*María Soledad Castaño Martínez**

AMPLIACIÓN DE LOS MODELOS DE CRECIMIENTO
Las innovaciones tecnológicas y el cambio climático

El Premio Nobel en Economía 2018 ha sido otorgado a los estadounidenses Paul M. Romer y William D. Nordhaus por sus aportaciones en las teorías que explican el crecimiento económico. El primero por incorporar las innovaciones tecnológicas y demostrar que las economías que más invierten en innovación son las que presentan mayor crecimiento económico a largo plazo. Y el segundo por integrar el cambio climático en el análisis económico determinando los costes y beneficios de reducir las emisiones contaminantes.

Palabras Clave: modelo de crecimiento económico, innovación tecnológica y cambio climático.
Clasificación JEL: O31, O47, Q54, Q55.

1. Introducción

La Real Academia de las Ciencias de Suecia ha concedido el Premio Nobel en Economía 2018 a Paul M. Romer y William D. Nordhaus por integrar el cambio climático y la innovación tecnológica en el análisis macroeconómico.

Uno de los aspectos que más ha preocupado a los economistas ha sido poder determinar los factores que pueden impulsar o frenar el crecimiento económico. En 2018, se ha premiado a dos economistas por introducir en el análisis macroeconómico dos de las restricciones más importantes que afectan al crecimiento económico, los recursos de la naturaleza y el conocimiento. Como es sabido, la naturaleza determina las condiciones en que vivimos y el conocimiento define nuestra capacidad para manejar estas condiciones.

El crecimiento económico se acumula con el tiempo y ayuda a mejorar el bienestar de los individuos. No obstante, se observa que en determinados periodos del tiempo y en determinados países el crecimiento es mayor que en otros. Este hecho ha llevado a los economistas a plantearse qué factores y qué condiciones determinan el crecimiento económico. La explicación convencional es que gracias al cambio tecnológico se producen esas diferencias en las tasas de crecimiento.

A principios de la década de 1980, Paul Romer comenzó a desarrollar la teoría del crecimiento endógeno, donde los avances tecnológicos no se derivan simplemente de fuentes externas (exógenas), como supone el modelo de crecimiento de Solow. En su lugar, son creados por actividades específicas en el mercado. Los hallazgos de Romer nos permiten ▷

* Universidad de Castilla-La Mancha
Versión de enero de 2019.

comprender mejor qué condiciones del mercado favorecen la creación de nuevas ideas que generan las tecnologías rentables. Además, su trabajo considera que las instituciones y políticas pueden incentivar el desarrollo tecnológico.

William D. Nordhaus comenzó su trabajo en la década de 1970, cuando los científicos comenzaron a constatar los efectos negativos del uso de los combustibles fósiles, tales como calentamiento global y los efectos perjudiciales del mismo. Nordhaus comenzó a analizar las relaciones de retroalimentación entre la actividad humana y el clima, combinando las teorías básicas y los resultados empíricos de la física, la química y la economía. Por lo tanto, no solo considera la naturaleza como una restricción en la actividad humana, sino también como algo muy influenciado por la actividad económica. Nordhaus se convirtió en la primera persona en diseñar modelos simples, pero dinámicos y cuantitativos, del sistema económico-climático global, ahora llamados *integrated assessment models* (IAMs). Estos modelos permiten simular cómo la economía y el clima coevolucionarán en el futuro bajo supuestos alternativos sobre el funcionamiento de la naturaleza y la economía de mercado, incluidas las políticas relevantes, y abordan preguntas sobre la conveniencia de diferentes escenarios globales e intervenciones políticas específicas.

Paul Michael Romer nació en Denver (Colorado) en 1955 y se licenció en matemáticas en 1977 en la Universidad de Chicago, institución donde logró el grado de doctor en Economía en 1983. Ha sido profesor en la Universidad de California en Berkeley, la Universidad de Chicago, la Universidad de Rochester y la Universidad de Stanford. Actualmente trabaja en la escuela de negocios Leonard N. Stern en New York.

Mientras era profesor en Stanford creó Aplia, una compañía de tecnología educativa dedicada a aumentar el esfuerzo de los estudiantes y el compromiso en el aula.

Fue economista jefe y vicepresidente sénior del Banco Mundial hasta el 24 de enero de 2018, cargo que ocupó desde junio de 2016. Es investigador asociado en la Oficina Nacional de Investigación Económica y miembro de la Academia Americana de Artes y Ciencias.

El profesor Romer es miembro de la Junta Directiva de Carnegie Endowment for the Advancement of Teaching. También, es miembro de la Junta Directiva de Community Solutions, una organización nacional sin fines de lucro dedicada a fortalecer las comunidades y acabar con la falta de vivienda.

Ha escrito varios artículos de gran impacto, tales como «Endogenous technological change» e «Increasing Returns and Long-Run Growth», en el *Journal of Political Economy*.

William Nordhaus nació en Albuquerque (Nuevo México) y obtuvo el doctorado en Economía por Massachusetts Institute of Technology en 1967. Ha sido desde entonces profesor en la Universidad de Yale. Es miembro de la Academia Nacional de Ciencias y de la Academia Americana de Artes y Ciencias. Además, es investigador de la Oficina Nacional de Investigación Económica y ha sido miembro y asesor principal del Panel sobre Actividad Económica de Brookings, Washington, DC, desde 1972.

El profesor Nordhaus es editor de varias revistas científicas y ha trabajado en los comités ejecutivos de la Asociación Económica Americana, la Asociación Económica del Este y del Panel de Expertos Económicos de la Oficina de Presupuesto del Congreso.

Es autor de muchos libros, entre ellos: *Invention, Growth and Welfare, Is Growth Obsolete?, The Efficient Use of Energy Resources, Reforming Federal Regulation, Managing the* ▷

Global Commons, Warming the World y, el clásico manual «Economía», escrito con Samuelson y traducido a varios idiomas.

2. Antecedentes: el modelo de Solow

A la hora de analizar el crecimiento económico desde una perspectiva actual se tiene que estudiar el conocido modelo de Solow (1956). En concreto, las hipótesis y ecuaciones que lo conforman serían las siguientes:

1. Se supone que en la economía se está fabricando solo un tipo de bien, cuyo nivel de producción viene recogido por la variable *Y*. Además, no resulta necesario en este modelo distinguir entre aquellos agentes económicos que ahorran y los que invierten, ya que se supone que al final todo el ahorro acabará siendo invertido.

2. Por lo que respecta al ahorro (*S*), este se comporta de una forma proporcional a la renta:

$$S = sY \qquad [1]$$

3. El *stock* de capital (*K*) no se deprecia y la inversión neta (*I*) es el crecimiento en el tiempo de dicho *stock* de capital, es decir, que se cumple que $\dot{K} = I$, donde $\dot{K} = dK/dt$. Como, en equilibrio, se cumple que la inversión tiene que ser igual al ahorro, por tanto:

$$\dot{K} = sY \qquad [2]$$

4. La función de producción incorpora dos factores, capital y trabajo, no recogiéndose de forma explícita la cualificación de los trabajadores, es decir, que no existe progreso tecnológico:

$$Y = F\,(K, L) \qquad [3]$$

Se supone que es una función agregada, continua y con rendimientos constantes, donde *Y* es la producción, *K* es el capital, que se considera que es totalmente maleable, y *L* es el trabajo. *F* corresponde a una función que cumple las condiciones establecidas por Inada. Además de lo expuesto, se suele suponer también que los rendimientos a escala son constantes, y que la productividad marginal de todos los factores productivos es positiva, pero decreciente. Asimismo, se consideran que los factores productivos más significativos son el capital, el trabajo y el conocimiento, mientras que los demás no lo son (Romer, 1996: 8).

5. El factor trabajo (*L*) coincide con la población total y crece a una tasa constante y exógena $\gamma > 0$, es decir, que:

$$\frac{\dot{L}}{L} = \gamma \qquad [4]$$

Dividiendo la expresión [3] entre *L*, se obtiene el producto en términos per cápita:

$$y = f\,(K) \qquad [5]$$

donde $y=Y/L$; $k=K/L$. Sabiendo que $K=k\,L_0e^{nt}$ y operando, se obtiene:

$$\dot{k} = sf(k) - nk \qquad [6]$$

Esta expresión es la ecuación fundamental del equilibrio neoclásico. En ella, *sf*(*k*) es el ahorro por trabajador, que se puede considerar como el flujo de inversión por trabajador, ▷

puesto que dentro del modelo se supone que todo el ahorro se convierte automáticamente en inversión.

Por su parte, *nk* sería la inversión que resultaría necesaria para mantener constante la relación que existe entre el capital y el trabajo, considerando que el número de trabajadores crece a una tasa *n*.

Por otro lado, se puede completar el modelo que se acaba de exponer introduciendo la depreciación δ. Teniendo en cuenta que la inversión bruta (la cantidad *output* adquirida por las empresas), I_t, es igual a la inversión neta, el aumento neto de capital como $\dot{K}$, más la depreciación que denominamos D_t, tenemos que:

$$I_t = \dot{K}_t + D_t \quad [7]$$

Para simplificar nuestro análisis, supondremos que, en cada momento del tiempo, una fracción constante de las máquinas se deteriora, a una tasa δ, lo que implica que la expresión [6] pasaría a ser:

$$\dot{k} = sf(k) - (n + \delta)k \quad [8]$$

Esta es la ecuación fundamental del modelo, que depende solo de *k*. El término $n+\delta$ sería la tasa de depreciación efectiva de la ratio capital-trabajo.

El punto k^* donde las dos curvas se cruzan se llama estado estacionario. Si la economía, por la razón que sea, se encuentra en el punto k^*, entonces la curva de depreciación es igual a la curva de ahorro. La ecuación fundamental del modelo Solow nos dice que cuando $sf(k)$ es igual a $(\delta+n)k$, entonces $\dot{k} = 0$ y el capital per cápita no aumenta. Cuando la economía tiene un *stock* de capital k^*, la cantidad producida, $sf(k^*)$, es tal que si ahorramos la fracción *s*, obtenemos una cantidad de inversión que es justamente la necesaria para reemplazar el capital depreciado. Es decir, una vez reemplazado el capital depreciado no quedan recursos para incrementar el *stock* de capital, por lo que este permanece en k^*. Al permanecer el capital al mismo nivel, la producción vuelve a ser la misma, de manera que, al ahorrar la misma fracción, *s*, se genera la misma inversión y se repite el mismo resultado. La economía no consigue aumentar el *stock* de capital y permanece constante hasta el final de los tiempos (Sala-i-Martin, 1999: 24).

Hay que tener presente que la función de producción se desplaza cuando se producen alteraciones en el nivel de tecnología. Por tanto, la solución del modelo de Solow conduce a la economía a una situación de equilibrio sostenido a largo plazo con pleno empleo, donde las tasas de crecimiento de la renta en términos per cápita son nulas. Este resultado, junto con la necesidad de explicar las tasas de crecimiento positivas, observadas empíricamente, justifican la introducción del progreso tecnológico como factor exógeno que determina la existencia de tasas de crecimiento positivo (Galindo y Malgesini, 1993).

Por tanto, en función de lo expuesto, el modelo de Solow presenta las siguientes predicciones (Mankiw, 1995: 277):

1. A largo plazo, la economía alcanza el estado estacionario que es independiente de las condiciones iniciales.
2. El nivel de renta correspondiente al estado estacionario depende de las tasas de ahorro y de crecimiento de la población. Cuanto mayores sean dichas tasas, mayor y menor será, respectivamente, el nivel del estado estacionario de la renta per cápita. ▷

3. La tasa de crecimiento de la renta per cápita del estado estacionario depende solo de la tasa de crecimiento tecnológico.
4. En el estado estacionario, el *stock* de capital crece a la misma tasa que la renta, de tal manera que la ratio capital-renta es constante.
5. En el estado estacionario, el producto marginal del capital es constante, mientras que el producto marginal del trabajo crece conforme a la tasa de progreso tecnológico.
6. La convergencia condicional entre países homogéneos se deriva de la dinámica de transición del modelo hacia el estado estacionario. Un país con menor *stock* de capital per cápita inicial, que comparta el mismo estado estacionario que otro inicialmente más adelantado, presentará una mayor productividad marginal del capital (por los rendimientos decrecientes de este factor) y, por tanto, un mayor rendimiento, estímulo a la inversión, y un mayor crecimiento económico. Así, pues, y a la luz de estos modelos, las medidas a adoptar para alcanzar la convergencia se limitarán a la modificación y adaptación de sus estructuras productivas a las del resto de países con los que se quiere converger. Una vez alcanzadas unas estructuras homogéneas, la convergencia vendrá por sí sola.

Dichas conclusiones tienen importantes implicaciones desde el punto de vista de la política económica, ya que indican que el decisor tiene escaso margen de maniobra para mejorar el crecimiento de la economía. Las alteraciones que se produzcan en variables consideradas, como aumentar la tasa de ahorro, y/o disminuir la tasa de la población, solo tendrán efectos positivos sobre la tasa de crecimiento a corto plazo, pero no producirá efectos en la tasa tendencial a largo plazo de la renta per cápita de la economía. Así, por ejemplo, algunos autores han señalado que las alteraciones en el ahorro a través de impuestos van a afectar tanto al producto como al consumo, pero solo temporalmente. Van a ser las modificaciones en el progreso técnico las que afectarán de forma duradera.

Así, pues, las únicas políticas que tendrán efectos positivos y permanentes sobre la tasa de crecimiento serán aquellas que aumenten la tasa de progreso tecnológico (γ), ya que este es el único factor que aparece como determinante de la tasa de crecimiento a largo plazo de la renta per cápita de la economía.

3. Los modelos de crecimiento endógeno de Paul Romer

Con la publicación de la tesis de Romer en 1986, que había sido escrita tres años antes, aparecen los denominados modelos de crecimiento endógeno. A diferencia del modelo de Solow, que predice que solamente puede haber crecimiento a largo plazo si existen mejoras tecnológicas, ya que los supuestos introducidos por los neoclásicos no permiten introducir progreso tecnológico dentro del modelo, de ahí su apelativo de modelos de crecimiento exógeno. En cambio, el planteamiento del recién galardonado Paul Romer sí permite introducirlo, por ello se les denomina modelos de crecimiento endógeno (Barro y Sala-i-Martín, 1995).

Asimismo, junto a esta crítica que se acaba de señalar, se sostiene que los modelos neoclásicos no proporcionaban conclusiones satisfactorias, debido básicamente a tres motivos (Lecaillon *et al*., 1995; y Artus, 1993): ▷

1. Resulta muy difícil admitir que el esfuerzo inversor, los procesos de investigación y el desarrollo (I+D), el gasto público, la fiscalidad u otras variables o medidas de política económica no tengan ningún efecto a largo plazo sobre la tasa de crecimiento.
2. Los modelos neoclásicos no permiten conocer las causas por las cuales las tasas de crecimiento son diferentes entre los países.
3. No resulta explicado de una manera convincente por qué no se producen movimientos de capital de los países ricos hacia los pobres, en los que la productividad marginal del capital es mayor y, por tanto, de acuerdo con las hipótesis neoclásicas, dichos flujos deberían ser mayores.

Así, pues, los modelos de crecimiento endógeno intentan superar estas dificultades introduciendo, para ello, los fenómenos de aprendizaje y los rendimientos a escala crecientes. Desde esta perspectiva, el crecimiento económico se explica mediante la existencia de externalidades ligadas a la inversión en capital físico o humano e incluso en I+D.

Romer (1990) analiza la producción de tecnología, y las condiciones para que esto ocurra en el mercado, basándose en la creación de conocimiento a un nivel más abstracto. Afirma que las «ideas», aunque producidas con insumos de capital y mano de obra, son diferentes a los bienes y a los servicios normales en dos dimensiones: la medida en que son rivales (pueden ser utilizadas por más de un actor a la vez) y excluibles (cómo es de fácil evitar que otros los usen). Romer enfatizó que las ideas no son rivales y, en un grado variable, excluibles.

Romer también afirmó que las ideas van de la mano con rendimientos crecientes a escala. Por ejemplo, producir un producto nuevo implica costes inicialmente altos, pero copias adicionales presentarían una estructura de costes con rendimientos constantes. Romer introduce en su formulación que el capital debe tener un rendimiento estrictamente positivo para que se genere un crecimiento sostenido. Para que la tasa de crecimiento de equilibrio sea constante a largo plazo, cuando el crecimiento proviene de la acumulación endógena de un factor de producción, la tecnología de acumulación debe ser lineal. Este punto puede ser ilustrado por el modelo de Solow, donde el crecimiento disminuirá con rendimientos decrecientes a escala $\alpha < 1$, pero continuará a una tasa constante con $\alpha = 1$.

Romer (1987a) estableció por primera vez un marco para el desarrollo de nuevos productos donde el crecimiento se genera como un subproducto de la acumulación de capital, pero donde una variedad cada vez mayor de bienes intermedios impide que los rendimientos del capital caigan a cero. En 1990 introduce en una formulación su modelo planteado en 1987 para modelar las decisiones de I+D en una economía de mercado descentralizada.

3.1. Nuevos productos y los rendimientos de capital en los modelos de crecimiento endógeno

La aportación del recién premio Nobel fue pensar cómo se podría evitar que los rendimientos del capital lleguen a cero cuando el capital crezca sin límite, como ocurría en el modelo de Solow. Romer (1987a) presentó el siguiente modelo alternativo al de Solow, donde el «amor por la variedad» y la especialización permitieron al capital obtener un rendimiento positivo sostenido. En lugar de tener un *stock* de capital homogéneo como insumo, la producción proviene de mano de obra, y un ▷

intervalo de bienes de capital intermedios indexados por i, $x(i)$ es la cantidad de bien i, y A es la longitud determinada endógenamente de este intervalo (que comienza en 0). El *output* total se definiría:

$$y = \left(\int_0^A x(i)^\alpha\, di\right) l^{1-\alpha} \qquad [9]$$

donde $\alpha \in (0,1)$. Además, se supone que la duración del intervalo de variedad (A) y la cantidad de cada bien de capital especializado se determinan por la cantidad existente del bien de capital estándar (homogéneo) en cada momento. Los costes, en términos de capital homogéneo, de producir x unidades de un bien de capital especializado son convexos e implican un coste fijo (igual a $(1 + x^2)/2$. Luego, se maximiza $\int_0^A x(i)^\alpha\, di$ sobre A y $x(i)$ dado el capital disponible k implica que $A = (2 - \alpha)k$ y $x(i) = \sqrt{\frac{\alpha}{2-\alpha}} \equiv \bar{x}$ para todo $i \in [0,A]$ y de lo contrario $x(i) = 0$.

Por tanto, la presencia de costes fijos hace que sea óptimo elegir un intervalo finito de longitud proporcional a k. Debido a la función de costes convexa y los rendimientos decrecientes par cada $x(i)$, es óptimo asignar un nivel de suministro positivo idéntico para cada $x(i)$ en uso. Insertando $A = (2 - \alpha)k$ y $x(i) = \bar{x}$ se obtendría:

$$y = (2 - \alpha)k\bar{x}^\alpha l^{1-\alpha} \qquad [10]$$

donde recordamos que α, $\bar{x}$ y l son constantes exógenas. Es decir, después de maximizar sobre $x(i)$ y A, sea cual sea el nivel de capital k disponible, la producción es lineal en este nivel. Esto significa que a medida que se acumula el capital, su producto marginal no va a cero; de hecho, será constante en todo momento. A medida que se acumula más capital, el número de variedades de capital especializadas sigue aumentando, mientras que cada unidad se usa al mismo nivel.

La idea es que la expansión y/o la especialización permiten explicar el crecimiento económico. Si configuramos la inversión en sy como en el modelo original de Solow, entonces se obtendría:

$$k_{t+1} = (1 - \delta)k_t + s(2 - \alpha)k\bar{x}^\alpha l^{1-\alpha} k_t \qquad [11]$$

Claramente, el capital y la producción crecerán a una tasa positiva en todo momento siempre que $s(2 - \alpha)k\bar{x}^\alpha l^{1-\alpha} > \delta$; en esta nueva expresión la tasa de crecimiento es endógena. Así, pues, Romer logró crear un mecanismo económico mediante el cual la acumulación de capital, por su transformación en una variedad cada vez mayor de bienes de capital especializados, no presenta rendimientos decrecientes.

3.2. *La producción de nuevo conocimiento en los modelos de crecimiento endógeno*

Posteriormente, Romer (1990) sugirió cinco propiedades que serían deseables de un modelo de crecimiento económico a largo plazo:

1. La acumulación de ideas es la fuente del crecimiento económico a largo plazo.
2. Las ideas no son rivales.
3. Un *stock* más grande de ideas hace que sea más fácil encontrar nuevas ideas.
4. Las ideas se crean en una actividad costosa pero decidida.
5. Las ideas pueden ser de su propiedad y el propietario puede vender los derechos de uso de las ideas a un precio de mercado. ▷

Romer (1990 y 1993) destacó las propiedades segunda y quinta: la no rivalidad, que implica una forma de externalidad positiva, y la exclusión parcial, que implica una distorsión de monopolio cuando se implementa en una economía de mercado.

En estos trabajos Romer introduce las nuevas ideas. Una vez que estas han sido desarrolladas, las ideas las introduce en el modelo como una nueva variedad *i*. Se desarrolla en un proceso costoso, que ahora utiliza mano de obra como entrada (a diferencia del capital, como se ha visto en el apartado anterior). En este caso, el trabajo también se puede utilizar para producir nuevas ideas, es decir, serían insumos laborales que se usan en las tareas de investigación. Supongamos que el coste de producir una idea es $1/(\xi A_t)$ unidades de trabajo. Denotando el número de investigadores en el momento *t* por l_t^R, el número de nuevas ideas viene dado por:

$$A_{t+1} - A_t = \xi A_t \, l_t^R \qquad [12]$$

Como la productividad de los investigadores es proporcional al *stock* de ideas existentes, el modelo incorpora la propiedad tres antes mencionada. Además, el modelo satisface la linealidad necesaria para generar una tasa de crecimiento constante a largo plazo.

Así, pues, una idea de investigación *i* es introducida en el modelo como una cantidad producida de $x(i)$, y como antes, $x(i)$ se produce a partir del capital homogéneo, pero con una estructura de producción lineal más simple; para producir una unidad de $x(i)$ se necesitan η unidades de capital general. Con este supuesto se obtiene la restricción de recursos de capital:

$$\int_0^{A_t} \eta x(i) di = k_t \qquad [13]$$

Dado que cada $x(i)$ tiene rendimientos decrecientes en la producción nacional, es óptimo repartir el capital general de manera equitativa entre los bienes especializados: $x(i) = k_t/(\eta A_t)$ para todo *i*. En este contexto, todas las ideas son igualmente buenas desde una perspectiva de producción y sus costes unitarios de producción también son idénticos.

A partir de aquí se pueden establecer todas las ecuaciones clave que determinan las cantidades del modelo. En particular, un planificador social benévolo se resolvería del siguiente problema:

$$\max_{\{c_t,\, k_{t+1},\, A_{t+1},\, l_t^R\}_{t=0}^{\infty}} \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \frac{c_t^{1-\sigma} - 1}{1-\sigma} \qquad [14]$$

sujeto a

$$c_t + k_{t+1} - (1-\delta)k_t = A_t \left(\frac{k_t}{\eta A_t}\right)^{\alpha} (l - l_t^R)^{1-\alpha} \qquad [15]$$

y

$$A_{t+1} - A_t = \xi A_t \, l_t^R \qquad [16]$$

Para todo $t = 0,1,\ldots$

La función de producción se puede escribir como proporcional a $k_t^{\alpha}(A_t l_t^F)$, donde $l^F \equiv l - l^R$ es la cantidad de trabajo utilizada en la producción del bien final (la constante de proporcionalidad es $\eta^{-\alpha}$). Por lo tanto, la tasa de crecimiento de *A*, concretamente ξl_t^R, es análoga a la tasa exógena γ en el modelo de Solow, pero l_t^R es endógeno, es el resultado de una elección, el uso de trabajadores en la producción del bien final o utilizar los trabajadores en actividades de investigación y/o producción de ideas. Por su parte, Romer plantea que para que las ideas tengan valor se les debe otorgar derechos de patente (Royal Swedish Academy of Sciences, 2018). ▷

3.3. *El modelo de Romer con externalidades del capital*

Romer (1986) dio un nuevo impulso a la literatura del crecimiento económico con la introducción de una función de producción con externalidades del capital. Este autor, en su artículo «Increasing Returns and Long-Run Growth», sostiene que las empresas que invierten adquieren también experiencia o conocimientos. Estos conocimientos pueden ser también utilizados por las demás empresas, y de ahí que el producto de estas también aumente.

A continuación se exponen las implicaciones de utilizar una función de producción con externalidades en el modelo con tasas de ahorro constantes. Una función de producción sería:

$$Y_t = AK_t^{\alpha} L_t^{1-\alpha} e_t^{\eta} \qquad [17]$$

donde Y_t es la producción agregada en el momento t, K_t es el capital agregado en el momento t y L_t es el trabajo agregado en el momento t. La diferencia entre esta función de producción y la función neoclásica Cobb-Douglas reside en el término e_t^{η}, que representa la externalidad. El parámetro η indica la importancia de la externalidad. Cuando $\eta = 0$, tenemos la función de producción neoclásica Cobb-Douglas sin externalidades. A medida que η aumenta, también lo hace el papel de la externalidad.

Según Romer, e es el capital agregado de la economía, K, dado que la inversión de cualquier empresa de la economía ayuda a aumentar el *stock* de experiencia o conocimientos de todas las demás. Sin embargo, para empezar, seguiremos a Lucas (1988) y supondremos que e es igual al capital por persona, $e = k$, en lugar del capital agregado. Como veremos, este supuesto no está exento de consecuencias importantes. Si incorporamos este supuesto, podemos reescribir la función de producción agregada como:

$$Y = AK^{\alpha} L^{1-\alpha} e^{\eta} = AK^{\alpha} L^{1-\alpha} \left(\frac{K}{L}\right)^{\eta} = \\ = AK^{\alpha+\eta} L^{1-\alpha-\eta} \qquad [18]$$

En primer lugar, se ha de comprobar si esta función de producción cumple las propiedades neoclásicas, y ocurre cuando $\alpha + \eta = 1$ o $\alpha + \eta > 1$.

Para poder incorporar esta función de producción en el modelo de crecimiento de Solow, debemos primero escribir la función de producción en términos per cápita para poder luego introducirla en la ecuación fundamental del modelo de Solow. Dividiendo la ecuación [17] por L_t e ignorando los subíndices temporales para simplificar la notación, se obtiene:

$$y = Ak^{\alpha} e^{\eta} \qquad [19]$$

Considerando el supuesto de que $k = e$, entonces:

$$y = Ak^{\alpha+\eta} \qquad [20]$$

Si substituye la ecuación [20] en la ecuación fundamental de Solow, se obtiene:

$$\dot{k} = sAk^{\alpha+\eta} - (\delta + n)k \qquad [21]$$

La tasa de crecimiento del capital per cápita sería, por tanto:

$$\frac{\dot{k}}{k} = \gamma_k = sAk^{\alpha+\eta-1} - (\delta + n) \qquad [22]$$

El comportamiento de la economía depende crucialmente de si la suma de parámetros $\alpha + \eta$ es inferior, superior o igual a uno, como se puede ver a continuación en estos tres casos (Sala-i-Martin, 1999: 57-61): ▷

Primero, si existen externalidades, $\eta > 0$, pero no son muy grandes, la suma de los parámetros $\alpha + \eta$ es inferior a uno. Cuando sucede esto, el exponente del capital en la función de ahorro es negativo y [22] puede expresarse del siguiente modo:

$$\gamma_k = \frac{sA}{k^{1-\alpha-\eta}} - (\delta + n) \qquad [23]$$

Existe, pues, un *stock* de capital de estado estacionario, y es único. Si calculamos este *stock* de capital, obtenemos que $k^* = \left(\frac{sA}{\delta + n}\right)^{\frac{1}{1-\alpha-\eta}}$. Es más, el estado estacionario es estable y la economía se comporta exactamente igual que la economía neoclásica a pesar de las externalidades.

Segundo: en el caso en que las externalidades sean $\eta = 1 - \alpha$, de manera que la suma $\alpha + \eta = 1$. Si se substituye en la ecuación de crecimiento [22], se obtiene que la tasa de crecimiento, en este caso, es $\gamma_k = sA - (\delta + n)$. Es decir, la tasa de crecimiento modelo *AK* de Rebelo (1991) y, por tanto, si utilizamos la igualdad $\alpha + \eta = 1$, la función de producción per cápita [20] quedaría $y = Ak$. Las implicaciones más conocidas de este modelo son: la tasa de crecimiento puede ser positiva sin necesidad de una variable exógena que crezca continuamente y, además, las medidas de política económica pueden afectar a las tasas de ahorro e inversión y, por tanto, a las tasas de crecimiento de la economía.

Por último, cuando las externalidades son tan grandes que la suma de los $\alpha + \eta > 1$, se obtiene un exponente del capital positivo en la ecuación de crecimiento [22]. El problema es que este estado estacionario es inestable, en el sentido de que, si el *stock* de capital es superior a k^*, entonces el crecimiento es positivo. El *stock* de capital por persona, k, crece sin parar de forma positiva. Por el contrario, si el stock de capital es inferior a k^*, entonces la tasa de crecimiento es negativa, el capital disminuye y la economía se aproxima a la extinción. No hace falta decir que el interés empírico de estas predicciones es limitado, puesto que, en la vida real, no se observan economías cuyas tasas de crecimiento vayan aumentando en el tiempo o cuyo capital tienda a desaparecer.

El interés del modelo de Romer es que la existencia de externalidades es una manera de argumentar que la tecnología de nuestra economía podría tener la forma *AK*. El problema principal observado en esta sección es que, para que la tecnología se convierta en *AK*, hace falta que existan externalidades, que sean suficientemente grandes y, además, que sean tales que la suma del exponente de la externalidad y el del capital sea exactamente igual a uno. Dicho de otro modo, es necesario que el exponente que representa la externalidad sea $\eta = 1 - \alpha$. De alguna manera, el tamaño de la externalidad, η, debe ser tan «grande» como la suma de las rentas de todos los trabajadores de la economía, $1 - \alpha$, supuesto que parece poco razonable.

4. Modelos de evaluación integrados de Nordhaus

Nordhaus extendió el modelo de crecimiento de Solow en los años 1970 al incluir el calentamiento global causado por las emisiones de carbono. De modo que plantea un modelo económico que incorpora un análisis global del cambio climático, ya que la sociedad y la naturaleza interactúan dinámicamente. Al reconocer la necesidad de tal enfoque, Nordhaus fue pionero en el desarrollo de modelos de evaluación integrados (Integrated Assessment Models o IAMs). ▷

Su idea general fue considerar cómo la producción y el bienestar humano se verían limitados por los cambios en el clima debido al uso de combustibles fósiles. El modelo clima-economía debe ser dinámico y tener en cuenta los siguientes submodelos:

- Un modelo de circulación de carbono que describa la trayectoria y concentración de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera.
- Un modelo climático que describa la evolución del clima a lo largo del tiempo en función de la trayectoria de la concentración de CO_2.
- Un modelo económico circular que describa cómo la economía y la sociedad se ven afectadas por el cambio climático a lo largo del tiempo.

Nordhaus mostró cómo estos submodelos muy diferentes podrían integrarse en lo que hoy en día se conocen como modelos de evaluación integrados (IAMs).

4.1. Modelo Provisional de Nordhaus (1975, 1977)

Nordhaus plantea su primer modelo a mediados de los años 1970, aunque aún no se trata de un IAM completo, debido a que no introduce un modelo climático ni una formulación explícita de los daños económicos derivados del cambio climático, pero es el punto de partida de sus trabajos posteriores. Su objetivo era especificar cómo la concentración de CO_2 en la atmósfera y, por lo tanto, el cambio climático, podría mantenerse a un nivel tolerable, al menor coste posible (Nordhaus, 1975 y 1977). Tal análisis sigue siendo valioso hoy: el Acuerdo de París 2015 bajo la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático estableció como objetivo mantener el aumento de la temperatura media mundial por debajo de 2 grados centígrados (2 ºC).

Nordhaus (1975) introduce en su análisis lo que se conoce como «módulo de circulación de carbono». Este describe cómo las emisiones globales de CO_2 influyen en la concentración de CO_2 en la atmósfera. El *output* del módulo es una trayectoria temporal de la concentración de CO_2 en la atmósfera. Concretamente, y basándose en los resultados obtenidos de las ciencias naturales, establece siete depósitos de carbono: (i) la troposfera (< ~10 kilómetros), (ii) la estratosfera, (iii) las capas superiores del océano (0-60 metros), (iv) el océano profundo (> 60 metros), (v) la biosfera a corto plazo, (vi) la biosfera a largo plazo, y (vii) la biosfera marina.

Dados estos supuestos, la circulación de carbono se puede modelar como un sistema lineal de primer orden para el año siguiente:

$$M_{t+1} = D \,.\, M_t + E_t \qquad [24]$$

donde M_t es un vector de siete elementos que representa el tamaño de los siete depósitos de carbono. D es una matriz de 7x7 de coeficientes de flujo entre depósitos. Los elementos de cada columna se suman a la unidad, debido a que no se pierde carbono en el sistema. Finalmente, E_t representa las emisiones. Usando este modelo, se puede describir la evolución de la concentración de CO_2 en la atmósfera (así como la cantidad de carbono en los otros depósitos) para cualquier escenario de emisión.

Desde un punto de vista económico, este primer modelo de Nordhaus (1975) es un primer paso para analizar cómo se puede lograr una restricción para la concentración de CO_2 en la atmósfera a un coste mínimo. Además, ▷

el documento analiza las posibles consecuencias de diferentes rutas de concentración de CO_2, incluidos los efectos sobre las temperaturas y los niveles del mar.

4.2. *Modelos DICE y RICE*

La primera contribución cuantitativa fundamental de Nordhaus (1994a) fue la construcción del modelo DICE (Dynamic Integrated model of Climate and the Economy). Este modelo se utiliza por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). Además del sistema de circulación de carbono, incorpora la relación dinámica entre los cambios en el balance global de energía y la temperatura media global. Estas relaciones fueron lo suficientemente simples para poder combinarse con el modelo de crecimiento económico de Solow, donde los factores productivos son el combustible fósil, el capital y la mano de obra.

Dos años más tarde, modificó el modelo introduciendo diferentes regiones. El nuevo modelo se conoce como RICE (Regional dynamic Integrated model of Climate and the Economy) (Nordhaus and Yang, 1996).

En primer lugar, teniendo en cuenta el clima, el CO_2 es un gas de efecto invernadero que cambia el balance entre la luz solar entrante y la radiación térmica de onda larga saliente. De hecho, el laureado en Química de 1903, Svante Arrhenius, describió el efecto directo de las concentraciones de CO_2 en el balance enérgetico por medio de la siguiente ecuación:

$$F_t = \frac{\eta}{ln2} \ln \frac{M_t}{M_0} \qquad [25]$$

La fórmula de Arrhenius dice que el cambio en el balance energético *F*, medido en potencia por área, es proporcional al logaritmo natural de la relación entre la concentración real de CO_2 atmosférica M_t y el valor referencia M_0. El parámetro mide cómo el balance energético cambia con la concentración de CO_2. Con esta representación simplificada del efecto invernadero, Nordhaus formuló un sistema de ecuaciones en diferencias para la temperatura media global (de la superficie) T_t y para la temperatura del océano T_t^0, ambas expresadas como desviaciones de sus niveles preindustriales. Estas ecuaciones deben considerarse como aproximaciones lineales alrededor del estado estacionario preindustrial y, además, se basa en la ley de la naturaleza de que la energía no desaparece. Así pues, el sistema propuesto sería el siguiente (el paso del tiempo se mide en décadas):

$$T_t - T_{t-1} = \sigma_1\big((F_t + O_t - \kappa T_t) - \sigma_2(T_{t-1} - T_{t-1}^0)\big) \qquad [26]$$

$$T_t^0 - T_{t-1}^0 = \sigma_3\,(T_{t-1} - T_{t-1}^0) \qquad [27]$$

El término $\big((F_t + O_t - \kappa T_t) - \sigma_2(T_{t-1} - T_{t-1}^0)\big)$ describe el balance energético de la atmósfera y la capa superior de los océanos. Aquí, F_t mide las subidas de energía debidas al efecto invernadero causado por el CO_2, O_t incluye otras subidas de energía provocadas por actividad humana, tales como las emisiones de metano y los aerosoles, mientras que T_t cuantifica el hecho de que un cuerpo más caliente irradia más energía. En este caso, la llamada retroalimentación de Planck, implica que una tierra más cálida, todo lo demás igual, irradia más energía al espacio en forma de luz infrarroja. El término $\sigma_2(T_{t-1} - T_{t-1}^0)$ refleja los flujos de energía de la atmósfera a los océanos profundos, que es una función de la diferencia de temperatura y aparece con signo negativo en el balance energético de la atmósfera. Si el balance energético total de la atmósfera y el océano superior presentan un excedente, la temperatura atmosférica ▷

aumentará: $T_t - T_{t-1} > 0$. Para un excedente dado, la velocidad del aumento de la temperatura está determinada por el parámetro σ_1.

El balance energético del océano profundo es más simple y solo contiene el flujo de energía de la atmósfera y la capa superior del océano. Si presenta un exceso, es decir, los flujos de energía neta son hacia abajo $T_{t-1} - T^0_{t-1} > 0$, los océanos se calientan a una velocidad determinada por σ_3.

Es sencillo ver que, si la concentración de CO_2 se estabiliza al doble del nivel preindustrial $\left(\frac{M_t}{M_0} = 2\right)$, el balance energético se incrementa en η. Sin tener en cuenta otras emisiones exógenas de energía ($O_t = 0$), finalmente se materializará un nuevo estado estacionario en el que las dos temperaturas son constantes. Para que esto sea posible, la temperatura atmosférica debe aumentar para equilibrar el efecto invernadero: $T = \frac{\eta}{\kappa}$.

En cambio, el modelo de circulación de carbono en DICE y RICE está relacionado con el primer modelo antes expuesto, pero Nordhaus (1975) solo utiliza tres depósitos de carbono: la atmósfera (M_t), la biosfera y las capas superiores del océano (M_t^U) y los océanos profundos (M_t^L). Así, pues, las variables M_t, M_t^U y M_t^L miden la masa de carbono en sus respectivos depósitos. Simplificando [24] en estos tres componentes y teniendo en cuenta las propiedades, que el carbono no puede desaparecer y que las entradas de un depósito deben ser idénticas a los flujos de salida de otro, se puede reescribir del sistema de circulación de carbono como:

$$M_t - M_{t-1} = -\phi_{12}M_{t-1} + \phi_{21}M^U_{t-1} + E_{t-1} \qquad [28]$$

$$M^U_t - M^U_{t-1} = \phi_{12}M_{t-1} - (\phi_{21} + \phi_{23})M^U_{t-1} + \phi_{32}M^L_{t-1} \qquad [29]$$

$$M^L_t - M^L_{t-1} = \phi_{23}M^U_{t-1} - \phi_{32}M^L_{t-1} \qquad [30]$$

Aquí, $\phi_{12}M_{t-1} - \phi_{21}M^U_{t-1}$ representa el flujo neto de carbono de la atmósfera hacia el depósito superior M_t^U, que se resta en la primera ecuación y se agrega en la segunda. Análogamente, $\phi_{23}M^U_{t-1} - \phi_{32}M^L_{t-1}$ es el flujo neto hacia el océano profundo desde la biosfera y las capas superiores del océano, que se resta en la segunda ecuación y se agrega en la tercera. Habiendo especificado el modelo dinámico de circulación de carbono, Nordhaus calibró sus parámetros para que se comportaran de acuerdo con los modelos de circulación de carbono más modernos.

Una innovación clave en DICE y en RICE sobre Nordhaus (1975) era que estos modelos añaden una función de daño económico considerando como variable la subida de las temperaturas medias globales. Nordhaus (1994a) fue pionero en el enfoque «desde abajo hacia arriba» para la agregación de daños. Su idea fue recopilar una gran cantidad de estudios microeconómicos sobre diversas consecuencias del cambio climático: por ejemplo, los daños a la agricultura, las regiones costeras, los servicios, la biodiversidad y la salud humana.

Es difícil imaginar las consecuencias que podría tener un cambio climático drástico. Para resolver este problema realizó una encuesta entre expertos en cambio climático. Esta encuesta solicitó evaluaciones de las consecuencias potencialmente dañinas del cambio climático y sus probabilidades asociadas.

Los resultados de la encuesta se centraron en un componente de «impacto catastrófico», que incluía una prima de riesgo (dependiendo de lo que los individuos estén dispuestos a pagar sobre el valor esperado para reducir un riesgo) (Nordhaus, 1994b).

Finalmente, Nordhaus especificó la siguiente función: ▷

$$\Omega(T_t) \equiv \frac{1}{1 + \theta_1 T_t + \theta_2 T_t^2} \qquad [31]$$

Esta función representa la proporción del PIB que queda después de los daños climáticos. Los parámetros θ_1 y θ_2 representan suma de las funciones de daño específicas de los mecanismos subyacentes, incluido el componente de impacto catastrófico. La función de daño describe cuánto pierde la sociedad como resultado del calentamiento global, con menos recursos para el consumo y la inversión.

Esta función de daño es parte de la fracción económica del modelo, que ahora analizamos con algo más de detalle. Los modelos económicos en DICE y RICE se basan en el modelo de Solow, por tanto, los modelos incluyen una función de utilidad explícita de los agentes. En RICE se incluyen las siguientes regiones: EEUU, OCDE-Europa, Rusia, Europa del Este y China. Los consumidores maximizan su utilidad al elegir cuánto ahorrar y consumir (los precios vienen como dados). Específicamente, en la región *j*, el bienestar del consumidor es:

$$\sum_{t=0}^{\infty} \beta^t L_{j,t} \frac{c_{j,t}^{1-\sigma} - 1}{1 - \sigma} \qquad [32]$$

donde $L_{j,t}$ es la población de la región en el periodo *t* y $c_{j,t}$ es su consumo per cápita. $L_{j,t}$ aumenta en función del crecimiento observado de la población, pero se supone que el crecimiento de la población disminuirá con el tiempo, lo que eventualmente llevará a una población global estable. Además, se supone que la suma infinita en la expresión de bienestar refleja la suposición de que los individuos son altruistas con las generaciones futuras.

Las empresas maximizan los beneficios, producen el bien final y contratan mano de obra, capital y energía en mercados competitivos. Al igual que en el modelo de Solow, se supone que utilizan una función de producción de Cobb-Douglas, donde la producción del producto final en la región *j* y el periodo *t* es:

$$\Omega_j(T_t) A_{j,t} k_{j,t}^{\alpha} l_{j,t}^{1-\alpha-\gamma_j} es_{j,t}^{\gamma_j} \qquad [33]$$

donde el factor de productividad total tiene dos términos. El primero $\Omega_j(T_t)$ es la función daño climático que produce una externalidad negativa (en la temperatura global). El segundo término es $A_{j,t}$, un parámetro de tecnología que aumenta exógenamente con el tiempo, al igual que en el modelo original de Solow (Nordhaus no incorporó el mecanismo de tecnología endógena de Romer). La cantidad de servicios energéticos por unidad de emisiones de carbono viene dado por $es_{j,t} = \xi_{j,t} e_{j,t}$, donde $e_{j,t}$ es uso de energía fósil y $\xi_{j,t}$ es la inversa de la intensidad fósil.

Se supone que el precio de la energía fósil neta de los costes de transporte y los impuestos regionales se iguala en todas las regiones. Pero los precios brutos pueden variar según los márgenes específicos de la región, incluidos los costes de transporte y los impuestos a la energía. Con el tiempo, la intensidad fósil $1/\xi_{j,t}$ disminuye, reduciendo la cantidad de carbono requerido por unidad de servicio energético de carbono. El combustible fósil es un recurso que se agota y, por tanto, el coste de su producción aumenta conforme aumenta la extracción histórica acumulada. Específicamente, el modelo asume que el coste de extraer combustible fósil aumenta considerablemente cuando la extracción acumulada alcanza un nivel crítico *CumC*. Los costes de producción fósil se especifican del siguiente modo:

$$q_t = x_1 + x_2 \left(\frac{\sum_{s=1995}^{t} E_s}{CumC} \right)^4 \qquad [34]$$

donde q_t es el coste de producir combustible fósil en el periodo *t* y $E_t = \sum_j e_{j,t}$ es el uso ▷

global de combustible fósil en el periodo *t*. Los parámetros x_1, x_2, *CumC*, reflejan que la oferta sea bastante elástica inicialmente, pero muy inelástica cuando se aproxima al valor *CumC*. Dado que los agentes tienen miras de futuro, esto implica que el precio del combustible fósil incluye el llamado término Hotelling, que representa el aumento de los costes marginales por la extracción futura de combustibles fósiles (Hotelling, 1931).

Finalmente, el uso agregado de combustibles fósiles E_t entra como el término de emisión en sistema de circulación de carbono previamente analizado, lo que cierra el modelo. Así, pues, la emisión de carbono fósil a la atmósfera entra en el sistema de circulación de carbono, lo que impulsa la concentración de carbono en la atmósfera, a través del efecto invernadero, y esto aumenta la temperatura global *Tt*, lo que reduce el *output* a través de $\Omega_j(T_t)$.

Además, las empresas emisoras producen emisiones pequeñas, pero los daños se extienden por todo el mundo, el efecto de las emisiones de la empresa en su propia productividad es insignificante y, por tanto, la empresa no internaliza esta externalidad negativa. Sin embargo, el efecto agregado de todas las emisiones en el mundo ciertamente no es despreciable, lo que crea un fallo de mercado en los mercados no regulados.

Según la investigación de Nordhaus, el remedio más eficiente para los problemas causados por las emisiones de gases de efecto invernadero sería un esquema global de impuestos sobre el carbono que se imponga de manera uniforme en todos los países. Esta recomendación se basa en un resultado formulado en la década de 1920 por un economista británico, A.C. Pigou, a saber: que cada emisor debe pagar el coste social del daño causado por sus emisiones a través de un precio adecuado (Pigou, 2017). Un sistema de comercio de emisiones global puede hacer el mismo trabajo, siempre que los límites de emisiones se establezcan lo suficientemente bajos como para resultar en un precio suficientemente alto para el carbono.

Sin embargo, los IAMs no solo proporcionan resultados cualitativos, sino que también permiten calcular rutas cuantitativas para el mejor impuesto al carbono y mostrar cómo estas rutas dependen de suposiciones sobre parámetros: por ejemplo, cuán sensible es la temperatura global a la concentración de carbono en la atmósfera, cuánto tiempo permanece en la atmósfera y la magnitud del daño causado por el cambio climático (Royal Swedish Academy of Sciences, 2018).

5. Conclusiones

En 2018, el Premio Nobel ha recaído sobre dos economistas por su análisis de los factores determinantes del crecimiento a largo plazo. Romer analiza cómo el conocimiento es la variable clave en los modelos de crecimiento y cómo las ideas son rentables y producen crecimiento en la medida que se pueden comercializar. En cambio, Nordhaus pone de manifiesto los límites al crecimiento debido a las posibles consecuencias negativas del cambio climático si no se controlan las emisiones de carbono.

Ambos tipos de análisis suponen que el papel de decisor político es crucial para influir en el crecimiento económico. Según Romer, las medidas de política económica que supongan incrementar el *stock* de conocimiento de las economías tendrían efectos positivos en crecimiento económico a largo plazo. Por su parte, Nordhaus propone un sistema global de impuestos de forma que se evite que la temperatura global del planeta aumente por encima del nivel acordado por los países a nivel mundial, para que el crecimiento económico a largo plazo sea sostenible. ▷

Bibliografía

[1] Artus, P. (1993). Croissance endogène: revue des modèles et tentative de sythèses. *Revenue économique*, 44, 189-227.

[2] Barro, R. J. y Sala-I-Martin, X. (1995). *Economic growth*. Londres: McGraw-Hill.

[3] Hotelling, H. (1931). The Economics of Exhaustible Resources. *Journal of Political Economy*, 39 (2), 137-175.

[4] Lecaillon, J.; Le page, J.; Ottavj, C. H. y Grangeas, G. (1995). *Macrodynamique. La croissance*. París: Eds. Cujas.

[5] Galindo, M. A. y Malgesini, G. (1993). *Crecimiento económico*. Madrid: McGraw-Hill.

[6] Mankiw, N. G. (1995). The growth of nations. *Brookings Papers on Economic Activity* (1), 275-310.

[7] Nordhaus, W. D. (1975). Can We Control Carbon Dioxide? *IIASA Working Paper*, 75-63. Vienna, Austria.

[8] Nordhaus, W. D. (1977). Economic Growth and Climate: The Case of Carbon Dioxide. *American Economic Review*, 67 (1), 341-346.

[9] Nordhaus, W. D. (1994a). *Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change*. Cambridge, MA: MIT Press.

[10] Nordhaus, W. D. (1994b). Expert Opinion on Climate Change. *American Scientist,* 82 (1), 920-937.

[11] Nordhaus, W. D. y Yang, Z. (1996). A Regional Dynamic General-Equilibrium Model of Alternative Climate-Change Strategies. *American Economic Review*, 86 (4), 741-765.

[12] Pigou, A. (2017). *The economics of welfare*. Routledge: taylorfrancis.com

[13] Rebelo, S. (1991). Long-run policy analysis and long-run growth. *Journal of Political Economy*, 99 (3), 500-521.

[14] Romer, D. (1996). *Advanced macroeconomics*. Londres: McGraw-Hill.

[15] Romer, P. M. (1986). Increasing Returns and Long-Run Growth. *Journal of Political Economy*, 94 (5), 1002-1037.

[16] Romer, P. M. (1987a). Growth Based on Increasing Returns Due to Specialization. *American Economic Review*. *Papers and Proceedings*, 77 (2), 56-62.

[17] Romer, P. M. (1987b). Crazy Explanations for the Productivity Slowdown. En: Fischer, S. (ed.), *NBER Macroeconomics Annual*, 2, 163-210.

[18] Romer, P. M. (1990). Endogenous Technological Change. *Journal of Political Economy*, 98 (5 Part 2), S71-S102.

[19] Romer, P. M. (1993). Two Strategies for Economic Development: Using Ideas and Producing Ideas. *Proceedings of the World Bank Annual Conference of Development Economics 1992*. Washington, DC: World Bank.

[20] Royal Swedish Academy of Sciences (2018). *Economic Growth, Technological Change, and Climate Change*. Disponible en: *https://www.nobelprize.org/uploads/2018/10/advanced-economicsciencesprize2018.pdf*

[21] Sala-i-Martin, X. (1999). *Apuntes de crecimiento económico*. Barcelona: Antoni Bosch.

[22] Solow, R. M. (1956). A Contribution to the Theory of Economic Growth. *Quarterly Journal of Economics*, 70 (1), 65-94.