo modelar un sistema en equilibrio cuando su composición está sujeta a un cambio permanente debido al surgimiento de entidades cualitativamente diferentes, como en el proceso de cambio estructural<sup>2</sup>. Así, sobre la base de los conocimientos obtenidos de la bibliografía y las relaciones entre los cambios estructurales y climáticos, en el capítulo II se proponen sucintamente los principales elementos de un modelo macro-micro adecuado para investigar los lazos entre el cambio estructural y el crecimiento sostenible.

---

<sup>2</sup> Según Ayres (2008), la simplificación adoptada en la mayoría de los modelos de crecimiento equilibrado equivale a aceptar el supuesto de que existe una vaca esférica.

# **I. Hechos empíricos estilizados relativos a los cambios estructurales y el desarrollo sostenible: evidencia, métodos y fuentes de datos**

Los hechos estilizados empíricos (Kaldor, 1966) representan un concepto fundamental que indica la presencia de regularidades empíricas que apuntan a una relación causal. El principal objetivo de ir en busca de hechos estilizados empíricos mediante un análisis selectivo de trabajos consiste en identificar los hallazgos recurrentes que permiten obtener evidencia generalizable. Al mismo tiempo, conviene delimitar ciertas áreas específicas donde distintos grados de ambigüedad sugieren que se requieren mayores investigaciones.

El principal centro de atención de la bibliografía empírica a la que se pasa revista en este trabajo apunta a los diversos aspectos del cambio estructural de las economías y cómo se ven afectados los patrones de sostenibilidad ambiental, sobre todo en lo concerniente al uso de la energía (por ejemplo, la eficiencia y la intensidad energéticas) y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) resultantes y, en menor medida, al cambio climático. Al identificar tanto la evidencia empírica recurrente como a los trabajos que cuentan con el menor nivel de aceptación general, se cumple un propósito: ofrecer una plataforma para los ejercicios de modelación y formular políticas orientadas a que en América Latina y el Caribe se logre un crecimiento compatible con la ecología (Rodrik, 2014).

Algunos de los aspectos del cambio estructural que se toman en consideración en este trabajo y que luego se analizan a la luz de la teoría en el capítulo II son los siguientes:

- i) sectores: cambios en la composición sectorial de las economías, sobre todo relativos a la tercerización y la industrialización progresiva;
- ii) organización industrial y las cadenas mundiales de valor;
- iii) mercado laboral: cambios en los puestos de trabajo y en las cualificaciones de los trabajadores como resultado de una reorientación hacia una economía verde;
- iv) demanda: cambios en los niveles de ingreso (PIB per cápita), los patrones de consumo y las preferencias, y

- v) cambios tecnológicos: a los fines de este trabajo, se refieren a los cambios en la matriz energética y al aumento de su eficiencia impulsada por el progreso tecnológico.

Estos cinco componentes están inevitablemente interrelacionados, aunque la mayor parte de la bibliografía de esta materia se haya concentrado en el primero y el cuarto en forma aislada.<sup>3</sup>

La bibliografía empírica abarca una serie de variables que resultan de interés al analizar el impacto ambiental causado por los cambios en los patrones de consumo y la producción. El elemento utilizado con mayor frecuencia es la intensidad energética, es decir, la relación entre el consumo de energía y el PIB, indicador que es inversamente proporcional a la eficiencia energética. En algunos casos también se toma en cuenta la calidad de la matriz energética, que es inversamente proporcional a la participación de los combustibles fósiles en la matriz de consumo. Otro indicador utilizado a menudo para medir la sostenibilidad ambiental es el nivel y el crecimiento de las emisiones de GEI producidas por la actividad antropogénica. En esta sección se aborda principalmente el primero de estos indicadores, salvo que se especifique lo contrario.

También se sistematizó la bibliografía relativa a varias investigaciones de gran magnitud, que comprenden los aportes efectuados tanto por economistas ambientales como ecológicos, a fin de incluir los siguientes factores:

- i) la relación entre el crecimiento económico y el desempeño ambiental de los países en función de las emisiones o la intensidad energética, también conocida como la curva ambiental de Kuznets (CAK);
- ii) la relación entre los cambios en la composición sectorial de las economías, las emisiones de GEI y la intensidad energética de los procesos productivos, con énfasis en la tercerización;
- iii) el efecto que la globalización de los cambios estructurales (incluidos los patrones comerciales) provoca en la distribución mundial de las emisiones y los cambios en la intensidad energética, con particular énfasis en la hipótesis del paraíso de la contaminación;
- iv) en relación con el punto anterior, se examinaron los aportes más recientes de expertos en ecología política y disciplinas afines, que analizan cuestiones de equidad ambiental asociadas al comercio mundial, y
- v) el efecto que la normativa ambiental ejerce en el mercado laboral, sobre todo en términos de la composición de la mano de obra y las calificaciones, factor que en la bibliografía pertinente, hasta la fecha, queda relativamente al margen de los estudios.

Así, en líneas generales, en este trabajo se busca contribuir al debate sobre el dilema del crecimiento (Jackson, 2009): eso es, si es insostenible, el decrecimiento puede causar inestabilidad, sobre todo en países donde las tasas de desempleo y la desigualdad de los ingresos resultan extremas. Como argumenta Piketty (2014), por ejemplo, el dilema del decrecimiento podría causar otras consecuencias indeseables en términos de desigualdad: es posible que una mayor proporción de los ingresos se encauce para incrementar el capital, lo que a su vez intensificará la desigualdad. El reto de la macroeconomía ecológica consiste en garantizar la estabilidad financiera, el pleno empleo y una distribución más equitativa de los ingresos dentro de las restricciones impuestas por los recursos disponibles (Jackson, 2009). Por consiguiente, el verdadero *quid* en cuestión es determinar si restringir el crecimiento constituye una solución viable, en general, y para América Latina y el Caribe, en particular. Si bien a esta interrogante primero se le dio una respuesta tradicional fundada en la microeconomía —impuestos ecológicos destinados a internalizar las externalidades e incentivar las inversiones verdes allí donde la crisis las tornó más difíciles de llevar adelante—, resulta también importante introducir una mirada macroeconómica a fin de desatar este nudo gordiano. Dicha perspectiva macroeconómica debe hacer hincapié, sobre todo, en la forma en que conviene orientar los cambios estructurales con el fin de garantizar un desarrollo sostenible.

---

<sup>3</sup> En el capítulo II se analizan estos factores con mayor minuciosidad.

## A. El origen: el desarrollo económico y la curva ambiental de Kuznets

Corrían los años cincuenta cuando nació el deseo de comenzar a determinar la tendencia de las emisiones de dióxido de carbono en función del crecimiento económico. Este objetivo se basó en las investigaciones llevadas a cabo con una perspectiva clásica por John Tyndall en 1859, quien fue el primero en describir cómo el calor se transmite por medio de los gases y, por ende, el origen del efecto invernadero (Hulme, 2009) (véase una reseña también en Stern, 2007 y 2008).

En una reciente y exhaustiva reseña histórica de la economía del cambio climático (Stern, Jotzo y Dobes, 2013), se postula que las primeras estimaciones de las emisiones antropogénicas que producen el cambio climático presentaban un sesgo por defecto, pues se basaban en pronósticos que subestimaban la disponibilidad de combustibles fósiles. Desde entonces, se vienen multiplicando los estudios empíricos acerca del vínculo entre el crecimiento económico y el cambio climático —que utilizan como variable indirecta el aumento de la intensidad energética y de las emisiones contaminantes, como el dióxido de carbono—, aunque la evidencia aún está teñida de diversos grados de incertidumbre.

La forma en que se evalúa cómo el crecimiento repercute en el cambio climático sigue despertando controversias por varios motivos, como la gran incertidumbre respecto de las consecuencias no económicas del cambio climático y la probabilidad de que ocurran daños catastróficos (Weitzman, 2011). Asimismo, en numerosos trabajos se han abordado los efectos económicos de la mitigación del cambio climático, aunque resultan bastante controvertidos, tal como se demuestra en las próximas secciones al analizar las curvas MAC, que representan el costo marginal en que se debe incurrir para reducir las emisiones. Por el contrario, resulta interesante que Stern, Jotzo y Dobes (2013) planteen que casi no se han realizado estudios sobre las preferencias de los consumidores con el objeto de determinar sus prioridades en materia de adaptación y su predisposición a costearlas como un indicador de los beneficios que se podrían obtener.

En la bibliografía, se han detectado dos temas de interés primordial. El primero es la relación causal entre el crecimiento del PIB y la tendencia de la intensidad energética (o emisiones de GEI) y su convergencia en distintos países. El segundo consiste en la descomposición de las fuentes de emisión y su transformación en factores, como el crecimiento demográfico, los ingresos y el consumo per cápita, la intensidad carbónica de la energía y la intensidad energética. Esta expresión matemática se conoce con el nombre de identidad de Kaya (Kaya y Yokobori, 1997) (véase un análisis de la identidad de Kaya, por ejemplo, en Raupach y otros, 2007). En este trabajo se hará hincapié en el primero de estos temas: la famosa curva ambiental de Kuznets.

Esta curva en forma de U invertida representa la relación observada en un país entre los niveles de PIB, los niveles y la tendencia de la intensidad energética, y las emisiones contaminantes. Uno de los primeros indicios de la existencia de esta función, que relaciona el crecimiento económico, la intensidad energética y las emisiones, se puede hallar en Nordhaus (1977), y desde entonces no dejan de multiplicarse los intentos por cuantificar las regularidades y las excepciones de esta interrelación. En años recientes, algunos investigadores llevaron a cabo estudios exhaustivos que abarcan diferentes períodos y países (Csereklyei, Rubio Varas y Stern, 2014; Dinda, 2004; Millimet, List y Stengos, 2003; Stern, 2004; Stern y Enflo, 2013). Pese a la riqueza de los aportes, persiste cierta heterogeneidad en la evidencia según la cual en los países se observa la relación postulada por la curva ambiental de Kuznets.

Uno de los análisis empíricos más amplios en cuanto al espectro temporal (1971-2010) y el número de países (99) es el que llevaron a cabo Csereklyei, Rubio Varas y Stern (2014). A continuación se presentan las principales conclusiones:

### *Desacoplamiento entre la tendencia del crecimiento y la intensidad energética*

En primer lugar, parece que en los últimos 40 años el mundo experimentó una disociación general entre el crecimiento y la intensidad energética: la intensidad sufrió una caída respecto del crecimiento de los ingresos, aunque con una elasticidad inferior a cero. No obstante, esta agregación mundial oculta un elevado nivel de heterogeneidad: al analizar en forma aislada la evidencia correspondiente a distintos

países, se observa que este desacoplamiento aparentemente ocurrió solo en pocas naciones desarrolladas (Csereklyei, Rubio Varas y Stern, 2014). Además, se mantuvo que a medida que aumentan los ingresos, también se incrementa el consumo energético en función del PIB. Por el contrario, los países donde se produjo un incremento de la intensidad energética se ubican en África y América Latina. Así, en Brasil, Chile, Colombia y México, según Altomonte y otros (2011), el aumento en la intensidad energética puede atribuirse al grado de especialización en recursos naturales y a una productividad caracterizada por una dinámica lenta. De este modo, en líneas generales, un desacoplamiento quizás esté ocultando un aumento del consumo energético en términos absolutos, por lo que podría resultar engañosa la evidencia según la cual supuestamente se han alcanzado las metas de disociación.

#### *Convergencia de la intensidad energética y la relación entre la energía y el capital*

En segundo lugar, durante los últimos 40 años se produjo una convergencia (agregada) incondicionada de la razón entre la intensidad energética y la relación entre energía y el capital. Los países con una baja intensidad energética inicial —en función del PIB per cápita— suelen experimentar un mayor incremento tanto de la intensidad energética como del ratio entre la energía y el capital. Asimismo, todas las pruebas de convergencia condicional e incondicional resultan en extremo significativas, lo que entraña que la intensidad energética y la razón entre la energía y el capital crecen en países con un acotado consumo energético. Al igual que otros investigadores, Stern, Jotzo y Dobes (2013) sostienen que en materia de intensidad energética la convergencia ocurrida en las últimas décadas no tuvo precedente: en los últimos 100 años la intensidad energética sufrió variaciones que con el paso del tiempo son más pronunciadas en cada nivel de ingresos.

#### *Participación en el gasto energético*

En tercer lugar, Csereklyei, Rubio Varas y Stern (2014) sostienen que la participación del costo de la energía en función del PIB disminuyó con el tiempo, aunque esta hipótesis solo se puso a prueba en un acotado número de países (Estados Unidos, Reino Unido y Suecia). Ello sugiere que el consumo efectivo por trabajador aumenta de la mano de los ingresos conforme transcurren los años, lo que a su vez reduce su participación en el costo de la energía.

Por último, los datos reunidos parecen ratificar la hipótesis de la escalera energética: la calidad de la matriz energética mejora a la par del crecimiento de los ingresos.

Algunas investigaciones que tuvieron como objeto de estudio ciertos países específicos, por ejemplo las naciones de América Latina y el Caribe, corroboran, pero solo parcialmente, la evidencia empírica mencionada en los párrafos precedentes (Russi y otros, 2008; Poudel, Paudel y Bhattacharai, 2009; Rubio y Folchi, 2012). Poudel, Paudel y Bhattacharai (2009) elaboraron especificaciones paramétricas y semiparamétricas a fin de demostrar la existencia de la curva ambiental de Kuznets en esta región durante el período 1980-2000 (aunque se limitaron a las emisiones de dióxido de carbono y entre las variables usuales utilizaron las zonas boscosas), al final se hallaron diferencias notables entre las naciones al tomar en cuenta la extensión de las tierras forestales.

Si bien los países con una elevada proporción de bosques y que además tienen menores ingresos, como Paraguay, Perú, Venezuela (República Bolivariana de), Bolivia (Estado Plurinacional de) y Brasil se encuentran en el segmento ascendente de la curva mientras que aquellos con una superficie boscosa media —Argentina, Chile, Ecuador, Colombia, Honduras y Nicaragua— suelen exhibir una curva en forma de N. Ello conlleva a que predomine una tendencia de N para toda la región. Por ende, parece que si solo se toman en consideración las emisiones de dióxido de carbono (para el caso de América Latina) la curva ambiental resulta ser menos alentadora que las teorías que preconizan la curva de Kuznets tradicional. Aparentemente hay un punto de inflexión al llegar a los 4.800 dólares per cápita: más allá de este umbral la intensidad de las emisiones de dióxido de carbono retoma su curso alcista. Sobre la base del análisis y el uso de las especificaciones semiparamétricas, este resultado demuestra ser muy sólido salvo en el caso de Brasil, Colombia y Perú.

Por consiguiente, en términos generales parece que la curva ambiental de Kuznets no constituye realmente un hecho estilizado o una regularidad empírica observada en todos los países. La heterogeneidad en cuanto al desacoplamiento entre el crecimiento y la intensidad energética guarda un estrecho vínculo con

la especialización del sector, lo que a su vez explica las diferentes tendencias de los ratios entre la energía y el capital. En el caso de los países que aún no han alcanzado el cénit de la curva o que de hecho presentan una curva en forma de N, el mayor riesgo que afrontan es la posibilidad de caer en la trampa de la especialización, que terminará aumentando su intensidad energética y el ratio entre la energía y el capital, pero no redundará en una mayor productividad (Altomonte y otros, 2011).

## B. Desglose de las tendencias de la intensidad energética: cambios sectoriales y tecnológicos

Los fundamentos analíticos (implícitos) de la curva ambiental de Kuznets descansan primordialmente en los cambios estructurales de las economías en diferentes niveles del PIB. El crecimiento económico se asocia con la desindustrialización progresiva de la economía, que tal vez entrañe cierto grado de desmaterialización orientada, en general, a acotar el consumo de energía y recursos naturales del sector productivo (véase el capítulo I, sección C). Sin embargo, los avances tecnológicos también podrían reducir la intensidad energética requerida por los sectores productivos si permiten disminuir el consumo, mejorar la matriz energética y desarrollar procesos más limpios. En la bibliografía empírica revizada no solo se ha probado la presencia de la curva ambiental de Kuznets en diferentes países y durante distintos períodos de tiempo ante la presencia o ausencia de intercambios comerciales, sino que también se han desglosado las fuentes del desacoplamiento entre el crecimiento de las emisiones y el PIB en función del cambio estructural en la composición sectorial de las economías y del cambio tecnológico.

La principal interrogante abordada por las investigaciones que en esta sección se procura dilucidar es el siguiente: ¿hasta qué punto la transición hacia sectores con niveles de intensidad energética superiores o inferiores al promedio, o el aumento o la disminución intrasectorial de la intensidad energética pueden justificar el incremento o la reducción de la intensidad energética requerida por el país A para llevar adelante sus procesos productivos durante un período determinado, que se inicia en el momento  $t$  y finaliza en el momento  $t+x$ ? En otras palabras: ¿en qué medida las cambiantes tendencias observadas en la intensidad energética y las emisiones son resultado de un efecto relacionado con el cambio estructural y el cambio tecnológico intrasectorial? Para hallar una respuesta, primero se presentarán brevemente diferentes métodos de descomposición y luego se analizarán las principales pruebas empíricas disponibles.

### 1. Métodos de descomposición: un breve inventario

Las dos familias de herramientas comúnmente utilizadas para desglosar las fuentes de eficiencia energética son aquellas originadas tanto por el cambio estructural como aquellas ocasionadas por el cambio tecnológico conocidas como: el análisis de descomposición de índices (IDA) y el análisis de descomposición estructural (SDA)<sup>4</sup>. Los trabajos de Hoekstra y van den Bergh (2003); Ang, Huang y Mu (2009); Ang, Mu y Zhou (2010); y posteriormente Su y Ang (2012) permiten llevar a cabo un análisis pormenorizado de las diversas técnicas de descomposición y sus propósitos<sup>5</sup>. Si bien el análisis de descomposición de índices sirve sobre todo para determinar el consumo energético y las fuentes de emisiones de sectores específicos (aunque su utilización está prácticamente restringida al ámbito de la investigación en cuestiones energéticas) el análisis de descomposición estructural permite realizar un desglose intersectorial y a menudo transfronterizo de la intensidad energética dentro de un marco de insumo-producto (véase el capítulo 1, sección B, apartado 2). Dada su relevancia para este trabajo, se hará hincapié en el uso y las sutilezas de las técnicas de análisis de descomposición estructural, tal como hicieron Su y Ang (2012). Mulder, de Groot y Pfeiffer (2014), al igual que Voigt y otros (2014), también efectuaron un análisis de los criterios que permiten escoger el método de descomposición más conveniente.

<sup>4</sup> El análisis de descomposición estructural (SDA) también se utiliza para desglosar las fuentes del crecimiento del empleo y la productividad.

<sup>5</sup> Véase también un trabajo más reciente de Hoekstra y van den Bergh (2006).

Básicamente, el análisis de descomposición estructural permite diferenciar los factores estructurales transectoriales —los cambios agregados que experimenta la intensidad energética de los países a raíz de mutaciones en su composición sectorial, donde se mantiene constante la intensidad energética— de los factores técnicos intrasectoriales —los cambios ocurridos en la intensidad energética de cada sector, a causa de los cuales permanece invariable la estructura de la economía—.

La primera vez que se puso en práctica el análisis de descomposición estructural, se recurrió a simples cuadros nacionales de insumo-producto y a un uso arbitrario de años base para los índices de Laspeyres y de Paasche. Además, el análisis incluyó elementos residuales de la descomposición que, según su magnitud, podían dificultar la interpretación de los resultados (véase Su y Ang, 2012). La naturaleza de los sucesivos perfeccionamientos de las técnicas de descomposición condujo al desarrollo de atributos significativos, como la independencia de la unidad de análisis y una descomposición exacta (es decir, sin elementos residuales). Así, el análisis de descomposición estructural más comúnmente utilizado en la actualidad es el método división de la media logarítmica (LMDI).

Habitualmente, los estudios sobre la descomposición de la energía —consumo y emisiones— que revisten interés para este trabajo, en su gran mayoría, utilizan técnicas de descomposición LMDI aditivas en lugar de multiplicativas, y escasos estudios aplican el índice de la tasa de cambio media (MRCI) o el método división paramétrica. Según Su y Ang (2012), los estudios recientes basados en estas técnicas se concentran cada vez más en China y el Japón, y en las emisiones en lugar del consumo energético. Algunos de los últimos trabajos también retoman el método DEL, propuesto por Dietzenbacher y Los (1998), que presuponen que no existe ninguna preferencia por una forma en particular (aditiva y no paramétrica) y abordan la falta de arbitrariedad en la secuencia de los factores de descomposición seleccionados<sup>6</sup>.

En general, se prefiere el LMDI, que se basa en la teoría de los números índice, por su relativa simpleza, tanto para computar los datos como para interpretar los resultados, pues utiliza valores negativos y nulos en las matrices y permite efectuar descomposiciones de gran exactitud. En la siguiente sección se pone de relieve la evidencia empírica basada en el análisis de descomposición estructural, principalmente las técnicas LMDI.

## 2. Tendencias Empíricas

Uno de los aportes más recientes y minuciosos a la bibliografía empírica, que hace uso de la técnica LMDI, es el efectuado por Voigt y otros (2014), quienes desglosaron las tendencias en materia de ahorro energético —los cambios en el consumo en función de los cambios en la producción bruta— y separaron las causas tecnológicas de las estructurales utilizando la base de datos World Input-Output Data (WIOD), compatibilizadas con las cuentas económicas y sociales. Esta base de datos proporciona información sobre el empleo, los salarios, las cualificaciones y el consumo energético bruto de 40 países de 1995 a 2007. El aspecto novedoso de este trabajo es que también toma en cuenta la heterogeneidad regional observada dentro de cada país.

Los autores aplican un método de descomposición de tres factores (LMDI-II) que integra:

- i) los cambios tecnológicos intrasectoriales que resultaron en una mayor eficiencia energética;
- ii) los cambios sectoriales, que a su vez se dividen en dos categorías:
  - nacionales (los observados en sectores del mercado interno que ahora tienden hacia una mayor o menor intensidad energética), y
  - transfronterizos (los cambios en la tendencia general seguida por las emisiones se atribuyen a la transición emprendida por los países hacia una mayor o menor intensidad energética), y
- iii) un efecto tecnológico global que toma en cuenta el aumento agregado general de la eficiencia energética en 34 sectores.

<sup>6</sup> Los resultados obtenidos no son independientes de la secuencia de los factores.

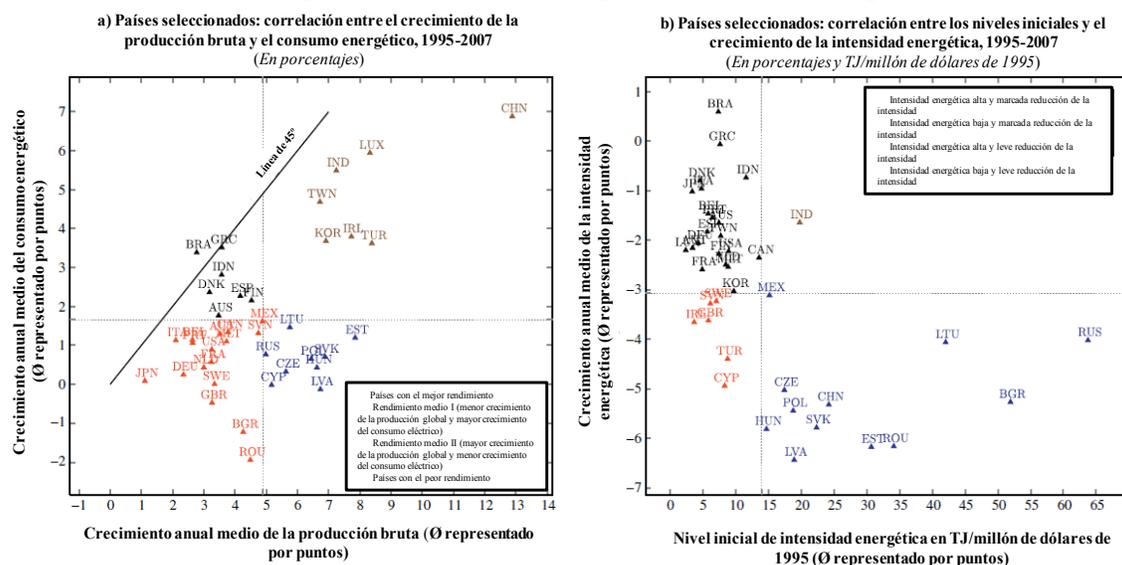
Al examinar la tendencia general experimentada por las diferentes fuentes de energía, Voigt y otros (2014) hallaron que el coque, el petróleo y los combustibles nucleares, a diferencia de la electricidad, representan los sectores menos heterogéneos en cuanto a la mejora de la intensidad energética de los países. Si en el caso del ahorro energético se analizan los cambios sectoriales ocurridos en el mundo, los sectores más eficientes resultan ser la maquinaria y los equipamientos eléctricos y ópticos. Cuando se pasa revista a los cambios ocurridos en cada país, se concluye que en la mayoría de las naciones objeto estudio se produjo un desacoplamiento entre el crecimiento bruto de la producción y el consumo energético —es decir, que el consumo aumentó a un ritmo más lento que la producción bruta e incluso, sufrió una merma en el Reino Unido—, mientras que en los países de Europa Oriental se observa un mejor desempeño, seguramente gracias a los cambios estructurales que terminaron dejando en el pasado las industrias intensivas en energía. En líneas generales, la heterogeneidad sectorial en función de los cambios ocurridos en materia de ahorro energético (los cambios tecnológicos intrasectoriales que redundan en una mayor eficiencia energética mencionados en el punto i) es más pronunciada que los cambios observados en sectores del mercado interno que tienden hacia una mayor o menor intensidad energética (véase el punto ii.a).

Resulta interesante que, al analizar los patrones de convergencia, Voigt y otros (2014) hayan detectado un fuerte nexo entre los niveles iniciales de intensidad energética y la reducción de la intensidad (véase el gráfico 1), por lo que la mayoría de los países que tenían bajos niveles de intensidad energética también presentaban una acotada merma de este parámetro (la mayoría de los países desarrollados, Brasil e Indonesia). De igual modo, las naciones con elevados niveles iniciales de intensidad energética experimentaron una marcada reducción durante el periodo que abarcó el estudio (los países de Europa Oriental y China). Pese a un giro estructural hacia los servicios, la India tuvo altos niveles iniciales y un desempeño particularmente mediocre en materia de reducción de la intensidad energética.

Por ende, la convergencia lograda por los países en el ámbito de la intensidad energética parece reflejar una tendencia general, que brinda apoyo a los hallazgos agregados en los que se hace hincapié en el capítulo I sección A. Sobre la base del análisis de descomposición estructural y pese a ser menos pronunciado que la heterogeneidad intersectorial, el papel específico del efecto transfronterizo al parecer reviste importancia: la tendencia global seguida por la intensidad energética se ve sumamente afectada por los cambios mundiales en materia de producción tendientes a lograr países con una mayor intensidad energética. No obstante este cambio mundial, la tendencia global que siguen las emisiones muestra una merma, que probablemente se vea impulsada por un efecto tecnológico positivo generalizado (intrasectorial).

Gráfico 1

Patrones de convergencia entre consumo energético e intensidad energética, 1992-2007

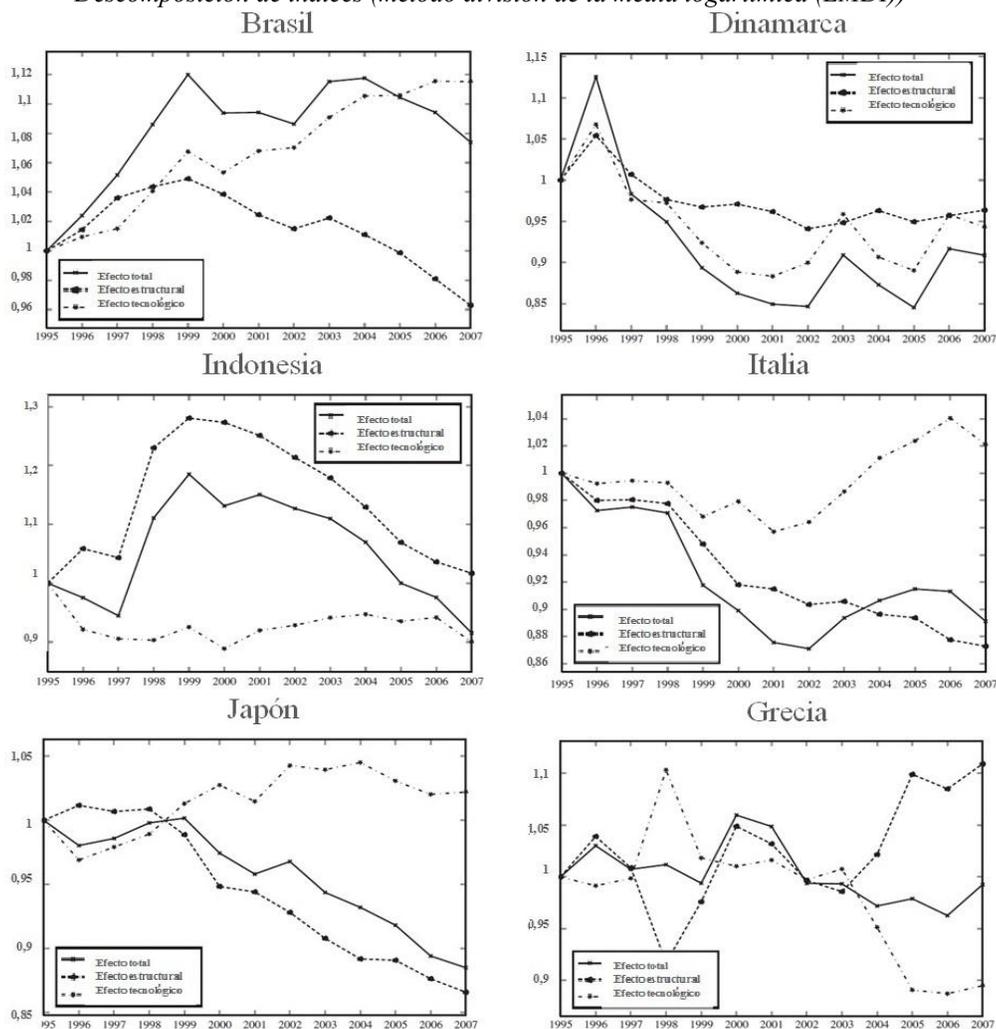


Fuente: S. Voigt y otros, “Energy intensity developments in 40 major economies: structural change or technology improvement?”, *Energy Economics*, vol. 41, Amsterdam, Elsevier, 2014.

En síntesis, si fuera necesario ordenar por nivel el papel de las distintas fuentes de las que emanaron los cambios en la intensidad energética a nivel mundial, los cambios intrasectoriales —la tecnología— desempeñaría el papel protagónico, que en comparación con la intensidad energética afectaron la heterogeneidad sectorial en mayor grado que los cambios estructurales tanto sectoriales como nacionales. En estos últimos, parece que el efecto transfronterizo prevaleció sobre el efecto nacional, por lo que el mayor protagonismo de países como China (respecto a su participación en la producción mundial) afectó las tendencias globales registradas por las emisiones más que los cambios estructurales nacionales.

En el gráfico 2 se presentan los países con el peor desempeño en materia de reducción de la intensidad energética, es decir, los que comenzaron con bajos niveles de intensidad y alcanzaron ínfimas tasas de reducción: Brasil, Dinamarca, Grecia, Indonesia, Italia y Japón. Entre ellos Brasil por ejemplo, tuvo un desempeño relativamente malo en función de los cambios tecnológicos, pese a que después del 2000 experimentó un cambio estructural para lograr sectores con un menor consumo que, sin embargo, no lograron bajar la intensidad energética y compensar el magro desempeño tecnológico.

**Gráfico 2**  
Países seleccionados: análisis de descomposición de índices de países con una acotada intensidad energética inicial y una ínfima reducción del consumo, 1995-2007<sup>a</sup>  
*Descomposición de índices (método división de la media logarítmica (LMDI))*



Fuente: S. Voigt y otros, "Energy intensity developments in 40 major economies: structural change or technology improvement?", Energy Economics, vol. 41, Amsterdam, Elsevier, 2014.

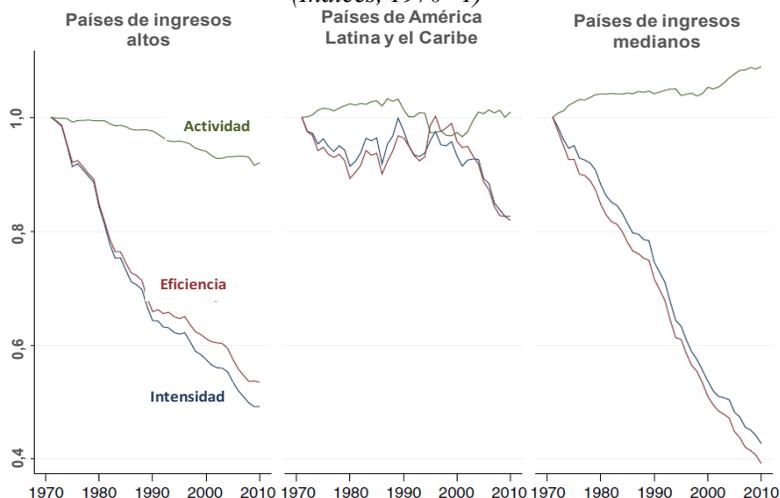
<sup>a</sup> Reducción inferior al 1% anual.

Por el contrario, los países que alcanzaron los mayores logros son Chipre, Eslovenia, Irlanda, el Reino Unido, la República de Corea, Suecia y Turquía. Cabe notar que ninguno de ellos presenta diferencias marcadas en cuanto al rol de la tecnología y el cambio estructural, factores que desempeñaron un papel muy beneficioso en la reducción de la intensidad energética agregada.

En la mayoría de los trabajos donde se adopta el análisis de descomposición estructural, los investigadores se centraron en un número más acotado de países o de categorías de emisiones, destacando que China fue objeto de estos estudios en muchos más casos que Estados Unidos. Mulder y de Groot (2012), y Mulder, de Groot y Pfeiffer (2014), por ejemplo, estudiaron 18 países miembros de la OCDE de 1970 a 2005, mientras que Kaivo-oja y otros (2014) se concentraron en China (véase Su y Ang, 2012; y Tian y otros, 2014), en Estados Unidos y la Unión Europea pos-2004. Por su parte, Poudel, Paudel y Bhattarai (2009); Russi y otros (2008); y Jiménez y Mercado (2014) centraron su atención en América Latina y el Caribe, mientras que Panayotou, Peterson y Sachs (2000) optaron por varios países en desarrollo. En las secciones siguientes se pone de relieve la evidencia empírica hallada en América Latina, que en general ratifica las conclusiones del análisis efectuado por Voigt y otros (2014) presentado con anterioridad.

En el caso de América Latina, la evidencia obtenida a partir del análisis de descomposición estructural suele ser menos abundante que en otras macrorregiones, por lo que los autores escogieron estudios que aportan resultados propicios para efectuar comparaciones.

**Gráfico 3**  
**Países seleccionados: comparación del nivel de actividad y de eficiencia e intensidad energética, 1970-2010**  
(Índices, 1970=1)



Fuente: R. Jiménez y J. Mercado, "Energy intensity, a decomposition and counterfactual exercise for Latin American countries", *Energy Economics*, vol. 42, Amsterdam, Elsevier, 2014.

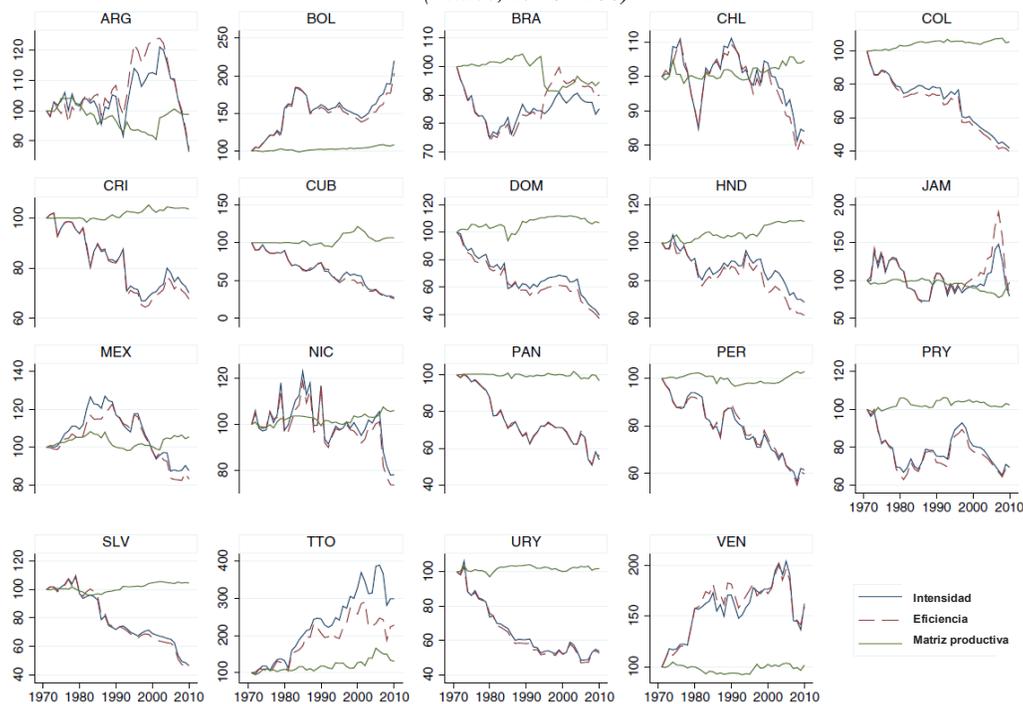
Como parte de un interesante ejercicio, Jiménez y Mercado (2014) ampliaron la metodología del análisis de descomposición estructural: tras haber desglosado las tendencias seguidas por la intensidad energética y tras haber separado los cambios estructurales de los tecnológicos, llevaron a cabo un análisis de regresión con el objeto de explorar los determinantes de los resultados de la descomposición. Luego aplicaron un método de control sintético para crear un grupo de referencia a fin de comparar los países y extraer conclusiones acerca del desempeño energético relativo observado en la región. El método de control sintético básicamente hace uso de las características típicas de los países latinoamericanos para lograr una combinación convexa de países no pertenecientes a América Latina pero con características similares (Jiménez y Mercado, 2014, pág. 164), que representa un conjunto de países contrafácticos respecto de América Latina. Tal como se ejemplifica en los gráficos 3 y 4, los autores compararon la descomposición de los factores que conforman la intensidad energética de América Latina y el Caribe con la de países de ingresos medianos y altos, y establecieron una diferencia entre estos tres elementos: intensidad (consumo), eficiencia (cambios tecnológicos) y tipo de actividad (cambio sectorial).

Hallaron que, por lo general, en los últimos 40 años la intensidad energética se contrajo en los 75 países estudiados, aunque con marcadas diferencias. Según la descomposición efectuada por Jiménez y Mercado (2014), la participación relativa de estos tres factores en la tendencia varía de manera rotunda.

En primer lugar, el cambio tecnológico suele ser responsable de la mayor parte de las mejoras en materia de eficiencia energética. En segundo lugar, si bien en los países de ingresos altos (habitualmente los miembros de la OCDE) los cambios sectoriales (actividad) contribuyeron a lograr el 10% de la merma de la intensidad, en América Latina representan el 8% del aumento del consumo (Jiménez y Mercado, 2014), casi seguro debido al grado de especialización de las industrias dedicadas a la extracción de recursos naturales. No obstante, esta tendencia reviste gran heterogeneidad en la región, hallazgo que está en sintonía, por ejemplo, con las conclusiones de Mulder y de Groot (2012), tal como se muestra en el gráfico 4.

En líneas generales, los resultados que arroja el método sintético de comparación parecen indicar que los países de América Latina y el Caribe tuvieron un desempeño levemente mediocre en materia de eficiencia energética hasta 2000, aunque experimentaron una mejora marcada en el último decenio, lo que está permitiendo a la región cerrar la brecha que aún permanece abierta.

**Gráfico 4**  
**América Latina y el Caribe: comparación del nivel de intensidad energética, 1970-2010<sup>a</sup>**  
(Índice, 1970=100)



Fuente: R. Jiménez y J. Mercado, "Energy intensity: a decomposition and counterfactual exercise for Latin American countries", *Energy Economics*, vol. 42, Amsterdam, Elsevier, 2014.

<sup>a</sup> ARG: Argentina; BOL: Bolivia (Est. Plur. de); BRA: Brasil; CHL: Chile; COL: Colombia; CRI: Costa Rica; CUB: Cuba; DOM: República Dominicana; HND: Honduras; JAM: Jamaica; MEX: México; NIC: Nicaragua; PAN: Panamá; PER: Perú; PRY: Paraguay; SLV: El Salvador; TTO: Trinidad y Tobago; URY: Uruguay; VEN: Venezuela (Rep. Bol. de).

Por lo tanto, estos resultados parecen indicar que la región tiene numerosas posibilidades de mejora, seguramente a partir de la tecnología, pero sin dejar de lado el componente estructural de los planes orientados a lograr una mayor eficiencia energética. En este sentido, tal vez convenga adoptar la mirada de los ecologistas políticos e industriales para aumentar el grado de conciencia sobre las posibles consecuencias de las políticas macroeconómicas que inciden sobre los cambios sectoriales.

Russi y otros (2008) analizaron el flujo de materiales durante el mismo período en un número más acotado de países latinoamericanos —Chile, Ecuador, México y Perú— con miras a evaluar el efecto de las reformas neoliberales en los países extractivos, según la definición de los ecologistas industriales.

Aunque difiere de las técnicas de descomposición estructural, el análisis del flujo de materiales (MFA) constituye una herramienta extra para determinar cómo repercuten los cambios estructurales —esta vez estimulados por el comercio— en la balanza comercial física<sup>7</sup>.

Este tipo de análisis permite determinar la balanza comercial física de los países —la diferencia entre las exportaciones y las importaciones como un equivalente material de los flujos de intercambio de bienes—. Russi y otros (2008) comienzan con la extracción nacional de materiales, es decir las materias primas que se extraen dentro del territorio de un país, a las que se añaden las importaciones para obtener los insumos materiales directos, que representan insumos materiales para la economía local, ya sean nacionales o importados, y que se utilizan en procesos productivos ulteriores. Sin embargo, al sustraer las exportaciones del consumo interno de materiales se obtiene la cantidad total de insumos que efectivamente permanecen dentro del país. Por consiguiente, la especialización del comercio de un país reviste importancia capital a la hora de calcular la balanza comercial física total.

Resulta crucial utilizar el MFA junto con las técnicas de descomposición estructural para determinar el nexo entre el crecimiento económico y la especialización estructural y comercial de países como los latinoamericanos, en cuyas economías los recursos naturales desempeñan un papel protagónico. Como es bien sabido, la globalización alteró radicalmente la posición relativa de los países en el mercado mundial, a raíz de lo cual el Sur Global aún afronta el enorme riesgo de caer en la trampa de la especialización. Según Russi y otros (2008), el creciente intercambio comercial no tuvo como resultado un menor consumo interno de materiales: de hecho aumentó por ejemplo, en la industria minera de Chile y el Perú, en el sector petrolero del Ecuador y en el ámbito de la construcción, en el caso de México. En el capítulo I, secciones D y E se analizan con mayor detenimiento las consecuencias de estos hallazgos y los aspectos relativos a las políticas y al ámbito político, respectivamente.

En obras publicadas en años más recientes, se procura determinar si las industrias basadas en los recursos naturales y los sectores manufactureros (que exhiben el mayor consumo energético) pueden emprender una transición con miras a ofrecer servicios o incluso, a incorporarse a las cadenas mundiales de valor (Hernandez, Martínez-Piva y Mulder, 2014; Gereffi y Fernandez-Stark, 2010). ¿Cómo incidiría este cambio sobre los procesos de desmaterialización y de reducción de la intensidad energética? En la próxima sección se pasa revista a las investigaciones que apuntan a responder esta pregunta.

### **C. ¿La tercerización entraña la desmaterialización? Mitos y realidades**

Uno de los orígenes prototípicos del cambio estructural es el paso de la agricultura a la industria y, luego, a los servicios. El proceso de externalización habitualmente tiene una asociación intuitiva con la desmaterialización de las economías. Sin embargo, en la actualidad hay escasa evidencia empírica que demuestre el verdadero efecto desmaterializador de la tercerización y, de acuerdo con las investigaciones publicadas, conviene adoptar una postura de escepticismo cauteloso. Así, en este trabajo se pasa revista a la evidencia disponible en un contexto reciente, donde los responsables de las políticas propugnan la reindustrialización de las economías<sup>8</sup>.

<sup>7</sup> En el capítulo I, sección D, se abordan específicamente los aspectos relacionados con el comercio y se analiza el efecto relativo que la liberalización comercial ejerce en los cambios estructurales específicos experimentados por varios países de América Latina y el Caribe.

<sup>8</sup> En años recientes la Comisión Europea abogó por la reindustrialización de la Unión Europea basada en el conocimiento (2013) a fin de superar la terrible recesión que afectó el mercado laboral de los países de la Unión en lo que parece una

En última instancia, ¿este plan está reñido con el entusiasmo por la potencial desmaterialización de las economías, la reducción de las emisiones mundiales y la disminución de la intensidad material de la producción inherente al proceso que entraña pasar de la manufactura al sector de los servicios? ¿Existe alguna evidencia empírica que corrobore el papel que juega la tercerización en la desmaterialización de las economías?

Kander (2005) llevó adelante uno de los primeros análisis empíricos que describen el vínculo entre la tercerización y la desmaterialización, estudio donde se concentró en lo ocurrido en la economía sueca a partir de 1970. Según la investigadora, el descenso de las emisiones de dióxido de carbono en Suecia se debió, sobre todo, a cambios en la matriz energética: el hecho de que la electricidad se generara a partir de biocombustibles, centrales hidroeléctricas o energía nuclear en lugar de combustibles fósiles, y la estabilización del nivel de consumo energético. En sus conclusiones, plantea que las modificaciones de la composición sectorial de la economía sueca tuvo un efecto despreciable en lo atinente a la reducción de las emisiones de dióxido de carbono. Kander (2005) fundamenta su postura sobre la base de un nuevo análisis del tradicional argumento esgrimido en la década de 1960 por Baumol (1967) —el mal de Baumol o la enfermedad de los costos en el sector de los servicios—, según el cual se sobrestima el aumento de la participación de los servicios en la economía cuando se lo analiza en términos reales en vez de nominales.

En una versión remozada de un trabajo originalmente publicado en 2005, Henriques y Kander (2010) retoman el mismo argumento, pero lo fundamentan mediante un análisis de descomposición estructural más minucioso. Tras haber aplicado el método Divisia de la media logarítmica (LMDI) a países desarrollados y en desarrollo, encontraron escasas pruebas de la existencia de una curva ambiental de Kuznets, sobre todo en naciones de industrialización tardía, conclusión que se condice con el análisis de la sección A. Para evaluar la incidencia de los cambios sectoriales sobre la intensidad energética, estimaron el cambio estructural de la composición sectorial en función del nivel de empleo y de precios constantes en lugar de corrientes. Según sus cálculos, el cambio sectorial real —sobre la base de precios constantes— gira en torno del 10% en vez del 30% que se obtiene al utilizar precios corrientes. Este efecto es mucho menos marcado que los usualmente postulados en la bibliografía empírica que comprende los cincuenta años analizados por estos investigadores en su estudio.

En consecuencia, los resultados de la descomposición mediante el método LMDI demuestran que en el proceso de reducción de la intensidad energética, el cambio sectorial desempeñó solo un papel secundario y, en particular, diminuto cuando se toma en cuenta el aumento en el sector de los servicios para el transporte. Por el contrario, hallaron que el efecto intrasectorial —el rol de los cambios tecnológicos en la reducción de las emisiones energéticas— tuvo repercusiones comparativamente más marcadas.

En el caso de los países en desarrollo, como el Brasil, la India y México, se detectó un patrón algo diferente y ciertos indicios de una curva de Kuznets. Según los resultados del análisis LMDI, estos países parecen exhibir saltos, pues alcanzan un pico a menores niveles de intensidad energética. Este hallazgo está en sintonía con los de Stern (2004), quien sostiene que la transferencia de tecnologías de ahorro energético, en lugar del reemplazo de los componentes de la producción, es la principal causa de que estos saltos se produzcan ante menores picos de intensidad energética.

En años recientes, Marin y Zoboli (2014) plantearon que el mal de Baumol —originalmente utilizado por Kander (2005), y por Henriques y Kander (2010) para comprobar el verdadero efecto de la tercerización de las economías en los niveles de emisión— es responsable en algunos países europeos del llamado mal de las emisiones. Tras analizar los efectos directos e indirectos que la tercerización ejerce en la tendencia de la intensidad de las emisiones de dióxido de carbono usando la

---

versión remozada de la antigua teoría del impulso fuerte. La estrategia orientada a lograr un renacimiento industrial de la Unión Europea (2013) requiere un incremento de la demanda de bienes manufactureros (inversiones, consumo final y exportación) que ronda el 50%. Esta política prevé un crecimiento asociado del PIB y el empleo en torno del 10%, y un aumento de las emisiones de dióxido de carbono cercano al 13%.

base de datos WIOD, Marin y Zoboli (2014) plantearon que los desencadenantes del mal de Baumol —el estancamiento de los avances tecnológicos y un lento crecimiento de la productividad en la mayoría de los servicios— se traduciría en un anquilosamiento similar del proceso de reducción de la intensidad energética, es decir, la productividad ambiental. Los investigadores corroboraron esta hipótesis tomando en cuenta la intensidad inicial y la dinámica de las emisiones directas de varios sectores agregados de manufacturas y servicios, así como la intensidad de las emisiones indirectas producidas por la demanda final tanto interna como internacional de los macrosectores analizados.

Curiosamente, observaron que en el caso de los servicios la intensidad de las emisiones directas es de hecho inferior a la de los macrosectores manufactureros, con excepción del transporte, aunque se detectó una tendencia muy heterogénea en los países europeos durante el período analizado. No obstante, estos investigadores sostienen que una lenta mejora de la eficiencia ambiental de los servicios víctimas del estancamiento, junto con un veloz crecimiento de su participación en la economía en términos reales (precios constantes) redundó en un aumento generalizado y más pausado de la eficiencia ambiental agregada. Este efecto es lo que los autores han dado en describir como el mal de las emisiones del crecimiento de los servicios. Asimismo, la evidencia relativa a la intensidad de las emisiones indirectas procedentes de la demanda final interna y externa parece indicar que la enfermedad ambiental del sector de los servicios refleja una mayor dependencia de las emisiones producidas allende las fronteras nacionales.

En sintonía con los resultados mencionados, Mulder, de Groot y Pfeiffer (2014) hallaron que, si bien se registró una caída de los niveles generales de intensidad energética durante 1980-2005 en 18 países de la OCDE, esta merma se debe en parte a un giro sectorial hacia los servicios, pese a que no aumentó la eficiencia energética de estos sectores (véase también Mulder y de Groot, 2012; y Florax, de Groot y Mulder, 2011). Por lo tanto, Mulder, de Groot y Pfeiffer (2014) sugieren que el rol que los cambios estructurales de los sectores desempeñan en el proceso de reducción general de la intensidad energética de hecho se puede atribuir al crecimiento de los servicios, aunque la verdadera magnitud de este efecto es menor de lo que suele aducirse, tal como señalan Kander (2005), y Henriques y Kander (2010).

En términos generales, en la bibliografía empírica se arguye que la disminución efectiva de la intensidad energética relacionada con la tercerización es menor que la que potencialmente podría lograrse si estos sectores hubieran garantizado un incremento intrasectorial de la eficiencia energética. Empero, cabe recalcar que los avances tecnológicos que podrían imprimir dinamismo a los servicios, en referencia al mal de Baumol (Baumol, 1967), tienen un vínculo insoslayable con un mayor uso de las tecnologías de la información y la comunicación, que, a su vez, hacen un uso extremadamente intensivo de la energía. La evidencia demuestra que en el sector de los servicios, la intensidad energética experimentó una merma modesta, mientras que su participación en el consumo se acrecentó en términos absolutos con el transcurso del tiempo. Un caso atípico de este patrón es el Japón, donde se expandió la participación de este sector tanto en el consumo como en la intensidad.

Mulder, de Groot y Pfeiffer (2014) realizaron un ejercicio interesante que podría resultar de utilidad repetir en los países de América Latina y el Caribe, y que sirve a la perfección para predecir el efecto de la tercerización asociada —o no— con una mayor eficiencia energética de los servicios. En particular simulan tres tipos de hipótesis con una muestra de nueve miembros de la OCDE. En primer lugar, observan que la tendencia de los niveles agregados de intensidad energética habría reflejado un aumento significativo si la participación del valor agregado del sector de los servicios no hubiera crecido desde 1980, lo que confirma que los efectos sectoriales ejercieron un papel para nada despreciable en el proceso de reducción de la intensidad. En segundo lugar, comparan diversas tendencias reales e hipotéticas de la intensidad energética en casos donde la eficiencia de los sectores analizados no registró mejora alguna. Así, la disminución hipotética de la intensidad energética en las economías occidentales en su conjunto no habría sido tan marcada como en el supuesto anterior, es decir, que el efecto intrasectorial resultó comparativamente más acotado que el efecto sectorial. Por último, los investigadores comparan la tendencia real e hipotética del aumento de la eficiencia energética en el sector de los servicios equivalente al incremento logrado en la industria manufacturera, y concluyen que la

disminución general de la intensidad habría sido más pronunciada que en la realidad. En términos generales, estas conclusiones confirman que el rol que un giro hacia los servicios juega en la reducción de la intensidad energética y de las emisiones, al menos en los países estudiados, de hecho se materializó, pero en menor medida de lo que podría haber sido posible si los cambios tecnológicos hubieran dado lugar a una mejora de la eficiencia energética de los servicios más marcada y de la misma magnitud que las ocurridas en algunas industrias manufactureras.

En suma, el número de estudios que específicamente abordan los efectos de la tercerización en las tendencias nacionales y mundiales de la intensidad energética y de las emisiones en comparación es menor que la bibliografía general examinada en las secciones precedentes. No obstante, se ha hecho especial hincapié en la desmaterialización de las economías como un determinante vital del aumento de la eficiencia energética que se debe lograr mediante la externalización. En cierta medida, los países desarrollados y miembros de la OCDE parecen haber alcanzado el tope máximo en lo concerniente a la transición real y nominal hacia los servicios, aunque es muy probable que reste mucho por hacer para instrumentar cambios tecnológicos que redunden en una mayor eficiencia energética en la totalidad de los servicios. Por el contrario, en el caso de las naciones en desarrollo y en transición, la posibilidad de aprovechar dicho giro sectorial aún plantea un reto y representa quizás una oportunidad y una fuente potencial de mayores beneficios en lo que respecta a la reducción del consumo y las emisiones.

Este constituye un tema de investigación en extremo prometedor, que serviría para fundamentar las políticas industriales en aras de un crecimiento ecológico; por ende, resulta crucial afinar las fuentes de datos que fecundarán este campo de investigación.

En cuanto a estas fuentes de datos, cabe notar que la reciente creación de la base WIOD, en conjunto con los datos sobre consumo bruto de energía, proporcionan cimientos empíricos de gran utilidad para realizar este tipo de análisis. Sin embargo, se podría lograr una mejora sustancial de la base de datos WIOD si se le otorgara una cobertura más extensa y desagregada en lugar de los 18 sectores y los 40 países que abarca en la actualidad, sobre todo naciones en desarrollo y en transición. Y de aun más importancia, sería imprescindible reunir cuadros de insumo-producto que incluyan una extensión ambiental (EEIO) para sectores suficientemente desagregados y una mayor variedad de países.

## **D. La relación entre el cambio estructural mundial y el comercio**

El intercambio comercial, las inversiones extranjeras directas y una creciente fragmentación internacional de la producción vinculada a las cadenas mundiales de valor exigen analizar con una mirada transfronteriza los conceptos de cambio estructural y desarrollo económico sostenible. En la bibliografía sobre medioambiente se ha abordado el efecto del comercio mediante la llamada hipótesis del paraíso de la contaminación. Si se lograra corroborar esta hipótesis por medio de estudios empíricos, se debilitaría en gran medida el argumento que plantea la existencia de una curva ambiental de Kuznets en el plano nacional, es decir que, incluso si un único país alcanzara cierto grado de desacoplamiento, no se traduciría necesariamente en una merma mundial de las emisiones, pues los países tal vez tengan posturas diferentes respecto de las medidas globales destinadas a mitigar el cambio climático.

¿Qué plantea la hipótesis del paraíso de la contaminación? ¿Hasta qué punto pueden el comercio internacional y los cambios estructurales en la producción mundial dar cuenta de su existencia?

Según esta hipótesis, las diferencias entre la normativa ambiental de distintos países, habitualmente entre países desarrollados y en desarrollo, podrían alentar a los países desarrollados a trasladar las instalaciones de industrias contaminantes a países en desarrollo y a aumentar la importación de productos sucios fabricados en estos. De este supuesto se deriva que las corrientes comerciales crearían patrones de especialización, donde los países en desarrollo obtienen una ventaja comparativa en la producción de bienes intensivos en dióxido de carbono. Los defensores de esta

hipótesis sostienen que en las naciones desarrolladas este proceso justifica en gran medida la relación entre el crecimiento y las emisiones contaminantes —representada mediante una función en forma de U invertida (véase la sección A)—, países que pueden darse el lujo de purificar su producción en el territorio nacional y de importar mercancías sucias procedentes de países en desarrollo. Una de las consecuencias más patentes de la hipótesis del paraíso de la contaminación radica en que no se observaría una tendencia hacia una curva de Kuznets a nivel mundial, sino solamente una redistribución de las emisiones entre el Norte y el Sur. La hipótesis atrajo numerosos aportes de diversa índole, tanto a favor como en contra (véase, por ejemplo, Cole, 2004; Panayotou, Peterson y Sachs, 2000; Kander y Lindmark, 2006; y Wiedmann, 2009).

¿Qué aducen los detractores? En primer lugar, según Cole (2004), las diferencias transfronterizas en la normativa ambiental no alcanzan para aumentar los costos en que se debe incurrir para cumplir con estas reglamentaciones, que tal vez resulten desmesurados en términos absolutos, pero despreciables como un porcentaje de los gastos totales de una empresa. En segundo lugar, estas diferencias en los costos no son suficientes para reubicar las instalaciones en países en desarrollo. Por último, otros costos desalientan esta reubicación, como los gastos que se deberán afrontar a causa de una infraestructura precaria, la corrupción, la inestabilidad institucional e, incluso, la pérdida de reputación que podrían padecer las multinacionales cuando el público en general y los medios las acusen de ofrecer puestos de trabajo a cambio de producir emisiones contaminantes (Arto y otros, 2014).

El escepticismo respecto de la hipótesis se basa en la interpretación de los distintos flujos de exportaciones netas: específicamente, la mayor exportación de bienes sucios elaborados en países en desarrollo bien podría derivarse de un aumento del consumo mundial de estos productos. De igual modo, una merma neta de las exportaciones de esta clase efectuadas por países desarrollados tal vez es la consecuencia de una menor participación nacional en el consumo de estos bienes y no se debe a que esta necesidad se satisface mediante importaciones de países en desarrollo. A propósito, el último argumento también justifica la presencia de la curva de Kuznets en el ámbito nacional: el crecimiento de los ingresos y el PIB se asocia a cambios en las preferencias de los consumidores, que pierden elasticidad en función de los precios y comienzan a inclinarse por productos más ecológicos, aunque más costosos.

Los investigadores han intentado confirmar la hipótesis del paraíso de la contaminación. Por ejemplo, Cole (2004) estimó una curva mediante una ecuación que tomaba en cuenta distintos tipos de emisiones contaminantes, los niveles de ingreso, los cambios sectoriales y el intercambio comercial entre países desarrollados y en desarrollo. Cuando se analizó la contaminación del aire y el agua, los resultados corroboraron un nexo con los ingresos, representado mediante una curva en forma de U invertida con un pico de unos 43.000 dólares en 1973. Los cambios sectoriales son en parte responsables de la disminución de las emisiones, pues la participación del sector manufacturero en el PIB tiene una correlación positiva con la calidad ambiental en ocho de los diez indicadores medidos en ese trabajo. En cuanto al comercio, la hipótesis queda demostrada a medias, solo en el caso de algunos contaminantes y durante algunos periodos, lo que refuerza la teoría de que una redistribución de las emisiones en sintonía con lo postulado por la hipótesis en parte es responsable de la curva en el ámbito nacional y que, por ende, no hay cabida para plantear la existencia de un efecto CAK. Así, se determinó que los picos que representan puntos de inflexión están por debajo del nivel de ingresos obtenidos cuando el efecto de la hipótesis se mantiene constante. Las emisiones que contaminan el aire, en particular, parecen tener una relación negativa con la participación de las importaciones muy contaminantes procedentes de países en desarrollo. En general, subsiste cierto grado de incertidumbre: ¿los países en desarrollo experimentarán los mismos patrones de curvas ambientales? Si la elasticidad en función de los ingresos no mengua en los sectores manufactureros que producen bienes sucios, esto significará que los cambios sectoriales efectuados por los países desarrollados en pos de sectores menos contaminantes meramente ocultan un efecto: un paraíso de la contaminación.

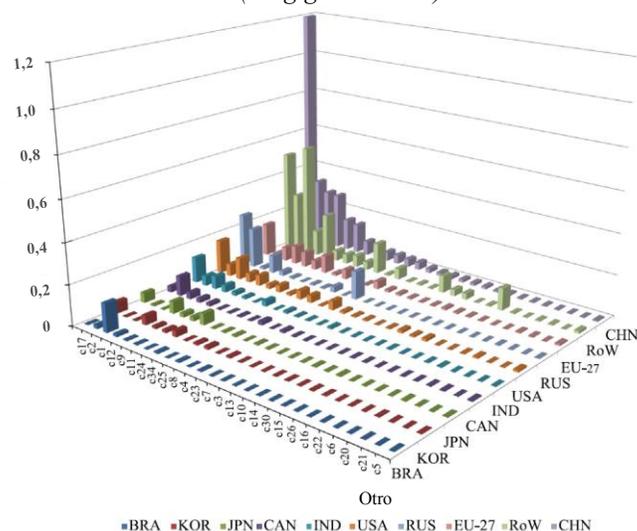
El debate acerca de la validez de esta hipótesis reviste particular importancia para las distintas facetas potenciales del desarrollo y el empleo que podría generar el crecimiento económico, situación que pondría en perspectiva lo que se considera una inquietud tardía de los países desarrollados. De hecho, una definición multifacética del concepto de desarrollo sostenible que incluya la sostenibilidad

ambiental, económica y social debería tomar en cuenta las diferentes preferencias de los países en cuanto al crecimiento del empleo y la sostenibilidad ambiental, por ejemplo. Algunos investigadores, tal como hicieron muy recientemente Arto y otros (2014), plantean que, al evaluar la validez de esta hipótesis y recomendar una política mundial factible para lidiar con el cambio climático, conviene descontar los efectos perjudiciales de la carga ambiental trasladada de los países desarrollados hacia el Sur Global con el aumento neto del empleo que los países en desarrollo pueden gozar gracias a un incremento de las exportaciones. En otras palabras, se podría decir que los países intercambian emisiones por puestos de trabajo.

Arto y otros (2014) realizaron un ejercicio para medir el nivel de empleo y emisiones en la economía mundial, basados en el supuesto de que algunos países en desarrollo tal vez deseen soportar los costos ambientales que acarrea una mayor exportación de productos de gran intensidad energética a cambio de obtener ganancias netas en el ámbito laboral.

Curiosamente, los autores utilizan datos multirregionales de insumo-producto sobre el empleo y las emisiones de los países en función de la balanza comercial. Plantean que el país A tendrá un excedente de emisiones si las emisiones resultantes de sus exportaciones son mayores que las producidas por su socio comercial (país B) para elaborar los bienes importados por A. De igual manera, un país presentará un excedente laboral en función de la balanza comercial si el empleo creado por las exportaciones supera la pérdida causada por las importaciones. Sobre la base de estas definiciones, concluyen que las naciones con un excedente neto de emisiones son las que obtuvieron los mayores beneficios en cuanto a la creación de empleo.

**Gráfico 5**  
Países seleccionados: emisiones totales de GEI producidas por las exportaciones, por sector, 2008<sup>a,b</sup>  
(En gigatoneladas)



Fuente: I. Arto y otros, "The game of trading jobs for emissions", *Energy Policy*, vol. 66, Amsterdam, Elsevier, 2014.

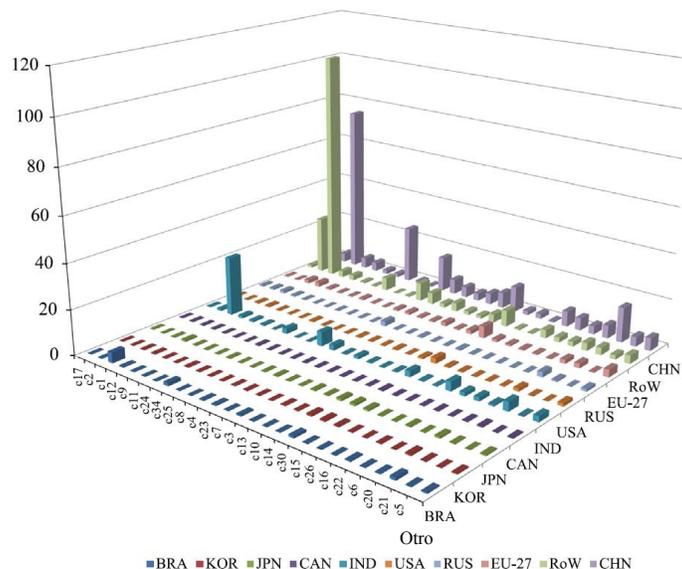
<sup>a</sup> Véase el anexo. c1: Agricultura, silvicultura y pesca; c2: Minería y canteras; c3: Alimentos, bebidas y tabaco; c4: Textiles; c5: Calzado de cuero; c6: Productos de madera; c7: Pulpa, papel, impresión y publicación; c8: Coque, petróleo refinado y combustible nuclear; c9: Productos químicos; c10: Goma y plásticos; c11: Otros minerales no metálicos; c12: Metales básicos y fabricados; c13: Maquinaria; c14: Equipos eléctricos y ópticos; c15: Equipos de transporte; c16: Otras manufacturas; c17: Suministro de electricidad, gas y agua; c20: Comercio mayorista; c21: Comercio minorista; c22: Hoteles y restaurantes; c23: Transporte terrestre; c24: Transporte marítimo y fluvial; c25: Transporte aéreo; c26: Otros servicios de transporte; c30: Alquiler de maquinaria y equipos y otras actividades comerciales; c34: Otros servicios.

<sup>b</sup> BRA: Brasil; KOR: República de Corea; JPN: Japón; CAN: Canadá; IND: India; USA: Estados Unidos; RUS: Federación de Rusia; UE-27: Unión Europea; RoW: Resto del mundo; CHN: China.

Los principales participantes en este intercambio de emisiones por puestos de trabajo son China, los Estados Unidos y la Unión Europea pos-2004<sup>9</sup>. En este contexto cabe notar que el debate centrado en la hipótesis del paraíso de la contaminación ahora se ve afectado por un cambio radical en la perspectiva acerca de la responsabilidad por las emisiones. Lo que en los albores nació como el principio de responsabilidad del productor devino en el principio de responsabilidad del consumidor, que supuestamente debe corregir el posible efecto dañino que el comercio trae aparejado para las emisiones (Peters, 2008; Wiedmann y otros, 2011), situación que termina originando implicaciones para las políticas relativas a la responsabilidad por las emisiones producidas por el comercio internacional.

A los fines del presente trabajo, reviste suma importancia para los responsables de las políticas públicas tener presente este canje de menores emisiones por un mayor empleo, que es específico de cada sector, como se explicó en la sección B. Por ejemplo, el suministro de agua, gas y electricidad son los sectores que generan la mayor cantidad de emisiones y menos propician el empleo, a diferencia de algunos sectores manufactureros, como los equipos eléctricos y ópticos, en cuyo caso una política pública orientada a reducir las emisiones mediante la restricción de las exportaciones provocaría una pérdida de puestos de trabajo comparativamente mayor (véanse los gráficos 5 y 6).

**Gráfico 6**  
**Países seleccionados: empleo creado por las exportaciones, por sector, 2008<sup>a, b</sup>**  
(En millones de puestos de trabajo)



Fuente: I. Arto y otros, "The game of trading jobs for emissions", *Energy Policy*, vol. 66, Amsterdam, Elsevier, 2014.

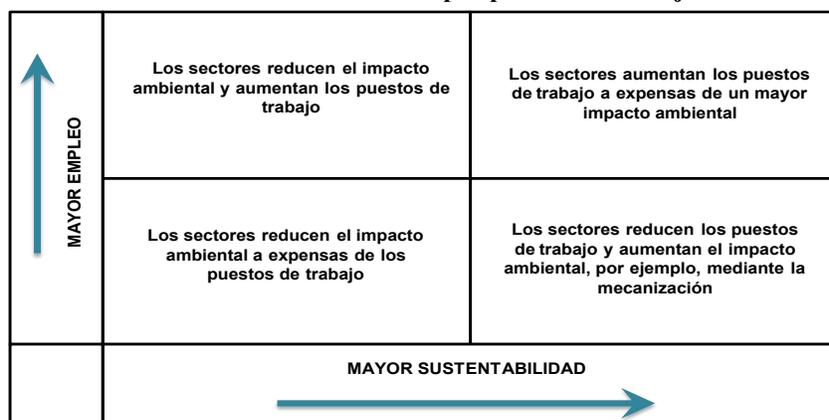
<sup>a</sup> Véase el anexo. c17: Suministro de electricidad, gas y agua; c2: Minería y canteras; c1: Agricultura, silvicultura y pesca; c12: Metales básicos y fabricados; c9: Productos químicos; c11: Otros minerales no metálicos; c24: Transporte marítimo y fluvial; c34: Otros servicios; c25: Transporte aéreo; c8: Coque, petróleo refinado y combustible nuclear; c4: Textiles; c23: Transporte terrestre; c7: Pulpa, papel, impresión y publicación; c3: Alimentos, bebidas y tabaco; c13: Maquinaria; c10: Goma y plásticos; c14: Equipos eléctricos y ópticos; c30: Alquiler de maquinaria y equipos y otras actividades comerciales; c15: Equipos de transporte; c26: Otros servicios de transporte; c16: Otras manufacturas; c22: Hoteles y restaurantes; c6: Productos de madera; c20: Comercio mayorista; c21: Comercio minorista; c5: Calzado de cuero.

<sup>b</sup> BRA: Brasil; KOR: República de Corea; JPN: Japón; CAN: Canadá; IND: India; USA: Estados Unidos; RUS: Federación de Rusia; UE-27: Unión Europea; RoW: Resto del mundo; CHN: China.

<sup>9</sup> Curiosamente, si bien China es uno de los principales exportadores de emisiones, cuyo índice de creación de empleo mediante el comercio internacional alcanza el 37,5%, y los Estados Unidos y la UE-27 representan los principales destinos de sus productos, esta última es el principal importador de las emisiones producidas.

Wiedmann y otros (2013) efectuaron otro aporte de relevancia a este debate sobre la hipótesis del paraíso de la contaminación (véanse también algunos aportes metodológicos anteriores en Wiedmann, 2009; y en Wiedmann y otros, 2011). En suma, estos autores creen que un análisis empírico más exhaustivo del intercambio de sostenibilidad ambiental por puestos de trabajo que ocurre a nivel sectorial en América Latina y el Caribe, como se ejemplifica en el diagrama 1, proporcionaría un claro indicio de los cambios sectoriales que podrían poner coto al impacto ambiental al tiempo que elevan el nivel de empleo.

**Diagrama 1**  
**Intercambio de emisiones por puestos de trabajo**



Fuente: Elaboración propia, sobre la base de H. Altomonte y otros, “La dinámica del consumo energético industrial en América Latina y sus implicancias para un desarrollo sostenible”, *Revista CEPAL*, N° 105 (LC/G.2508), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2011.

¿Cuáles son las consecuencias que esta hipótesis trae aparejadas para las políticas y la equidad? La respuesta a esta pregunta se presenta en la próxima sección.

## E. Desarrollo sostenible, comercio y equidad

En esta sección se examinan distintos puntos de vista acerca de algunas inquietudes que despiertan el comercio internacional y el desplazamiento de la carga ambiental de los países desarrollados hacia los países en desarrollo. Una de estas preocupaciones es la espiral a la que podría dar origen la hipótesis del paraíso de la contaminación y la consiguiente persistencia de conflictos relacionados con la distribución de la carga ecológica. Los economistas ambientales y ecológicos (Muradian y Martínez-Alier, 2001; Muradian, O’Connor y Martínez-Alier, 2002; Pérez-Rincón, 2006; Russi y otros, 2008; Muñoz, Strohmaier y Roca, 2011) así como los ecologistas políticos (Martínez-Alier, 1995; Martínez-Alier y otros, 2010) brindan distintas miradas sobre este tema. Algunas perspectivas despiertan particular interés para los objetivos de este trabajo: las políticas industriales nacionales destinadas a lograr cambios estructurales deben emprender la ardua tarea de garantizar cambios beneficiosos para el empleo que minimicen el incremento de las emisiones y de la intensidad energética, en un contexto mundial signado por una creciente desigualdad en la distribución de la carga ambiental gestada por la especialización del comercio.

Las disímiles opiniones de los economistas ambientales y ecologistas quedan de manifiesto cuando abordan el problema del comercio y el desplazamiento de la carga ambiental del Norte al Sur.

Muradian y Martínez-Alier (2001), y Muradian, O’Connor y Martínez-Alier (2002) resumen a la perfección estas posturas opuestas. Los economistas ambientales suelen considerar ilegítimo todo obstáculo comercial, incluso en el supuesto de diferencias internacionales en las normas ambientales, que constituye el origen de la hipótesis del paraíso de la contaminación. Es probable que todo

resultado derivado del libre comercio sea más favorable desde el punto de vista ambiental, de la misma forma que la alta tasa de crecimiento inherente al libre comercio a la larga mutará las preferencias ambientales de los consumidores, que comenzarán a optar por productos más limpios y también garantizarán la consecución de un mejor desempeño ambiental. Además, si bien los países pueden imponer normas más permisivas en sintonía con sus propias prioridades en materia de crecimiento o medioambiente, no resultarán sostenibles a largo plazo, puesto que las multinacionales probablemente no querrán trasladarse a países en desarrollo con un marco reglamentario menos riguroso, sobre todo si las instituciones y la infraestructura los tornan menos atractivos.

En cambio, los economistas ecológicos critican con mayor dureza los beneficios de un libre comercio irrestricto y rehúsan el credo que profesan los economistas ambientales: el libre comercio da origen naturalmente a mayores tasas de crecimiento (véanse, por ejemplo, Pérez-Rincón, 2006; Russi y otros, 2008; y Muñoz, Strohmaier y Roca, 2011). A propósito, el crecimiento económico es un indicador limitado del bienestar, puesto que pasa por alto las externalidades ambientales y el agotamiento del capital natural. Asimismo, no se debe dar por sentado que un mayor índice de crecimiento asegurará a la larga —y cabría preguntarse dentro de cuánto tiempo— una modificación de las preferencias ambientales de los consumidores de modo que opten por productos más ecológicos y, en general, pongan coto a la explotación del medioambiente. En el largo plazo resulta insostenible el lema que preconiza garantizar primero el crecimiento, aceptar el daño ambiental y luego subsanarlo. El primer motivo es que en su mayoría se desconocen las consecuencias futuras de la degradación ambiental, y los costos de la pérdida de biodiversidad son virtualmente infinitos. Por ende, no se pueden descontar. El segundo motivo es que la curva ambiental predice niveles de puntos de inflexión del PIB mucho más elevados que el PIB per cápita mundial medio. Si se confía en una relación entre los ingresos y las condiciones ambientales en forma de U invertida, se podría llegar a trascender el umbral ecológico —la irreversibilidad— antes de alcanzar el umbral económico.

Los economistas ecológicos ponen de relieve que la hipótesis más plausible originada en las diferencias en materia de reglamentación ambiental, lejos de resultar irrealista en el largo plazo, constituirá un punto de discusión entre los países desarrollados y en desarrollo, y los sistemas de internalización de los costos producirán una competencia desenfrenada sistemática. La Organización Mundial del Comercio (OMC) debería impedir el *dumping* ecológico de parte de los países del Sur y fomentar la estandarización de las normas ambientales de modo que la demanda de productos verdes procedentes del Norte también lleve a una modificación de los procesos productivos instrumentados en el Sur.

Curiosamente, Muradian y Martínez-Alier (2001), por ejemplo, sugieren zanjar las opiniones de los economistas ecológicos y las de investigadores del campo de la ecología política con el objeto de proponer un enfoque meridional para abordar el vínculo entre el comercio y el medioambiente. Algunos alegan que la mirada de los economistas ecológicos, resumida en las secciones precedentes, aún representa la postura septentrional, donde la principal preocupación que desvela al Norte Global es caer en la red del *dumping* ecológico tendida por el Sur, y donde la consecuente degradación sistemática del medioambiente es un efecto importado.

Según los autores del presente trabajo, este punto de vista despierta particular interés: es probable que una mirada ecológica septentrional pueda minimizar el desplazamiento de la carga ambiental real hacia el Sur en un contexto donde los países meridionales deben alcanzar el desarrollo sostenible por sí mismos, confiando en la absoluta ventaja comparativa que gozan en las industrias relacionadas con los recursos naturales u otras actividades especializadas con un uso intensivo del medioambiente, como la elaboración de productos primarios. El aumento de las importaciones de recursos naturales y productos primarios procedentes del Sur, en un intento por preservar las normas ambientales del Norte, probablemente abrirá una brecha amplia y persistente entre el Norte y el Sur, y tenderá una trampa de especialización al Sur. Por lo tanto, las políticas que en general fomentan la especialización en materia de recursos naturales y productos primarios, así como la exportación de estos bienes, podrían desembocar en el corto plazo en una mejora ficticia de las tasas de crecimiento de los países meridionales, pero a la larga tal vez acarreen un contexto más generalizado de asimetrías y desarrollo insostenible.

Por consiguiente, según Muradian y Martínez-Alier (2001), una política más meticulosa debería tomar en cuenta los diferentes centros de poder imperantes en el país, en un intento por adoptar un enfoque institucional de las cuestiones ambientales que procure corregir las asimetrías intrínsecas, sobre todo, en el comercio mundial de productos primarios y las actividades extractivas. Por ejemplo, resulta engañosa la idea de que los países en desarrollo quizá se beneficien si aumentan su grado de especialización en las etapas que siguen inmediatamente a la extracción de las materias primas: esta situación intensificaría el traslado de los costos ambientales hacia los países del Sur, lo que a su vez les impondría la carga de los costos resultantes tanto de la extracción como del procesamiento. Cada vez con mayor frecuencia, el mundo será testigo de un intercambio ecológico desigual y de una nueva ola de deterioro ambiental de las relaciones de intercambio, según lo postulado en la hipótesis de Prebisch (Pérez-Rincón, 2006; Russi y otros, 2008; Muñoz, Strohmaier y Roca, 2011).

Para corroborar este deterioro ambiental de las relaciones de intercambio, en la bibliografía sobre economía ecológica y ecología política se recurrió a las relaciones de intercambio ambiental (ETT) y la balanza de emisiones producidas por el comercio (BEET). Los aportes en este campo procuran presentar un contraargumento a la evidencia hallada por el Banco Mundial y fundada en lo que Muradian, O'Connor y Martínez-Alier (2002) denominan indicadores de una sostenibilidad débil, que miden el valor monetario del agotamiento del capital natural asociado con la importación de recursos naturales. En cambio, los indicadores de la sostenibilidad fuerte trascienden este valor monetario y apuntan a rastrear las huellas ecológicas que dejan las naciones, tomando en cuenta factores como el espacio ambiental, el análisis del flujo de materiales y la contaminación implícita en las corrientes comerciales, los que se evalúan en unidades de medida físicas (Wiedmann y otros, 2013).

Las relaciones de intercambio ambiental y la balanza de emisiones producidas por el comercio permiten cuantificar la dimensión del intercambio ecológico y la presencia del deterioro postulado por Prebisch: el país A es responsable del deterioro de las relaciones de intercambio ambientales del país B si la carga ambiental de los bienes que A importa de B sistemáticamente excede la de los productos que B compra a A. Si bajan las ETT, significa que A está trasladando la carga ambiental de su consumo hacia B, situación que se refleja en sus respectivas balanzas de emisiones. La persistente desigualdad de los intercambios ecológicos conlleva una creciente reubicación de las actividades con un uso intensivo del medioambiente en regiones periféricas o, en otras palabras, el hemisferio sur: con cuanta mayor frecuencia esta situación conduzca a la trampa de la especialización, más etérea será la voluntad política de impedirla (Martínez-Alier, 1995; Martínez-Alier y otros, 2010). Esta situación marcaría el final de la curva ambiental del país y el desacoplamiento entre el crecimiento económico y la degradación ambiental, donde con el transcurso del tiempo la contaminación inherente deviene sistemáticamente mayor a la reducción de las emisiones de GEI lograda en el ámbito local.

## **F. Transformaciones ecológicas y empleo: las repercusiones de la normativa ambiental en el mercado laboral**

Las organizaciones internacionales, como la OCDE, exhortan a la comunidad académica a abordar las consecuencias que traen aparejadas para el mercado laboral las políticas en materia de cambio climático (Martínez-Fernandez, Hinojosa y Miranda, 2010). En esta sección se analiza otro aspecto del cambio estructural: las modificaciones en la composición del empleo y el capital humano del mercado laboral como resultado de las transiciones hacia un mundo verde, según la definición laxa adoptada en este trabajo. Más en particular, se procura determinar si dichas transiciones demandan, y hasta qué punto, una composición radicalmente nueva de los puestos de trabajo y las calificaciones laborales, y qué requisitos exigen los empleos verdes en cuanto al nivel de educación y formación en comparación con los marrones.

Una premisa fundamental consiste en que el desempleo tecnológico y el sesgo de calificación inherente al cambio tecnológico no son elementos nuevos ni en la teoría económica (Galor y Moav, 2000) ni en los estudios sobre innovación (Vivarelli y Pianta, 2000). No obstante, tal como aducen Consoli y otros (2015), cuando los cambios tecnológicos están orientados a ecologizar la economía, el

desplazamiento del empleo resulta más oneroso e irreversible, pues las aptitudes no se transfieren con facilidad a diferentes contextos, lo que torna más preocupante el despido de trabajadores en ocupaciones marrones o con competencias no ecológicas. En algunos de los aportes más recientes a la bibliografía especializada se analizan distintas facetas de los cambios tecnológicos y estructurales del consumo, y sus efectos en las diversas competencias requeridas por el mercado laboral (véase, por ejemplo, Goos, Manning y Salomons, 2014; y Mazzolari y Ragusa, 2013).

Entre los pocos investigadores que han abordado de manera sistemática este problema desde el punto de vista empírico se encuentran Consoli y otros (2015), y Vona y otros (2015). En primer lugar, clasifican los empleos verdes en distintas categorías, a saber:

- i) puestos de trabajo en procesos de reverdecimiento;
- ii) ocupaciones dedicadas a la manufactura, y a los productos y servicios que contribuyen a la conservación del medioambiente, y
- iii) empleos en sectores con un gran número de empresas involucradas en la conservación ambiental<sup>10</sup>.

Consoli y otros (2015) explican que, para adoptar tecnologías verdes, se requieren cambios suplementarios en las prácticas institucionales vigentes a fin de adaptarlas a un nuevo sistema de producción de bienes más ecológicos que cumplan con la normativa ambiental. Esta exigencia podría dar como resultado la creación de nuevos puestos de trabajo, la reconversión de empleos marrones o, en el peor de los casos, la desaparición de empleos obsoletos. Los indicadores de competencias verdes se basan en la teoría estándar del capital humano, la teoría cognitiva sobre inteligencia artificial y la de adquisición de calificaciones basada en la ejecución de tareas (Autor, Levy y Murnante, 2003; y Consoli y otros, 2015).

Lo novedoso de este enfoque propuesto por Consoli y otros (2015), y Vona y otros (2015) radica en el análisis pormenorizado de las competencias verdes que forman parte de los requisitos ocupacionales de ciertos sectores. En lugar de efectuar un recuento impreciso de los empleos desplazados, los autores evalúan de manera exhaustiva cómo la normativa ambiental repercute en la adopción de nuevas prácticas institucionales y tecnologías más ecológicas. Tales cambios pueden inducir la creación de nuevas ocupaciones (nuevas calificaciones verdes y demanda verde) o la aparición de nuevas combinaciones de aptitudes y conocimientos (fortalecimiento de calificaciones verdes) en ocupaciones ya existentes (Consoli y otros, 2015).

De los estudios de Vona y otros (2015) se obtienen conclusiones interesantes relativas a los cambios estructurales del mercado laboral estadounidense: una reglamentación ambiental más rigurosa, traducida en la mayor reducción de emisiones lograda durante el período analizado (2002-2011), aumenta la demanda de calificaciones verdes así como su complejidad, porque los empleos verdes involucran tareas más laboriosas y no rutinarias, como la capacidad de gestión operativa. Curiosamente, algunos de los hallazgos brindan información útil sobre la polémica en torno a la existencia de la curva ambiental de Kuznets y la hipótesis del paraíso de la contaminación (véanse las secciones A y D) y el nexo con las calificaciones: el sector manufacturero de los Estados Unidos se viene encogiendo sin cesar desde hace dos décadas, también a causa de la fragmentación internacional de la producción y el comercio. En líneas más generales, se suele afirmar que los países del Norte Global están reubicando en el extranjero no solo los sectores con un gran consumo energético y una generación intensiva de emisiones, sino también los procesos intensivos en mano de obra poco o no calificada. En los países desarrollados, esto se traduce en un aumento generalizado de la calidad de los productos, en el caso del mercado de bienes, y de la mano de obra, en el caso del mercado laboral. Sin embargo, Vona y otros (2015) plantean que el cambio en la demanda de calificaciones debido al desplazamiento de los puestos de trabajo ocasionado por el marco reglamentario y el comercio solo da cuenta en parte del efecto positivo que la normativa ambiental en

<sup>10</sup> Los autores formulan una advertencia: podría darse una serie de falsos negativos —empleos verdes en compañías cuyos productos y servicios no son necesariamente ecológicos— o falsos positivos —empleos verdes contabilizados como tales porque se llevan a cabo en empresas que ofrecen productos y servicios tanto ecológicos como no ecológicos—.

general ejerce en la demanda de empleos verdes muy calificados. Según sostienen algunos, es en extremo probable que esta consecuencia beneficiosa se vea impulsada por cambios tecnológicos e institucionales, sobre todo en los sectores en crecimiento.

Por consiguiente, la fragmentación internacional de la producción puede resultar perjudicial para los países de destino por dos motivos que se alimentan mutuamente: la trampa de la especialización, tal como ya se analizó, y la trampa de las calificaciones. Sin embargo, los países en desarrollo pueden atenuar en parte los daños por medio de políticas educativas, industriales y ambientales. Por ejemplo, tal como sostienen Vona y otros (2015), si para alcanzar el objetivo de reducir las emisiones en un 50%, aumenta un 9,5% la demanda de científicos y un 4,5% la demanda de profesiones del campo de la ingeniería, la educación deviene un componente crucial de las políticas destinadas a promover un crecimiento económico sostenible. Una mayor oferta de estas aptitudes empujaría los salarios de ingenieros y científicos hacia abajo, lo que a su vez disminuiría el costo en que se debe incurrir para adoptar métodos ecológicos de producción y, por ende, las secuelas económicas perniciosas.

Estos hallazgos y las consecuencias relacionadas con las políticas revisten sumo interés para América Latina. Por lo tanto, las investigaciones deberían concentrarse en el análisis empírico de la interrelación entre estos cambios estructurales de los sectores, la tercerización, el grado de especialización del comercio y el empleo, pues constituyen tanto los determinantes como los efectos de las transformaciones ecológicas. Ello exige reunir datos en forma exhaustiva y sistemática, con una desagregación sectorial muy minuciosa, así como información acerca de las tareas ocupacionales llevadas a cabo como parte de las actividades de cada sector. Esta recomendación, entre otras, forma parte de las conclusiones del presente trabajo.

## G. Resumen de la evidencia empírica

En este extenso capítulo, se ha pasado revista en forma selectiva a los problemas metodológicos y los hallazgos empíricos más relevantes asociados con los efectos que el cambio estructural trae aparejados para un crecimiento sostenible desde el punto de vista ambiental. Así, afloraron diversos hechos estilizados empíricos que ponen en el centro del debate cuestiones esenciales, pero aún sin solución, que ameritan imperiosa atención tanto en el plano mundial como regional, sobre todo en el caso de América Latina.

Se han abordado variados aspectos del cambio estructural, a saber:

- i) sectores: cambios en la composición sectorial de las economías, sobre todo relativos a la tercerización y la industrialización progresivas;
- ii) organización industrial y las cadenas mundiales de valor;
- iii) mercado laboral: cambios en los puestos de trabajo y en las calificaciones de los trabajadores como resultado de una reorientación hacia una economía verde;
- iv) demanda: cambios en los niveles de ingreso (PIB per cápita), patrones de consumo y preferencias, y
- v) cambios tecnológicos: a los fines de este trabajo, se refieren a los cambios en la matriz energética y al aumento de la eficiencia energética a raíz del progreso tecnológico.

En la bibliografía empírica se utilizan diversas variables a la hora de evaluar el impacto ambiental de los cambios en la producción y el consumo. El factor utilizado con mayor frecuencia es la intensidad energética, es decir, la relación entre el consumo de energía y el PIB, indicador que es inversamente proporcional a la eficiencia energética. En algunos casos también se toma en cuenta la calidad de la matriz energética, que es inversamente proporcional a la participación de los combustibles fósiles en la matriz de consumo. Otro indicador habitualmente utilizado para medir la sostenibilidad ambiental es el nivel y el crecimiento de las emisiones de GEI producidas por la actividad antropogénica. En este capítulo se aborda principalmente el primero de estos indicadores, salvo que se especifique lo contrario.

En este trabajo se ha efectuado un examen selectivo, aunque sistemático, de los hechos estilizados empíricos relativos al cambio estructural y la sostenibilidad ambiental, según la definición presentada, sobre la base de cuatro grandes campos de investigación que comprenden aportes de distintas disciplinas, por ejemplo, la economía ecológica y ambiental, los estudios sobre innovación, el comercio y el desarrollo económico. Tales hechos estilizados son los siguientes:

- i) un análisis del origen y la evolución de la curva ambiental de Kuznets desde su concepción primigenia hasta los últimos estudios empíricos acerca de América Latina y el Caribe;
- ii) la relación entre los cambios en la composición sectorial de las economías y su repercusión en la intensidad energética y las emisiones provenientes de los sectores productivos, con especial énfasis en los procesos de tercerización;
- iii) el efecto que la globalización de los cambios estructurales y las modificaciones de los patrones comerciales ejerce en las emisiones producidas en el mundo, con especial énfasis en la hipótesis del paraíso de la contaminación;
- iv) se pasó revista a los aportes más recientes de investigadores en ecología política y disciplinas afines, que examinaron el nivel de equidad entre el Norte y el Sur en función del comercio mundial, y
- v) la incidencia de las normas ambientales sobre el mercado laboral, sobre todo en lo concerniente al empleo y la conformación de las calificaciones exigidas.

A continuación se resumen brevemente los hechos estilizados empíricos.

- i) Hechos relativos a la curva ambiental: los últimos 40 años fueron testigos de una disociación entre el crecimiento y la intensidad energética. No obstante, este promedio mundial encubre un elevado grado de heterogeneidad: este desacoplamiento parece haber ocurrido verdaderamente solo en unos pocos países. En la mayoría de los casos, la tendencia descendente seguida por la intensidad energética mundial se puede atribuir al hecho de que algunos países crecieron proporcionalmente a mayor velocidad, más que a una caída efectiva y generalizada del ratio entre el consumo energético y el PIB.

Conforme pasan los años, esta relación entre la energía y el capital se contrae en proporción más que la intensidad energética. Por el contrario, en los países donde subieron los niveles de intensidad energética también aumentó este ratio, como en el caso de África y América Latina.

La participación del gasto energético en el PIB viene reduciéndose, lo que indica también un aumento del consumo energético efectivo por trabajador remunerado, situación que a su vez arrastró hacia abajo la participación de dicho gasto.

Por último, la calidad de la matriz energética mejoró de la mano del crecimiento de los ingresos. Las pruebas relativas a América Latina presentan diferencias sustanciales entre los países según su grado de especialización en materia de recursos naturales y, en particular, la extensión de las zonas dedicadas a la silvicultura. Mientras que las naciones con una elevada proporción de tierras forestales y que en muchos casos tienen menores ingresos, como el Paraguay, el Perú, Venezuela (República Bolivariana de), Bolivia (Estado Plurinacional de) y el Brasil— se encuentran en el segmento ascendente de la curva, con excepción de esta última, aquellas con una superficie boscosa media —Argentina, Chile, Ecuador, Colombia, Honduras y Nicaragua— suelen exhibir una curva en forma de N. De este modo, se observa una tendencia a un comportamiento de N de toda la región. Por ende, parece que si solo se toman en consideración las emisiones contaminantes de dióxido de carbono, en el caso de América Latina la curva ambiental resulta ser menos alentadora que las teorías que preconizan la curva de Kuznets tradicional.

- ii) Hechos relativos al nexo entre el cambio estructural y la desmaterialización: ¿los cambios estructurales orientados a desarrollar el sector de los servicios entrañan la desmaterialización de las economías? Con la mirada puesta en los miembros de la OCDE, los investigadores

hallaron que durante los últimos 30 años los niveles generales de intensidad energética de 18 de estos países vienen en caída, en parte a causa de un cambio sectorial que apunta a los servicios. Sin embargo, la actual reducción de la intensidad energética parece ser marcadamente inferior a la meta que potencialmente podría haberse alcanzado si este sector hubiera mostrado un mejor desempeño en cuanto a la mejora de la eficiencia energética.

Por ende, hay por delante un camino por recorrer que aún puede emprenderse para reducir la intensidad energética, la cual depende del avance que todavía puedan lograr los servicios para asegurar una mejora intrasectorial de la eficiencia energética. Sin embargo, cabe tener presente que el progreso tecnológico que serviría para dinamizar estos servicios tiene un lazo ineludible con un uso más difundido de las tecnologías de la información y la comunicación, que, a su vez, hacen un uso extremadamente intensivo de la energía y podrían compensar los beneficios de los cambios estructurales instrumentados en aras de los servicios.

- iii) Hechos relativos a la hipótesis del paraíso de la contaminación: pese a que las pruebas no revisten una unanimidad contundente, la hipótesis resulta tener una validez general, aunque solo en el caso de algunos contaminantes y para ciertos períodos determinados.

El desplazamiento de la carga ambiental vinculada al comercio entre el Norte y el Sur, y las profundas diferencias entre las normativas ambientales apoyan la conjetura de que a escala planetaria no se produjo el efecto descrito por la curva de Kuznets. Así y todo, en líneas generales persiste una profunda incertidumbre: ¿los países en desarrollo seguirán los mismos patrones de curva que los países desarrollados? Si no falla la elasticidad en función de los ingresos del sector que manufactura productos no ecológicos, significará que los cambios sectoriales internos de los países desarrollados tendientes a lograr sectores menos contaminantes solo enmascaran un paraíso de la contaminación.

Los países latinoamericanos corren el riesgo de convertirse en exportadores netos de bienes intensivos en materiales y en el posible destino de la reubicación de productos sucios.

- iv) Hechos relativos al vínculo entre el comercio y la equidad ambiental: es menester advertir a los responsables de la formulación de políticas del Sur Global acerca de la mirada ecológica del Norte, que procura minimizar el verdadero desplazamiento ambiental de los países septentrionales a los meridionales, en un contexto donde se alienta al Sur a esforzarse por lograr el desarrollo sostenible confiando en la absoluta ventaja comparativa que gozan en las industrias relacionadas con los recursos naturales u otras actividades especializadas con un uso intensivo del medioambiente. Las consecuencias a largo plazo de un juego sistemático en virtud del cual en el Sur se intercambian puestos de trabajo por emisiones probablemente conducirán a asimetrías y brechas marcadas y persistentes entre el Norte y el Sur, y tenderá una trampa de especialización en la que podrá caer el Sur. Además, cabe tener en cuenta la hipótesis del deterioro de los términos de intercambio en función del medioambiente, postulada por Prebisch. Este se basa en indicadores de una sostenibilidad débil en lugar de fuerte, que descuentan el agotamiento del capital natural al que podría llevar a la larga la trampa de la especialización.
- v) Hechos relativos a la incidencia de la normativa ambiental sobre el mercado laboral: si bien hasta ahora estuvo limitada a los Estados Unidos, la evidencia empírica del efecto de las reglamentaciones ambientales en el mercado laboral muestra que las políticas en favor de una transición hacia un mundo verde (en forma de normas ambientales) resultan beneficiosas tanto para la demanda de aptitudes ecológicas como para la transición hacia calificaciones de mayor complejidad requeridas para realizar tareas no rutinarias. En cambio, se puede inferir que la falta de apoyo a una transformación ecológica tal vez entrañe no solo una trampa de la especialización sino también una trampa de las calificaciones, que condenará a los países a un mercado laboral signado por competencias desfavorables.

## II. ¿De qué sirve modelar el cambio estructural cuando se estudia el desarrollo sostenible?

¿Por qué conviene considerar distintos aspectos del cambio estructural a la hora de estudiar las condiciones que permiten lograr un desarrollo sostenible?

En primer lugar, el crecimiento económico (inversión y consumo) depende de varios aspectos del cambio estructural, como la división del trabajo, el cambio tecnológico o una mayor demanda. En segundo lugar, tal como se explicó en el capítulo precedente, los cambios estructurales inciden sobre el efecto que estas actividades económicas (producción y consumo) ejercen y ejercerán en el medioambiente. Determinar el alcance de esta influencia no es una tarea sencilla, a causa de la irreversibilidad de estos cambios, las distintas secuelas que las actividades económicas pueden infligir en el medioambiente y los cambios tecnológicos que exhiben un patrón de dependencia condicionado por el pasado. En tercer lugar, las inestabilidades ecológicas y las alteraciones ambientales repercuten en los cambios estructurales. Si bien no se abordan a fondo en este estudio por falta de espacio, pues requerirían una investigación por separado, los cambios estructurales originados por las mutaciones ecológicas revisten importancia capital cuando se debaten políticas y los costos presentes a fin de acotar el impacto ambiental de las actividades económicas. Sería difícil imaginar que la potencial destrucción de capital e infraestructura en gran escala, las migraciones masivas y los conflictos, por ejemplo, brinden contextos propicios para una producción estable caracterizada por un crecimiento exógeno (Stern, 2013, pág. 849).

Por ende, resulta crucial estudiar cómo diferentes facetas del cambio estructural se vinculan con distintos aspectos de la sostenibilidad ambiental, y cómo estos nexos cambian con el tiempo a medida que avanzan el crecimiento económico y el desarrollo.

Si se toman en cuenta los países de América Latina, en la actualidad las emisiones se concentran en el sector agrícola y del cambio de uso de suelo y la energía y menos en la industria en comparación con las emisiones mundiales (Vergara y otros, 2014; Stern, 2008)<sup>11</sup>. No obstante, el desarrollo futuro y el cambio estructural harán menguar el efecto del cambio del uso de suelo y probablemente modificarán la actual proporción de emisiones. Por ello conviene entender cómo los futuros cambios estructurales incidirán sobre el nivel de emisiones.

---

<sup>11</sup> Se excluyen las emisiones provenientes del cambio en el uso de la tierra.

En el capítulo I se analizó la evidencia relativa a los nexos entre los cambios sectoriales y tecnológicos, por un lado, y el consumo energético, por el otro (sección B), el efecto de la tercerización en las emisiones (sección C), la relación entre la sostenibilidad y el comercio (sección D), la equidad (sección E) y el empleo (sección F).

En este capítulo se abordan los argumentos teóricos y la evidencia empírica que relacionan distintas facetas del cambio estructural con la sostenibilidad. Como resultado, se identificaron seis aspectos del cambio estructural: la composición sectorial, la organización industrial, el cambio tecnológico, el empleo, la demanda y las instituciones. Aunque fácilmente se podría hacer una clasificación distinta, esta ofrece ciertas ventajas: en líneas generales se basa en modelos formulados antes por los autores de este trabajo, permite identificar con nitidez en cada categoría varios cambios relacionados con la sostenibilidad, posibilita detectar con facilidad los nexos con la bibliografía teórica y empírica, y resulta práctica para aprovechar elementos de distintos tipos de modelos. En el cuadro 1 se enumeran diversos componentes de cada uno de estos seis factores, que, como se argumenta a continuación, guardan relevancia para la sostenibilidad.

## **A. Seis facetas del cambio estructural y su relación con la sostenibilidad**

El principal argumento de este trabajo plantea que, para llegar a entender más a fondo el nexo entre el desarrollo económico y el crecimiento, por un lado, y la sostenibilidad, por el otro, se requieren modelos que capturen diversas facetas del cambio estructural así como sus interrelaciones (o coevolución). Estos modelos se pueden utilizar para estudiar el efecto que distintos aspectos del cambio estructural ejercen en diferentes facetas de la sostenibilidad, incluida la complejidad que probablemente surgirá de la interacción entre diversos rostros del cambio estructural. En un trabajo anterior, van Ruijven y otros (2008) analizaron sucintamente cómo los modelos energéticos globales abordan los cambios estructurales relevantes para los países en desarrollo. Estos investigadores toman en cuenta un conjunto de cambios estructurales más acotado que los analizados en este trabajo, incluidos los siguientes: el uso de combustibles tradicionales, la electrificación, los cambios sectoriales (agregados), la distribución de los ingresos, la economía informal y el agotamiento de los recursos. En este trabajo, se analizó un mayor número de cambios estructurales, tomando como base las investigaciones de Matsuyama (2008), y de Saviotti y Gaffard (2008), y el modelo inicialmente elaborado por Ciarli y otros (2010).

A continuación se examinan los posibles nexos que pueden darse entre los cambios estructurales y la sostenibilidad. En el cuadro 1 se resumen estas conclusiones y se enumeran algunos de los principales cambios que revisten importancia para los seis aspectos del cambio estructural abordados en esta sección. Al analizar cada una de estas seis facetas, también se describen brevemente los nexos con algunos de los otros aspectos del cambio estructural.

### **1. Sectores**

La composición final de la economía ejerce una incidencia tanto directa como indirecta sobre diversos aspectos de la sostenibilidad por conducto de la estructura de insumo-producto y el comercio, que repercute en la sostenibilidad regional (véase la sección D). Los insumos difieren en función de coeficientes técnico-laborales y la intensidad energética; a su vez, estos tres se ven influenciados por los cambios tecnológicos.

La industrialización modifica en forma directa los paisajes ecológicos; el acceso a los recursos así como su uso y distribución, y las estructuras sociales. Cada sector produce un nivel diferente de emisiones de GEI (Stern, 2008), de manera similar a lo que ocurre con las rentas y los salarios, y, en general, afectan la distribución de los ingresos, lo que incide sobre la sostenibilidad por conducto de la composición de la demanda. Los sectores también se diferencian en función del costo que deben afrontar para reducir las emisiones de GEI (Enkvist, Nauclér y Rosander, 2007). En algunos casos, estos costos son negativos, por ejemplo, cuando se instalan dispositivos de aislamiento en edificios o se mejora la eficiencia de los combustibles usados en el sector transporte, de la misma forma en que la reducción de las emisiones de

GEI también baja los gastos variables, mientras que en otras ocasiones el gasto es mucho más elevado. Es menester dar cuenta de estas diferencias por medio de macromodelos.

Por ejemplo, López (2007) sostiene que no todos los cambios estructurales tienen una relación positiva con el desarrollo y, desde un punto de vista agregado, los divide en cambios benignos y perversos. En el primer caso, las inversiones tanto en el sector primario como en el secundario estimulan a quienes están en el sector primario a abandonarlo sin que se produzca degradación alguna. En el segundo caso, los cambios estructurales resultan de la degradación o expropiación de los recursos naturales, que inducen una urbanización forzosa y traen aparejados efectos perjudiciales para los salarios, la distribución de los ingresos y los recursos ambientales —efectos indirectos—<sup>12</sup>. Según López (2007, pág. 223), el sendero que lleva a una u otra categoría depende sobre todo de las políticas públicas, por ejemplo, los impuestos que gravan los recursos y su redistribución, que guardan un estrecho vínculo con el marco institucional: cuanto mayor sea el sesgo proelitista del gobierno, más probable será encaminarse por un sendero perverso.

En forma indirecta, distintos sectores requieren diferentes calificaciones (Vona y Consoli, 2014), situación que se repite en los sectores que ofrecen productos y servicios ecológicos (Consoli y otros, 2015), que probablemente exigirán mayores competencias que los empleos marrones (Vona y otros, 2015) (véase a continuación la sección dedicada al empleo y la sección F). En este sentido, los sectores se diferencian en cuanto a las actividades orientadas a la innovación (Malerba y Orsenigo, 1997), tanto en función de su nivel como de su composición (cambio tecnológico sesgado por los factores).

Si bien en este trabajo no se aborda la incidencia del cambio climático sobre las actividades económicas, cabe notar que los cambios en el medioambiente causan cambios estructurales. La ausencia de linealidad característica de los cambios en el medioambiente, por ejemplo, la posible y marcada suba de las temperaturas medias (Weitzman, 2009), también caracteriza a los cambios en la economía (sociedad), lo que exige herramientas capaces de representar esta falta de linealidad en ambos ámbitos<sup>13</sup>.

En resumen, se han identificado cuatro componentes fundamentales de la faceta sectorial del cambio estructural (véase el cuadro 1): i) los cambios en la composición sectorial, que influyen la participación en el total de las emisiones de GEI y el costo de reducción; ii) las diferencias sectoriales en materia de actividades innovadoras; iii) los cambios en los coeficientes técnicos, laborales y de consumo, y iv) la composición de la mano de obra en función de las tareas y las competencias.

## 2. Organización industrial

Los cambios en la composición sectorial tienen un vínculo estrecho con la organización de los procesos productivos, encauzado por medio de las decisiones que toman las empresas en relación con las compras y las ventas. Las modificaciones de la producción ejercen tres efectos directos en la relación entre el desarrollo económico y la sostenibilidad. En primer lugar, un mayor grado de especialización suele asociarse con una mayor productividad. Así, según se trate de la productividad de la mano de obra o de la productividad total de los factores, la especialización puede incidir sobre el mercado laboral y la intensidad energética. En segundo lugar, conforme las compañías externalizan parte de su producción, será probable que deban utilizar con más frecuencia los medios de transporte, que constituyen un componente significativo de las emisiones de GEI.

En tercer lugar, la externalización puede venir de la mano de un crecimiento del comercio. En el plano regional, los intercambios comerciales, por un lado, tienen consecuencias considerables en la

<sup>12</sup> Este resultado puede ser producto de la expropiación o degradación de los recursos naturales, como el uso excesivo de agua de parte de las industrias más poderosas.

<sup>13</sup> Por ejemplo, los cambios marginales en los patrones de consumo (a causa de mayores ingresos o modificaciones en la estructura productiva y en la distribución de ingresos) ejercen un efecto que tal vez no sea marginal y que depende de la producción nacional, el comercio y otros factores. Esto sucede cuando se tala un bosque extenso o se modifica un ecosistema mediante la sobrepesca o la agricultura con el objeto de satisfacer una mayor demanda de alimentos. Tal como se analizará en las próximas secciones, el problema se torna enrevesado cuando surgen cambios estructurales tanto del lado izquierdo (la economía) como del lado derecho (el medioambiente) y se debe recurrir a herramientas complejas.

deslocalización de actividades más o menos contaminantes, mientras que, por otra parte, pueden alterar el grado de especialización regional y su inclusión en las cadenas mundiales de valor, que en la actualidad dan cuenta de gran parte del comercio (Baldwin y Lopez-Gonzalez, 2013). Recientemente también se ha demostrado que la especialización local representa un determinante notable de la participación en estas cadenas (Lopez-Gonzalez, Meliciani y M. Savona, 2015).

La organización de los procesos productivos puede determinar de manera indirecta la concentración del mercado y el tamaño de las empresas. A su vez, se ha comprobado que la talla de las compañías está relacionada con la distribución salarial: así, las firmas de mayor envergadura pagan salarios relativamente más abultados que las pequeñas (Bottazzi y Grazi, 2010; Brown y Medoff, 1989), debido al crecimiento exponencial de los sueldos en relación con los niveles jerárquicos de las organizaciones (Lydall, 1959; Simon, 1957).

Es probable que los cambios en la organización productiva modifiquen la concentración geográfica de las actividades económicas y los trabajadores: la urbanización desempeña un papel destacado en el grado de participación del transporte en las emisiones de GEI y guarda nexos con los cambios en la mano de obra, los ingresos y el consumo<sup>14</sup>. Por ejemplo, Windrum, Ciarli y Birchenhall (2009b) examinan el rol primordial que a fines del siglo XIX jugó la urbanización en la evolución de las tecnologías del transporte en el Reino Unido y, en particular, en el desarrollo del automóvil como una tecnología destinada a reducir la contaminación urbana y los tiempos de transporte.

Por último, los cambios en la estructura productiva, la concentración geográfica y del mercado, y el ciclo de vida de las tecnologías (Abernathy y Utterback, 1978), modifican la dinámica industrial (Klepper, 1997; Mazzucato, 2002)<sup>15</sup>.

En síntesis, se analizan cinco componentes esenciales ligados a la estructura de la producción y la dinámica industrial, que revisten importancia para el desarrollo económico sostenible (véase el cuadro 1): i) el surgimiento de nuevos sectores intermedios; ii) los cambios en los coeficientes de insumo-producto inducidos por dichos sectores; iii) la concentración del mercado y el tamaño de las empresas; iv) la distribución geográfica, y v) la dinámica industrial.

### 3. Cambios tecnológicos

Los cambios tecnológicos resultan vitales para lograr tanto los cambios estructurales como la sostenibilidad. Cuando el primer modelo encomendado por el Club de Roma sacó a la luz los límites ecológicos del crecimiento (Meadows y otros, 1972), los autores plantearon que el crecimiento exponencial de la población y la producción habría agotado a gran velocidad los recursos y las reservas de alimentos mundiales, pero entre los detractores, Cole y otros (1973) adujeron que los investigadores habían pasado por alto los cambios tecnológicos. Estos cambios ejercen tres efectos diferentes en el impacto ambiental de los procesos productivos (crecimiento de la producción) y el consumo (crecimiento demográfico). En primer lugar, las innovaciones ambientales que dan lugar a un ahorro en los factores (van den Bergh, 2013) pueden aumentar la eficiencia energética de los procesos productivos, incluido el transporte, y reducir así los recursos necesarios para producir y consumir la misma cantidad de un mismo bien.

En segundo lugar, esto se puede llevar a cabo por medio de la desmaterialización (véase el análisis de la evidencia empírica realizado en la sección C). Es posible incrementar el valor agregado de un producto final, de modo que los consumidores obtengan la misma utilidad al consumir una proporción

---

<sup>14</sup> Véanse, por ejemplo, las conclusiones a las que llegaron Vergara y otros (2014) al estudiar los países de América Latina y la evaluación energética mundial (GEA) (2012, pág. 13) con una visión global: las políticas de urbanización tendrán profundas repercusiones en las necesidades de transporte e infraestructura, y en la viabilidad de diferentes medios de transporte en el ámbito local. Tanto la decisión de viajar como la elección del medio inciden sobre el consumo de combustible.

<sup>15</sup> Cabe tener en cuenta que la dinámica y los ciclos de vida de la industria también se ven influenciados por los regímenes tecnológicos sectoriales mencionados anteriormente (Malerba y Orsenigo, 1997) y actúan como determinantes fundamentales de la industrialización y los procesos orientados a cerrar las brechas (Kim, 1999).

menor de un bien determinado. Otra alternativa consiste en proporcionar directamente a los consumidores un servicio en lugar de un producto que brinda el mismo bienestar (Ayres y van den Bergh, 2005). En tercer lugar, se pueden sustituir los combustibles fósiles por energías renovables, ya sea en el ámbito de la producción intermedia como del consumo final, por ejemplo, en el caso del transporte y la calefacción (Ayres, 1998; Popp, Newell y Jaffe, 2010; Stern, 2007).

Por ende, los modelos deben tener en cuenta las innovaciones graduales que mejoran la eficiencia energética y aquellas que son radicalmente novedosas, es decir las transformaciones tecnológicas que exigen modificar grandes sectores de la economía, incluidas las conductas de los consumidores, la estructura productiva y la infraestructura (Safarzyńska, Frenken y Van den Bergh, 2012; Van den Bergh, Truffer y G. Kallis, 2011). Sin embargo, los modelos tienen que tomar en consideración el hecho de que las innovaciones no se acumulan en forma lineal, sino que se agrupan en el tiempo y el espacio (Silverberg y Verspagen, 2007 y 2005) de forma tal que a las grandes innovaciones les sigue un grupo de innovaciones menores. Esta dinámica también se puede observar a través de las lentes de las ondas largas (Freeman, Clark y Soete, 1982), en particular si se considera que la última de estas ondas puede traer de la mano tecnologías sostenibles (Freeman, 1996)<sup>16</sup>. Por ejemplo, sobre la base del Informe Stern sobre la economía del cambio climático, Stern (2008) postula que, dadas las limitadas medidas tendientes a acotar los GEI en sectores como el uso de la tierra y la agricultura, se deben tomar acciones contundentes en los entornos donde las tecnologías puedan desempeñar un papel protagónico en el proceso de reducción de las emisiones, como la energía y el transporte. Si bien este objetivo resulta potencialmente factible, exigirá cambios drásticos y transiciones sociales que involucran varios aspectos del cambio estructural.

**Cuadro 1**  
**Aspectos del cambio estructural: cambios esenciales para la sostenibilidad ambiental<sup>a</sup>**

Sectores	Organización Industrial	Cambios estructurales			
		Cambio tecnológicos	Empleo	Demanda	Instituciones
Participación en producción de GEI	Nuevos sectores intermediarios	Ahorro de factores	Empleos verdes	Distribución del ingreso	Regimen de apropiación de conocimiento
Actividad innovadora	Coefficientes insumo-producto	Energía limpia	Desempleo	Preferencias de consumo	Oportunidades técnicas
Costo de abatimiento	Tamaño de las empresas	Innovaciones radicales o trayectorias	Distribución salarial	Preferencias temporales	Acceso a recursos
Relaciones insumo-producto	Mano de obra	Procesos no lineales y agrupados	Intensidad laboral		Gobernaza
Composición laboral (calificaciones verdes)	Concentración geográfica	Desmaterialización			Interacciones sociales
		Senderos, incertidumbre y efectos no deseados			Culturas

Fuente: Elaboración propia.

<sup>a</sup> Se considera que un modelo específico toma en cuenta una faceta del cambio estructural si alguno de los cambios mencionados en el cuadro es endógeno al modelo; por ejemplo, si el modelo tiene una estructura de insumo-producto fija, no se considera que incorpora elementos de cambio estructural.

No obstante, la relación entre el cambio tecnológico, la sostenibilidad y el cambio estructural no es lineal: la tecnología no entraña automáticamente una mejora positiva. Ante todo, la innovación demanda tiempo, requiere ingentes inversiones, cambia en forma gradual (trayectorias tecnológicas que presentan un patrón de dependencia condicionado por el pasado) y reporta beneficios inciertos (Nelson y Winter, 1982). En el caso de las tecnologías verdes, esta incertidumbre se refiere tanto al retorno sobre las inversiones

<sup>16</sup> Véanse en Köhler (2012) las similitudes y diferencias entre los marcos utilizados para analizar las ondas largas y las transiciones sociotecnológicas.

como a los efectos indeseados, por ejemplo, el efecto que la producción de biocombustibles puede ejercer en los precios de los alimentos y la nutrición.

En segundo lugar, las tecnologías sostenibles pueden seguir diferentes caminos, cada uno de los cuales presenta ventajas y desventajas para distintos segmentos de la población (Leach, Scoones y Stirling, 2010a; Stirling, 2009). La elección de uno u otro sendero dependerá de la interacción entre los diversos poderes y la estructura de la economía. En tercer lugar, existen efectos perversos a causa de los cuales las innovaciones ecológicas pueden menoscabar la sostenibilidad ambiental. Esto se debe, sobre todo, a un efecto rebote (Stapleton, Sorrell y Schwanen, 2015; Sorrell, 2007): conforme aumenta la eficiencia de la energía, baja su costo y sube su consumo. Además, existe la paradoja verde (van der Ploeg, 2011; van der Ploeg y Withagen, 2012): los incentivos que reducen el costo de los recursos renovables a fin de incrementar las inversiones disminuyen el precio general de la energía, lo que a su vez puede incrementar el consumo de energía generada a partir de combustibles fósiles.

En términos generales, se detectaron siete nexos esenciales entre los cambios tecnológicos y la sostenibilidad (véase el cuadro 1): i) el sesgo de los factores; ii) la desmaterialización; iii) las tecnologías limpias; iv) las innovaciones radicales y los cambios de paradigma; v) la falta de linealidad y la dinámica del agrupamiento; vi) la elección de los senderos tecnológicos, y vii) la incertidumbre y los efectos indeseados.

#### 4. Cambios técnicos

A medida que cambian las tecnologías, la organización de las empresas y la estructura productiva, es probable que se vean afectados el empleo y los salarios. Las consecuencias que una transformación verde trae aparejadas para el mercado laboral aún no quedan del todo claras, debido a los múltiples efectos que se deben tomar en cuenta (Dierdorff y otros, 2009). Por ejemplo, los cambios en la composición industrial inducidos por modificaciones en las preferencias de los consumidores, el agotamiento de los recursos o la normativa ambiental pueden tener repercusiones negativas en el mercado laboral (Martínez-Fernández, Hinojosa y Miranda, 2010). De hecho, los efectos de la ecologización económica también pueden ser positivos: el nacimiento de nuevos sectores relacionados con este reverdecimiento, que suelen hacer un uso más intensivo de la mano de obra (AIE, 2009). El efecto general dependerá de la composición industrial y las decisiones relativas a la externalización y la deslocalización (véanse las secciones anteriores).

Además del efecto neto sobre el empleo, tal vez revistan mayor relevancia los cambios cualitativos en la organización, las competencias requeridas y las nuevas combinaciones de conocimientos (Vona y Consoli, 2014). Consoli y otros (2015) plantean que la distribución de tareas se ve afectada cuando se produce un cambio en el paradigma tecnológico, lo que guarda similitud con una transformación verde. La magnitud dependerá de cuán rutinarias sean las tareas —las tareas más repetitivas pueden cambiar con facilidad en diferentes paradigmas, pero es imposible reproducir las no rutinarias— y del grado de transferibilidad de los conocimientos —la transformación es más costosa si no se pueden transferir los conocimientos—. Por lo tanto, la distribución de las tareas y los conocimientos, que se relaciona con la estructura productiva, abrirá un sendero más o menos escabroso hacia el desarrollo sostenible, el cual requiere cambios tecnológicos, sectoriales e institucional drásticos.

En forma indirecta, los cambios en el ámbito laboral probablemente modificarán la distribución salarial (Brynjolfsson y McAfee, 2014), que, a su vez, ejerce un efecto considerable en la composición de la demanda. Por ejemplo, Rezai, Taylor y Mechler (2013) argumentan que, en un macromodelo integrado, al reducir las horas de trabajo se pueden provocar efectos perversos: tal vez se induzca un aumento de la demanda de mano de obra, lo que ejercerá presión sobre los salarios y, por ende, sobre los ingresos disponibles o las inversiones en nuevo capital, resultado que aumentará el consumo, la productividad y las emisiones de GEI.

De este modo, se observa que existen al menos cuatro componentes de la faceta laboral del cambio estructural, que guardan un nexo con la sostenibilidad (véase el cuadro 1): i) los empleos verdes y la modificación de las calificaciones; ii) el desempleo; iii) la distribución salarial, y iv) los cambios en la intensidad de la contratación de mano de obra de parte de los sectores.

## 5. Demanda

En cuanto a la demanda, existen dos elementos del cambio estructural, relacionados con aspectos analizados anteriormente, que resultan cruciales para la sostenibilidad ambiental. En primer lugar, la distribución de los ingresos. Este componente guarda vínculos con varios de los factores ya examinados: la organización de la estructura productiva y el tamaño de las empresas (Ciarli y otros, 2010); la deslocalización de parte de la producción a raíz del marco reglamentario, el grado de competitividad o la disponibilidad de recursos (Martínez-Fernández, Hinojosa y Miranda, 2010); la distribución de las competencias, la obsolescencia de las calificaciones o la adquisición de nuevas competencias en aras de la readaptación profesional (Consoli y otros, 2015); y la inversión en capital verde y la distribución de las rentas (Rezai, Taylor y Mechler, 2013). La distribución de los ingresos determina el ritmo al que se podrá ahorrar y el nivel de consumo final, así como la distribución del consumo en diferentes categorías de bienes y servicios, que pueden resultar más o menos contaminantes.

Por ejemplo, Greenstone y Jack (2015) demostraron que los países de ingresos bajos y medianos están más contaminados que los de ingresos altos en función de la calidad del agua y el aire, aunque sus emisiones de GEI sean significativamente inferiores. Esta situación conlleva una merma considerable del bienestar debido, por ejemplo, a una menor expectativa de vida y una mayor prevalencia de enfermedades entre los niños. Sin embargo, el deseo de pagar para disfrutar de agua y aire más puros es menor que en las naciones de ingresos altos. Los investigadores sostienen que esto es consecuencia, entre otras causas, de una mayor preferencia marginal por consumir bienes materiales en lugar de agua o aire puros, y de varias ineficiencias del mercado relativas a la liquidez y el acceso al crédito. Otra explicación brindada por los autores yace en la economía política: los encargados de la formulación de políticas no mejoran las preferencias de los ciudadanos que padecen las secuelas de la contaminación. Esta situación se puede extrapolar fácilmente a una sociedad muy inequitativa, donde se da prioridad a los intereses de las clases acomodadas en detrimento de los menos pudientes (véase evidencia reciente relativa a los Estados Unidos en Gilens y Page, 2014).

El segundo factor se relaciona con las preferencias de los consumidores y su evolución a lo largo del tiempo (Witt, 2011), y con el nivel de ingresos y de saciedad (Witt, 2001). Las preferencias de los consumidores pueden actuar como un potente motor del proceso innovador orientado a desarrollar bienes más económicos o ecológicos (Janssen y Jager, 2002; Windrum, Ciarli y Birchenhall, 2009a y 2009b). Por ejemplo, Zhu, Shi y Wang (2014) comprobaron que en China las emisiones dependen de una estructura industrial que responde a la demanda internacional en lugar de nacional. En el ámbito de la economía ambiental, se han analizado a fondo las preferencias relativas al aspecto temporal: la aversión al riesgo y la velocidad a la que las personas descuentan el costo del cambio climático y el consumo de las generaciones venideras en comparación con el consumo presente y los costos en que se debe incurrir para acotar las emisiones (Stern, 2013; Pindyck, 2013; Nordhaus, 2013). ¿Cuánto se valora el bienestar social de las generaciones futuras? ¿Cómo se debería redistribuir el daño ambiental entre las generaciones? ¿Cuánto se sabe acerca de los efectos del cambio climático a largo plazo como para dar forma adecuada a las preferencias temporales? ¿Cuántas generaciones conviene abarcar?

Resulta laborioso obtener y evaluar la evidencia empírica necesaria para dilucidar todas estas interrogantes, que inciden sobre las conductas de consumidores y productores, y sobre la medida en que afectan la sostenibilidad ambiental (Ackerman y otros, 2009). A causa de enormes incertidumbres acerca de los efectos futuros del cambio climático (Pindyck, 2013), algunos autores recomiendan aplicar tasas de descuento en extremo bajas a la hora de calcular el costo del cambio climático (Ackerman y Stanton, 2012; Ackerman, Stanton y Bueno, 2013). Dietz, Hepburn y Stern (2008) sugieren que es imposible estimar este descuento recurriendo solo a la economía del bienestar, pero es menester reflexionar acerca de los aspectos éticos. Por ejemplo, según la filosofía moral, se deben utilizar tasas de descuento exiguas en modelos donde se evalúe las consecuencias y el costo del cambio climático (Stern, 2014a y 2014b).

Pero, si bien este debate sirve para que los encargados de las políticas fundamenten las medidas de reducción adoptadas, proporciona escasa evidencia acerca de los principales responsables del cambio climático y estructural: los productores y los consumidores. Por ejemplo, Moyer y otros (2014) sugieren

que la tasa de descuento debería ser endógena a la contaminación; sin embargo, como ya se ha analizado, no todas las personas asignan el mismo valor a la pureza del aire y el agua (Greenstone y Jack, 2015). Las conclusiones extraídas en trabajos precedentes por Ruderman, Levine y McMahon (1987), y por Dreyfus y Viscusi (1995) recomiendan tasas relativamente altas respecto de la producción y compra de bienes verdes. En otras palabras, conviene dar cuenta también de la forma en que las personas de hecho descuentan el costo y los beneficios de la contaminación futura, y no solo tomar en consideración cómo deberían hacerlo.

De este modo, se observa que existen tres grandes componentes que establecen un vínculo entre la demanda inherente al cambio estructural y la sostenibilidad (véase el cuadro 1): i) la distribución de los ingresos; ii) las preferencias de los consumidores, y iii) las preferencias que favorecen los efectos directos e indirectos de la degradación ambiental, tanto actuales como futuros.

## 6. Instituciones

Varios componentes analizados en las secciones precedentes quedan dentro de la influencia de las políticas, los incentivos, las estructuras sociales y las interacciones de las instituciones (Arrow y otros, 1995)<sup>17</sup>. Por ejemplo, Faber, Idenburg y Wilting (2007) adoptaron un modelo de insumo-producto para estudiar los efectos del cambio tecnológico en las emisiones, en el que la innovación incide sobre las emisiones por conducto de los coeficientes técnicos y de importación, y los cambios experimentados por las instituciones. Estas juegan un rol esencial en el marco elaborado por Greenstone y Jack (2015), que da cuenta de la acotada voluntad de pagar como contraprestación de menores niveles de contaminación. Las instituciones también desempeñan un papel en lo que hace al aprovechamiento y la distribución de los recursos naturales (Boulangier y Bréchet, 2005), que influyen en diferentes dinámicas de los cambios estructurales benignos y perversos por medio de los impuestos y el gasto público, factores que a su vez repercuten en el uso de los recursos naturales y la sostenibilidad (López, 2007). La gobernanza y la confianza institucional representan un obstáculo formidable para que Europa pueda dejar atrás la actual crisis económica y lidiar con el cambio climático antes de que sea demasiado tarde (Fagerberg, Laestadius y Martin, 2015).

Jacobsson y Bergek (2011) adoptaron una mirada más amplia de las instituciones: evaluaron en qué medida el estudio de los sistemas de innovación puede resultar provechoso para identificar los principales puntos flacos que dificultan a las instituciones lograr la sostenibilidad ambiental. Para ello, identificaron las áreas de los sistemas de innovación donde las políticas podrían reportar los mayores beneficios. Con una postura incluso más amplia, Smith, Stirling y Berkhout (2005) estudiaron distintos procesos de transición encaminados hacia sistemas sociotecnológicos más sostenibles<sup>18</sup>. Analizaron los aspectos relativos a la gobernanza de distintos tipos de transición, para lo cual se concentraron en dos elementos cruciales de las instituciones: la capacidad de delegación y sus facultades.

En síntesis, los cambios institucionales revisten importancia capital para todos los componentes del cambio estructural, así como su interacción con el cambio climático y la sostenibilidad. Dada la complejidad que entraña definir, mensurar y modelizar las instituciones, éstas representan el aspecto más problemático a la hora de llevar a cabo esta tarea. De este modo, las instituciones son estructuras abiertas difíciles de definir. Sin embargo, destacan algunos factores de la faceta institucional del cambio estructural, que tienen un nexo con la sostenibilidad (véase el cuadro 1) como son: i) los regímenes de apropiación del conocimiento y los derechos de propiedad; ii) las oportunidades tecnológicas; iii) el acceso a los recursos (las relaciones de poder); iv) la gobernanza (las relaciones de poder); v) las interrelaciones sociales, y vi) la cultura.

<sup>17</sup> Por ejemplo, la manera en que se determina si las innovaciones ambientales resultan apropiadas y cómo se regula su uso.

<sup>18</sup> Por ejemplo, las complejas interacciones entre las estructuras y fuerzas sociales, por un lado, y las estructuras y características tecnológicas, por el otro, que determinan la conducta de los consumidores, las trayectorias tecnológicas, la disponibilidad de las tecnologías de consumo y producción, y otros factores que vinculan los comportamientos sociales y los atributos de las tecnologías en un período dado. Véase un amplio pantallazo de la interrelación entre la innovación, el impacto ambiental, las estructuras sociales y las transiciones hacia regímenes más o menos sostenibles en la obra que comenzaron a publicar van den Bergh, Truffer y Kallis (2011).

### III. La sostenibilidad y el cambio estructural: un examen de los modelos económicos

En este capítulo se analiza sucintamente la forma en que las principales clases de modelo utilizadas para estudiar la relación entre la economía y la sostenibilidad abordan una o varias facetas del cambio estructural. A su vez, se pasará revista a los modelos de evaluación integrada —IAM— y al modelo computadorizado de equilibrio general —CGE— (sección A), los modelos que explícitamente abordan los cambios estructurales —sobre todo considerados como cambios sectoriales— (sección B), los modelos de macroeconomía ecológica poskeynesiana —EMK— (sección C) y los modelos evolutivos multiagentes —EABM2 y EABM4— (sección D)<sup>19</sup>. Estos últimos se dividen en macro- y micromodelos, porque, si bien no abordan la sostenibilidad general, los micromodelos proporcionan numerosos elementos para estudiar la relación entre los cambios tecnológicos y diversos aspectos del cambio estructural.

Asimismo, se resumen las principales características de cada categoría de modelo. Por falta de espacio, no se logra hacer justicia adecuadamente a ninguno de estos modelos, en particular la familia de los IAM y los CGE, que cuentan con muchísimos integrantes que ya fueron sometidos a evaluaciones, las cuales dieron origen a numerosas reseñas de gran minuciosidad. Cuando estén incorporados en los modelos, la atención se centrará sobre todo en los atributos relativos a los cambios estructurales. A continuación, se sintetiza la forma en que estos modelos dan cuenta, o no, de los seis componentes del cambio estructural. En el cuadro 2 se presenta un resumen sucinto de este análisis, y en el cuadro 3 se proporciona una lista de verificación más exhaustiva donde se explica cuáles de los componentes examinados en el capítulo II, primera sección y en el cuadro 1 forman parte de cada clase de modelo.

Gerst y otros (2013) proponen una tipología de modelos que sirven para investigar el cambio climático en los sistemas económicos, clasificados en cuatro niveles diferentes que van de un micronivel a un macronivel. El cuarto nivel corresponde a los micromodelos, que principalmente abordan la difusión de las tecnologías sostenibles, los procesos de innovación y la incidencia del cambio climático sobre las personas. En la sección D se analizarán algunos de estos modelos en la medida en que permitan definir un macromarco complejo para estudiar las interacciones entre los cambios estructurales y la sostenibilidad ambiental. El tercer nivel comprende los modelos sectoriales, que no incluyen macrorretroalimentaciones,

---

<sup>19</sup> No se analizarán los enfoques econométricos que combinan atributos poskeynesianos y de insumo-producto, como el E3MG (Köhler y otros, 2006b) o FIDELIO (Kratena y otros, 2013), porque se los creó principalmente para efectuar estimaciones. El interés primordial de dichos modelos empíricos radica en su representación de la dinámica del equilibrio.

y se concentra sobre todo en el sector eléctrico y el consumo energético, y en su incidencia sobre el medioambiente. El segundo nivel corresponde a los modelos que abordan la totalidad del sistema económico. Algunos de estos mantienen la mirada microeconómica, pero en general proporcionan detalles exigüos en cuanto a las elecciones tecnológicas y familiares cuando se excluye el agente representativo (véanse las secciones A, B y C). Y el primer nivel representa los modelos que abordan las relaciones entre los países que procuran celebrar acuerdos mundiales destinados a reducir las emisiones. Si bien este constituye un aspecto institucional crítico bajo la influencia del cambio estructural, que resulta esencial para la sostenibilidad ambiental, no se lo aborda en este trabajo.

En resumen, la atención para apartado se centra en los modelos del segundo nivel, aunque se analizan brevemente los del cuarto al examinar los modelos de cambio tecnológico que pueden integrarse a un marco macro-micro (sección D, apartado 2), así como algunos ejemplos del tercer nivel (sección B).

## **A. Modelos de evaluación integrada (IAM) y modelos de equilibrio general computables (CGE)**

### **1. Modelos IAM**

Desde el momento en que Nordhaus publicó su obra en 1979, se elaboraron numerosos modelos de evaluación integrada destinados a estudiar el efecto de la actividad económica en el cambio climático y los costos económicos que entraña la reducción del impacto ambiental causado por la producción y el consumo<sup>20</sup>. Estos modelos tienen como objeto describir las complejas relaciones entre los factores ambientales, sociales y económicos de los que dependerán el cambio climático futuro y la eficacia de las políticas en la materia a fin de extraer conclusiones relevantes para la formulación de políticas (van Vuuren y otros, 2011b, pág. 256). Stern (2008) divide el ciclo lineal entre la esfera económica, social y ambiental en cinco etapas:

- i) las decisiones relativas a la producción y el consumo generan GEI de diferentes tipos, entre los que destaca el dióxido de carbono;
- ii) las emisiones de GEI se terminan acumulando en la atmósfera;
- iii) estos gases atrapan el calor y generan un calentamiento atmosférico a un ritmo determinado;
- iv) este calentamiento causa cambios en los patrones climáticos, y
- v) el cambio climático trae aparejado para las personas, la vegetación y las especies animales, por ejemplo, diversas consecuencias cuya complejidad no resulta fácil de entender y evaluar. Todas estas relaciones se estudian mediante modelos paramétricos a fin de dar cuenta de la enorme incertidumbre que siembran.

Pindyck (2013) describió los seis principales componentes de la mayoría de los modelos de evaluación integrada que abordan estas cinco etapas:

- i) la emisión futura de dióxido de carbono en diferentes hipótesis de consumo y producción agregados;
- ii) la concentración futura de dióxido de carbono, que dependerá de la acumulación actual y anterior de este gas;
- iii) las proyecciones relativas a los cambios de temperatura y otros parámetros del cambio climático;

---

<sup>20</sup> Wei, Mi y Huang (2015) llevaron a cabo un ejercicio bibliométrico básico que describe el alcance y la distribución de las investigaciones que abordaron los modelos de evaluación integrada.

- iv) las consecuencias económicas del cambio climático;
- v) una estimación de los costos en que se debe incurrir para reducir las emisiones y la acumulación de GEI, y
- vi) diferentes hipótesis acerca del bienestar social, incluidos los costos actuales y futuros que entrañan el cambio climático, el actual costo de reducción de las emisiones de GEI y las diferentes preferencias temporales para calcular estos costos para varias generaciones.

El propósito principal de estos modelos consiste en brindar información a los encargados de las políticas sobre las mejores alternativas para poner coto a las emisiones de GEI y bajarlas a un nivel ideal: el nivel que maximiza el bienestar intertemporal del hogar representativo. Por ende, los responsables de las políticas deben comparar el costo que entraña disminuir las emisiones ahora en función de la utilidad actual (función de reducción) con los beneficios que los descendientes de esta familia gozarán en el futuro gracias a esta merma en el agotamiento de los recursos. La capacidad de los modelos para representar con minuciosidad todos los vínculos entre las actividades antropogénicas y el medioambiente acarrea un costo: la arbitrariedad de las elecciones en cuanto a las parametrizaciones y las funciones. Los modelos pueden arrojar resultados diametralmente opuestos a causa de las diferencias en dichos supuestos, lo que dificulta su evaluación y, en particular, el debate acerca de las tasas de descuento (Ackerman y otros, 2009). La gran libertad de acción de que gozan los investigadores para formular estos supuestos también les otorga un poder excesivo, pero pocas restricciones; y no resulta nada fácil clasificar estas hipótesis según su grado de fiabilidad y aceptabilidad (Pindyck, 2013)<sup>21</sup>.

Según Stern (2013) y Pindyck (2013), pese a que allanaron muchísimo el camino para lograr entender algunas de las relaciones entre la actividad económica presente, el impacto ambiental y los costos que deberán afrontar las actividades económicas futuras, los modelos de evaluación integrada presentan varios problemas que requieren solución antes de poder convertirse en herramientas confiables para evaluar las políticas de desarrollo sostenible. Entre estos obstáculos se pueden mencionar los siguientes<sup>22</sup>:

- i) el carácter exógeno de los motores del crecimiento, que no se ven afectados por el cambio climático, u otros aspectos endógenos del modelo; sin embargo, el cambio climático puede ejercer efectos permanentes en el acervo de capital y no meramente reducir el crecimiento del PIB durante un año a una tasa determinada;
- ii) una incertidumbre radical: sobre la base de los conocimientos disponibles, es posible estimar los efectos de un alza de la temperatura del planeta de hasta 4°, pero no se cuenta con suficiente información para determinar qué sucedería si la temperatura excediera este umbral (Weitzman, 2011 y 2009)<sup>23, 24</sup>;
- iii) los daños —las consecuencias económicas del cambio climático— no toman en consideración la totalidad de los costos que conllevan, por ejemplo, las migraciones masivas, las catástrofes o los conflictos;
- iv) solo algunos modelos abordan la distribución de la probabilidad de los riesgos, que en muchos casos presenta una función leptocúrtica (Weitzman, 2014);

<sup>21</sup> Edenhofer y otros (2010), y van Vuuren y otros (2011a) compararon y evaluaron una serie de modelos de evaluación integrada con miras a estudiar cómo y por qué arrojan resultados divergentes.

<sup>22</sup> Véanse análisis más pormenorizados en los trabajos originales, pues no se los puede describir exhaustivamente en este estudio por razones de espacio.

<sup>23</sup> Si el cambio climático inflige secuelas suficientemente graves, el costo que conllevará una temperatura ascendente será astronómico. En los ejercicios de modelización de los efectos es preciso integrar hipótesis que incluyan estas trágicas consecuencias, aunque ahora parezcan inverosímiles. Incluso ante esas ínfimas probabilidades, dará frutos toda pequeña inversión que reduzca el exiguo valor esperado de un desastre futuro (Weitzman, 2014).

<sup>24</sup> Lenton y Ciscar (2012) analizaron varios puntos de inflexión que podrían incorporarse a los modelos básicos de evaluación integrada.

- v) la estimación de los costos únicamente en función del PIB, aunque se esperan costos gigantescos para la humanidad, incluida la pérdida de vidas;
- vi) los supuestos relativos al bienestar social: el cálculo de la aversión al riesgo que presentan los cambios futuros y la estimación de la tasa de descuento;
- vii) el efecto que los cambios en la concentración de dióxido de carbono pueden ejercer en la temperatura u otros parámetros climáticos (sensibilidad climática)<sup>25</sup>, y
- viii) una escasa atención al cambio tecnológico, que puede disminuir los costos de las futuras medidas de mitigación mediante el uso de recursos renovables o reducir el consumo energético (Ackerman y otros, 2009).

### Cambios estructurales

Tal como se resume en los cuadros 2 y 3, es limitada la medida en que los modelos de evaluación integrada reflejan el efecto de los cambios estructurales analizados en el capítulo II. En primer lugar, estos modelos dan cuenta de algunas diferencias sectoriales, con una mirada agregada, y se establece una diferencia entre las distintas fuentes de consumo energético, como residencial, industrial, comercial y para transporte, y la conversión de energía. Entonces, el costo que entraña reducir las emisiones de GEI dependerá de la composición industrial de una región determinada y de la utilización de los recursos, como la eficiencia del suministro y de los medios de transporte, y el uso de la tierra (Stern, 2008), sin embargo, el crecimiento relativo de diversos sectores no reviste características endógenas, por lo que no se incluyen los aspectos sectoriales del cambio estructural. Asimismo, este tipo de modelo pasa por alto los cambios en las relaciones de insumo-producto.

En segundo lugar, pese a los esfuerzos recientes por introducir en los modelos de evaluación integrada los cambios tecnológicos endógenos, este objetivo se alcanza principalmente mediante un aprendizaje lineal basado en la experiencia o por medio de actividades agregadas de investigación y desarrollo, siguiendo un mecanismo que induce el cambio tecnológico (véase Popp, 2004; y las reseñas de Köhler y otros, 2006a; Gillingham, Newell y Pizer, 2008; y Popp, Newell y Jaffe, 2010). Debido a que estos cambios se integran a una función que toma en cuenta la producción agregada, cuando sí ocurren cambios marginales (Ackerman y otros, 2009), suelen representar una merma del consumo energético, pero no surten efecto alguno en la estructura económica.

En los modelos de evaluación integrada se podría introducir la sustitución de tecnologías contaminantes (combustibles fósiles) por tecnologías ecológicas —energías renovables—, y así se abordaría el cambio estructural en el uso de tecnologías para los procesos productivos. Por ejemplo, mediante un modelo de crecimiento, Acemoglu y otros (2012) estudiaron los efectos que diversas políticas ejercen en el cambio tecnológico dirigido. En su modelo, las empresas producen un bien homogéneo que combina insumos procedentes de dos sectores, uno ecológico y otro sucio, el cual resulta más perjudicial para el medioambiente. El marco del cambio tecnológico dirigido entraña dos efectos:

- i) la mayor magnitud inicial de las tecnologías no ecológicas atrae más inversiones en materia de cambio tecnológico, y
- ii) el mayor precio de la tecnología limpia da lugar a mayores inversiones.

¿Cuál de estos dos efectos prevalecerá? La respuesta dependerá de los siguientes factores:

- i) el grado de sustituibilidad entre las dos tecnologías;
- ii) el nivel relativo inicial de desarrollo de cada tecnología, y
- iii) si la tecnología no ecológica consume algún recurso no renovable que se torna escaso.

<sup>25</sup> Existe un limitado consenso respecto de estos efectos, porque persisten muchos huecos de información que es imposible mensurar. Dado que no se puede cuantificar la variabilidad del cambio climático, resulta gigantesca la variabilidad de los efectos directos. En síntesis, en este momento se desconoce cuál es la sensibilidad climática.

Los autores hallaron resultados interesantes respecto de la sustitución de tecnologías sucias por limpias. En primer lugar, si las tecnologías gozan de una sostenibilidad elevada y si las antiguas tienen un amplio dominio del mercado y una alta productividad, es menester intervenir mediante una política enérgica. En segundo lugar, un impuesto transitorio sobre la producción de carbono puede bastar como un mayor estímulo a las inversiones en tecnologías ecológicas. Sin embargo, toda demora en la aplicación del impuesto destinado a encauzar las inversiones hacia tecnologías limpias aumentará los costos que acarrea una política tardía y una desaceleración económica más intensa. Asimismo, si las tecnologías no constituyen sustitutos perfectos, tal vez se requiera una política de aplicación permanente.

En tercer lugar, los modelos de evaluación integrada no incluyen la dinámica del empleo o el desempleo; por tanto, no toman en cuenta los cambios salariales, las competencias y los empleos verdes.

En cuarto lugar, muchos ejercicios sobre la formulación de políticas que utilizan estos modelos comparan hipótesis elaboradas con diferentes marcos temporales para el agente representativo, y modelos más sofisticados dan lugar a un cambio en la tasa de descuento a raíz del impacto ambiental<sup>26</sup>. Las preferencias temporales son un aspecto relevante de los cambios estructurales relacionados con el consumo que todo modelo debería abordar, pero también deberían depender de otras variables de estado, como los ingresos. Por último, los modelos de evaluación integrada no toman en cuenta los cambios endógenos en las normas, las reglamentaciones o la distribución del poder, y las políticas se introducen como un factor exógeno para contrastar su efecto en los costos y los beneficios que arroja la reducción de las emisiones.

Stern (2013) propuso varias ampliaciones al actual modelo integrado a fin de hacer lugar a los cambios estructurales que vienen de la mano del cambio climático, incluida la posibilidad de dar cuenta de los efectos que trascienden el PIB (vidas humanas y sistemas ambientales, entre otros): este enfoque más amplio puede dificultar una optimización simple, pero esto se desprende de la propia naturaleza de las cuestiones que se tienen entre manos (Stern, 2013)<sup>27</sup>. Rosen y Guenther (2015) también sugieren que no se deberían emplear modelos que hagan uso de ecuaciones lineales, pues no permiten dar cuenta de cambios radicales en el proceso de mitigación.

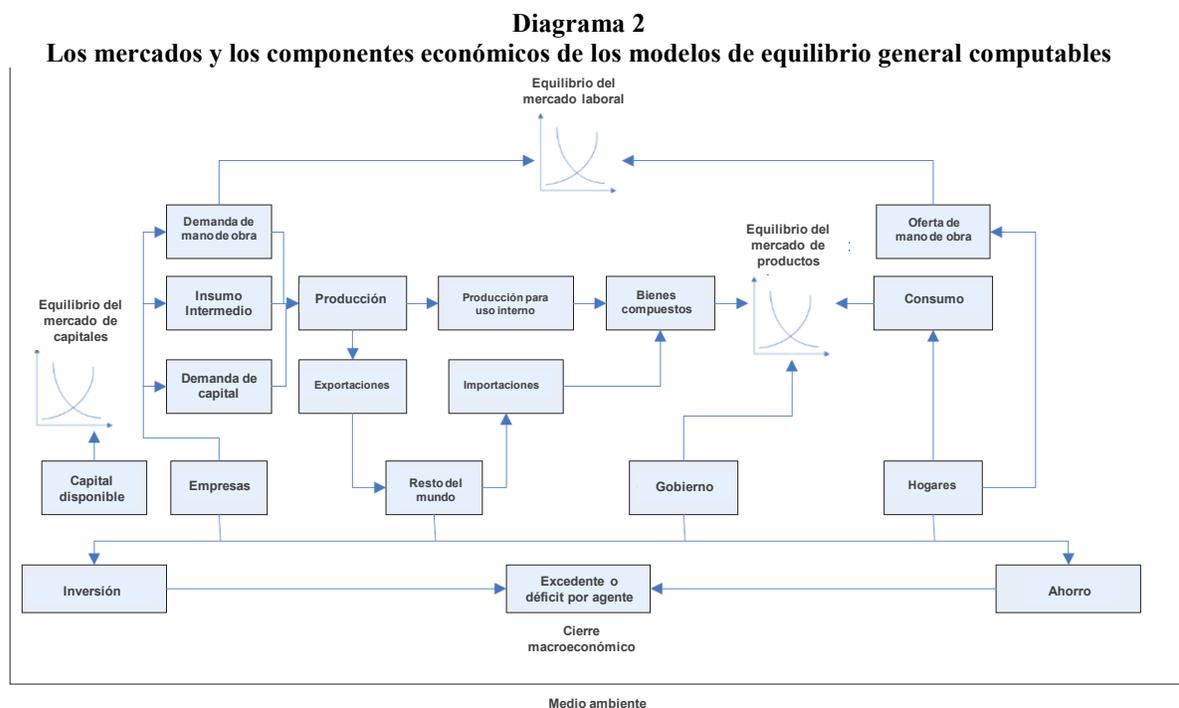
En este trabajo plantea que las modificaciones a los modelos agregados de evaluación integrada constituyen una mejora leve, pero aún pasan por alto resultados significativos asociados a las interacciones entre los agentes económicos y a su evolución con el paso del tiempo en virtud de presiones tanto internas como externas (véase un análisis más minucioso en la sección D).

## 2. Modelos CGE

Si bien los modelos de evaluación integrada analizados con anterioridad son modelos de equilibrio parcial basados en la teoría neoclásica del crecimiento, se han adaptado modelos computados de equilibrio general para llevar a cabo evaluaciones integradas en un marco de múltiples sectores interrelacionados y en equilibrio constante, donde el mercado se vuelve a equilibrar en cada período (Boulanger y Bréchet, 2005). Los modelos CGE son complejos: abarcan un gran número de regiones y sectores con diversos vínculos con el ambiente basados en el uso de diferentes fuentes de energía y emisiones de GEI. En el diagrama 2 se ilustran los tres mercados principales de un modelo multisectorial típico: mano de obra, capital y bienes.

<sup>26</sup> McNerney, Lempert y Keller (2012) modificaron un modelo dinámico integrado de la economía y el clima (modelo DICE IAM) para estudiar el papel de conductas hipotéticas relativas a la incertidumbre y compararon el comportamiento estándar (esperado) dirigido a maximizar la utilidad con conductas basadas en una mayor aversión al riesgo, es decir aquellas basadas en un bajo nivel de confianza y las que anteponen la seguridad ante todo. Con estos criterios que determinan la adopción de conductas con mayor aversión al riesgo, los autores obtuvieron estrategias de mitigación más sólidas, que evitan fenómenos fundamentalmente indeseados, y hallaron que al acotar la incertidumbre se cosechan grandes beneficios.

<sup>27</sup> Se pueden mencionar varios ejemplos: la introducción en el crecimiento (económico) de variables que se ven afectadas por los efectos de un cambio climático drástico, como el capital ambiental e institucional; una reducción permanente del capital en las zonas afectadas por el cambio climático; una disminución permanente de la productividad del capital, por ejemplo, un menor suministro hídrico en los canales de riego, y un proceso más acotado de aprendizaje basado en la experiencia, habitualmente incorporado en los modelos de crecimiento endógeno.



Fuente: P. Capros y otros, "GEM-E3 model documentation", *JRC-IPTS Working Papers*, N° JRC83177, Institute for Prospective and Technological Studies, 2013.

En el diagrama 3 se ejemplifica toda la estructura de esta clase de modelo, con diversos sectores, economías y consumos energéticos. Los instrumentos de las políticas que abordan los incentivos de diferentes sectores económicos (como los impuestos) se evalúan utilizando una serie de indicadores de sostenibilidad.

El modelo CGE estándar está compuesto por tres grupos principales de agentes —hogares, empresas y el gobierno— más el resto del mundo (representado como *RoW* en el gráfico 8)<sup>28</sup>. Los hogares pertenecen a diversos grupos económicos, cada uno de los cuales está formado por un hogar representativo. Los hogares maximizan la utilidad intertemporal mediante el equilibrio óptimo entre el ahorro y el consumo, tras haber pagado los impuestos correspondientes<sup>29</sup>. El consumo se divide entre varios sectores y se marca una diferencia entre los bienes duraderos y no duraderos, y los que se pueden producir en el mercado interno o se deben importar. Los límites que restringen el presupuesto de los hogares dependen de los salarios (en virtud del equilibrio del mercado laboral), los ahorros, los impuestos y las transferencias. El consumo energético de los hogares está representado por el combustible para el transporte, la electricidad y la calefacción. Para dar cuenta del efecto rebote, la energía representa un servicio nominal cuya demanda depende de los precios del servicio: en términos de eficiencia energética, un precio más bajo se traduciría en una mayor demanda.

Las empresas maximizan las utilidades, sujetas a la tecnología y el capital disponibles, recurriendo a la mano de obra, su capital, los insumos intermedios y las fuentes de energía<sup>30</sup>. Los modelos pueden diferir en función de las fuentes energéticas que incluyen, cómo las fuentes se convierten en consumo y cómo estas se transforman en GEI. Los modelos también suelen tener una empresa representativa por sector, incluidos los sectores responsables de la generación energética. La cantidad de insumos dependerá

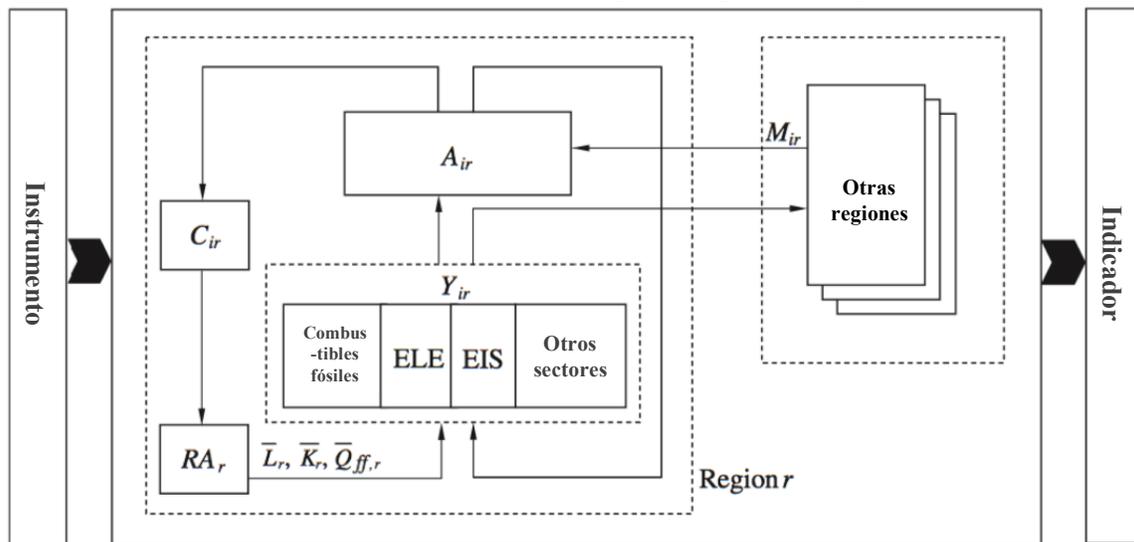
<sup>28</sup> En este trabajo se siguen los lineamientos de Capros y otros (2013), que ostentan extrema minuciosidad.

<sup>29</sup> En primer lugar se toma la decisión de realizar los consumos en el presente o en el futuro.

<sup>30</sup> La mano de obra se puede dividir en dos grupos: calificada y no calificada.

de la demanda que, a su vez, dependerá del precio de los factores. El capital, la mano de obra y los precios de la energía se suelen determinar en forma exógena como factores que dependen de los siguientes componentes, respectivamente: el costo de la inversión (endógena en función de la industria), la tasa de interés y la depreciación (factores exógenos), los salarios en función de la industria, y el suministro mundial de energía. El cambio tecnológico se modeliza para cada insumo en forma individual, lo que modifica la composición de los insumos (sesgo de los factores); asimismo, se lo representa como un cambio en la productividad total de los factores. Cabe resaltar que el cambio tecnológico suele ser semiendógeno y tiende a ser impulsado por el aprendizaje basado en la experiencia. La dinámica del modelo es el resultado de las inversiones efectuadas en capital nuevo gracias a los ahorros.

**Diagrama 3**  
**Estructura básica de un modelo de equilibrio general computable<sup>a</sup>**



Fuente: Ch. Böhringer y A. Löschel, "Computable general equilibrium models for sustainability impact assessment: status quo and prospects", *Ecological Economics*, vol. 60, N° 1, Amsterdam, Elsevier, 2006.

<sup>a</sup>  $Y_i$  representa la producción de un bien básico ( $i$ ) por medio de insumos energéticos y no energéticos.  $L$ ,  $K$ , y  $Q$  representan la mano de obra, el capital y los combustibles fósiles usados como insumos, respectivamente.  $C_i$  es el consumo del bien  $i$  por parte del agente representativo ( $RA$ ), mientras que  $A_i$  simboliza los productos nacionales, tanto intermedios como finales, y  $M_i$  son los productos intermedios y finales importados. ELE es Electricidad y EIS son los sectores intensivos en energía.

En el mercado laboral, los hogares y las empresas primero negocian el número de horas de trabajo, dependiendo del ocio que las familias deseen disfrutar en la actualidad y en el futuro. El equilibrio entre la oferta y la demanda de mano de obra luego determina el costo del trabajo y de los salarios (mediante salarios proporcionales al rendimiento). Entonces, el desempleo voluntario se determina en virtud de las elecciones de los hogares y ciertas fricciones del mercado. La oferta de mano de obra puede modificarse en función de las características demográficas, que siguen una evolución exógena.

El coeficiente de insumo-producto define el flujo de bienes y dinero entre los sectores, incluidos varios sectores intermedios, la demanda final de bienes duraderos y no duraderos, las importaciones y las exportaciones. El modelo se cierra cuando el sector público recauda los impuestos y hace efectivos los intereses y las prestaciones correspondientes (en especial, a los desempleados).

Los modelos computadorizados de equilibrio general se calibran usando datos sectoriales sobre consumo, sectores, inversiones, salarios, comercio, impuestos y transferencias, coeficientes de insumo-producto y emisiones de GEI. Luego se llevan a cabo simulaciones que abarcan diferentes períodos a fin de evaluar el impacto ambiental, en equilibrio, de distintas políticas que inciden sobre los hogares, las empresas y las funciones inherentes del gobierno.

## Cambios estructurales

El modelo CGE refleja los efectos de los cambios estructurales analizados en el capítulo II relativamente mejor que el modelo de evaluación integrada, pero de todos modos está sujeto a varias limitaciones (véanse los cuadros 2 y 3).

Ante todo, ello se debe a que la estructura de producción se representa mediante la estructura de insumo-producto. No obstante, este elemento se calibra para el período y los coeficientes no cambian si se excluyen los modelos que introducen un proceso exógeno de aprendizaje basado en la experiencia.

**Cuadro 2**  
**Los cambios estructurales según diferentes clases de modelos<sup>a,b</sup>**

Modelos	Sectores	Organización industrial	Cambios estructurales			
			Cambios tecnológicos	Empleo	Demanda	Instituciones
IAM	No. No aborda los cambios sectoriales. Cambios agregados y exógenos	No	Parcial: exógenos, aprendizaje basado en la experiencia, cambio tecnológico inducido pero agregado	No	Limitada: las preferencias temporales cambian por la contaminación	No: experimentos de política
CGE	Parcial: muchos sectores con cambios tecnológicos que pueden afectar la producción de GEI	No: diversificación, pero estática, de los mapas de insumo-producto	Parcial: semiexógeno, aprendizaje basado en la experiencia, cambio tecnológico inducido, pero agregado	No	Limitada: cambian los patrones de consumo, no las preferencias	No: experimentos de política
SCM	Sí	Sí, pero solo en un par de modelos	Sí, pero solo en un par de modelos	No	Limitada: dos poblaciones	No: experimentos de política
EMK	Parcial: composición de la mano de obra	Todavía no	No	Sí	Limitada: distribución salarial	No: experimentos de política
ABM 2	Parcial: escasa atención a los efectos ambientales	Alcance limitado: tamaño de la empresa y dinámica industrial	En general sí	Sí	Sí, pero no se desarrolla	Parcial: interacción con las políticas y respuesta a estas
ABM 4	No	Alcance limitado: sobre todo dinámica industrial	Sí	No	Sí	Parcial: evolución de los centros de poder y las oportunidades técnicas

Fuente: Elaboración propia.

<sup>a</sup> Algunos modelos ofrecen mejores herramientas que otros para reflejar la relación entre los cambios estructurales y la sostenibilidad ambiental, en particular los que no requieren una solución cerrada en estado de equilibrio.

<sup>b</sup> IAM: modelos de evaluación integrada; CGE: modelos computadorizados de equilibrio general; SCM: modelos de cambio estructural; EMK: modelos de macroeconomía ecológica (keynesiana); EABM 2: macromodelos evolutivos multiagentes; EABM 4: modelos evolutivos multiagentes (innovaciones).

En segundo lugar y dependiendo de los precios relativos del estado de equilibrio, los distintos sectores contribuyen en diferentes proporciones a la generación de GEI, los que pueden originarse en el territorio nacional o allende las fronteras. Pero no suele presentarse un cambio endógeno en la estructura productiva, ni en el caso de la demanda final (como cambios drásticos en la canasta de consumo) ni de la demanda intermedia, con excepción del aprendizaje práctico o del continuo y monótono cambio tecnológico dirigido (por ejemplo, cambios en la división del trabajo)<sup>31</sup>.

<sup>31</sup> Una de estas excepciones la constituyen Sassi y otros (2010), que utilizan una función con un coeficiente fijo de producción y aplican cambios en el consumo final de energía y transporte. Bosetti y otros (2009) incluyen innovaciones radicales en el modelo híbrido WITCH de cambio tecnológico, pero este emana de un proceso agregado lineal de investigación y desarrollo, con factores temporales y precios *ad hoc*.

En tercer lugar, el cambio tecnológico se modela de manera similar a la evaluación integrada: los cambios ocurren en zonas marginales como mejoras a la eficiencia energética o a las emisiones de GEI.

En cuarto lugar, respecto de la demanda, distintos grupos de hogares tienen ingresos disímiles, por lo que tal vez varíen sus decisiones relativas al precio de los bienes, pero dichas preferencias no cambian con el tiempo, la satisfacción de sus necesidades o la aparición de nuevos productos. En estos casos solo se modelizan patrones de consumo relacionados con los altibajos en los ingresos, los que constituyen un aspecto fundamental de los cambios estructurales.

De igual modo que los modelos de evaluación integrada, los CGE toman en cuenta las instituciones como fuentes de diferentes políticas que se pueden instrumentar para reducir las emisiones de GEI. No se representa ningún cambio o aspecto institucional en forma endógena. Esta limitación puede resultar imposible de salvar en los modelos CGE, que se basan en el supuesto de que los mercados siempre pueden reequilibrarse y, por ende, no necesitan ni de instituciones que los regulen ni de una economía más abierta (Scricciu, 2007).

En ambos modelos se plasman tres supuestos esenciales que dificultan su aplicación a la hora de justificar los cambios estructurales y su vínculo con el medioambiente. En primer lugar, la hipótesis de la racionalidad perfecta no permite examinar conductas alternativas y más realistas que puedan verse influenciadas por diferentes instituciones, ni siquiera cuando se dispone de información acotada.

En segundo lugar, este supuesto viene de la mano de la hipótesis del agente representativo, que modeliza las microconductas de cada componente del sistema —consumidores, empresas de diferentes sectores, el gobierno, entre otros— (Giupponi y otros, 2013). Dada la ausencia de una variedad de agentes con distintas características, preferencias y comportamientos, no hay margen para un cambio estructural en la sociedad que origine modificaciones en las elecciones de los consumidores, el empleo o las instituciones, y tampoco en la concentración geográfica, los patrones de urbanización y las preferencias tecnológicas, por ejemplo, sobre la base del concepto de las rutinas (Nelson y Winter, 1982)<sup>32</sup>.

En tercer lugar, las evaluaciones neoclásicas de la economía ambiental se encuadran en un marco neoclásico donde existe un único equilibrio que sirve de base para el crecimiento económico. Dadas estas hipótesis, se podrían formular políticas óptimas para reducir las emisiones en el presente y salvaguardar así los recursos ambientales para las generaciones venideras, incluso si no se producen otros cambios a raíz de modificaciones, por ejemplo, en el clima, la tecnología o la estructura laboral. No obstante, estas hipótesis tampoco permiten capturar el nacimiento de entidades cualitativamente diferentes (Saviotti y Gaffard, 2008, pág. 115), que resultan esenciales para el desarrollo económico, en particular cuando está acompañado de desequilibrios ecológicos y ambientales. También es imposible reflejar el aspecto más sobresaliente de la sostenibilidad: los ajustes transitorios (Barker, 2004), los cuales revisten particular importancia en los países en desarrollo que experimentan cambios estructurales, como los latinoamericanos (van Ruijven y otros, 2008)<sup>33</sup>.

## B. Modelos SCM

En esta sección se analizan diversos modelos que explícitamente abordan los cambios estructurales con una mirada clásica en donde el empleo y el valor agregado pasan de un sector de baja productividad a otro de alta productividad. A diferencia de los ejemplos analizados en las secciones

---

<sup>32</sup> Por ejemplo, cuando en los modelos de evaluación integrada se incluyen los cambios en la urbanización y los mercados laborales, se consideran factores exógenos, tal como hicieron O'Neill y otros (2012).

<sup>33</sup> Véase en Scricciu (2007) un análisis bien fundamentado y conciso de las restricciones con las que se topa el modelo de equilibrio general al representar la sostenibilidad.

anteriores, solo se pudo hallar un número limitado de modelos de cambio estructural relativamente disímiles. Dadas las diferencias entre los modelos y la atención puesta sobre todo en los cambios estructurales, a continuación se describe una muestra con mayor detalle.

Sobre la base de hechos estilizados empíricos relativos a la tercerización (véase la sección C), Campiglio (2014) elaboró un modelo para investigar la relación entre un elevado crecimiento económico —encauzado mediante inversiones en una manufactura más productiva— y un mayor bienestar social —representado por un menor nivel de contaminación y menos horas de trabajo—<sup>34</sup>. En este modelo, la inversión pública en infraestructura ejerce influencia en los incentivos que dirigirán las inversiones hacia uno u otro sector, al tiempo que actúa como motor del crecimiento económico y el impacto ambiental.

Se trata de un modelo bastante estándar que comprende dos sectores. Un hogar representativo consume un bien estándar y servicios ecológicos, para lo cual también hace uso de un recurso compartido: el medioambiente. Para maximizar la utilidad, la familia elige el nivel óptimo de consumo de bienes y de oferta de mano de obra. En la economía se producen dos bienes: una manufactura estándar y un servicio verde (con una función de producción agregada). La inversión pública beneficia al bien estándar, pero no al servicio verde. La función de producción del servicio verde solo recurre a la mano de obra, por lo que no hay oportunidad de invertir y mejorar la productividad.

El modelo permite extraer únicamente un par de conclusiones acerca del cambio estructural y su nexo con el bien no productivo. Ello ocurre cuando la relación entre la inversión pública y privada es mayor que el equilibrio a largo plazo: una mayor tasa de inversión pública ejerce un efecto perjudicial en el bienestar, porque aumenta el capital privado y disminuye el recurso común —el medioambiente—. Algo similar ocurre cuando los hogares muestran una preferencia más marcada por el producto manufacturero.

Antoci, Russu y Ticci (2012) estudiaron cómo en los países en desarrollo la dinámica de la sostenibilidad se ve afectada por los cambios estructurales cuando existen recursos naturales que pueden ser explotados por diversos actores con distintos propósitos. Su investigación aborda el problema con que se topan los países que experimentan cambios estructurales solo en forma parcial debido a la explotación de los recursos naturales con fines de renta, lo que acarrea efectos dañinos para el crecimiento económico y la sostenibilidad (López, 2007). Como la atención está puesta en las naciones en desarrollo, en el trabajo se analiza la etapa anterior: la transición del sector primario al secundario. Su modelo también es bastante estándar y representa una economía pequeña y abierta con dos sectores —uno tradicional, basado en el aprovechamiento de los recursos naturales, y un sector manufacturero—, con una empresa representativa para cada uno. Ambos sectores recurren a los recursos naturales para elaborar sus productos. La principal diferencia radica en que el sector tradicional no puede sustituir el capital natural por máquinas, mientras que el sector manufacturero sí, pero hasta cierto punto. El modelo toma en cuenta dos agentes: los ricos —que invierten en capital nuevo— y los pobres, que dependen de un empleo por cuenta propia basado en los recursos naturales o que trabajan para los ricos. Las actividades de ambos grupos repercuten en los recursos naturales, pero al inicio no se realizan conjeturas respecto de qué consecuencia resulta menos sostenible: incluso si los pobres utilizan los recursos naturales en forma directa, las inversiones de capital también pueden aprovechar estos recursos en forma indirecta y con una mayor tasa de uso.

Los cambios estructurales involucran solamente a los pobres: pueden permanecer en el sector tradicional utilizando los recursos naturales o pueden trabajar en el sector moderno a cambio de un

---

<sup>34</sup> Estos hechos estilizados son los siguientes:

- i) el mundo del empleo se embarca hacia la industria de los servicios;
- ii) este cambio se relaciona con una merma de la productividad;
- iii) también guarda vínculos con un aumento de las horas de trabajo en el caso de algunos servicios;
- iv) algunos servicios producen una gran proporción de emisiones, como el transporte;
- v) otros servicios tienen una participación acotada en la producción de emisiones, como la educación, la salud y las industrias creativas; estos también se caracterizan por una baja productividad laboral, un acotado potencial para lograr un mayor crecimiento de la productividad y una creciente participación del empleo, pese a la exigua productividad, y
- vi) la infraestructura puede tener incidencia sobre el desarrollo de diferentes sectores y tecnologías.

salario. Los agentes pueden sentirse atraídos hacia el sector moderno si la remuneración es superior a los ingresos que obtienen por su trabajo autónomo o verse forzados a ingresar a este ámbito si se agotan los recursos naturales. En el sector moderno, los ricos basan su producción en el capital —los recursos naturales— y la mano de obra proporcionada por los pobres. Los recursos naturales se tornan menos abundantes conforme los utilizan ambos sectores (no se realiza ninguna hipótesis acerca de los diferentes efectos). Tras el pago de salarios y los gastos correspondientes, todos los ingresos del sector moderno se reinvierten en nuevo capital físico, pero no se reintegran los recursos naturales.

Los cambios estructurales —agentes pobres que pasan del sector tradicional al moderno— pueden ocurrir a causa de varios cambios exógenos (parámetros): i) una mayor productividad del sector moderno; ii) un mayor impacto ambiental producido por el sector tradicional; iii) un mayor impacto ambiental de parte del sector moderno, y iv) una merma de la explotación máxima que puede resistir el recurso natural (disponibilidad). Estos factores pueden combinarse de diferentes maneras y arrojar distintos resultados:

- i) un cambio estructural empobrecedor: los pobres comienzan a realizar tareas remuneradas, menguan los recursos naturales y aumenta el capital físico, lo que intensifica la desigualdad;
- ii) un cambio estructural positivo: los pobres se traspasan al sector moderno y se incrementan tanto los recursos naturales como el capital físico, y
- iii) un cambio estructural negativo: los pobres pasan al sector moderno y disminuyen los recursos naturales y el capital físico; por ende, todos sufren mayor pobreza.

Estos dos modelos abordan y ejemplifican dos aspectos interesantes del cambio estructural y la sostenibilidad, respectivamente relacionados con la tercerización y la explotación de los recursos naturales en un agrupamiento poblacional con agentes que gozan de diferentes accesos a los recursos, pero no ofrecen datos adicionales acerca de la modelización del cambio estructural. Sin embargo, en los trabajos de Antoci, Russu y Ticci (2012) la elección de distintos agentes depende también del efecto de la economía en el medioambiente: los recursos naturales son dinámicos, pues su disponibilidad y productividad están sujetas a cambios, al igual que los incentivos de quienes trabajan con estos recursos.

Al igual que los modelos computadorizados de equilibrio general, se dan varios casos de retroalimentación entre el diseño de políticas destinadas a acotar la incidencia del sector moderno sobre los recursos naturales y la reducción de las externalidades ambientales, que dependen del efecto que las políticas ejerzan en distintos agrupamientos poblacionales, la inversión de capital y la elección de los trabajadores. Algunas políticas pueden disminuir el crecimiento, mientras que otras tal vez agudicen la desigualdad o menoscaben la sostenibilidad.

Los modelos elaborados por Pasche (2002), Bretschger y Smulders (2012), y van der Meijden y Smulders (2014) utilizan métodos similares. Pasche (2002) analizó cómo los cambios que entraña una transición de un sector más contaminante a uno menos contaminante pueden arrojar luz sobre la relación a corto y largo plazo entre el crecimiento y la sostenibilidad (por conducto del cambio estructural), y si a la larga puede darse una curva de Kuznets. Los investigadores hallaron que los cambios tecnológicos y estructurales solo tienen incidencia a corto plazo sobre la reducción de las emisiones: en última instancia, para recortar la contaminación, la economía deberá converger en un menor consumo o una tasa de crecimiento nulo.

Bretschger y Smulders (2012) estudiaron cómo los cambios sectoriales y la innovación repercuten en el uso de los recursos por medio de un modelo en el que los trabajadores pueden trasladarse entre los sectores, y estos presentan diferentes tasas de innovación. A diferencia de Pasche (2002), estos investigadores concluyeron que los cambios estructurales pueden complementar los cambios tecnológicos en el proceso de búsqueda de la sostenibilidad, incluso cuando para producir energía no se disponga de alternativas viables que reemplacen los recursos no renovables en casos de baja sustentabilidad entre las fuentes energéticas renovables y no renovables. Así, la utilización de recursos naturales para generar energía estimula los cambios estructurales, que junto con la innovación en diferentes sectores, propician el crecimiento económico.

Van der Meijden y Smulders (2014) elaboraron un modelo en el que mostraron que la disponibilidad de tecnologías renovables incentiva las actividades de investigación y desarrollo, lo que contribuye al crecimiento y a la transición de las energías no renovables a las renovables. Sus conclusiones contradicen los modelos donde se supone que una menor disponibilidad de fuentes energéticas debería desincentivar la innovación y encauzar las inversiones hacia otras actividades a causa de las diferencias en los precios.

Pan (2006) amplía el análisis: cubre más de dos sectores con una integración vertical e introduce cambios tecnológicos en un modelo de insumo-producto donde distintos sectores se interrelacionan por medio de coeficientes técnicos. Su investigación aborda dos aspectos del cambio tecnológico. El primero consiste en la creación de nuevas tecnologías en virtud de las actividades de investigación y desarrollo que modifican los coeficientes tecnológicos: se supone que el cambio tecnológico sigue una curva logística respecto del tiempo que representa el ciclo de vida de la tecnología. El segundo comprende la adopción de estas tecnologías: la estructura económica evoluciona a medida que las nuevas tecnologías se comienzan a utilizar en la economía.

En el trabajo se elabora un modelo que solo representa una cara de la economía —la oferta—, que demuestra cómo las inversiones en investigación y desarrollo originan nuevas aportaciones de capital que se extenderán por los sectores. En un comienzo, las nuevas aportaciones conllevarán una pequeña disminución de los insumos utilizados (inicio del ciclo de vida del producto). Con el transcurso del tiempo, conforme se aprende a utilizar las nuevas tecnologías, se inducen cambios estructurales más enérgicos, que entrañan una modificación de los coeficientes tecnológicos. Las nuevas tecnologías surgen de cambios tecnológicos endógenos encauzados mediante inversiones en un modelo dinámico de insumo-producto (resuelto con una programación no lineal).

Este trabajo reviste gran relevancia a la hora de analizar dos facetas fundamentales e interrelacionadas del cambio estructural: el cambio tecnológico y la organización de la producción. El modelo tiene un elevado nivel de agregación y se basa en la hipótesis de una dinámica bastante estilizada del cambio tecnológico, pero representa un paso significativo hacia la integración de los cambios estructurales en los ejercicios de modelización que abordan el uso de los recursos, que en este caso se efectúa mediante coeficientes tecnológicos.

El modelo agregado más exhaustivo que aborda la relación entre el crecimiento, el cambio estructural y la sostenibilidad ambiental es el elaborado por Ayres y van den Bergh (2005). Estos investigadores también se concentraron en la sustitución de los factores productivos e identificaron los tres mecanismos primordiales del crecimiento endógeno que permiten sostener un crecimiento exponencial por medio de ciclos. El primero es el uso de combustibles fósiles: a medida que estos reemplazan la tracción humana, aumentan la productividad, permiten ahorrar tiempo y reducir la mano de obra, bajan los precios, incrementan la demanda y propician un mayor consumo, a la vez que los costos disminuyen conforme aumentan los conocimientos conexos (una simplificación del cambio tecnológico)<sup>35</sup>. Así, el primer mecanismo de crecimiento se basa en la disponibilidad de combustibles fósiles cada vez menos costosos, seguido de un proceso de aprendizaje basado en la experiencia y economías de escala. De hecho, una contracción del consumo de combustibles fósiles puede poner fin al ciclo de crecimiento.

El segundo mecanismo es la división del trabajo y el aprendizaje. La especialización vertical intensifica la productividad mediante el cambio tecnológico, las economías de escala y el aprendizaje práctico, lo que baja los precios y aumenta el consumo. Este mayor consumo debe venir de la mano de un nivel decreciente de saciedad o, en otras palabras, de una innovación en los productos que permita subir las curvas de Engel. Entonces, este segundo mecanismo de crecimiento se basa principalmente en cambios en la organización industrial y en una producción para los mercados finales. Debido a la materialidad de los bienes elaborados en este ciclo, un aumento de la producción también intensifica la presión sobre el medioambiente y el uso de recursos escasos, los que pueden llegar a agotarse.

---

<sup>35</sup> Por ejemplo, la utilización de estos combustibles en la producción de maquinaria y fertilizantes.

El tercer mecanismo consiste en la desmaterialización: el aumento del valor añadido de los productos finales de modo que pueda disminuir la cantidad de bienes elaborados y se inicie así una transición hacia la provisión de servicios que reemplacen dichos bienes. Este mecanismo también se basa en la innovación productiva, pero es más drástico que el segundo mecanismo: una transición hacia la provisión de servicios inmateriales que cumplen las funciones de los productos sustituidos. Para poder generar un crecimiento endógeno sostenido, los nuevos servicios deben crear una nueva demanda.

### **Cambios estructurales**

En síntesis (véanse los cuadros 2 y 3), la mayoría de los modelos de cambio estructural se concentran en la composición sectorial de las economías. Algunos utilizan solo dos sectores —uno contaminante y otro no—, mientras que algunos abordan un amplio número al estilo de los modelos de insumo-producto y los CGE. En el primero de los casos, distintos incentivos inducen cambios en la redistribución de la mano de obra de un sector a otro (cambio estructural). En general, están relacionados con el costo de producción de cada sector, que depende de la escasez relativa del producto, o con las externalidades negativas que ocasiona. Estos modelos abordan los cambios estructurales ocurridos sobre todo en la composición sectorial y, en parte, en la demanda final.

En un par de trabajos se postulan modelos radicalmente diferentes, donde se toman en cuenta otros aspectos del cambio estructural, como la organización industrial y el cambio tecnológico. En lo que concierne a la organización de la producción, Pan (2006) representa en su modelo los cambios en la estructura de insumo-producto, mientras que Ayres y van den Bergh (2005) hacen lo propio con el surgimiento de nuevos sectores intermedios. Respecto del cambio tecnológico, Pan (2006) no trasciende demasiado la dinámica exógena y las innovaciones y las curvas de aprendizaje que permiten ahorrar factores; Ayres y van den Bergh (2005) estudian la desmaterialización y las innovaciones drásticas mediante la modelización del desarrollo de productos radicalmente novedosos.

Dado que estos modelos utilizan sectores agregados, de manera similar a los CGE, no se toman en cuenta las modificaciones en la estructura laboral, sino únicamente los cambios laborales que entrañan el traspaso de un sector a otro, que en algunos casos pueden conllevar mayores o menores ingresos. Se suele prestar escasa atención a la demanda, con excepción de Antoci, Russu y Ticci (2012), que estudiaron la distribución de los ingresos entre dos clases de consumidores, y de Ayres y van den Bergh (2005), que indagaron los niveles de saciedad, pero no los cambios en la estructura de la demanda.

Al igual que en el caso de los modelos IAM y CGE, cuando se tienen en cuenta las instituciones, estas se reducen a meros entornos experimentales alternativos.

## **C. Modelos EMK**

Esta clase de modelo está en plena infancia<sup>36</sup>. En varios trabajos recientes se plantea que los macromodelos keynesianos pueden integrar las cuestiones ecológicas (límites biofísicos) relevantes para los economistas ecológicos en el marco de la macroeconomía, al tiempo que combinan el análisis ecológico con las restricciones de un balance macroeconómico, y viceversa (Jackson, 2009; Jackson y otros, 2014; Rezai, Taylor y Mechler, 2013). Dada la marcada juventud de esta bibliografía, se cuenta con pocos aportes, algunos de los cuales adoptaron la forma de propuestas de modelos futuros. Se dará un pantallazo a los marcos sugeridos por Rezai, Taylor y Mechler (2013), y por Jackson y otros (2014), y se analizará cómo incorporan los cambios estructurales; luego se evaluarán algunos modelos recientes, con la mirada puesta en la incorporación de distintos aspectos de los cambios estructurales.

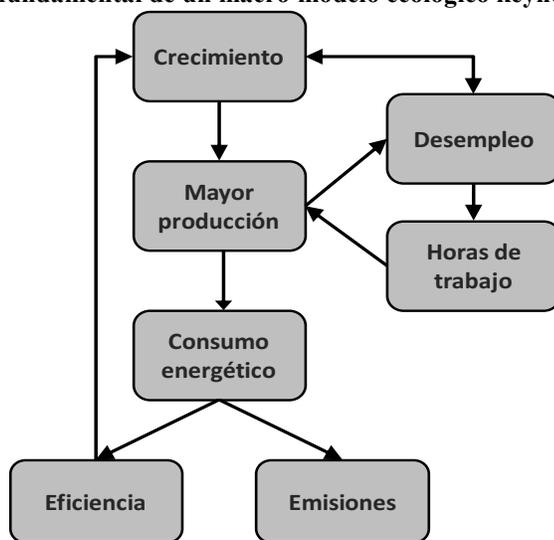
---

<sup>36</sup> No se incluyen aquí los enfoques econométricos que combinan atributos poskeynesianos y de insumo-producto, como el E3MG (Köhler y otros, 2006b) o FIDELIO (Kratena y otros, 2013), porque se los creó principalmente para efectuar estimaciones econométricas.

Tras estudiar las principales limitaciones del modelo IAM, CGE y de otros modelos neoclásicos, Rezai, Taylor y Mechler (2013) hallaron que, al abordar los problemas ecológicos, conviene prestar atención a los cambios en la estructura de las economías en lugar de concentrarse en cambios marginales que pasan relativamente inadvertidos. Plantean que los modelos keynesianos los sirven para abordar algunas de las preocupaciones que desvelan a los economistas ecológicos, como el desempleo, los comportamientos adaptativos y racionalmente limitados, la distribución de los ingresos, los macroefectos de rebote y las hipótesis de decrecimiento (menor consumo)<sup>37</sup>.

Por ejemplo, una de las posibles políticas para abordar tanto el desempleo como la producción sostenible consiste en disminuir el número de horas de trabajo. Los autores sostienen que posiblemente esta decisión traiga aparejados efectos antiintuitivos en el nivel agregado, pues puede ajustar el mercado laboral, reforzar el poder de negociación de los trabajadores y provocar una alza salarial, lo que tal vez estimule a las empresas a aumentar las inversiones de capital y la productividad. A su vez, esto socava la sostenibilidad al incrementar el consumo energético, causa efectos ambiguos en el empleo y aumenta la relación entre el capital y el producto. Rezai, Taylor y Mechler (2013) también advirtieron que puede ocurrir una transición hacia los sectores más productivos, lo que también puede tener repercusiones indeseadas: según estimaciones transfronterizas, una mayor productividad se debe a un mayor consumo energético (60%) y solo una parte a la mayor eficiencia energética<sup>38</sup>. En otras palabras, la eficiencia por sí sola puede mitigar parcialmente el impacto ambiental de una mayor producción. Una de las razones es la existencia de un efecto rebote también en el macronivel, en un marco donde se da un desempleo involuntario, situación que encuentra justificación en un mayor gasto en tecnologías verdes a fin de mejorar la eficiencia energética, que también aumentaría la producción y, por ende, el consumo energético, independientemente de los ingresos de los hogares y el precio de la energía. Este sería el efecto rebote que ocurriría en el micronivel.

**Diagrama 4**  
**Dinámica fundamental de un macro modelo ecológico keynesiano**



Fuente: A. Rezai, L. Taylor y R. Mechler, “Ecological macroeconomics: an application to climate change”, *Ecological Economics*, vol. 85, Amsterdam, Elsevier, 2013.

<sup>37</sup> Entre estas preocupaciones se incluye el desempleo, considerado un resultado del cambio tecnológico, y las presiones salariales, una consecuencia significativa del cambio ambiental y un aspecto relevante de la sostenibilidad.

<sup>38</sup> Véase también en Altomonte y otros (2011) un análisis de la productividad y la eficiencia energética de los sectores manufactureros de cuatro países de América Latina.

En resumen, los investigadores explican el macromodelo ecológico keynesiano (véase el diagrama 4) con esta conjetura: si hay crecimiento, la teoría macroeconómica predice un aumento de la productividad. Toda aceleración del crecimiento de la misma ejercerá múltiples efectos. En primer lugar, si la producción no continúa creciendo, causará desempleo, un elemento crucial en el debate sobre el decrecimiento. La propuesta de reducir las horas de trabajo con el objeto de contrarrestar el desempleo quizá dé frutos pasajeros, debido al crecimiento endógeno de la productividad. Esta situación puede derivar en un crecimiento ulterior de la productividad orientado a atenuar las presiones salariales en el mercado laboral. En segundo lugar, el debate acerca de la energía predice que una mayor productividad laboral entraña un mayor consumo energético, que, a su vez, conduce a un uso más intensivo de los recursos y una producción de emisiones más profusa que se ve compensado por una mejora lo suficientemente marcada en la eficiencia. Y según el debate en torno del efecto rebote, se alcanzará un mayor crecimiento (Rezai, Taylor y Mechler, 2013, pág. 74).

Jackson y otros (2014) también propusieron fusionar los modelos de evaluación integrada con los modelos macroeconómicos keynesianos que prestan atención particular a la demanda. En primer lugar, plantearon la necesidad de incluir la dinámica laboral y, respecto de Rezai, Taylor y Mechler (2013), sugirieron incorporar una multiplicidad de sectores para modelar dicho factor a fin de detectar cambios en la demanda final, una propuesta que no discrepa demasiado de algunos CGE. En segundo lugar, sostienen que también se debe incorporar la distribución de los ingresos, para evaluar, por ejemplo, si un menor crecimiento aumenta la participación del capital en la economía y si propicia una desigualdad más acentuada y un mayor consumo de energía y recursos naturales. En tercer lugar, los investigadores sugieren incluir también la estabilidad financiera, que tiene consecuencias significativas para los hogares y las decisiones relativas a las inversiones, tal como se corroboró durante la reciente crisis.

Si bien suenan prometedores, los modelos actuales de macroeconomía ecológica poskeynesiana y las propuestas resultantes, no ofrecen más elementos que los modelos avanzados CGE y SCM que permiten dar cuenta de los cambios estructurales. Los dos modelos analizados por Jackson y otros (2014) —GEMMA<sup>39</sup> y FALSTAFF<sup>40</sup>— se caracterizan por representar macromodelos de las dinámicas de los sistemas, por estar impulsados por la demanda agregada y por ser compatibles con los flujos y *stocks*. Estos atributos permiten a los autores modelizar la dinámica de realimentación entre los componentes del modelo sin necesidad de recurrir a soluciones de equilibrio, al tiempo que mantienen la estabilidad financiera mediante la congruencia entre flujos y *stocks*. Si bien representan avances significativos en lo que concierne a la modelación de las relaciones entre la economía y el medioambiente, estos modelos están formados por uno o varios sectores, cuya composición o vínculos no cambian con el tiempo, y por una demanda agregada sin diferencias entre distintos consumidores, cuya demanda efectiva dependerá de los ingresos y el *stock* de capital mientras que los cambios demográficos son exógenos.

### **Cambios estructurales**

En resumen, los modelos de macroeconomía ecológica poskeynesiana permiten abordar aspectos del cambio estructural que revisten menor relevancia en los modelos analizados hasta ahora (IAM, CGE y SCM). En los cuadros 2 y 3 se ilustran, en particular, el empleo y el desempleo, así como la dinámica de la demanda, cabe recordar que los modelos se ven impulsados por este factor. La dinámica del empleo, en especial, ha sido objeto de múltiples análisis que abordan el desempleo involuntario, los cambios en sectores con diferente intensidad de mano de obra y remuneración, que también incide sobre la distribución de los ingresos.

En líneas más generales, los modelos EMK se encuadran en un marco que da cuenta de los desequilibrios a corto plazo —y de la dinámica de realimentación en el caso de los modelos de sistemas

<sup>39</sup> Green Economy Macro-Model and Accounts.

<sup>40</sup> Financial Assets and Liabilities in a Stock and Flow consistent Framework.

dinámicos—, que constituyen un componente esencial del cambio estructural. Además, al ser modelizados, los agentes, muestran conductas adaptativas y tienen una capacidad limitada para funcionar en un sistema signado por una gran incertidumbre, sobre todo en lo atinente a los cambios ambientales.

Hasta el momento, los cambios en la integración vertical de los sectores, en la composición industrial —incluidas las fuentes energéticas— y, en general, los cambios tecnológicos gozan de un menor nivel de desarrollo<sup>41</sup>.

Al igual que en los modelos anteriores, no se hace referencia a los cambios o las características institucionales, salvo la puesta en práctica de diferentes políticas y la existencia de desempleo involuntario.

## D. Modelos EABM

Van den Bergh y Gowdy (2000) explican por qué las teorías evolutivas resultan particularmente útiles para estudiar la economía ambiental y la economía ecológica. En primer lugar, en sus hipótesis no suponen la existencia de un único sistema ideal —una situación económica perfecta—, pues los estados de la economía compiten entre sí en diversos niveles y sufren mutaciones. En segundo lugar, estos investigadores no consideran factible la reversibilidad, como en una función estándar de producción agregada, por lo que resulta imposible sustituir los insumos y las tecnologías, y reasignarlos en forma óptima conforme pasan los años. Reemplazar una tecnología es una tarea costosa que requiere tiempo y conocimientos: por ejemplo, algunas no están disponibles continuamente y otras tienen mayor difusión aunque sean inferiores (Arthur, 1989). En tercer lugar, resulta casi imposible cuantificar las variaciones marginales en un sistema que alberga distintas especies. No se puede calcular el valor de una especie que desaparece ni las consecuencias de su extinción: las especies están interconectadas y forman parte de un sistema complejo, por lo que no siempre resulta factible determinar qué sucederá con el resto del sistema cuando se alteren estas relaciones; y podría llegarse a la misma conclusión respecto de las tecnologías, las empresas, los recursos naturales o su productividad. En cuarto lugar, el efecto umbral guarda mayor relevancia que el efecto marginal: debido a la impredecibilidad de los cambios marginales, los sistemas llegan a puntos de inflexión que inducen cambios drásticos, habitualmente irreversibles, como la extinción de una especie, una moda impuesta por alguna conducta nueva o una tecnología totalmente novedosa que empieza a dominar el mercado a causa, por ejemplo, de externalidades de la red. En quinto lugar, en los sistemas ecológicos y económicos se observan procesos evolutivos de selección, mutación o innovación, y retención, que deberían formar parte de la explicación que da cuenta de la dinámica económica (Nelson y Winter, 1982), sobre todo en términos de externalidades positivas o negativas. Por último y como ya se describió, las maniobras orientadas a evitar los riesgos revisten mayor relevancia que la eficiencia económica a la hora de estudiar la relación entre las actividades económicas y el medioambiente.

Así, Van den Bergh y Gowdy (2000) justifican por qué el enfoque evolutivo resulta particularmente útil para explicar el nexo entre el cambio estructural y la sostenibilidad ambiental: una mirada evolutiva establece relaciones entre los cambios en el uso de los materiales y las tendencias a más largo plazo y procesos inciertos que involucran un crecimiento (cambios de nivel), el reemplazo de insumos primarios y secundarios, modificaciones en la estructura sectorial, innovaciones tecnológicas, y cambios en las preferencias y los estilos de vida. Ello entraña la aparición de nuevas actividades —como un diseño industrial verde, la miniaturización y el reciclado— y su incidencia sobre la economía (Ayres, 1998). La evolución de las preferencias o, mejor dicho, la coevolución de

<sup>41</sup> Kemp-Benedict (2014) llevó a cabo un estudio más minucioso, donde formuló un modelo neorricardiano a fin de examinar el papel de los recursos primarios en el crecimiento económico. El modelo representa tres sectores con una integración vertical, cuya contribución al crecimiento se mide en función del alza del costo de los insumos externos a fin de determinar cómo los cambios en la demanda ejercen distintos efectos en los componentes primarios, salariales y en circulación.

las preferencias y la tecnología —en función de las interacciones entre la oferta y la demanda— constituye la fuente primigenia de cambio en un nivel básico, la cual afecta los estilos de vida y los patrones de consumo de materiales y energía (van den Bergh y Gowdy, 2000).

Un sistema complejo se define en virtud de la coevolución de atributos, como las preferencias, y distintas agrupaciones poblacionales (por ejemplo, trabajadores y empresas), el nacimiento de nuevas actividades, la transición hacia tecnologías novedosas que requieren nuevos conocimientos y competencias, una nueva organización productiva, la transformación de bienes en servicios, es decir, algunos de los cambios estructurales analizados al inicio de este trabajo. Este es un sistema de numerosos componentes o partes que interactúan en forma dinámica, donde las microinteracciones dan origen a macropatrones de comportamientos (Beinhocker, 2006, pág. 18). Si un sistema complejo está en evolución, significa que los componentes también se adaptan, mutan, predicen, desarrollan preferencias, se reproducen y ejercen (en las preferencias y las conductas de otros componentes) una influencia imposible de pronosticar sobre la base del comportamiento de esta entidad en forma aislada (Arthur, 2013). Si a estas interrelaciones se suman las tecnologías, las instituciones y el medioambiente —que, a su vez, están formados por entidades interconectadas—, entonces el sistema adquiere una complejidad que no puede reducirse a una dinámica del equilibrio ni a muchas de las otras hipótesis de la economía neoclásica o de la mayoría de las economías estructurales y poskeynesianas postuladas en los modelos analizados hasta este punto (IAM, CGE, SCM y EMK)<sup>42</sup>. Se requieren, en especial, herramientas de modelación que permitan realizar hipótesis acerca de los comportamientos microeconómicos de los agentes, pero no respecto de los macroequilibrios, es decir, donde las propiedades macroeconómicas son el resultado de la conducta de los agentes, de sus interacciones y de su interrelación con el sistema (Tesfatsion y Judd, 2006).

Varios investigadores abordaron la relación entre el crecimiento económico y la sostenibilidad ambiental por medio de modelos informatizados y multiagentes. La mayoría son modelos de agentes múltiples, al estilo de la escuela evolutiva (Nelson y Winter, 1982), que representan la innovación, la difusión de tecnologías verdes o la transición hacia una economía baja en carbono. Según la clasificación de Gerst y otros (2013), se trata por lo general de modelos de cuarto nivel, que abordan los aspectos microeconómicos de los cambios estructurales relacionados, sobre todo, con la innovación, la demanda y las instituciones, y revisten relevancia porque sugieren varias dinámicas que pueden reproducirse en macromodelos. A continuación se efectuará un breve análisis de estos modelos tras pasar revista a los pocos que abarcan las facetas micro y macroeconómicas (modelos del segundo nivel).

## 1. Modelos macro-micro

Debido a la enorme variabilidad y al acotado número de modelos de simulación de agentes, en el caso de la economía ambiental, se analizan pocos ejemplos.

Wolf y otros (2013) elaboraron un modelo basado en los agentes para estudiar las políticas que están orientadas a ecologizar la economía y que resultan ventajosas para todos los involucrados, es decir, las políticas ambientales que disocian el crecimiento económico de la contaminación ambiental y que intensifican el crecimiento de los ingresos al tiempo que reverdecen la economía (Lagom RegiO)<sup>43</sup>. Dejando de lado la hipótesis del crecimiento estable y equilibrado, y dando lugar a senderos de crecimiento alternativos, los autores transforman el problema de la escasez en un

<sup>42</sup> Véase un breve análisis de las diferencias y similitudes entre los modelos neoclásicos y los modelos evolutivos de agentes múltiples en Scrieciu, Rezai y Mechler (2013), y en Giupponi y otros (2013). También se puede consultar un examen más pormenorizado de las principales diferencias entre los modelos multiagentes y de equilibrio general, en particular el modelo de equilibrio general dinámico estocástico (DSGE), en Fagiolo y Roventini (2012).

<sup>43</sup> Jaeger y otros (2011) propusieron políticas similares, pues sostienen que, si en la Unión Europea se elevan las metas de reducción de emisiones al 30%, esta medida podrá aumentar el empleo, mejorar el crecimiento y disminuir las emisiones. Shi y Zhang (2011) elaboraron un modelo con el objeto de plantear cómo los beneficios de la división del trabajo y el comercio internacional pueden fortalecer la ventaja competitiva de los países si se comienzan a desarrollar tecnologías limpias.

problema de coordinación: ¿cómo se pueden lograr patrones de crecimiento más beneficiosos para el medio ambiente y para el crecimiento económico?

El modelo abarca varias regiones y varios sectores, los cuales están integrados verticalmente, y toma en cuenta la demanda final.

Las empresas de cada sector y región pueden comerciar con empresas de los demás sectores o regiones, pero no pueden migrar entre regiones. Las funciones relativas a la producción (nivel corporativo) se basan en la matriz insumo-producto de la economía. Los intercambios comerciales se llevan a cabo entre compañías de distintos sectores y entre empresas y hogares, en el ámbito nacional (intra-regional) o internacional (inter-regional). En cada período, la producción de las empresas debe alcanzar una meta predeterminada: se actualiza el objetivo deseado en función de la rentabilidad (se aumenta la producción, por ejemplo) y se ajusta el inventario para hacer frente a las variaciones en la demanda. Dadas ciertas condiciones, las compañías también pueden acceder al mercado de capitales y acrecentar su capacidad de inversión. La producción no vendida se acumula y pasa a formar parte de las existencias. La información relativa a la meta de producción se utiliza para determinar las necesidades de mano de obra y el costo de la producción, y los precios se actualizan en función de una regla que rige los aumentos.

Una de las empresas contrata como mano de obra a los miembros de hogares heterogéneos, los que pueden migrar entre las regiones. En cada período, los hogares revisan el contrato vigente para optar por permanecer en la empresa o por abandonarla: si renuncian, deben buscar un empleo diferente en otra empresa, aunque probablemente en la misma región. Las compañías también ajustan el número de trabajadores en función de las metas de producción. En cada uno de los períodos, las familias compran productos dependiendo de los coeficientes de consumo de cada bien, y acumulan existencias para consumirlas en los períodos siguientes. Asimismo, modifican sus coeficientes de consumo imitando a los hogares que tienen la mayor utilidad mediante cambios aleatorios.

Las empresas encauzan las innovaciones por tres caminos diferentes. En su forma más simple, la productividad de las empresas aumenta de la mano del aprendizaje basado en la experiencia, modelado en forma indirecta por la inversión en capital, la cual es impulsada por las metas de producción de cada período. Los cambios tecnológicos basados en la imitación se dan en algunas empresas que pueden emular a la que goza de la mayor utilidad de la región. La imitación modifica dos coeficientes: la mano de obra empleada y los insumos en circulación. Además, las empresas canalizan la innovación por medio de una regla de cambio que modifica todos los coeficientes de producción. Asimismo, algunas empresas también copian los precios, incluidos los aumentos, y los salarios de la compañía más eficiente de la región. Y otras empresas modifican los precios y los salarios al azar.

El modelo también incluye la dinámica industrial. Las empresas que no producen, por ejemplo, a raíz de una escasa demanda, salen del mercado y devuelven el capital restante a los propietarios (hogares): las entradas y las salidas se determinan en función de los intereses y la tasa de rentabilidad de las empresas.

Los otros dos actores son el gobierno (uno por región) y el sector financiero. El gobierno computa el número de desempleados y el subsidio correspondiente, y define la base impositiva, que se utilizará para pagarlos en base al salario medio, mientras que la tasa de interés que determina el costo del capital se actualiza utilizando la regla de Taylor.

El impacto ambiental se modela con un procedimiento sencillo, sin ninguna retroalimentación a la economía. Las emisiones dependen del combustible usado en los procesos productivos, que difieren entre los sectores, y los cambios en las emisiones de carbono aumentan en forma exógena, siguiendo una curva logística.

El modelo incorpora una serie de cambios estructurales. La composición sectorial puede mutar con el paso del tiempo a raíz de los cambios tecnológicos y las modificaciones sufridas por la demanda. La metamorfosis de la composición sectorial también entraña cambios en la producción de GEI, mientras que la innovación y la imitación alteran la relación de insumo-producto intersectorial. Aunque las empresas difieren en tamaño, el cual se modifica conforme transcurre el tiempo, no se da una concentración geográfica ni otros cambios en la organización industrial. El cambio tecnológico se modela de forma tal

que, además de los sesgos factoriales y el aprendizaje práctico, se toman en cuenta varios procesos estructurales, como la creación de nuevas tecnologías originadas en la imitación, así como el agrupamiento de tecnologías. Asimismo, se incluyen diversas modificaciones de la estructura laboral, como la distribución de los ingresos —mediante la innovación y la emulación de empresas, la migración de hogares y la búsqueda de empleo—, el desempleo y cambios en la intensidad de la mano de obra contratada por los sectores, aunque este factor no incide sobre el impacto ambiental. El modelo también comprende los cambios estructurales relacionados con la demanda, encauzados mediante la distribución de los ingresos, y la innovación, la imitación de los patrones de consumo. Por último, en el modelo, no se abordan los cambios institucionales.

El segundo modelo micro-macro analizado en este trabajo es el modelo ENGAGE, formulado por Gerst y otros (2013) con el objeto de estudiar (en un marco encuadrado en la teoría de juegos) cómo se llevan a cabo las negociaciones internacionales entre los países y cómo pueden incidir sobre el impacto ambiental. En este caso, la atención se centra en un modelo con un único país y una sola región, que se basa en las investigaciones de Dosi, Fagiolo y Roventini (2010), a las que se agregaron dos componentes: la energía y las emisiones. En síntesis, el sector energético incluye dos tipos de empresas: las que producen energía y las que desarrollan tecnologías para generar energía. Los productores de energía compran tecnologías a quienes las producen, y todas tienen diferentes precios, productividades y sostenibilidades ambientales. Se pueden fabricar tres tipos de tecnologías: las que producen un nivel de emisiones de carbono elevado, las que producen un bajo nivel y las que no producen emisiones (renovables). El reemplazo de tecnologías contaminantes por tecnologías más limpias se basa en los modelos anteriores (Grübler, Nakićenović y Victor, 1999; Ma y Nakamori, 2009; Robalino y Lempert, 2000).

El modelo comprende cinco poblaciones: consumidores (hogares), empresas que venden bienes de consumo, las que producen bienes de capital, las generadoras de energía y las de tecnología energética. Los hogares consumen bienes caracterizados por diferentes intensidades energéticas y ciclos de vida. Los ingresos disponibles se utilizan para adquirir bienes (o reemplazarlos una vez concluida su vida útil) y consumirlos. El costo de consumo depende de la intensidad energética de cada bien y del precio de la energía.

Cada empresa del mercado de los bienes de consumo elabora un producto homogéneo utilizando capital, energía y mano de obra. Las aportaciones de capital efectuadas por la compañía determinan tres costos: la productividad laboral, la energía necesaria para fabricar el producto y la intensidad energética (reflejada en el costo en que debe incurrir el consumidor). A su vez, la empresa determina el nivel de producción deseado sobre la base de existencias pasadas (conducta adaptativa). Luego, determina las inversiones que se efectuarán para adquirir capital nuevo o reemplazar el capital obsoleto, y toma prestados los recursos necesarios. Las empresas fijan un precio usando una regla que rige los aumentos, la cual cambia de la mano de la participación en el mercado (competitividad), factor que a su vez depende del precio y de la intensidad energética de los productos.

Las compañías de bienes de capital elaboran productos que son utilizados como insumos por aquellas empresas que manufacturan productos finales, y definen una serie de atributos que caracterizan al resto de la economía: i) la productividad de las empresas de productos finales; ii) la energía necesaria para elaborar el producto final; iii) la energía necesaria para producir los bienes de capital, y iv) la intensidad energética de los bienes finales. Las empresas del sector de maquinaria invierten en actividades de investigación y desarrollo a fin de producir nuevo capital mediante la imitación y la innovación. Cuando tienen éxito, lo que ocurre en forma aleatoria, la imitación y la innovación aumentan la productividad laboral de los productores finales e intermedios, y reducen la intensidad energética de las fases de producción y de consumo. El costo en que se debe incurrir para producir bienes de capital depende del consumo energético y de la mano de obra utilizada, y el precio se fija en función de un margen comercial.

Los fabricantes de bienes de capital y de productos finales salen del mercado si no tienen participación alguna, y son reemplazados por empresas similares pero con menos restricciones en cuanto a su liquidez.

Para determinar su nivel de producción, las compañías energéticas se basan en estimaciones de su capacidad productiva y de la energía que necesitarán en el período actual para alimentar todas las máquinas, sin pasar por alto la depreciación del capital. Si requieren más energía, invertirán en nuevas tecnologías. En primer lugar, una empresa decide qué tipo de tecnología adquirirá de conformidad con una regla de descuento que toma en cuenta el impuesto sobre las emisiones y la huella de carbono, la productividad de la mano de obra y el consumo térmico de las tecnologías. En segundo lugar, las empresas pronostican el consumo total y la capacidad de extracción de combustibles, y luego calculan el costo de los combustibles. Por último, se estima el costo efectivo que entraña la producción de energía, que se refleja en el precio que deberán pagar los consumidores y los productores.

Las compañías que fabrican tecnologías energéticas ofrecen tres opciones de bienes de capital: los que producen un nivel de emisiones de carbono elevado, los que producen un nivel bajo y los que no producen emisiones. Todas las tecnologías comparten ciertas características: i) la productividad laboral es inherente a la producción energética, que forma parte del costo en que incurren los productores; ii) la productividad de la mano de obra es necesaria para fabricar la tecnología; iii) la intensidad energética es necesaria para producir la tecnología, y iv) el consumo de calor es inherente a la generación energética que afrontan los productores. Las empresas mejoran sus tecnologías en forma lineal por medio del aprendizaje práctico y las actividades de investigación y desarrollo, las que son subsidiadas por el gobierno con los fondos procedentes de la recaudación impositiva con el objeto de alentar la adopción de tecnologías con un nivel de emisiones bajo o nulo. Las innovaciones acrecientan la productividad laboral de quienes fabrican tecnología y energía, y la intensidad energética del proceso de producción tecnológica.

La modelación del mercado laboral se lleva a cabo en forma agregada, una vez que las empresas y los hogares han determinado la demanda total y oferta totales de mano de obra. Los desempleados cobran un subsidio estatal y los salarios aumentan de la mano de la productividad laboral media.

El modelo aborda diversos aspectos del cambio estructural relacionados, principalmente, con la innovación. La relación entre los fabricantes de productos intermedios y finales (insumo-producto) varía con las aportaciones de capital, pero los dos sectores tienen integración vertical. En lo concerniente a la organización industrial, los principales cambios estructurales del modelo tienen un nexo con la modificación del tamaño de las empresas y la concentración del mercado. Se toman en cuenta varios cambios estructurales significativos para la innovación: la incertidumbre inherente al proceso innovador —que depende de las inversiones de la empresa (ventas)— y la inversión en energías limpias, que también tiene una relación endógena con las conductas de la empresa y otros aspectos del modelo, como los ingresos públicos y el empleo, entre otros. Además, en el caso de los bienes de capital, la innovación —que depende de las inversiones de la empresa y la demanda final— modifica la intensidad energética del proceso productivo. La innovación que tiene como objeto nuevos bienes de capital también modifica la intensidad energética de los productos finales, lo que incide sobre la participación de las empresas en el mercado, los precios y, por ende, la distribución en el mercado de productos finales con diferentes intensidades energéticas.

El tercer modelo micro-macro que se examina en el presente trabajo fue elaborado por Desmarchelier y Gallouj (2012) sobre la base de las investigaciones de Dosi, Fagiolo y Roventini (2010), y apunta a estudiar la transición del mundo manufacturero hacia servicios menos contaminantes —el proceso de desmaterialización—. En el modelo se representan cinco poblaciones: empresas fabricantes de productos finales, proveedores de servicios finales, productores de bienes de capital, compañías de servicios empresariales y consumidores. Las conductas de las empresas que elaboran bienes de capital y productos finales, así como la relación entre ellas, se asemejan mucho a las que ya describieron Gerst y otros (2013). Las empresas de servicios van prestando sus servicios en función de la demanda, pues no es posible almacenarlos en *stock*, y utilizan la mano de obra como el único factor de producción, lo que entraña que no se puede mejorar la productividad laboral; sin embargo, las empresas de servicios intermedios ejercen influencia en la productividad de quienes se dedican a la manufactura al mejorar la calidad de sus servicios, que aumenta cuando se invierte en la capacitación de los empleados (el capital humano).

Los consumidores, caracterizados por su heterogeneidad, dividen sus ingresos entre los bienes manufacturados y los servicios, cuya participación varía con el tiempo y sigue el patrón de las curvas de ley de Engel. Esto significa que los hogares con bajos salarios concentran la mayor parte de los gastos en manufacturas, como alimentos, vivienda y prendas de vestir. Conforme suben los salarios, los hogares incrementan el consumo de servicios en forma más que proporcional respecto de los productos manufacturados, y, en el caso de los hogares con altos ingresos, la mayor parte del consumo se dirige a los servicios, como el transporte o el ocio.

Todos los sectores contribuyen a la producción de emisiones de GEI, aunque en diferentes proporciones. Las empresas de manufacturas y de bienes de capital pueden modificar su impacto ambiental al modificar sus aportaciones de capital. La aplicación de un impuesto sobre las emisiones acrecienta el precio final tanto de los bienes como de los servicios, dependiendo de las emisiones de cada empresa, medida que ejerce una presión selectiva sobre las compañías más contaminantes, que son menos competitivas.

El modelo simula la transición laboral del mundo industrial a los servicios, así como otros hechos estilizados. De los resultados se pueden extraer las siguientes tres conclusiones:

- i) la desmaterialización instrumentada mediante los servicios tal vez permita combinar un crecimiento positivo del PIB con un menor incremento de las emisiones de GEI;
- ii) el impuesto ambiental puede propiciar los cambios estructurales en aras de los servicios, y
- iii) este gravamen resulta eficaz solo en el corto plazo, pues a la larga las medidas de reducción dependerán de la capacidad innovadora de la empresa.

El último modelo analizado es menos desagregado que los anteriores, pero reviste relevancia porque es uno de los pocos que abordan los cambios institucionales (Nannen y van den Bergh, 2010). Dicho modelo representa países que deben optar por invertir en una u otra tecnología, donde las alternativas se diferencian por su alto o bajo nivel de emisiones de carbono. Las decisiones de los agentes evolucionan con el tiempo al modificarse y ser objeto de imitaciones, las que ocurren al observar el crecimiento de los vecinos y de la tecnología adoptada en el pasado. A causa de la acotada información con la que cuentan, los agentes cometen errores al recurrir a la imitación, por lo que los responsables de las políticas pueden aprovechar estas fallas para alentar a los agentes a invertir en una de las tecnologías en particular. Este modelo se basa en los trabajos de Nordhaus (1992).

Los agentes pueden invertir en capital, energía fósil o energías renovables, y la inversión total que planifiquen para cada período se dividirá entre estas opciones. Una vez efectuada, no se puede modificar —como en una isocuanta—, aunque los agentes sí pueden invertir en distintas proporciones en el siguiente período. En otras palabras, la composición del *stock* se determina en función de las elecciones previas. Para que el costo de las energías fósiles y renovables sea similar, la inversión en fuentes fósiles paga un impuesto marginal, mientras que en las renovables se paga un costo marginal, porque se trata de una tecnología más moderna. La producción de cada agente se basa en la función Cobb-Douglas, donde se utilizan como insumos el capital y la energía, y las dos fuentes energéticas constituyen sustitutos perfectos.

El calentamiento del planeta se acrecienta junto con el consumo de combustibles fósiles —menos un índice de disminución—, y el bienestar de los agentes depende de la producción y de los impuestos que gravan los combustibles, deducidos los perjuicios causados por el calentamiento. Los agentes están interconectados como en una pequeña red mundial donde existen ciertas preferencias: unos pocos agentes tienen muchas relaciones; la mayoría tienen escasos lazos; todos están interconectados con sus vecinos, y algunos tienen vínculos con agentes lejanos. Los agentes solo pueden emular a aquellos con los que están vinculados. En cada período, los agentes imitan la estrategia de inversión del vecino cuyos ingresos exhibieron el mayor crecimiento, y se les brinda un margen de error que les permite modificar las estrategias al azar. La capacidad de cada agente se mide en función del número relativo de veces que es imitado por los demás.

Los investigadores recurrieron a este modelo para estudiar las consecuencias de tres políticas públicas diferentes: gravar los combustibles fósiles con un impuesto, reducir el costo de las energías

renovables y publicitar las energías renovables dando a los usuarios mayor visibilidad en la red respecto de otros agentes. Aunque el modelo goza de una simpleza relativa, no es posible predecir el efecto de cada estrategia a causa de la interacción entre los agentes, pues estos aprenden en forma colectiva. Según las conclusiones de los autores, las políticas simples que modifican el grado de visibilidad de las tecnologías y la interrelación entre los agentes traen aparejadas repercusiones significativas similares a los resultados de la aplicación de subsidios e impuestos. También demostraron que el monto del gravamen que logra inclinar la balanza de las elecciones tecnológicas depende de la difusión inicial de las tecnologías: el efecto cerrojo (*lock-in*) originado en la imitación de los vecinos probablemente requerirá un impuesto más alto que el necesario para igualar el costo de las dos tecnologías disponibles.

Este modelo, de adopción de tecnologías destinadas a lograr una producción determinada, pasa por alto un gran número de facetas del cambio estructural, pero aborda tres puntos sobresalientes:

- i) las modificaciones de la estructura productiva a raíz de los cambios tecnológicos, también son factores abordados por los modelos anteriores;
- ii) un patrón de dependencia condicionado por el pasado a causa de externalidades de la red, y
- iii) el efecto de las interacciones sociales, es decir, un aspecto de la estructura institucional.

También demuestra que los experimentos de las políticas habituales que dejan de lado la estructura institucional, incluso si son igual de simples que la interacción entre los agentes inversores, tal vez no logren revelar cuáles son las políticas adecuadas<sup>44</sup>.

### **Cambios estructurales**

Los modelos evolutivos con agentes heterogéneos y no totalmente racionales, y con una dinámica que no está en perfecto equilibrio invalidan tres supuestos básicos y permiten analizar los cambios estructurales en función de los cambios en las poblaciones, el estado del sistema (no necesariamente en equilibrio), las estrategias y estructuras tecnológicas irreversibles, y las tecnologías más o menos novedosas.

Los macromodelos formulados hasta el momento con un componente ambiental explotan solo parte de la heterogeneidad que probablemente tendrá incidencia sobre la sostenibilidad ambiental. En cuanto a los sectores, se han analizado los cambios en la composición sectorial, así como las diferentes participaciones en la producción de GEI, actividades de innovación y coeficientes de insumo-producto.

En segundo lugar, la faceta más avanzada del cambio estructural es el cambio tecnológico en función de las actividades de investigación y desarrollo destinadas a obtener tecnologías más limpias; las innovaciones drásticas; los procesos aleatorios, agrupados y no lineales; y la incertidumbre inherente a la invención de nuevas tecnologías.

En tercer lugar, en el caso del mercado laboral, estos modelos abordan cambios ocurridos en el empleo, las diferencias salariales y sectores con intensidades laborales disímiles.

En cuarto lugar, también se modelan los aspectos del cambio estructural relacionados con la demanda: la distribución de los ingresos como un resultado de las elecciones de los hogares y las empresas, y las preferencias de los consumidores, como un coeficiente sectorial de producción, que varían junto con las imitaciones y las mutaciones a que se someten los productos.

Por último, los modelos multiagentes también han integrado, aunque solo de manera parcial, elementos institucionales relevantes para los cambios estructurales, con el énfasis puesto en la estructura de las interacciones entre las autoridades encargadas de la adopción de decisiones.

<sup>44</sup> Se puede obtener un resultado similar al utilizar el modelo formulado por Janssen y de Vries (1998), en el que se introducen a un modelo agregado estándar agentes con distintas miradas del mundo. Los puntos de vista dispares afectan la forma en que se perciben los cambios en el impacto ambiental y la respuesta a las políticas ambientales. A medida que los agentes aprenden unos de otros y cambia la proporción de quienes tienen opiniones diferentes, también varía la reacción ante las políticas ambientales.

Algunos de los aspectos institucionales y microeconómicos del cambio estructural han gozado de un estudio más minucioso que otros por medio de micromodelos centrados en las innovaciones ambientales y las transiciones tecnológicas. A continuación se los examina brevemente.

## 2. Micromodelos de innovación

Popp, Newell y Jaffe (2010) pasaron revista a estudios teóricos y empíricos que abordaron la relación entre el cambio tecnológico y la sostenibilidad ambiental en el micronivel —innovación y difusión de tecnologías favorables para el medioambiente— y en el macronivel —el impacto ambiental de la innovación y la difusión de tecnologías fomentadas por diferentes políticas en materia de innovación y medioambiente—. La mayoría de los estudios examinan la incidencia de las normas que abordan las externalidades ambientales y las ineficiencias del mercado en materia de innovación (como los impuestos, los incentivos a las actividades de investigación y desarrollo, y los marcos reglamentarios), la actividad innovadora de las empresas (patentes e investigación y desarrollo) y la adopción de tecnologías específicas por parte de las compañías a fin de erradicar o reducir las externalidades, así como la información y los costos que obstaculizan dicha adopción. Los trabajos teóricos se concentran en el mal funcionamiento del mercado con el que lidian las empresas a la hora de orientar sus gastos en materia de investigación y desarrollo hacia innovaciones que no terminen beneficiando a algunos mediante un mejor proceso o producto sino a la sociedad en general, por ejemplo, gracias a la reducción del nivel de emisiones.

Varios autores argumentan que el cambio necesario para dejar atrás una economía hipercarbónica y abrazar un modelo hipocarbónico en el que se constriña el riesgo de causar daños ambientales irreparables no puede encauzarse solo por medio de impuestos y subsidios que aborden las externalidades y la innovación, sino que exige una metamorfosis más profunda —o, en otras palabras, cambios estructurales— (Kemp, 1994; Jackson, 2009; Grin, Rotmans y Schots, 2010; van den Bergh, Truffer y Kallis, 2011). Estas transformaciones deberían ocurrir en distintos niveles de la sociedad, dar cuenta de los equilibrios de poder en la adopción de decisiones, la puesta en marcha de cambios científicos y tecnológicos, y propiciar la creación de tecnologías totalmente novedosas. En otras palabras, para plasmar innovaciones no se requieren únicamente gobiernos que dicten normas u ofrezcan subsidios fiscales, o empresas que inviertan en el sector público o en investigación y desarrollo. La innovación también entraña el acceso a los conocimientos, oportunidades y posibilidades de aprovechar la tecnología, una estructura de mercado, una interacción entre científicos e ingenieros y, en general, sistemas innovadores<sup>45</sup>.

Las innovaciones radicales que acompañan las transiciones hacia un mundo sostenible exigen entender cabalmente los incentivos y las conductas de los innovadores, los consumidores y demás actores involucrados<sup>46</sup>. Además de las normas vigentes o que pronto entrarán en vigor, es necesario tomar en cuenta, por ejemplo, los segmentos de mercado, las ventajas de los precursores, la responsabilidad social empresarial, la presión de los consumidores y la presión de los pares (van den Bergh, Truffer y Kallis, 2011).

Van den Bergh, Truffer y Kallis (2011) brindan ejemplos que explican por qué las políticas ambientales —que abordan las reglamentaciones y las externalidades ambientales negativas— y las políticas de innovación —que abordan los incentivos que fomentan la innovación y las externalidades positivas del conocimiento— resuelven diferentes problemas, ofrecen distintos incentivos y deberían ser consideradas herramientas complementarias. En primer lugar, los incentivos que fomentan las energías

<sup>45</sup> Por ejemplo, Johnstone y Stirling (2015) comparan las elecciones en materia energética efectuadas por el Reino Unido y Alemania, y plantean que los criterios tecnológicos no bastan para justificar las trayectorias divergentes seguidas recientemente por los programas nucleares de ambos países.

<sup>46</sup> Blackman y Bannister (1998), entre otros, hallaron que la adopción de una tecnología más limpia de parte de pequeños productores mexicanos se vio propiciada por la presión de la comunidad local. Popp, Hafner y Johnstone (2011) observaron que, en el caso de las plantas de celulosa de varios países, este cambio se originó en la presión ejercida por los consumidores, mientras que Woersdorfer y Kaus (2011) demostraron la importancia de la presión de la comunidad y los pares al momento en que los consumidores se topan con la decisión de adoptar, o no, una fuente de energía renovable.

renovables por sí solos pueden bajar los costos de la energía y, si no vienen de la mano de un marco reglamentario, pueden propiciar un mayor consumo energético, situación que representa la paradoja verde (van der Ploeg, 2011; van der Ploeg y Withagen, 2012). En segundo lugar, la normativa ambiental podría favorecer las innovaciones marginales en lugar de los cambios drásticos necesarios para alcanzar el desarrollo sostenible. En tercer lugar, las normas solamente pueden dar lugar a innovaciones que permitan ahorrar mano de obra—uno de los caminos que conducen a un menor nivel de emisiones—en vez de innovaciones que puedan reducir el consumo de energía o materiales. En cuarto lugar, tal vez resulte ventajoso realizar inversiones ingentes en innovaciones ambientales y ser un precursor en la materia para cosechar los frutos de la futura normativa ambiental, situación conocida como la hipótesis de Porter.

Se han utilizado varios modelos evolutivos para analizar las transiciones radicales hacia tecnologías más sostenibles, por ejemplo el formulado por Safarzyńska, Frenken y van den Bergh (2012), al que se hace referencia en este trabajo y que se utilizó para enumerar las principales facetas del cambio estructural incluidas en los modelos de innovación del cuarto nivel. A continuación se examina la modelación de varios cambios estructurales por medio de algunos ejemplos<sup>47</sup>.

### **Organización industrial**

Mediante un análisis de los regímenes tecnológicos y los cambios en la demanda, Oltra y Saint Jean (2009) estudiaron cómo estos factores inciden sobre la dinámica industrial (entrada y salida de empresas) y la consiguiente creación —o no— de diseños tecnológicos con atributos ambientales.

### **Cambio tecnológico**

Zeppini y van den Bergh (2011) ampliaron el modelo de cerrojo tecnológico de Arthur (1989) e introdujeron la posibilidad de recombinar innovaciones con diferentes trayectorias: las dos tecnologías enfrentadas representan sustitutos limpios y sucios. Hallaron que dicha recombinación puede ofrecer trayectorias híbridas y tecnológicas alternativas, que mejorarán la sostenibilidad ambiental en comparación con las tecnologías sucias.

Windrum, Ciarli y Birchenhall (2009b); y Windrum, Ciarli y Birchenhall (2009a) recurrieron al modelo NK (Kauffman y Levin, 1987) con el fin de modelizar las actividades de investigación y desarrollo llevadas a cabo por las empresas en busca de tecnologías más limpias. Dada la complejidad del ámbito tecnológico, las empresas se empeñan por mejorar suficientemente la tecnología actual para abrazar el próximo paradigma tecnológico. La incertidumbre que caracteriza el futuro de las tecnologías limita las ganancias que las compañías esperan obtener de las innovaciones.

### **Demanda**

En varios modelos se ha estudiado la coevolución de las tecnologías del lado de la oferta, y de las preferencias de los consumidores, por el de la demanda. Windrum, Ciarli y Birchenhall (2009b); y Windrum, Ciarli y Birchenhall (2009a) agrupan a los consumidores en distintas categorías en función de sus ingresos y les asignan preferencias heterogéneas respecto del rendimiento de los bienes, los precios y la contaminación. En materia de consumo, los consumidores emulan las elecciones de los vecinos que gozan de un mayor nivel de ingresos. El modelo muestra que la estrategia de innovación de las empresas orientada hacia bienes más ecológicos dependerá de la distribución inicial de los consumidores y su evolución. No obstante, las tácticas empresariales también tienen incidencia sobre las elecciones de los consumidores y, por ende, sobre su distribución en diferentes clases con distintas preferencias. Por ejemplo, el mercado puede estar dividido en empresas cuyos productos satisfacen las necesidades de diferentes segmentos: los consumidores de ingresos bajos compran sobre todo bienes económicos contaminantes, mientras que los más acomodados abogan por los productos verdes.

---

<sup>47</sup> Cecere y otros (2014) también pasaron revista a las innovaciones ecológicas con una mirada evolutiva, para lo cual consultaron estudios teóricos y empíricos, y centraron su atención, sobre todo, en el papel del patrón de dependencia condicionado por el pasado y el efecto cerrojo, mientras que Faber y Frenken (2009) ofrecen una interesante colección de modelos evolutivos que abordan la economía ambiental, la innovación y las políticas.

**Cuadro 3**  
**La modelación de cambios estructurales específicos según diferentes clases de modelos<sup>a</sup>**

Cambios estructurales	Modelos <sup>b</sup>					
	Sectores	IAM	CGE	SCM	EMK	ABM
<b>Participación en las emisiones de GEI</b>			√	√	√	√
Actividades innovadoras			√	√		√
Costo de reducción						
Relación insumo-producto			√ <sup>c</sup>	√		√
Composición de la mano de obra (competencias verdes)				√	√	
<b>Organización industrial</b>						
Nuevos sectores intermedios				√		
Coefficientes de insumo-producto				√	√ <sup>d</sup>	
Tamaño de la empresa						√
Concentración geográfica						
Dinámica industrial						√
<b>Cambio tecnológico</b>						
Ahorro en los factores	√	√	√			√
Desmaterialización				√		
Tecnologías limpias	√	√	√			√
Trayectorias e innovaciones radicales				√		√
Proceso no lineal y agrupado						√
Trayectos						√
Incertidumbres y efectos indeseados						√
<b>Empleo</b>						
Empleos verdes						
Desempleo					√ <sup>d</sup>	√
Distribución salarial					√ <sup>d</sup>	√
Intensidad de la mano de obra					√ <sup>d</sup>	√
<b>Demanda</b>						
Distribución de los ingresos				√	√ <sup>d</sup>	√
Preferencias de los consumidores			√ <sup>e</sup>			√
Preferencias temporales	√					
<b>Instituciones</b>						
Regímenes de apropiación del conocimiento						
Oportunidades para adopción de tecnologías						√
Acceso a los recursos						
Gobernanza						√
Interacciones sociales						√
Culturas						

Fuente: Elaboración propia.

<sup>a</sup> Este cuadro no constituye una síntesis rigurosa de los trabajos publicados; en cambio, se presenta un pantallazo general de los factores del cambio estructural abordados y se mencionan ejemplos de cambios que revisten relevancia para la sostenibilidad en cada una de estas seis áreas. También cabe notar que los modelos difieren en gran medida, en particular si la comparación se efectúa a partir del SCM hacia la derecha. Véase un análisis más específico de algunos de estos modelos en las secciones pertinentes del capítulo III.

<sup>b</sup> IAM: modelos de evaluación integrada; CGE: modelos computarizados de equilibrio general; SCM: modelos de cambio estructural; EMK: modelos de macroeconomía ecológica (keynesiana); EABM 1: macromodelos evolutivos multiagentes; EABM 2: modelos evolutivos multiagentes (innovaciones).

<sup>c</sup> Aprendizaje basado en la experiencia.

<sup>d</sup> El cambio se incluirá en modelos futuros.

<sup>e</sup> Cambios en los patrones de consumo más que en las preferencias.

Safarzyńska y van den Bergh (2010a) ampliaron este modelo con el objeto de analizar las políticas relativas a la oferta —impuestos— y la demanda —campañas que fomentan las tecnologías verdes—. También hallaron que la probabilidad de avanzar hacia un paradigma más ecológico depende de las preferencias iniciales de los consumidores y de cómo evolucionan con el transcurso del tiempo.

Buenstorf y Cordes (2008) ahondaron y analizaron el papel que el aprendizaje de los consumidores desempeña en la difusión de las tecnologías verdes: demostraron que, como estas tecnologías no son necesariamente mejores en cuanto a su rendimiento; las enseñanzas relativas a valores ambientales más amplios guardan mayor relevancia que las lecciones sobre los atributos ecológicos específicos.

Bleda y Valente (2009) estudiaron el rol del etiquetado ecológico en la demanda de los consumidores y las conductas innovadoras de las empresas.

### **Instituciones**

Safarzyńska y van den Bergh (2010b) analizaron el papel que los cambios institucionales desempeñan en el uso de los recursos naturales y en la ejecución de las políticas ambientales. Por medio de un modelo multinivel de selección grupal, indagaron cómo las formas de poder modifican la distribución de las recompensas entre diferentes grupos y cómo inciden sobre la conducta futura de la economía y las elecciones ecológicas conexas.

Tal como se anticipó, estos micromodelos evolutivos se concentran en aspectos específicos de los cambios estructurales y su nexa con la sostenibilidad ambiental<sup>48</sup>. Sin embargo, presentan una serie de rasgos interesantes que pueden introducirse en los modelos micro-macro.

## **E. Resumen: hacia un marco micro-macro que aborde los cambios estructurales**

En el capítulo II se analizó cómo varios cambios estructurales guardan vínculos con la sostenibilidad del crecimiento y del desarrollo económico. Se presentaron diversos componentes de seis facetas del cambio estructural y se explicó cómo repercuten en los efectos que la producción y el consumo ejercen en el medioambiente. Estos son los siguientes: el cambio sectorial, la organización industrial, el cambio tecnológico, el empleo, la demanda y las instituciones (véase el cuadro 1). También se planteó que muchos de estos cambios estructurales mantienen una estrecha interrelación.

En este capítulo se ha pasado revista a cinco clases de modelos económicos que incorporan un componente ecológico o ambiental, y se examinaron los aspectos del cambio estructural que incluyen, cómo se los aborda y las interrelaciones entre ellos. Los resultados de estos análisis se presentan en los cuadros 2 y 3, los cuales se resumen en los próximos párrafos.

Es acotado el grado en que el modelo IAM refleja las relaciones con los cambios estructurales analizados en el capítulo II. El IAM da cuenta de algunas de las disparidades sectoriales y distingue diferentes fuentes de consumo energético a nivel agregado —por ejemplo, residentes, industria, comercio y transporte—, pero no se endogeniza el crecimiento relativo de estos sectores. El cambio tecnológico se modeliza como un aprendizaje basado en la experiencia y un cambio en una función de producción agregada, sin que exista efecto alguno en la estructura de la economía. Los principales cambios relativos a la demanda son aquellos relacionados con las preferencias.

Los modelos CGE dan cuenta de un mayor número de facetas de la estructura económica, como distintos sectores con disparidades en cuanto a las curvas de aprendizaje, la participación en las emisiones totales, la relación intersectorial de insumo-producto y los patrones de consumo adoptados por consumidores representativos estilizados. No obstante, los principales supuestos —que todos los

---

<sup>48</sup> Solo algunos de estos modelos utilizan agentes múltiples.

mercados se equilibran y que no existen agentes heterogéneos (representativos), interacciones directas y expectativas racionales— restringen gravemente la medida en que estos modelos pueden reflejar los cambios estructurales. Esta clase de modelo permite analizar el efecto de diversas composiciones sectoriales, relaciones y preferencias de los consumidores, pero no logra integrar los cambios estructurales en su dinámica.

Los SCM resultan más explícitos en lo atinente a la interacción intersectorial entre los insumos y los productos, y cómo estos vínculos pueden variar a causa de la conducta de agentes homogéneos y los cambios climáticos. Sin embargo, existen pocos modelos que introducen también cambios en la organización industrial y que abordan los cambios en los coeficientes de insumo-producto y el surgimiento de nuevos sectores intermedios. Las diferencias en la demanda no son más sofisticadas que las ya incluidas en los modelos CGE avanzados.

Algunos economistas de la escuela poskeynesiana recientemente abordaron los aspectos ecológicos y los integraron a marcos macroeconómicos que permiten analizar las relaciones entre las restricciones de la balanza macroeconómica y el cambio ecológico. Hasta ahora, los aportes modelan, en particular, marcos que toman en cuenta aspectos del cambio estructural dejados de lado por los modelos IAM, CGE y EKM, sobre todo en lo concerniente a la dinámica de la demanda y los cambios en la estructura laboral.

Ciertos investigadores han sugerido que para dar cuenta de facetas interrelacionadas del cambio estructural y de sus lazos con la sostenibilidad, es preciso modelizar sistemas complejos en evolución (Costanza y otros, 1993), que incorporen las incertidumbres, un elemento de sorpresa, el aprendizaje, el patrón de dependencia condicionado por el pasado, múltiples equilibrios, un rendimiento subóptimo, el efecto cerrojo y las restricciones termodinámicas (Costanza y otros, 1993, pág. 553).

Al día de hoy, la quinta clase de modelo analizada en este trabajo —el modelo evolutivo— es el mejor para emprender dicha tarea. A fin de modelar los cambios en la estructura económica, se deben representar las microinteracciones entre los agentes, para lo cual, en lugar de recurrir a herramientas agregadas, como la dinámica del sistema, se requieren modelos computables que reflejen incentivos, información, preferencias y comportamientos heterogéneos, entre otros factores. Los modelos evolutivos multiagentes se han utilizado para explorar diversos aspectos del cambio estructural, como la dinámica industrial, el efecto cerrojo y el efecto de expulsión (*lock-out*), la complejidad y la indeterminación del cambio tecnológico, las transiciones tecnológicas, la evolución de las preferencias relativas a la demanda, las relaciones de poder y las interacciones sociales.

Estos micromodelos se concentran en componentes específicos de las transiciones tecnológicas y carecen de un marco macroeconómico integrado. En la bibliografía se han propuesto modelos que abordan o podrían abordar numerosos rostros del cambio estructural (véase capítulo I, sección D y apartado 1), entre los que se incluyen los cambios en la composición sectorial, diversos aspectos del cambio tecnológico (también relacionados con la composición sectorial y con la demanda final), los cambios en la estructura laboral, y las modificaciones en la distribución de los ingresos y las preferencias de los consumidores.

Un aspecto que se pasa por alto en todos los modelos analizados es el cambio institucional, reflejado, por ejemplo, en los problemas de gobernanza, las relaciones de poder, la interacción entre los actores de un mismo sistema de innovación y los regímenes de apropiación del conocimiento.



## IV. Un marco micro-macro que aborda los cambios estructurales

Para entender las interacciones entre distintas facetas del cambio estructural y sus vínculos con la sostenibilidad resulta esencial contar con un marco macroeconómico integrado. Por ello, tras extraer las enseñanzas que dejan las investigaciones analizadas en el capítulo anterior y las ventajas comparativas de distintas escuelas de modelación en lo referente a la inclusión de aspectos específicos del cambio estructural, en este capítulo se delinear brevemente algunas ideas estilizadas para elaborar un marco micro-macro integrado a fin de modelar y analizar las relaciones entre los cambios estructurales y ambientales, y su incidencia sobre el desarrollo sostenible.

Tomando como piedra angular el modelo formulado por Ciarli y otros (2010) —y luego ampliado por Ciarli y Lorentz (2011), y Ciarli (2012)— a fin de integrar el nacimiento de nuevas industrias y la evolución de las preferencias relativas a la demanda<sup>49</sup>. El modelo actualmente aborda cinco aspectos del cambio estructural, a saber:

- i) los cambios sectoriales: surgen nuevos sectores en forma endógena como resultado de las innovaciones llevadas a cabo por las empresas;
- ii) los cambios en la estructura productiva: a medida que las empresas innovan, pasan de un sector a otro; también se modifica el tamaño de las compañías, por lo que se reforma su organización;
- iii) los cambios tecnológicos: las empresas que elaboran productos finales modifican las características de su producción, mientras que las del sector de bienes de capital innovan y así renuevan los productos usados por las empresas de productos finales. El proceso de innovación exhibe atributos de agrupamiento y un patrón de dependencia condicionado por el pasado, por lo que el resultado es incierto, tanto para los bienes finales como los de capital;
- iv) el empleo: los trabajadores desempeñan sus funciones en niveles diferentes de las organizaciones y reciben un salario como contraprestación. Conforme se modifica el tamaño de las empresas, varía la distribución salarial, y

---

<sup>49</sup> Por motivos de espacio, no se brinda una descripción minuciosa del modelo, pero se recomienda consultar los documentos originales.

- v) la demanda: del modelo surgen en forma endógena nuevas clases de consumidores como resultado de los cambios en la organización de las empresas. Las diferentes clases ganan distintos salarios, tareas y preferencias como consumidores, las que evolucionan a medida que cambia la población (a raíz de otros cambios estructurales).

Para estudiar las relaciones entre los cambios estructurales y la sostenibilidad, el modelo necesita incluir más componentes. En primer lugar, se deben incorporar los sectores energéticos e intermedios en un marco de insumo-producto, de manera semejante a los modelos CGE y algunos SCM (véase, por ejemplo, Ayres y van den Bergh, 2005; y Pan, 2006), pero sobre la base de los microfundamentos. Es decir, que deberían modelarse las interacciones insumo-producto interempresariales, como en las investigaciones de Ciarli (2005), y Ciarli y otros (2008). Además, diferentes sectores deberían tener diferentes participaciones en la producción de GEI y distintos costos de reducción, como en los modelos IAM y CGE. Hay tres motivos que explican por qué la relación de insumo-producto debería modelarse a un micronivel, a saber:

- i) la necesidad de endogenizar los cambios en la relación intersectorial y la relevancia de los sectores de la economía como un resultado de los cambios tecnológicos en el ámbito empresarial —cambio en la matriz de insumos—, similar a la propuesta de Wolf y otros (2013), y las opciones de deslocalización (comercio internacional);
- ii) la necesidad de endogenizar las decisiones de las compañías relativas a las compras y las ventas (Ciarli y otros, 2008), el surgimiento de sectores intermedios nuevos en el país o nunca antes vistos en el mundo, motivo que debería servir para incluir variables significativas, como los costos de transacción, la especialización, las capacidades tecnológicas y el tamaño de la empresa, y
- iii) la relación interempresarial de insumo-producto permitiría endogenizar las decisiones adoptadas por las empresas en lo concerniente a su instalación o reubicación en una región determinada, la entrada a diferentes sectores o la salida de ellos, y el papel de los medios de transporte en la producción de GEI.

En segundo lugar, el modelo debería incorporar tanto a los servicios como a la manufactura con el objeto de estudiar la desmaterialización (Ayres y van den Bergh, 2005), tal como hicieron Desmarchelier y Gallouj (2012).

En tercer lugar, el modelo debería hacer lugar a las innovaciones radicales en las fuentes energéticas y los bienes que entrañan un consumo intensivo de combustibles fósiles (véase, por ejemplo, Windrum, Ciarli y Birchenhall, 2009b; y otros trabajos mencionados en el capítulo III, sección D, segundo apartado). Un modelo similar al elaborado por Windrum, Ciarli y Birchenhall (2009b), que representa un panorama tecnológico complejo mediante un pseudomodelo NK (Valente, 2014), permitiría dar cuenta de la vasta incertidumbre inherente al proceso de innovación y los efectos indeseados de las innovaciones ambientales. Además, si hay empresas rivales que producen distintas tecnologías energéticas, se podría representar la evolución de trayectorias tecnológicas dispares, la dependencia histórica de la tecnología energética y los paradigmas tecnológicos bajo cuyo paraguas se puede producir una tecnología (Dosi, 1982)<sup>50</sup>.

En cuarto lugar, el modelo debería representar un mercado laboral realista, como hacen Wolf y otros (2013), de modo que las remuneraciones jerárquicas modeladas por Ciarli y otros (2010) no evolucionen solo en forma mecánica, sino como el resultado de las negociaciones entre el patrón y los empleados. Revisten particular relevancia los cambios en las aptitudes de los trabajadores, sobre todo las competencias verdes; así el modelo permitiría endogenizar los cambios en la participación intersectorial del empleo y la diferente intensidad laboral de la manufactura y los servicios.

---

<sup>50</sup> La exhaustiva modelización de la demanda llevada a cabo por Ciarli y otros (2010) permite estudiar los determinantes tecnológicos y sociales del cambio tecnológico.

En quinto lugar, si bien la demanda resulta muy profusa en Ciarli y otros (2010), el debate llevado a cabo en la bibliografía sobre el modelo IAM sugiere a todas luces la importancia de las preferencias temporales o, en líneas más generales, las ambientales. Es probable que estas se vean afectadas por un abanico de factores, incluidos los ingresos (Greenstone y Jack, 2015) y las características de los productos (Windrum, Ciarli y Birchenhall, 2009b), aunque también es probable que constituyan efectos individuales específicos que ocurren al azar.

En sexto lugar, el punto flaco (por excelencia) de todos los modelos económicos analizados es el rol de las instituciones y su dinámica, además de los escasos intentos por estudiar las oportunidades tecnológicas, la gobernanza y las interacciones sociales, e independientemente de la inclusión de ejercicios de política en los modelos IAM y CGE. Es menester ampliar el alcance del modelo básico a fin de incluir los regímenes de apropiación del conocimiento, el acceso a los recursos ambientales y su gestión, y los cambios en las conductas de los consumidores como resultado de la imitación y las interacciones sociales.

Por último, los modelos IAM y CGE han servido para reunir, aunque de manera incompleta, muchísima información acerca de algunas relaciones vitales entre la economía y el medioambiente, sobre todo en lo atinente a las emisiones de GEI, el consumo energético y su repercusión en el cambio climático. En los modelos más minuciosos, el efecto de la producción y el consumo se relaciona con la composición sectorial, las relaciones comerciales, las fuentes de energía y las canastas de consumo<sup>51</sup>. La restricción con que se topan dichos modelos es que prestan escasa atención a numerosas facetas de la sostenibilidad, que guardan relación con las emisiones de GEI pero que no se limitan a este ámbito, como la biodiversidad, los recursos hídricos y la migración, que no han sido objeto de estudios exhaustivos y requieren mayor investigación (Stern, 2013)<sup>52</sup>. Por el contrario, los modelos EABM, excelentes para modelizar los cambios estructurales, permiten entender solo de manera bastante circunscrita los dispares mecanismos en virtud de los cuales las actividades económicas afectan el medio ambiente. Esta situación brinda inmensas oportunidades de aprendizaje mutuo; sin embargo, conviene mantener las funciones de cambio estructural disponibles en los modelos evolutivos y los EABM, y adquirir un conocimiento más cabal del impacto ambiental en lugar de embarcarse en el proceso inverso.

---

<sup>51</sup> El único macromodelo evolutivo que incluye al menos un número limitado de estas relaciones es el formulado por Gerst y otros (2013).

<sup>52</sup> En este sentido, los modelos IAM y CGE llevan la delantera, porque simplifican la heterogeneidad del aspecto económico.



## V. La modelación de los cambios estructurales y la sostenibilidad: una advertencia

Un modelo constituye una abstracción de la realidad, una herramienta analítica. Si bien en este trabajo se propone un modelo que capta gran parte de la complejidad inherente a la interacción entre diferentes aspectos del cambio estructural y entre la sostenibilidad ambiental, las dinámicas son mucho más complejas e impredecibles de lo que se puede modelar o pronosticar. Es necesario vencer dos grandes obstáculos antes de embarcarse en la modelación y el análisis de hipótesis. Uno de ellos es el que plantea la elección de la estrategia de modelación, mientras que el otro es de naturaleza más general.

El primer escollo: los resultados de cualquier modelo dependerán de las hipótesis que se realicen. Los modelos padecen de muchos puntos flacos, un abanico de parámetros indeterminados y diversas elecciones que ejercen una incidencia significativa sobre los resultados obtenidos. Pero se observan diferencias: los modelos CGE y EABM suelen ofrecer mayor libertad que los macromodelos EMK e IAM, y el modelo intermedio SCM. Por ello, quizá se les atribuya incluso menor fiabilidad, porque los parámetros y las conductas determinan los resultados que arrojan (Pindyck, 2013), situación que resulta engañosa por los siguientes motivos.

El primero es que las hipótesis más realistas exigen una calibración más concienzuda, pero mejoran la fiabilidad del modelo respecto de los supuestos que distan de las conductas observables. El segundo: es posible ir elaborando los modelos evolutivos multiagentes de manera gradual, de modo que cada etapa se pruebe para corroborar su nivel de confianza. En otras palabras, es posible dar a los modelos un formato modular a fin de que cada uno se pueda someter a una prueba empírica y un proceso de verificación. Y el tercero es que la capacidad de evaluar un gran número de hipótesis no representa un punto débil, sino un cúmulo de información. Tal vez refiera al desconocimiento de los resultados futuros y sus probabilidades (Stirling y Scoones, 2009), que también constituye información relevante cuando se requieren adoptar decisiones relativas a las políticas que traen aparejadas consecuencias igual de drásticas que el cambio climático.

El segundo escollo, de naturaleza más general, es que los modelos crean un halo de conocimiento y precisión, que constituye un mero espejismo engañoso (Pindyck, 2013, pág. 860). Si bien es posible abordar con facilidad los puntos de inflexión, las crisis y las transiciones en los modelos evolutivos multiagentes, no sirven para eliminar la incertidumbre knightiana: ningún modelo debería, por mayor precisión y complejidad que ostente, crear una percepción de fiabilidad y recomendar políticas ideales para el largo plazo.

Los autores no sugieren que el modelo propuesto deba utilizarse para predecir los efectos que los distintos patrones de cambio estructural tal ejerzan dentro de 100, 50 o incluso 10 años, pues concuerdan con Rosen y Guenther (2015) en que los modelos deben emplearse para analizar la incidencia en el corto plazo<sup>53</sup>. Como la sostenibilidad es un objetivo o un deber moral, el modelo tiene como propósito indagar cómo las complejas interacciones entre diferentes aspectos del cambio estructural inciden sobre el medio ambiente a fin de formular políticas que sigan trayectorias más sostenibles. La atención puesta en varios cambios estructurales permite elaborar políticas complejas, que tienen efectos diversos en las personas y las empresas, las cuales desempeñan papeles diferentes en el impacto ambiental causado por la producción y el consumo, por ejemplo, las políticas industriales y tecnológicas que vienen de la mano de impuestos sobre la emisión de carbono (van den Bergh, 2013), políticas locales destinadas a modificar los hábitos de los consumidores o el aprovechamiento de la presión social.

En síntesis, no se debe edificar política ambiental alguna únicamente sobre los cimientos que ofrecen los modelos (Pindyck, 2013; Stern, 2013).

---

<sup>53</sup> En todo caso los modelos se pueden utilizar para simular escenarios de largo plazo.

## VI. Políticas

### A. La utilización de modelos para la formulación de políticas sobre sostenibilidad y cambio estructural

La evaluación de políticas a partir de ejercicios teóricos está sujeta a los principales supuestos del modelo y a las funciones examinadas. En el caso de las teorías económicas, no es infrecuente obtener resultados contradictorios a partir de modelos relativamente semejantes que tomaron como punto de partida, hipótesis diferentes: este es también el caso de los modelos ambientales, como se muestra a todas luces en Stern (2013) y en Pindyck (2013). Cuando las discrepancias son más pronunciadas, como entre los modelos más estándares —IAM y CGE— y los menos estándares, como el EABM, no es posible realizar una comparación directa de las evaluaciones de diversas políticas.

Entonces, la equiparación de políticas públicas debe basarse en la comparación de los propios modelos. De hecho, es posible probar los modelos utilizando datos antiguos en relación con los micro y los macro hechos estilizados a fin de determinar la verificabilidad de sus supuestos. Sin embargo, tal como ha quedado demostrado, distintas escuelas de modelación cubren diferentes aspectos de los cambios estructurales y de manera significativamente variada, por lo que cada tipo sirve para evaluar los costos y beneficios de un número acotado de políticas, y no se los puede someter a una comparación directa.

Los modelos IAM y CGE se utilizan, sobre todo, para evaluar los costos y los descuentos, como la merma de la producción económica, y los beneficios —por lo general, un menor nivel de emisiones de GEI— que pueden dimanar de un impuesto determinado. En algunos de los modelos más recientes, una modificación del régimen fiscal también puede inducir a un cambio tecnológico: en el caso del CGE, pueden mutar la participación sectorial en la producción de GEI y las preferencias de los consumidores.

Algunos de los modelos SCM guardan gran similitud con los CGE: representan casos de compensación en el diseño de políticas orientadas a reducir el impacto ambiental provocado por los sectores más contaminantes, lo cual depende del efecto que las políticas ejerzan en diferentes poblaciones, las inversiones de capital, las elecciones de los trabajadores y cómo se modelan dichas elecciones. Los modelos elaborados por Pan (2006), y por Ayres y van den Bergh (2005), con enfoques bastante divergentes, abordan explícitamente las relaciones insumo-producto, y cómo las actividades de investigación y desarrollo pueden cambiarlas; por ende, los instrumentos tienen como diana el grado de complementariedad entre estas actividades y las políticas adoptadas en materia de control de los recursos naturales.

Los modelos EMK introducen facetas ecológicas que no se toman en cuenta en modelos anteriores, por ejemplo, el empleo —considerado tanto una causa como una consecuencia de los cambios ambientales—, la distribución de los ingresos, los efectos rebote en el macronivel, y las hipótesis de decrecimiento basadas en un menor consumo, sobre todo cuando se aborda la evidencia de que las políticas de innovación solo desempeñan un papel secundario en el proceso destinado a alcanzar la sostenibilidad, en especial en el corto plazo. Por ejemplo, demostraron que, al reducir las horas de trabajo con el objeto de combatir el desempleo y acrecentar la sostenibilidad, los efectos pueden llegar a compensar estos cambios y terminar aumentando el consumo energético.

Es probable que una única política que aborde solo un aspecto del cambio estructural, como la adopción de tecnologías no contaminantes, la innovación y los cambios tecnológicos, el consumo, la sustitución de insumos o el empleo, tenga un efecto acotado y acarree varias consecuencias adversas inesperadas, por ejemplo, un efecto rebote, la paradoja verde o una mayor demanda de capital, tal como se analizó en el capítulo III (van den Bergh, Truffer y Kallis, 2011; van den Bergh, 2013). La complejidad de las relaciones entre el cambio climático y los cambios estructurales exige también un conjunto de políticas complejas: como se describió en el capítulo III, sección D, segundo apartado, la puesta en marcha de políticas complementarias en materia de innovación y medio ambiente casi seguramente resultará más exitosa que la adopción de un único instrumento.

Los cambios estructurales analizados en este trabajo (véase el capítulo II, primera sección) están interrelacionados y entrañan transformaciones colosales en la economía. Como también se analizó, su vínculo con el cambio climático no es para nada sencillo y depende de la conducta de un gran número de actores microeconómicos que tienen incentivos diversos y que, ante las políticas, tal vez exhiban reacciones diferentes, pero estrechamente interrelacionadas.

Se ha recurrido a los modelos evolutivos, microeconómicos y multiagentes para estudiar los nexos entre los cambios en las tecnologías ambientales y la dinámica industrial, la compleja e incierta búsqueda de tecnologías, las modificaciones en la composición de la demanda y las preferencias, y los cambios institucionales, entre otros factores. Algunos de estos modelos muestran que la mayor sostenibilidad de la producción guarda un vínculo con transformaciones que quizá tornen necesario ofrecer incentivos diferentes, instrumentar cambios drásticos en las tecnologías, y entender mejor las incertidumbres radicales y llevar a cabo experimentos en este ámbito. Las políticas de innovación también deben abordar la complejidad del problema e involucrar a diversas organizaciones tanto públicas como privadas (Mowery, Nelson y Martin, 2010), al igual que a los consumidores (Hargadon, 2010).

El macromodelo EABM abarca una serie de cambios estructurales y permite analizar distintas políticas complementarias utilizando supuestos más razonables acerca del comportamiento de los agentes económicos, así como detectar los resultados que emerjan de sus complejas interacciones. Por ejemplo, Wolf y otros (2013) investigaron cómo un límite máximo impuesto a las emisiones puede aumentar el nivel de empleo, y Desmarchelier y Gallouj (2012) estudiaron políticas complementarias que abordan las fuentes de contaminación relacionadas con los servicios, tanto para cada servicio en sí como para su movilidad, mientras que Nannen y van den Bergh (2010) indagaron la relevancia de las interacciones entre distintos agentes que optan por diferentes tecnologías, donde las políticas inciden sobre el precio de los combustibles fósiles, el costo de las energías renovables y el conocimiento sobre estas fuentes.

En líneas generales, tal como se analizó en el capítulo V, los modelos pueden resultar de suma utilidad para evaluar hipótesis e investigar la complejidad de las interrelaciones entre las facetas del cambio estructural y un vasto abanico de posibles resultados, pero no deben constituir la piedra angular de las políticas ambientales.

## **B. Evidencia empírica de la adopción de políticas en materia de sostenibilidad**

Si bien en las próximas secciones se extraen las repercusiones para las políticas formuladas en América Latina, aquí se presenta un inventario conciso de los instrumentos de política habitualmente utilizados para contrarrestar el cambio climático, reducir las emisiones, y disminuir la intensidad energética de los procesos productivos y de las actividades relativas al consumo.

Stern, Jotzo y Dobes (2013) marcan una diferencia entre dos grupos de medidas —la adaptación al cambio climático y la mitigación de sus efectos—, el primero de los cuales dio origen a cuantiosos trabajos. En años más recientes, la prolífica bibliografía sobre el papel de la innovación ambiental como un instrumento de las políticas puso en primer plano cómo las innovaciones pueden permitir lidiar con los retos que plantea el cambio climático (véanse los análisis de van den Bergh, 2013; Barbieri y otros, 2015; Nesta, Vona y Nicolli, 2014; y Ghisetti y Pontoni, 2015; así como el uso de una combinación de políticas en Rogge y Reichardt, 2015).

### **1. Instrumentos de mitigación y mecanismos de estímulo**

La principal desventaja con que se topan las políticas de mitigación emana de la normativa, de la aplicación de impuestos sobre las emisiones o de la adopción de regímenes de comercio de derechos de emisión —el mayor de los cuales es el instrumentado por la Unión Europea— que inciden sobre la competitividad internacional. Debido a que estos elementos exigen afrontar un costo para observar las disposiciones vigentes e inflan los gastos de las empresas, estas quizá se sientan menos incentivadas a invertir en tecnologías más ecológicas (van den Bergh, 2013; Stern, Jotzo y Dobes, 2013; Barbieri y otros, 2015). En este sentido, la innovación en tecnologías con menores emisiones de carbono y en general las innovaciones ambientales conllevan, por ejemplo, externalidades positivas que podrían ayudar a alcanzar otros propósitos y no solo la mitigación, como una mayor micro- y macrocompetitividad. Por lo tanto, en la bibliografía se ha prestado especial atención al estímulo creado por las políticas que reglamentan las energías renovables y los incentivos económicos, es decir, las medidas que alientan a las empresas a invertir en energías renovables a raíz de la normativa ambiental o la puesta en práctica de instrumentos económicos.

Como Barbieri y otros (2015) resumen correctamente, la desventaja mencionada está relacionada con la llamada hipótesis de Porter (Porter y van der Linde, 1995), según la cual, en ciertas condiciones la reglamentación ambiental podría propiciar la adopción de innovaciones ambientales y así mejorar la competitividad empresarial y compensar los costos iniciales en que se debe incurrir para cumplir con las disposiciones. A diferencia de la bibliografía tradicional sobre normativa ambiental, estas condiciones se refieren a la presencia de avances tecnológicos dinámicos, al grado de certidumbre y de credibilidad de las normas destinadas a reducir las emisiones, y a un contexto competitivo que aliente a las empresas a abrazar por lo menos innovaciones que den lugar a menores gastos. En lo concerniente a esta condición, en la bibliografía empírica se observa que los instrumentos de política basados en incentivos parecen dar mejores frutos cuanto más competitivo es el mercado.

Con una mirada similar, Nesta, Vona y Nicolli (2014) sostienen que las normas ambientales destinadas a inducir a las compañías a adoptar tecnologías renovables o innovaciones verdes resultan más eficaces en países con mercados energéticos abiertos. Curiosamente, también plantean que las políticas ambientales revisten importancia capital solo para la obtención de patentes ecológicas de alta calidad, mientras que la competencia afianza las de baja calidad. En líneas generales, los impuestos sobre las emisiones podrían tener mayor eficacia que los permisos de tolerancia para lograr estimular las innovaciones, sobre todo porque el costo de los permisos desciende tras la adopción de nuevas tecnologías y así reduce los incentivos para seguir invirtiendo tanto en tecnologías menos contaminantes como en innovaciones ambientales (Barbieri y otros, 2015).

En un análisis reciente de pruebas empíricas de los factores que determinan el éxito de las innovaciones ambientales, Ghisetti y Pontoni (2015) se concentraron, en particular, tanto en la

adopción de normas ambientales como en las actividades de investigación y desarrollo. Por medio de un metaanálisis de una muestra de aportes seleccionados, se halló que, en comparación con los incentivos basados en los precios, por ejemplo, el instrumento que resultaba más eficaz para incentivar la innovación ambiental era la rigurosidad normativa.

Cabe resaltar que la OCDE recientemente elaboró una serie de indicadores de la severidad de las reglamentaciones ambientales —limitados a solo algunos miembros de la organización—, que ordenan diversas políticas según su nivel de rigurosidad con un horizonte a largo plazo (Botta y Koźluk, 2014). Si bien necesariamente entrañan una simplificación de la multidimensionalidad de los instrumentos de las políticas ambientales, en principio permitirían comparar los efectos de diferentes políticas ambientales como una función de su nivel de rigurosidad en contextos nacionales muy disímiles. Los autores esperan que esta labor dé frutos particularmente beneficiosos si se le extiende a un mayor número de países, sobre todo, los latinoamericanos.

## 2. Normativas ambientales: el uso y abuso de la curva MAC

En el contexto de la disociación entre el crecimiento y las emisiones, los responsables de las políticas se topan con la necesidad de evaluar la eficacia de los instrumentos de política que reducen los GEI y otras emisiones, es decir, los costos relativos que acarrearán las herramientas destinadas a reducir las emisiones en comparación con los beneficios obtenidos. Uno de los métodos más populares utilizados para evaluar la eficacia de estas herramientas es la curva MAC.

Barker (2004) proporcionó la siguiente explicación: al utilizar esta curva, el concepto de reducción se define como una merma de las emisiones, al igual que en el caso de los GEI, y tiene asociada una noción —el beneficio marginal de la reducción (MAB)—, que describe el valor de la disminución de los daños causados por las emisiones, es decir, una curva que grafica el costo marginal de la reducción de las emisiones o los beneficios marginales de la reducción de los daños. Es esencial diferenciar claramente estos dos conceptos en los estudios teóricos. Cuando se recurre a un conjunto especial de hipótesis teóricas, ambas curvas resultan idénticas en el nivel de equilibrio óptimo. El costo marginal puede abarcar una amplia gama de costos dispares, tanto públicos como privados e incluso, sociales, que pueden incluir valoraciones de mercado, pero siempre asociados con el proceso de reducción de emisiones. No obstante, salta a la vista que en general no comprenden los costos políticos que entraña la puesta en marcha de medidas y políticas en la materia. Estos costos pueden verse compensados por beneficios ambientales colaterales o una mayor eficiencia lograda a partir de los ingresos tributarios.

La noción de curva de reducción marginal se desprende directamente del concepto de curva MAC. En líneas generales, Barker (2004) plantea que la sociedad puede representar los métodos de reducción de las emisiones como un gráfico (o una curva si es razonable considerar que los costos constituyen una variable continua) ascendente de los costos adicionales inherentes a la reducción. Si se conocen cuáles son los costos que debe solventar la sociedad, incluidas las generaciones venideras, con cada aumento del nivel de los daños (por ejemplo, el beneficio que reportarían menores emisiones) y si se supone que la representación de estos costos también es una función ascendente, entonces se puede escoger el punto de ambas funciones donde los costos incrementales equiparan a los beneficios incrementales. En este punto, es posible calcular la medida en que se deberían reducir las emisiones. Si resulta aceptable que los grupos sociales responsables de las emisiones reaccionen a las señales enviadas por los precios, se puede proponer una política —ya sea un impuesto sobre las emisiones de carbono o un régimen de comercio de derechos de emisión— que eleve el precio de las emisiones en el mercado hasta alcanzar el nivel de los beneficios incrementales que reporta la lucha contra las emisiones. Luego el mercado se encargará del resto.

Como bien lo resume Kesicki (2011), las curvas MAC basadas en las experiencias se obtienen de estimaciones empíricas, efectuadas por el sector público o privado, de los costos de reducción asociados con la adopción de una tecnología específica a fin de lograr disminuciones incrementales de las emisiones de dióxido de carbono, mientras que las curvas MAC basadas en modelos se elaboran a partir de modelos energéticos que simulan las tendencias de los costos relacionados con el dióxido de

carbono y los niveles de emisión correspondientes. Estos modelos suelen basarse en un marco de equilibrio parcial, que minimiza los costos del sistema y maximiza los excedentes de los productores y los consumidores, sobre la base de las hipótesis habituales de conductas optimizadas, y no incluyen detalles específicos sobre la tecnología y su dinámica.

Las curvas MAC usualmente se utilizan para introducir instrumentos basados en incentivos, en general impuestos sobre la emisión de carbono, permisos y sistemas de límites máximos y comercio de derechos de emisión: la curva permite calcular las reducciones vinculadas con la instrumentación de un nuevo impuesto, por ejemplo, basado en la supuesta reacción que tendría una persona ante los incentivos monetarios y no monetarios. Por el contrario, se alega que las curvas MAC ofrecen menor eficiencia a la hora de utilizar instrumentos no basados en incentivos, como las políticas de despliegue, las de investigación y desarrollo, y las de dirección y control (Kesicki, 2011), aunque pueden servir para encauzar hacia las políticas de despliegue información sobre el nivel adecuado de los incentivos fiscales o de las tarifas reguladas a fin de estimular la adopción de tecnologías de emisiones cero o próximas a cero cuando estén disponibles. Las políticas de dirección y control representan básicamente un conjunto de reglamentaciones, por ejemplo normas que rigen ciertas tecnologías o productos, o que prohíben o restringen el uso de tecnologías ineficientes. En líneas generales, estas curvas solo resultan indirectamente beneficiosas en relación con el uso de instrumentos de políticas públicas no basadas en los incentivos.

Como suele ocurrir en el plano económico, no siempre es posible identificar en forma fehaciente o cumplir de manera viable con los preceptos estipulados por las políticas públicas a partir de un marco en equilibrio y las hipótesis conexas basadas en agentes racionales, pese al empeño por realizar una estimación empírica de los daños provocados por el cambio climático y los esfuerzos por ponerles coto (Tol, 2002a y 2002b). Lo mismo sucede en el caso de la curva MAC, tal como explican Kesicki (2011), y Kesicki y Ekins (2012). Si bien resultan atractivas por su sencillez —a menudo excesiva—, las curvas MAC adolecen de varios defectos, incluida la falta de transparencia respecto de las hipótesis principales sobre las que descansan, la incapacidad de incorporar los cambios tecnológicos y la dinámica de los costos, sobre todo cuando los gastos proyectados son inciertos y muy lejanos en el tiempo, y la dificultad de abordar y evaluar los costos sociales o los beneficios secundarios (Kesicki y Ekins, 2012).

En términos más generales, estas curvas no tienen la capacidad intrínseca de tomar en cuenta la dinámica fundamental característica de los requisitos y los procesos de descarbonización de la economía, como también postularon Kesicki y Ekins (2012), que resumieron a la perfección las consecuencias que trae aparejadas el uso de las curvas MAC para los responsables de las políticas públicas: ¿qué significan para ellos? En primer lugar, esta curva no es ni debería considerarse un servicio centralizado de políticas de reducción de las emisiones: es un ejemplo de instrumento simple y útil que permite involucrar a diversas partes interesadas en el debate acerca de la mitigación del cambio climático. Siempre y cuando se le haya otorgado solidez y se hayan tenido en cuenta los inconvenientes que presenta, la curva MAC puede proporcionar un primer pantallazo de los costos de reducción y del potencial que ofrece en un momento determinado. Por lo tanto, estas curvas no deberían ser más que uno de los pilares que sustenten las decisiones en que se fundamentan las políticas públicas.

### 3. Combinación de políticas públicas

A diferencia de lo que ocurre con las curvas MAC, en la prolífica bibliografía sobre las transiciones hacia la sostenibilidad se ha procurado elaborar un marco teórico uniforme que permita formular y evaluar la combinación ideal de políticas. Este concepto entraña cierto grado de complejidad, de modo que resulta esencial evaluar con sumo cuidado todos los elementos que en conjunto lo definen. En comparación con los instrumentos ya descritos —como los impuestos sobre las emisiones, las normas ambientales y las herramientas basadas en incentivos o en otros factores— los trabajos acerca de la combinación de políticas públicas apuntan a profundizar el análisis de su eficacia a fin de tomar en cuenta un mayor número de aspectos no económicos. El examen presentado en Rogge y Reichardt (2015) resulta de interés en muchos sentidos. Los investigadores presentan un marco conceptual interdisciplinario pero unificador con el objeto de lograr una combinación de políticas que trascienda la mera interacción de varios instrumentos. En términos más específicos, solo será posible garantizar

el cambio tecnológico en materia ambiental con mayor certeza que una simple innovación, si esta combinación de políticas se basa en una estrategia amplia a largo plazo que a su vez pueda modificar el nivel de credibilidad, tal como plantearon Stern, Jotzo y Dobes (2013), y Barker (2004).

Los autores preconizan una mirada sistémica en la formulación de políticas (Rogge y Reichardt, 2015) que garantice la uniformidad y la congruencia de la combinación de instrumentos, que suele verse entorpecida por los intereses contrapuestos de los actores involucrados. La aplicación de este concepto unificado en varios casos sectoriales, sobre todo en Alemania, posibilitó un examen más a fondo de los factores que determinan el éxito, que abarcan desde la imposición de un único gravamen sobre las emisiones hasta la adopción de metas a largo plazo en materia de cambio climático y el consiguiente nivel de credibilidad de la estrategia general que, al menos hasta ahora, predomina en el ámbito nacional. Los autores creen que la adopción ulterior de una combinación de políticas en los países de América Latina puede servir para afianzar el proceso de toma de decisiones en materia de políticas.

En el análisis llevado a cabo por van den Bergh (2013), se explica de forma más explícita y exhaustiva por qué un conjunto de políticas ambientales debe comprender instrumentos pertinentes, complementarios y compatibles, un nivel conveniente de diversidad tecnológica y una correcta selección de elementos de fijación de precios, además de plazos adecuados. La normativa ambiental siempre debe estar complementada por políticas que estimulen la innovación ambiental; además, es preciso aplicar instrumentos de ambos grupos a fin de evitar todo efecto rebote y la paradoja verde.

Tal como van den Bergh (2013) lo resume a la perfección, desde el punto de vista conceptual, el problema colosal que se debe resolver para alentar las innovaciones ambientales y completar la transición hacia la sostenibilidad entraña otros dos escollos:

- i) un reto triple: regular las externalidades ambientales negativas, positivas del conocimiento y las negativas del efecto cerrojo, y
- ii) los obstáculos que plantean las fugas de innovación y las salidas de emergencia: un diseño de políticas destinado a evitar los rebotes energéticos, la fuga de carbono, la paradoja verde (las repercusiones de la política climática en los mercados de combustibles fósiles), los cambiantes problemas ambientales (rebote ambiental) y los efectos de expulsión relacionados con la tecnología y el conocimiento.

Ciertamente, no constituye una tarea sencilla, en particular para los países latinoamericanos, por lo que en la próxima sección se recapitulan las ideas y propuestas presentadas hasta el momento.

## **C. Implicaciones para las políticas de América Latina**

Las consecuencias que se describen en esta sección se basan, sobre todo, en un examen de la bibliografía empírica presentada en el capítulo I: no se desprenden de un análisis directo y solo incluyen una acotada evidencia relativa a América Latina.

Entre las cuestiones que demandan una solución más urgente destacan los aspectos relativos al comercio, tal como se analizó en el capítulo I, sección D.

Muradian y Martínez-Alier (2001) (véase también Martínez-Alier, 2012) han propuesto una perspectiva interesante. Argumentan que los productores de recursos naturales deberían crear o formar parte de ecocárteles comprometidos a dedicar un porcentaje de sus ingresos a la internalización de los costos ambientales que acarrear los procesos de extracción y producción, dando por sentado que serán más altos que los costos inherentes a la gestión de desechos. Un plan de acción verdaderamente mundial destinado a hacer frente al cambio climático que también debería basarse en lo que Muradian y Martínez-Alier (2001) describen como un impuesto global sobre el agotamiento de los recursos naturales que logre reequilibrar las asimetrías creadas por el principio de responsabilidad del consumidor.

En líneas más generales, Muradian y Martínez-Alier (2001) abogan por un giro en esta mirada para que se deje de lado la ventaja comparativa basada en el cambio y se haga hincapié en la que proporciona la explotación de los recursos. Los responsables de las políticas deberían revizar la filosofía que sirvió de fundamento a las estrategias de sustitución de importaciones ejecutadas en la década de 1950 y basadas en la hipótesis de Prebisch. En caso de que se corrobore este supuesto, conduciría a un deterioro indefinido de las relaciones de intercambio, una permanente trampa de la especialización y una brecha con el crecimiento cada vez más ancha. Según sostienen algunos investigadores, estos argumentos continúan vigentes hoy en día en lo concerniente a su dimensión ambiental y, si no se brinda un apoyo adecuado al crecimiento de los productos no primarios en países con recursos abundantes, aumentará considerablemente el riesgo de tomar un sendero hacia un desarrollo insostenible.

Esta visión de una senda de desarrollo no sostenible, sin embargo, puede ser engañosa, pues en gran medida pasa por alto la función del cambio tecnológico. Por ejemplo, los avances técnicos de las industrias del sector de los recursos naturales posiblemente podrían disminuir la carga ambiental relacionada con esta especialización en cuanto a los costos de extracción, la intensidad energética, el agotamiento del capital natural, la pérdida de biodiversidad y la participación en la producción total de emisiones de GEI. Es posible sortear parte la trampa de la especialización si se desarrollan sectores cerrados, como los servicios intensivos en conocimientos y especializados en la gestión de los recursos naturales que garanticen algún tipo de mejora o actualización, lo que asegurará al mismo tiempo la desmaterialización de la economía. La medida en que será factible alcanzar esta meta depende de las interacciones entre diferentes aspectos del cambio estructural, que es menester comprender desde el punto teórico (véase el capítulo II).

En líneas generales y a modo de una reflexión preliminar sobre las políticas que se adoptarán en América Latina en materia de cambio estructural, únicamente sobre la base de la evidencia empírica analizada en este trabajo, se efectúan las siguientes recomendaciones:

- i) la ventaja comparativa en el ámbito de los recursos naturales y las actividades primarias no debería ser explotada sino aprovechada como una plataforma para lograr un crecimiento impulsado por las exportaciones al tiempo que se diversifica la economía con la mirada puesta en servicios ecológicos de altas calificaciones y especializados en estos recursos;
- ii) tal vez ya no sea viable migrar de una industria basada en los productos básicos y los recursos obtenidos mediante procesos de extracción hacia actividades de transformación con un consumo intensivo de materiales y energía, sobre todo en un contexto donde impera la hipótesis del paraíso de la contaminación, y
- iii) para eludir las trampas de especialización inherentes a las situaciones descritas anteriormente, los encargados de formular las políticas deben actuar en tres niveles diferentes, a saber:
  - debe favorecerse a los eslabonamientos regresivos con los servicios muy calificados en calidad de proveedores especializados de las industrias que utilizan los recursos naturales, en particular, para garantizar una modernización tecnológica que abra la puerta hacia procesos de extracción y producción más limpios;
  - debe garantizarse que la educación pública superior esté preparada para capacitar a un número creciente de gerentes de operaciones, ingenieros y científicos especializados en asuntos ecológicos y recursos naturales que puedan atender a los principales sectores económicos en el ámbito de los recursos naturales, y
  - debe asegurarse de que a largo plazo se alcance un desarrollo adecuado de estas calificaciones especializadas en el plano nacional con el objeto de exportarlas o de ingresar a segmentos de gran valor agregado de las cadenas de valor mundiales en la industria de los servicios.

La mayoría de estas implicaciones se basan en investigaciones empíricas que se concentran en una única faceta del cambio estructural y, en general, en un único indicador de la sostenibilidad

ambiental. Por ende, si bien resultan iluminadoras porque permiten ver los árboles, tal vez no dejen ver el bosque. En particular, quizá no ofrezcan la posibilidad de entablar algún vínculo entre un aspecto aislado del cambio estructural y las facetas que se deberían tener en cuenta ya que probablemente traerán aparejados diferentes efectos en la sostenibilidad ambiental.

A fin de dar cuenta de dicha complejidad, se recomienda desarrollar modelos que endogenicen diversos aspectos conexos de los cambios estructurales, sobre la base de los conocimientos obtenidos a partir de la evidencia empírica (véase el capítulo II).

Se sugiere recurrir a modelos evolutivos complejos con una heterogeneidad de agentes (modelos multiagentes), que ofrezcan el marco y la flexibilidad que permitan modelizar unos cuantos aspectos interrelacionados del cambio estructural y analizar su incidencia relativa sobre la sostenibilidad ambiental (véase el capítulo II).

No obstante, dados los diversos grados de libertad característicos de estos modelos, a la hora de elaborarlos también conviene prestar atención a varios factores y recomendaciones:

- i) formular hipótesis creíbles y comprobables en el micronivel;
- ii) utilizar un enfoque modular, de modo de poder evaluar por separado las virtudes de diferentes módulos;
- iii) adoptar una mirada transdisciplinaria, es decir, en colaboración con otros expertos en ciencias sociales y naturales a fin de modelar conductas sociales y las relaciones con los sistemas ecológicos, respectivamente;
- iv) verificar en forma empírica tanto los supuestos como los resultados, y
- v) analizar el comportamiento del modelo configurando los parámetros para distintos niveles y diferentes realidades.

Por último, es recomendable utilizar primero los modelos para análisis a corto plazo si esto resulta factible (véase el capítulo V). Incluso los modelos evolutivos complejos, que conllevan incertidumbres y puntos de inflexión, se deben aprovechar para entender los cambios a corto plazo. Conviene que los encargados de formular las políticas introduzcan en estas elementos de incertidumbre y una pluralidad de resultados (Stirling, 2012).

## VII. Conclusiones

En este trabajo se pasó revista a la bibliografía teórica y empírica donde se indaga el nexo entre los cambios estructurales y la sostenibilidad. Se definió el concepto de sostenibilidad en términos muy generales y se focalizó la atención en la sostenibilidad ambiental. También se investigaron diversas facetas interrelacionadas del cambio estructural: los cambios en la composición sectorial de las economías (sobre todo, la transición hacia los servicios), los avances tecnológicos, la organización industrial (en particular, el comercio), el empleo, la demanda y las instituciones. Asimismo, se compararon distintos enfoques teóricos y empíricos que se pueden adoptar a la hora de estudiar la sostenibilidad —como la economía ambiental, la economía ecológica, la ecología política, la economía laboral y la economía de la innovación— y diversas opciones de modelización, como los modelos IAM, CGE, los enfoques estructurales, los modelos evolutivos y los macroeconómicos keynesianos.

En los primeros capítulos, se pasó revista selectiva a la evidencia empírica que corrobora la validez de la curva ambiental de Kuznets y de la hipótesis del paraíso de la contaminación; la descomposición estructural de las causas de la modificación de la intensidad energética agregada mundial y nacional en función de los cambios estructurales sectoriales y los avances tecnológicos; el vínculo entre la tercerización y el descenso de la intensidad energética; y el nexo entre el comercio y la equidad del intercambio ecológico.

En la bibliografía se hallan variadas pruebas de la existencia (sobre todo en los países desarrollados) de una relación entre el crecimiento económico, por un lado, y la intensidad de la energía y de las emisiones, por el otro, que se puede graficar en forma de U, mientras que las naciones en transición y en desarrollo suelen exhibir un patrón en forma de N. La evidencia general demuestra una convergencia en cuanto a la reducción de la intensidad energética (o un aumento de la eficiencia energética), aunque también en líneas generales se deben a un efecto tecnológico intrasectorial. Si bien en promedio y en términos agregados la tercerización dio lugar a cierta disminución de la intensidad energética, este efecto tiende a ser más exiguo que el beneficio potencial que podría obtenerse, es decir, el que se habría alcanzado si la totalidad de los servicios hubieran logrado mayores avances tecnológicos y, por ende, un mejor rendimiento. Como ya se explicó, si en este caso se toma en cuenta un aspecto más complejo del cambio estructural, sería posible obtener una imagen más nítida que la presentada en este trabajo. Por último, se deben abordar con suma seriedad los aspectos relativos al comercio y la equidad, no solo para luchar contra el cambio climático en el plano mundial, sino también para moldear el cambio estructural de forma tal que la sostenibilidad ambiental venga acompañada del pleno empleo, sobre todo en los países en desarrollo.

En la segunda parte de este trabajo, se esgrimen los argumentos teóricos que explican por qué conviene modelar las relaciones entre distintas facetas del cambio estructural para entender más cabalmente los nexos con la sostenibilidad. En lo que concierne a estas facetas, se identificaron seis aspectos generales. Sobre la base de una serie de componentes y cambios relevantes para cada aspecto, se pasó revista a ejemplos de distintas clases de modelos: el modelo IAM de equilibrio parcial y los modelos CGE, SCM, EMK y EABM.

También se demostró que los modelos evolutivos multiagentes abordan un gran número de cambios estructurales, pero presentan puntos flacos a la hora de modelar la interacción con el medioambiente. A partir de un fructífero modelo de crecimiento y los cambios estructurales formulado por Ciarli y otros (2010), se procuró endogenizar una serie de aspectos y componentes y realizar una modelación meticulosa de los vínculos con la sostenibilidad ambiental. Si se toma prestada la terminología típica de la economía neoclásica, esto se asemeja a pasar de modelos parciales del cambio estructural a modelos generales donde se tienen en cuenta los efectos ecológicos y ambientales.

Finalmente, sobre la base de análisis teóricos y empíricos se resumieron las opciones de política examinadas en investigaciones teóricas y se postularon algunas implicaciones para las políticas a partir de la literatura empírica.

## Bibliografía

- Abernathy, W. y J.M. Utterback (1978), "Patterns of industrial innovation", *Technology Review*, vol. 80, N° 7.
- Acemoglu, D. y otros (2012), "The environment and directed technical change", *American Economic Review*, vol. 102, N° 1, Nashville, Tennessee, American Economic Association.
- Ackerman, F. y E. Stanton (2012), "Climate risks and carbon prices: revising the social cost of carbon", *Economics. The Open-Access, Open-Assessment E-Journal*, vol. 6.
- Ackerman, F., E. Stanton y R. Bueno (2013), "ERED: a new model of climate and development", *Ecological Economics*, vol. 85, Amsterdam, Elsevier.
- Ackerman, F. y otros (2009), "Imitations of integrated assessment models of climate change", *Climatic Change*, vol. 95, N° 3, Springer.
- AIE (Agencia Internacional de la Energía) (2009), "Ensuring green growth in a time of economic crisis: the role of energy technology", Siracusa.
- Altomonte, H. y otros (2011), "La dinámica del consumo energético industrial en América Latina y sus implicancias para un desarrollo sostenible", *Revista CEPAL*, N° 105 (LC/G.2508), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Ang, B.W., A.R. Mu y P. Zhou (2010), "Accounting frameworks for tracking energy efficiency trends", *Energy Economics*, vol. 32, N° 5, Amsterdam, Elsevier.
- Ang, B.W., H.C. Huang y A.R. Mu (2009), "Properties and linkages of some index decomposition analysis methods", *Energy Policy*, vol. 37, N° 11, Amsterdam, Elsevier.
- Antoci, A., P. Russu y E. Ticci (2012), "Environmental externalities and immiserizing structural changes in an economy with heterogeneous agents", *Ecological Economics*, vol. 81(C), Amsterdam, Elsevier.
- Arrow, K. y otros (1995), "Economic growth, carrying capacity, and the environment", *Ecological Economics*, vol. 15, N° 2, Amsterdam, Elsevier.
- Arthur, W.B. (2013), "Complexity economics: a different framework for economic thought", *SFI Working Paper*, N° 2013-4-2012, Santa Fe Institute.
- \_\_\_\_\_ (1989), "Competing technologies, increasing returns and lock-in by historical events", *The Economic Journal*, vol. 99, N° 394, Wiley.
- Arto, I. y otros (2014), "The game of trading jobs for emissions", *Energy Policy*, vol. 66, Amsterdam, Elsevier.
- Autor, D.H., F. Levy y R.J. Murnane (2003), "The skill content of recent technological change: an empirical exploration", *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 118, N° 4, Oxford University Press.
- Ayres, R.U. (2008), "Sustainability economics: where do we stand?", *Ecological Economics*, vol. 67, N° 2, Amsterdam, Elsevier.
- \_\_\_\_\_ (1998), "Industrial metabolism: work in progress", *Theory and Implementation of Economic Models for Sustainable Development*, J.C. van den Bergh y M.W. Hofkes (eds.), Springer.

- Ayres, R.U. y J. van den Bergh (2005), –A theory of economic growth with material/energy resources and dematerialization: interaction of three growth mechanisms”, *Ecological Economics*, vol. 55, N° 1, Amsterdam, Elsevier.
- Baldwin, R. y J. Lopez-Gonzalez (2013), –Supply-chain trade: a portrait of global patterns and several testable hypotheses”, *NBER Working Paper Series*, N° 18957, Cambridge, Massachusetts, National Bureau of Economic Research.
- Barbieri, N. y otros (2015), –A survey of the literature on environmental innovation based on main path analysis”, *SEEDS Working Paper*, N° 7/2015.
- Barker, T. (2004), –The transition to sustainability: a comparison of general-equilibrium and space-time-economics approaches”, *Working Paper*, N° 62, Tyndall Centre for Climate Change Research.
- Baumol, W.J. (1967), –Macroeconomics of unbalanced growth: the anatomy of urban crisis”, *American Economic Review*, vol. 57, N° 3, Nashville, Tennessee, American Economic Association.
- Beinhocker, E.D. (2006), *The Origin of Wealth: Evolution, Complexity, and the Radical Remaking of Economics*, Boston, Harvard Business School Press.
- Berg, M. (2002), –From imitation to invention: creating commodities in eighteenth-century Britain”, *Economic History Review*, vol. 55, N° 1, Wiley.
- Blackman, A. y G.J. Bannister (1998), –Community pressure and clean technology in the informal sector: an econometric analysis of the adoption of propane by traditional Mexican brickmakers”, *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 35, N° 1, Amsterdam, Elsevier.
- Bleda, M. y M. Valente (2009), –Graded eco-labels: a demand-oriented approach to reduce pollution”, *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 76, N° 4, Amsterdam, Elsevier.
- Böhringer, Ch. y A. Löschel (2006), –Computable general equilibrium models for sustainability impact assessment: status quo and prospects”, *Ecological Economics*, vol. 60, N° 1, Amsterdam, Elsevier.
- Bosetti, V. y otros (2009), –Optimal energy investment and R&D strategies to stabilize atmospheric greenhouse gas concentrations”, *Resource and Energy Economics*, vol. 31, N° 2, Amsterdam, Elsevier.
- Botta, E. y T. Koźluk (2014), –Measuring environmental policy stringency in OECD countries”, *OECD Economics Department Working Papers*, N° 1177, Paris, OECD Publishing.
- Bottazzi, G. y M. Grazzi (2010), –Wage-size relation and the structure of work-force composition in Italian manufacturing firms”, *Cambridge Journal of Economics*, vol. 34, N° 4, Oxford University Press.
- Boulanger, P.-M. y T. Bréchet (2005), –Models for policy-making in sustainable development: the state of the art and perspectives for research”, *Ecological Economics*, vol. 55, N° 3, Amsterdam, Elsevier.
- Bowles, S. (1998), –Endogenous preferences: the cultural consequences of markets and other economic institutions”, *Journal of Economic Literature*, vol. 36, N° 1, Nashville, Tennessee, American Economic Association.
- Bretschger, L. y S. Smulders (2012), –Sustainability and substitution of exhaustible natural resources”, *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 36, N° 4, Amsterdam, Elsevier.
- Brown, Ch. y J. Medoff (1989), –The employer size–wage effect”, *Journal of Political Economy*, vol. 97, N° 5, Chicago, University of Chicago Press.
- Brynjolfsson, E. y A. McAfee (2014), *The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies*, Nueva York, W.W. Norton & Company.
- Buenstorf, G. y Ch. Cordes (2008), –Can sustainable consumption be learned? A model of cultural evolution”, *Ecological Economics*, vol. 67, N° 4, Amsterdam, Elsevier.
- Campiglio, E. (2014), –The structural shift to green services: a two-sector growth model with public capital and open-access resources”, *Structural Change and Economic Dynamics*, vol. 30, Amsterdam, Elsevier.
- Capros, P. y otros (2013), –GEM-E3 model documentation”, *JRC-IPTS Working Papers*, N° JRC83177, Institute for Prospective and Technological Studies.
- Cecere, G. y otros (2014), –Lock-in and path dependence: an evolutionary approach to eco-innovations”, *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 24, N° 5, Springer.
- Chang, H.-J. (2011), –Institutions and economic development: theory, policy and history”, *Journal of Institutional Economics*, vol. 7, N° 4, Cambridge University Press.
- Chenery, H. y otros (1986), *Industrialisation and Growth: A Comparative Study*, Nueva York, Oxford University Press.
- Ciarli, T. (2012), –Structural interactions and long run growth: an application of experimental design to agent based models”, *Revue de l'OFCE*, vol. 124, N° 5, Paris, Presses de Science Po.
- \_\_\_\_\_ (2005), –A Study of Industrial Development from an Evolutionary Perspective. The Case of Costa Rica and a Simulation Model for the Analysis of Micro-Macro Interactions”, tesis.

- Ciarli, T. y A. Lorentz (2011), "Product variety and economic growth. Trade off between supply and demand dynamics", Max Planck Institute of Economics, inedito.
- Ciarli, T. y M. Di Maio (2014), "Theoretical arguments for industrialisation-driven growth and economic development", *African Industrial Development and European Union Co-operation. Prospects for a Reengineered Partnership*, F. Matambalya (ed.), Routledge.
- Ciarli, T. y otros (2010), "The effect of consumption and production structure on growth and distribution. A micro to macro model", *Metroeconomica*, vol. 61, N° 1, Wiley Blackwell.
- \_\_\_\_\_ (2008), "Technological change and the vertical organisation of industries", *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 18, N° 3, Springer.
- CMMAD (Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo) (1987), *Nuestro futuro común*, Oxford University Press.
- Cole, H.S.D. y otros (eds.) (1973), *Thinking about the Future: A Critique of "The Limits to Growth"*, Londres, Sussex University Press.
- Cole, M.A. (2004), "Trade, the pollution haven hypothesis and the environmental Kuznets curve: examining the linkages", *Ecological Economics*, vol. 48, N° 1, Amsterdam, Elsevier.
- Consoli, D. y otros (2015), "Do green jobs differ from non-green jobs in terms of skills and human capital?", *SPRU Working Paper Series*, N° 16, Universidad de Sussex.
- Costanza, R. y otros (1993), "Modeling complex ecological economic systems: toward an evolutionary, dynamic understanding of human and nature", *BioScience*, vol. 43, N° 8, Oxford University Press.
- Csereklyei, Z., M. Rubio Varas y D.I. Stern (2014), "Energy and economic growth: the stylized facts", *CCEP Working Papers*, N° 1417, Canberra, The Australian National University.
- Desmarchelier, B. y F. Gallouj (2012), "Endogenous growth and environmental policy: are the processes of growth and tertiarization in developed economies reversible?", *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 23, N° 4, Springer.
- Dierdorff, E. y otros (2009), "Greening of the world of work: implications for O\*NET-SOC and new and emerging occupations", Raleigh, National Center for O\*NET Development.
- Dietz, S., C. Hepburn y N. Stern (2008), "Economics, ethics and climate change", *Arguments for a Better World: Essays in Honor of Amartya Sen*, K. Basu y R. Kanbur (eds.), vol. 2, Oxford University Press.
- Dietzenbacher, E. y B. Los (1998), "Structural decomposition techniques: sense and sensitivity", *Economic Systems Research*, vol. 10, N° 4, Taylor & Francis.
- Dinda, S. (2004), "Environmental Kuznets Curve hypothesis: a survey", *Ecological Economics*, vol. 49, N° 4, Amsterdam, Elsevier.
- Dosi, G. (1982), "Technological paradigms and technological trajectories: a suggested interpretation of the determinants and directions of technical change", *Research Policy*, vol. 11, N° 3, Amsterdam, Elsevier.
- Dosi, G., G. Fagiolo y A. Roventini (2010), "Schumpeter meeting Keynes: a policy-friendly model of endogenous growth and business cycles", *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 34, N° 9, Amsterdam, Elsevier.
- Dreyfus, M. y W.K. Viscusi (1995), "Rates of time preference and consumer valuations of automobile safety and fuel efficiency", *Journal of Law and Economics*, vol. 38, N° 1, Chicago, University of Chicago Press.
- Edenhofer, O. y otros (2010), "The economics of low stabilization: model comparison of mitigation strategies and costs", *The Energy Journal*, vol. 31, número especial.
- Enkvist, P.-A., T. Nauclér y J. Rosander (2007), "A cost curve for greenhouse gas reduction" [en línea] <http://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability-and-resource-productivity/our-insights/a-cost-curve-for-greenhouse-gas-reduction>.
- Faber, A. y K. Frenken (2009), "Models in evolutionary economics and environmental policy: towards an evolutionary environmental economics", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 76, N° 4, Amsterdam, Elsevier.
- Faber, A., A.M. Idenburg y H.C. Wilting (2007), "Exploring techno-economic scenarios in an input-output model", *Futures*, vol. 39, N° 1, Amsterdam, Elsevier.
- Fagerberg, J.E., S. Laestadius y B.R. Martin (2015), "The triple challenge for Europe: the economy, climate change and governance", *Working Papers on Innovation Studies*, N° 20150422, Universidad de Oslo.
- Fagiolo, G. y A. Roventini (2012), "Macroeconomic policy in DSGE and agent-based models", *Revue de l'OFCE*, vol. 124, N° 5, París, Presses de Science Po.
- Fisher, A. (1939), "Production, primary, secondary and tertiary", *Economic Record*, vol. 15, N° 1.
- Florax, R., H. de Groot y P. Mulder (2011), *Improving Energy Efficiency Through Technology: Trends, Investment Behaviour and Policy Design*, Cheltenham, Edward Elgar Publishing.

- Freeman, Ch. (1996), "The greening of technology and models of innovation", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 53, N° 1, Amsterdam, Elsevier.
- Freeman, Ch., J. Clark y L. Soete (1982), *Unemployment and Technical Innovation: a Study of Long Waves and Economic Development*, Londres, Frances Pinter.
- Galeano, E. (1980), *Las venas abiertas de América Latina*, Ciudad de México, Siglo Veintiuno Editores.
- Galor, O. y O. Moav (2000), "Ability-biased technological transition, wage inequality, and economic growth", *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 115, N° 2, Oxford University Press.
- GEA (2012), *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*, Laxenburg, International Institute for Applied Systems Analysis.
- Gereffi, G. y K. Fernandez-Stark (2010), "The offshore services value chains: developing countries and the crisis", *Policy Research Working Papers*, N° 5262, Washington, D.C., Banco Mundial.
- Gerst, M. D. y otros (2013), "Agent-based modeling of climate policy: an introduction to the ENGAGE multi-level model framework", *Environmental Modelling & Software*, vol. 44, Amsterdam, Elsevier.
- Ghisetti, C. y F. Pontoni (2015), "Investigating policy and R&D effects on environmental innovation: a meta-analysis", *Ecological Economics*, vol. 118, Amsterdam, Elsevier.
- Gilens, M. y B.I. Page (2014), "Testing theories of American politics: elites, interest groups, and average citizens", *Perspectives on Politics*, vol. 12, N° 3, Cambridge University Press.
- Gillingham, K., R.G. Newell y W.A. Pizer (2008), "Modeling endogenous technological change for climate policy analysis", *Energy Economics*, vol. 30, N° 6, Amsterdam, Elsevier.
- Giupponi, C. y otros (2013), "Innovative approaches to integrated global change modelling", *Environmental Modelling & Software*, vol. 44, Amsterdam, Elsevier.
- Goos, M., A. Manning y A. Salomons (2014), "Explaining job polarization: routine-biased technological change and offshoring", *American Economic Review*, vol. 104, N° 8, Nashville, Tennessee, American Economic Association.
- Greenstone, M. y B.K. Jack (2015), "Envirodevonomics: a research agenda for an emerging field", *Journal of Economic Literature*, vol. 53, N° 1, Nashville, Tennessee, American Economic Association.
- Greif, A. (2006), *Institutions and the Path to the Modern Economy: Lessons from Medieval Trade*, Nueva York, Cambridge University Press, 2006.
- Grin, J., J. Rotmans y J. Schot (2010), *Transitions to Sustainable Development. New Directions in the Study of Long Term Transformative Change*, Routledge.
- Grübler, A., N. Nakićenović y D.G. Victor (1999), "Dynamics of energy technologies and global change", *Energy Policy*, vol. 27, N° 5, Amsterdam, Elsevier.
- Hargadon, A. (2010), "Technology policy and global warming: why new innovation models are needed", *Research Policy*, vol. 39, N° 8, Amsterdam, Elsevier.
- Harris, J.R. y M.P. Todaro (1970), "Migration, unemployment and development: a two-sector analysis", *American Economic Review*, vol. 60, N° 1, Nashville, Tennessee, American Economic Association.
- Henriques, S.T. y A. Kander (2010), "The modest environmental relief resulting from the transition to a service economy", *Ecological Economics*, vol. 70, N° 2, Amsterdam, Elsevier.
- Hernandez, R., J.M. Martínez-Piva y N. Mulder (eds.) (2014), *Global Value Chains and World Trade: Prospects and Challenges for Latin America (LC/G.2617-P)*, Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Hirschman, A.O. (1961), *La estrategia del desarrollo económico*, Cd. de México, Fondo de Cultura Económica.
- Hoekstra, R. y J.C.J.M. van den Bergh (2006), "The impact of structural change on physical flows in the economy: forecasting and backcasting using structural decomposition analysis", *Land Economics*, vol. 82, N° 4, Wisconsin, University of Wisconsin Press.
- \_\_\_\_\_ (2003), "Comparing structural decomposition analysis and index", *Energy Economics*, vol. 25, N° 1, Amsterdam, Elsevier.
- Hulme, M. (2009), "On the origin of the 'greenhouse effect': John Tyndall's 1859 interrogation of nature", *Weather*, vol. 64, N° 5, Wiley.
- Jackson, T. (2009), *Prosperity without Growth: Economics for a Finite Planet*, Londres, Earthscan.
- Jackson, T. y otros (2014), "Foundations for an ecological macroeconomics: literature review and model development", *Working Paper*, N° 65 [en línea] [http://www.foreurope.eu/fileadmin/documents/pdf/Workingpapers/WWWforEurope\\_WPS\\_no065\\_MS38.pdf](http://www.foreurope.eu/fileadmin/documents/pdf/Workingpapers/WWWforEurope_WPS_no065_MS38.pdf).
- Jacobsson, S. y A. Bergek (2011), "Innovation system analyses and sustainability transitions: contributions and suggestions for research", *Environmental Innovation and Societal Transitions*, vol. 1, N° 1, Amsterdam, Elsevier.

- Jaeger, C.C. y otros (2011), *A New Growth Path for Europe. Generating Prosperity and Jobs in the Low-carbon Economy. Synthesis Report*, Potsdam, European Climate Forum.
- Janssen, M.A. y B.J.M. de Vries (1998), "The battle of perspectives: a multi-agent model with adaptive responses to climate change", *Ecological Economics*, vol. 26, N° 1, Amsterdam, Elsevier.
- Janssen, M.A. y W. Jager (2002), "Stimulating diffusion of green products", *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 12, N° 3, Springer.
- Jiménez, R. y J. Mercado (2014), "Energy intensity: a decomposition and counterfactual exercise for Latin American countries", *Energy Economics*, vol. 42, Amsterdam, Elsevier.
- Johnstone, P. y A. Stirling (2015), "Comparing nuclear power trajectories in Germany and the UK: from 'regimes to democracies' in sociotechnical transitions and discontinuities", *SPRU Working Paper Series*, N° 18, Universidad de Sussex.
- Kaivo-oja, J. y otros (2014), "Are structural change and modernisation leading to convergence in the CO2 economy? Decomposition analysis of China, EU and USA", *Energy*, vol. 72, N° 1, Amsterdam, Elsevier.
- Kaldor, N. (1966), *Causes of the Slow Rate of Economic Growth of the United Kingdom: an Inaugural Lecture*, Cambridge, Cambridge University Press.
- \_\_\_\_\_ (1957), "A model of economic growth", *Economic Journal*, vol. 67, N° 268, Royal Economic Society.
- Kander, A. (2005), "Baumol's disease and dematerialization of the economy", *Ecological Economics*, vol. 55, N° 1, Amsterdam, Elsevier.
- Kander, A. y M. Lindmark (2006), "Foreign trade and declining pollution in Sweden: a decomposition analysis of long-term structural and technological effects", *Energy Policy*, vol. 34, N° 13, Amsterdam, Elsevier.
- Kauffman, S.A. y S. Levin (1987), "Towards a general theory of adaptive walks on rugged landscapes", *Journal of Theoretical Biology*, vol. 128, N° 1, Amsterdam, Elsevier.
- Kaya, Y. y K. Yokobori (eds.) (1997), *Environment, Energy, and Economy: Strategies for Sustainability*, Tokio, United Nations University Press.
- Kemp, R. (1994), "Technology and the transition to environmental sustainability", *Futures*, vol. 26, N° 10, Amsterdam, Elsevier.
- Kemp-Benedict, E. (2014), "The inverted pyramid: a neo-Ricardian view on the economy environment relationship", *Ecological Economics*, vol. 107, Amsterdam, Elsevier.
- Kesicki, F. (2011), *Marginal Abatement Cost Curves for Policy Making - Model-derived versus Expert-based Curves*, Londres, UCL Energy Institute.
- Kesicki, F. y P. Ekins (2012), "Marginal abatement cost curves: a call for caution", *Climate Policy*, vol. 12, N° 2, Taylor & Francis.
- Kim, L. (1999), "Building technological capability for industrialization: analytical frameworks and Korea's experience", *Industrial and Corporate Change*, vol. 8, N° 1, Oxford University Press.
- Klepper, S. (1997), "Industry life cycles", *Industrial and Corporate Change*, vol. 6, N° 1, Oxford University Press.
- Köhler, J. (2012), "A comparison of the neo-Schumpeterian theory of Kondratiev waves and the multi-level perspective on transitions", *Environmental Innovation and Societal Transitions*, vol. 3, Amsterdam, Elsevier.
- Köhler, J. y otros (2006a), "The transition to endogenous technical change in climate-economy models: a technical overview to the innovation modeling comparison project", *The Energy Journal*, número especial, N° 1, International Association for Energy Economics.
- \_\_\_\_\_ (2006b), "Combining energy technology dynamics and macroeconometrics: the E3MG model", *The Energy Journal*, vol. 27, International Association for Energy Economics.
- Kratena, K. y otros (2013), "HDELIO 1: Fully interregional dynamic econometric long-term input-output model for the EU27", *JRC Scientific and Policy Reports*, Comisión Europea.
- Lazonick, W.H. (1994), "Employment relations in manufacturing and international competition", *The Economic History of Britain since 1700*, R. Floud y D.N. McCloskey (eds.), Cambridge, Cambridge University Press.
- \_\_\_\_\_ (1979), "Industrial relations and technical change: the case of the self-acting mule", *Cambridge Journal of Economics*, vol. 3, N° 3, Oxford University Press.
- Leach, M., I. Scoones y A. Stirling (2010a), *Dynamic Sustainabilities: Technology, Environment, Social Justice*, Londres, and Earthscan.

- \_\_\_\_\_ (2010b), "Governing epidemics in an age of complexity: Narratives, politics and pathways to sustainability", *Global Environmental Change*, vol. 20, N° 3, Amsterdam, Elsevier.
- Lenton, T. y J.C. Ciscar (2012), "Integrating tipping points into climate impact assessments", *Climatic Change*, vol. 117, N° 3, Springer.
- Lewis, A.W. (1954), "Economic development with unlimited supplies of labour", *The Manchester School*, vol. 22, N° 2, Wiley.
- López, R. (2007), "Structural change, poverty and natural resource degradation", *Handbook of Sustainable Development*, G. Atkinson, S. Dietz y E. Neumayer (eds.), Edward Elgar Publishing.
- Lopez-Gonzalez, J., V. Meliciani y M. Savona (2015), "When Linder meets Hirschman: inter-industry linkages and global value chains in business services", *SPRU Working Paper Series*, N° 20, University of Sussex.
- Lydall, H.F. (1959), "The distribution of employment incomes", *Econometrica*, vol. 27, N° 1, Nueva York, The Econometric Society.
- Ma, T. e Y. Nakamori (2009), "Modeling technological change in energy systems. From optimization to agent-based modeling", *Energy*, vol. 34, N° 7, Amsterdam, Elsevier.
- Maddison, A. (2003), *The World Economy: Historical Statistics*, París, Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE).
- Malerba, F. y L. Orsenigo (1997), "Technological regimes and sectoral patterns of innovative activities", *Industrial and Corporate Change*, vol. 6, N° 1, Oxford University Press.
- Marin, G. y R. Zoboli (2014), "The \_emission disease\_ in services" [en línea] [http://www.giova.marin.altervista.org/files/papers/emiss\\_disease20121206.pdf](http://www.giova.marin.altervista.org/files/papers/emiss_disease20121206.pdf).
- Martínez-Alier, J. (2012), "Environmental justice and economic degrowth: an alliance between two movements", *Capitalism Nature Socialism*, vol. 23, N° 1.
- \_\_\_\_\_ (1995), "The environment as a luxury good or \_too poor to be green\_?", *Ecological Economics*, vol. 13, N° 1, Amsterdam, Elsevier.
- Martínez-Alier, J. y otros (2010), "Social metabolism, ecological distribution conflicts, and valuation languages", *Ecological Economics*, vol. 70, N° 2, Amsterdam, Elsevier.
- Martínez-Fernández, C., C. Hinojosa y G. Miranda (2010), "Green jobs and skills: the local labour market implications of addressing climate change" [en línea] <http://www.oecd.org/regional/leed/44683169.pdf>.
- Matsuyama, K. (2008), "Structural change", *The New Palgrave Dictionary of Economics*, S. Durlauf y L. Blume (eds.), Basingstoke, Palgrave Macmillan.
- Mazzolari, F. y G. Ragusa (2013), "Spillovers from high-skill consumption to low-skill labor markets", *Review of Economics and Statistics*, vol. 95, N° 1, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press.
- Mazzucato, M. (2002), "The PC industry: new economy or early life-cycle?", *Review of Economic Dynamics*, vol. 5, N° 2, Amsterdam, Elsevier.
- McCloskey, D.N. (2009), "Science, bourgeois dignity, and the Industrial Revolution", *MPRA Paper*, N° 22308, University Library of Munich.
- McInerney, D., R.J. Lempert y K. Keller (2012), "What are robust strategies in the face of uncertain climate threshold responses?", *Climatic Change*, vol. 112, N° 3, Springer.
- Meadows, D. y otros (1972), *The Limits to Growth*, Nueva York, Universe Books.
- Millimet, D.L. y J.A. List y T. Stengos (2003), "The environmental Kuznets curve: real progress or misspecified models?", *Review of Economics and Statistics*, vol. 85, N° 4, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press.
- Mokyr, J. (2007), "Knowledge, enlightenment, and the Industrial Revolution: reflections on the gifts of Athena", *History of Science*, vol. 45, N° 2, SAGE.
- Mowery, D.C., R.R. Nelson y B.R. Martin (2010), "Technology policy and global warming: why new policy models are needed (or why putting new wine in old bottles won't work)", *Research Policy*, vol. 39, N° 8, Amsterdam, Elsevier.
- Moyer, E. y otros (2014), "Climate impacts on economic growth as drivers of uncertainty in the social cost of carbon", *The Journal of Legal Studies*, vol. 43, N° 2, Chicago, Chicago University Press.
- Mulder, P. y H.L.F. de Groot (2012), "Structural change and convergence of energy intensity across OECD countries, 1970-2005", *Energy Economics*, vol. 34, N° 6, Amsterdam, Elsevier.
- Mulder, P., H.L.F. de Groot y B. Pfeiffer (2014), "Dynamics and determinants of energy intensity in the service sector: a cross-country analysis, 1980-2005", *Ecological Economics*, vol. 100, Amsterdam, Elsevier.
- Muñoz, P., R. Strohmaier y J. Roca (2011), "On the North-South trade in the Americas and its ecological asymmetries", *Ecological Economics*, vol. 70, N° 11, Amsterdam, Elsevier.
- Muradian, R. y J. Martínez-Alier (2001), "Trade and the environment: from a Southern perspective", *Ecological Economics*, vol. 36, N° 2, Amsterdam, Elsevier.

- Muradian, R., M. O'Connor y J. Martínez-Alier (2002), "Embodied pollution in trade: estimating the environmental load displacement of industrialised countries", *Ecological Economics*, vol. 41, N° 1, Amsterdam, Elsevier.
- Nannen, V. y J.C.J.M. van den Bergh (2010), "Policy instruments for evolution of bounded rationality: application to climate-energy problems", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 77, N° 1, Amsterdam, Elsevier.
- Nelson, R.R. y S.G. Winter (1982), *An Evolutionary Theory of Economic Change*, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press.
- Nesta, L., F. Vona y F. Nicolli (2014), "Environmental policies, competition and innovation in renewable energy", *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 67, N° 3, Amsterdam, Elsevier.
- Nordhaus, W.D. (2013), *The Climate Casino: Risk, Uncertainty, and Economics for a Warming World*, Yale University Press.
- \_\_\_\_\_ (1992), "An optimal transition path for controlling greenhouse gases", *Science*, vol. 258, N° 5086, Washington, D.C., Asociación Estadounidense para el Progreso de la Ciencia.
- \_\_\_\_\_ (1979), *Efficient Use of Energy Resources*, New Haven, Yale University Press.
- \_\_\_\_\_ (1977), "Economic growth and climate: the carbon dioxide problem", *American Economic Review*, vol. 67, N° 1, Nashville, Tennessee, American Economic Association.
- North, D.C. (2005), *Understanding the Process of Economic Change*, Princeton, Princeton University Press.
- Oltra, V. y M. Saint Jean (2009), "Sectoral systems of environmental innovation: an application to the French automotive industry", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 76, N° 4, Amsterdam, Elsevier.
- O'Neill, B.C. y otros (2012), "The effect of urbanization on energy use in India and China in the iPETS model", *Energy Economics*, vol. 34, Amsterdam, Elsevier.
- Pan, H. (2006), "Dynamic and endogenous change of input-output structure with specific layers of technology", *Structural Change and Economic Dynamics*, vol. 17, N° 2, Amsterdam, Elsevier.
- Panayotou, T., A. Peterson y J.D. Sachs (2000), "Is the Environmental Kuznets Curve Driven by Structural Change? What Extended Time Series May Imply for Developing Countries", *CAER II Discussion Paper*, N° 80, Cambridge Massachusetts, Harvard Institute for International Development.
- Pasche, M. (2002), "Technical progress, structural change, and the environmental Kuznets curve", *Ecological Economics*, vol. 42, N° 3, Amsterdam, Elsevier.
- Pérez-Rincón, M.A. (2006), "Colombian international trade from a physical perspective: towards an ecological Prebisch thesis", *Ecological Economics*, vol. 59, N° 4, Amsterdam, Elsevier.
- Peters, G.P. (2008), "From production-based to consumption-based national emission inventories", *Ecological Economics*, vol. 65, N° 1, Amsterdam, Elsevier.
- Piketty, T. (2014), *Capital in the Twenty-First Century*, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press.
- Pindyck, R.S. (2013), "Climate change policy: what do the models tell us?", *Journal of Economic Literature*, vol. 51, N° 3, Nashville, Tennessee, American Economic Association.
- Popp, D. (2004), "ENTICE: endogenous technological change in the DICE model of global warming", *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 48, N° 1, Amsterdam, Elsevier.
- Popp, D., R.G. Newell y A.B. Jaffe (2010), "Energy, the environment, and technological change", *Handbook of the Economics of Innovation*, vol. 2, Amsterdam, Elsevier.
- Popp, D., T. Hafner y N. Johnstone (2011), "Environmental policy vs. public pressure: innovation and diffusion of alternative bleaching technologies in the pulp industry", *Research Policy*, vol. 40, N° 9, Amsterdam, Elsevier.
- Porter, M. y C. van der Linde (1995), "Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship", *Journal of Economic Perspectives*, vol. 9, N° 4, Nashville, Tennessee, American Economic Association.
- Poudel, B.N., K.P. Paudel y K. Bhattarai (2009), "Searching for an environmental Kuznets curve in carbon dioxide pollutant in Latin American countries", *Journal of Agricultural and Applied Economics*, vol. 41, N° 1.
- Prebisch, R. (1949), *El desarrollo económico de la América Latina y algunos de sus principales problemas* (E/CN.12/89), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Raupach, M. y otros (2007), "Global and regional drivers of accelerating CO2 emissions", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 104, N° 24, National Academy of Sciences.

- Rezai, A., L. Taylor y R. Mechler (2013), "Ecological macroeconomics: an application to climate change", *Ecological Economics*, vol. 85, Amsterdam, Elsevier.
- Robalino, D.A. y R.J. Lempert (2000), "Carrots and sticks for new technology: abating greenhouse gas emissions in a heterogeneous and uncertain world", *Integrated Assessment*, vol. 1, N° 1, Springer.
- Rodrik, D. (2014), "Green industrial policy", *Oxford Review of Economic Policy*, vol. 30, N° 3, Oxford University Press.
- Rogge, K. y K. Reichardt (2015), "Going beyond instrument interactions: towards a more comprehensive policy mix conceptualization for environmental technological change", *SPRU Working Paper Series*, N° 12, Universidad de Sussex.
- Rosen, R.A. y E. Guenther (2015), "The economics of mitigating climate change: what can we know?", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 91, Amsterdam, Elsevier.
- Rosenberg, N. (1974), "Science, invention and economic growth", *The Economic Journal*, vol. 84, N° 333, Wiley.
- Rosenstein-Rodan, P.N. (1943), "Problems of industrialisation of Eastern and South-Eastern Europe", *The Economic Journal*, vol. 53, N° 210/211, Royal Economic Society.
- Rubio, M.d.Mar y M. Folchi (2012), "Will small energy consumers be faster in transition? Evidence from the early shift from coal to oil in Latin America", *Energy Policy*, vol. 50, Amsterdam, Elsevier.
- Ruderman, H., M.D. Levine y J.E. McMahon (1987), "The behavior of the market for energy efficiency in residential appliances including heating and cooling equipment", *The Energy Journal*, vol. 8, N° 1, International Association for Energy Economics.
- Russi, D. y otros (2008), "Material flows in Latin America", *Journal of Industrial Ecology*, vol. 12, N° 5-6, Wiley.
- Safarzyńska, K. y J.C.J.M. van den Bergh (2010a), "Demand-supply coevolution with multiple increasing returns: policy analysis for unlocking and system transitions", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 77, N° 2, Amsterdam, Elsevier.
- \_\_\_\_\_ (2010b), "Evolving power and environmental policy: explaining institutional change with group selection", *Ecological Economics*, vol. 69, N° 4, Amsterdam, Elsevier.
- Safarzyńska, K., K. Frenken y J.C.J.M. van den Bergh (2012), "Evolutionary theorizing and modeling of sustainability transitions", *Research Policy*, vol. 41, N° 6, Amsterdam, Elsevier.
- Sassi, O. y otros (2010), "MACCLIM-R: a modelling framework to simulate sustainable development pathways", *International Journal of Global Environmental Issues*, vol. 10, N° 1-2.
- Saviotti, P. y J.L. Gaffard (2008), "Preface for the special issue of JEE on 'innovation, structural change and economic development'", *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 18, N° 2, Springer.
- Scoones, I. y otros (2007), "Dynamic systems and the challenge of sustainability", *STEPS Working Paper*, N° 1, Brighton, STEPS Centre.
- Scricciu, S.S. (2007), "The inherent dangers of using computable general equilibrium models as a single integrated modelling framework for sustainability impact assessment. A critical note on Böhringer and Löschel (2006)", *Ecological Economics*, vol. 60, N° 4, Amsterdam, Elsevier.
- Scricciu, S.S., A. Rezai y R. Mechler (2013), "On the economic foundations of green growth discourses: the case of climate change mitigation and macroeconomic dynamics in economic modeling", *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, vol. 2, N° 3, Wiley.
- Shi, H.L. e Y. Zhang (2011), "How Carbon Emission Mitigation Promotes Economic Development. A Theoretical Framework" [en línea] <http://www.gci.org.uk/Documents/How%20carbon%20emission%20mitigation%20promotes%20economic%20development-2011-04-clean.pdf>.
- Silverberg, G. y B. Verspagen (2007), "The size distribution of innovations revisited: an application of extreme value statistics to citation and value measures of patent significance", *Journal of Econometrics*, vol. 139, N° 2, Amsterdam, Elsevier.
- \_\_\_\_\_ (2005), "A percolation model of innovation in complex technology spaces", *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol. 29, N° 1-2, Amsterdam, Elsevier.
- Simon, H.A. (1957), "The compensation of executives", *Sociometry*, vol. 20, N° 1, American Sociological Association.
- Singer, H.K. (1950), "The distribution of gains between investing and borrowing countries", *American Economic Review*, vol. 40, Nashville, Tennessee, American Economic Association.
- Smith, A. (1958), *Investigación sobre la naturaleza y causas de la riqueza de las naciones*, Ciudad de México, Fondo de Cultura Económica.
- Smith, A., A. Stirling y F. Berkhout (2005), "The governance of sustainable socio-technical transitions", *Research Policy*, vol. 34, N° 10, Amsterdam, Elsevier.

- Sorrell, S. (2007), *The Rebound Effect: an Assessment of the Evidence for Economy-wide Energy Savings from Improved Energy Efficiency*, Londres, UK Energy Research Centre (UERC).
- Stapleton, L., S. Sorrell y T. Schwanen (2015), "Estimating direct rebound effects for personal automotive travel in Great Britain", *SPRU Working Paper Series*, N° 8, Universidad de Sussex.
- Stern, D.I. (2004), "The rise and fall of the environmental Kuznets curve", *World Development*, vol. 32, N° 8, Amsterdam, Elsevier.
- Stern, D.I. y K. Enflo (2013), "Casality between energy and output in the long-run", *Energy Economics*, vol. 39, Amsterdam, Elsevier.
- Stern, D.I., F. Jotzo y L. Dobes (2013), "The economics of global climate change: a historical literature review", *CCEP Working Papers*, N° 1307, Centre for Climate Economics and Policy.
- Stern, N. (2014a), "Ethics, equity and the economics of climate change Paper 1: science and philosophy", *Economics and Philosophy*, vol. 30, N° 3, Cambridge University Press.
- \_\_\_\_\_ (2014b), "Ethics, equity and the economics of climate change Paper 2: economics and politics", *Economics and Philosophy*, vol. 30, N° 3, Cambridge University Press.
- \_\_\_\_\_ (2013), "The structure of economic modeling of the potential impacts of climate change: grafting gross underestimation of risk onto already narrow science models", *Journal of Economic Literature*, vol. 51, N° 3, Nashville, Tennessee, American Economic Association.
- \_\_\_\_\_ (2008), "The economics of climate change", *American Economic Review*, vol. 98, N° 2, Nashville, Tennessee.
- \_\_\_\_\_ (2007), *The Economics of Climate Change: The Stern Review*, Cambridge University Press.
- Stirling, A. (2012), "Opening up the politics of knowledge and power in bioscience", *PLoS Biology*, vol. 10, N° 1.
- \_\_\_\_\_ (2011), "Pluralising progress: from integrative transitions to transformative diversity", *Environmental Innovation and Societal Transitions*, vol. 1, N° 1, Amsterdam, Elsevier.
- \_\_\_\_\_ (2009), "Direction, distribution and diversity! Pluralising progress in innovation, sustainability and development", *STEPS Working Paper*, N° 32, Brighton, STEPS Centre.
- Stirling, A. e I. Scoones (2009), "From risk assessment to knowledge mapping: science, precaution and participation in disease ecology", *Ecology and Society*, vol. 14, N° 2.
- Su, B. y B.W. Ang (2012), "Structural decomposition analysis applied to energy and emissions: some methodological developments", *Energy Economics*, vol. 34, N° 1, Amsterdam, Elsevier.
- Tesfatsion, L. y K.L. Judd (eds.) (2006), vol. 2 of *Handbook of Computational Economics. Vol. 2: Agent-Based Computational Economics: A Constructive Approach to Economic Theory*, Amsterdam, Elsevier.
- Tester, J. y otros (eds.) (2005), *Sustainable Energy: Choosing Among Options*, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press.
- Tian, X. y otros (2014), "How does industrial structure change impact carbon dioxide emissions? A comparative analysis focusing on nine provincial regions in China", *Environmental Science & Policy*, vol. 37, Amsterdam, Elsevier.
- Tol, R.S.J. (2002a), "Estimates of the damage costs of climate change. Part 1: benchmark estimates", *Environmental and Resource Economics*, vol. 21, N° 1, Springer.
- \_\_\_\_\_ (2002b), "Estimates of the damage costs of climate change, part II. Dynamic estimates", *Environmental and Resource Economics*, vol. 21, N° 2, Kluwer Academic Publishers.
- Unión Europea (2013), *European Competitiveness Report 2013. Towards Knowledge Driven Reindustrialisation*, Bruselas.
- Valente, M. (2014), "An NK-like model for complexity", *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 24, N° 1, Springer.
- Van den Bergh, J. (2013), "Environmental and climate innovation: limitations, policies and prices", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 80, N° 1, Amsterdam, Elsevier.
- Van den Bergh, J. y J.M. Gowdy (2000), "Evolutionary theories in environmental and resource economics: approaches and applications", *Environmental and Resource Economics*, vol. 17, N° 1, Springer.
- Van den Bergh, J., B. Truffer y G. Kallis (2011), "Environmental innovation and societal transitions: introduction and overview", *Environmental Innovation and Societal Transitions*, vol. 1, N° 1, Amsterdam, Elsevier.
- Van der Meijden, G. y S. Smulders (2014), "Technological Change During the Energy Transition", *Tinbergen Institute Discussion Paper*, TI 2014-108/VIII, Tinbergen Institute.
- Van der Ploeg, F. (2011), "Macroeconomics of sustainability transitions: second-best climate policy, Green Paradox, and renewables subsidies", *Environmental Innovation and Societal Transitions*, vol. 1, N° 1, Amsterdam, Elsevier.

- Van der Ploeg, F. y C. Withagen (2012), "Is there really a green paradox?", *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 64, N° 3, Amsterdam, Elsevier.
- Van Ruijven, B. y otros (2008), "Modeling energy and development: an evaluation of models and concepts", *World Development*, vol. 36, N° 12, Amsterdam, Elsevier.
- Van Vuuren, D.P. y otros (2011a), "The representative concentration pathways: an overview", *Climatic Change*, vol. 109, Springer.
- \_\_\_\_\_ (2011b), "How well do integrated assessment models simulate climate change?", *Climatic Change*, vol. 104, N° 2.
- Vergara, W. y otros (2014), *El desafío climático y de desarrollo en América Latina y el Caribe. Opciones para un desarrollo resiliente al clima y bajo en carbono*, Washington, D.C., Banco Interamericano de Desarrollo.
- Vivarelli, M. y M. Pianta (2000), *The Employment Impact of Innovation: Evidence and Policy*, New York, Routledge.
- Voigt, S. y otros (2014), "Energy intensity developments in 40 major economies: structural change or technology improvement?", *Energy Economics*, vol. 41, Amsterdam, Elsevier.
- Von Tunzelmann, G.N. (1995), *Technology and Industrial Progress: The Foundations of Economic Growth*, Aldershot, Edward Elgar Publishing.
- Vona, F. y D. Consoli (2014), "Innovation and skill dynamics: a life-cycle approach", *Industrial and Corporate Change*, vol. 24, N° 6, Oxford University Press.
- Vona, F. y otros (2015), "Green skills", *NBER Working Papers*, N° 21116, Cambridge Massachusetts, National Bureau of Economic Research.
- Wei, Y.-M., Z.-F. Mi y Z. Huang (2015), "Climate policy modeling: an online SCI-E and SSCI based literature review", *Omega*, vol. 57, Amsterdam, Elsevier.
- Weitzman, M.L. (2014), "Fat tails and the social cost of carbon", *American Economic Review*, vol. 104, N° 5, Nashville, Tennessee, American Economic Association.
- \_\_\_\_\_ (2011), "Fat-tailed uncertainty in the economics of catastrophic climate change", *Review of Environmental Economics and Policy*, vol. 5, N° 2, Oxford University Press.
- \_\_\_\_\_ (2009), "On modeling and interpreting the economics of catastrophic climate change", *Review of Economics and Statistics*, vol. 91, N° 1, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press.
- Wiedmann, T. (2009), "A review of recent multi-region input-output models used for consumption-based emission and resource accounting", *Ecological Economics*, vol. 69, N° 2, Amsterdam, Elsevier.
- Wiedmann, T. y otros (2013), "The material footprint of nations", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 112, N° 20, Washington, D.C., National Academy of Sciences.
- \_\_\_\_\_ (2011), "Quo vadis MRIO? Methodological, data and institutional requirements for multi-region input-output analysis", *Ecological Economics*, vol. 70, N° 11, Amsterdam, Elsevier.
- Windrum, P., T. Ciarli y Ch. Birchenhall (2009a), "Consumer heterogeneity and the development of environmentally friendly technologies", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 76, N° 4, Amsterdam, Elsevier.
- \_\_\_\_\_ (2009b), "Environmental impact, quality, and price: consumer trade-offs and the development of environmentally friendly technologies", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 76, N° 4, Amsterdam, Elsevier.
- Witt, U. (2011), "The dynamics of consumer behavior and the transition to sustainable consumption patterns", *Environmental Innovation and Societal Transitions*, vol. 1, N° 1, Amsterdam, Elsevier.
- \_\_\_\_\_ (2001), "Learning to consume - A theory of wants and the growth of demand", *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 11, N° 1, Springer.
- Woersdorfer, J.S. y W. Kaus (2011), "Will nonowners follow pioneer consumers in the adoption of solar thermal systems? Empirical evidence for northwestern Germany", *Ecological Economics*, vol. 70, N° 12, Amsterdam, Elsevier.
- Wolf, S. y otros (2013), "A multi-agent model of several economic regions", *Environmental Modelling & Software*, vol. 44, Amsterdam, Elsevier.
- Zeppini, P. y J.C.J.M. van den Bergh (2011), "Competing recombinant technologies for environmental innovation: extending Arthur's model of lock-in", *Industry and Innovation*, vol. 18, N° 3, Taylor & Francis.
- Zhu, Y., Y. Shi y Z. Wang (2014), "How much CO2 emissions will be reduced through industrial structure change if China focuses on domestic rather than international welfare?", *Energy*, vol. 72, Amsterdam, Elsevier.

## **Anexo**

## Bibliografía utilizada en el capítulo I y para calcular la curva ambiental de Kuznets

- Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA): <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps>
- Agencia Internacional de la Energía (IEA): <http://www.iea.org/statistics/>
- Base de datos International Comparison Database, Universidad de Queensland: <http://uqicd.economics.uq.edu.au/>
- Base de datos Total Economy Database: <http://www.conference-board.org/data/economydatabase/>
- Base de Datos y Publicaciones Estadísticas de la CEPAL (CEPALSTAT): [http://estadisticas.cepal.org/cepalstat/WEB\\_CEPALSTAT/Portada.asp](http://estadisticas.cepal.org/cepalstat/WEB_CEPALSTAT/Portada.asp)
- Centre for International Price Research: <http://www.vanderbilt.edu/econ/cipr/index.html>
- Compendio de Datos sobre el Medio Ambiente (OCDE): <http://www.oecd.org/env/indicators-modelling-outlooks/oecdenvironmentaldatacompendium.htm>
- Cuadros de Penn, Universidad de Groningen: <http://www.rug.nl/research/ggdc/data/pwt/>
- División de Alerta Temprana y Evaluación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA): <http://www.unep.org/dewa/africa/>
- División de Estadística de las Naciones Unidas, donde se puede consultar una lista de sitios web nacionales que publican datos oficiales sobre el medioambiente: <http://unstats.un.org/unsd/environment/clinks.htm>
- Indicadores y datos ambientales (OCDE): <http://www.oecd.org/env/indicators-modelling-outlooks/data-and-indicators.htm>
- Programa de Comparación Internacional (PCI): <http://icp.worldbank.org/>
- Proyecto Maddison: <http://www.ggdc.net/maddison/maddison-project/home.htm>



Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)  
Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC)  
[www.cepal.org](http://www.cepal.org)