La innovación en la literatura reciente del crecimiento endógeno

Innovation in the recent endogenous growth literature

Carlos Borondo Arribas[1]
Universidad de Valladolid

Resumen. Este artículo presenta un repaso de los principales modelos recientes que hacen de la investigación y el desarrollo (I+D) el motor del crecimiento económico. El tema se acota temporalmente empezando en 1990 y se circunscribe exclusivamente a la literatura del crecimiento endógeno. Se distingue entre innovación horizontal y vertical, analizando en cada caso los determinantes de la cantidad de I+D realizada, que a su vez determina la tasa de crecimiento de la economía. Se revisa también la evidencia empírica sobre la aportación de la I+D al crecimiento y finalmente se detallan algunos modelos recientes del proceso de difusión internacional del conocimiento y su efecto sobre la divergencia internacional.

Palabras clave. Innovación; I+D; crecimiento endógeno.

Clasificación JEL. O10, O30, O47.

Abstract. This paper reviews the most important recent models making the research and development (R&D) the engine of growth. The survey starts in 1990 and deals only with the endogenous growth literature. The distinction between horizontal and vertical innovation is explained, analyzing in each case the determinants of the amount of R&D, which in turn determines the rate of growth of the economy. The empirical evidence about the contribution of R&D to growth is also summarized and finally we cover the recent models on international technology diffusion and its effect on international convergence.

Key words. Innovation; R&D; endogenous growth.

JEL classification. O10, O30, O47.

Fecha de recepción del artículo. 18-03-2008
Fecha de aceptación del artículo. 12-09-2008

1. Introducción

Pocos economistas dudan de que la innovación es el principal impulsor del progreso económico y del bienestar. La innovación, tal como la define el diccionario, es la creación o modificación de un producto y su introducción en el mercado. Naturalmente esta actividad está ligada a la investigación, que a su vez se define como la realización de actividades intelectuales y experimentales de modo sistemático con el propósito de aumentar los conocimientos sobre una determinada materia. La propia expresión ya ofi-

[1] Agradezco los comentarios de Zenón Jiménez-Ridruejo y de los dos evaluadores anónimos. Cualquier error es de mi responsabilidad.

cial I+D+I reconoce esta relación (Investigación + Desarrollo + Innovación). En este artículo nos referimos al conjunto de estas actividades como a una sola, que requiere *inputs*, un capital humano altamente cualificado y unos recursos financieros (sin contar el marco regulatorio, que los economistas siempre damos por hecho) para generar el *output* que en este caso son las innovaciones o simplemente las ideas, que es el nuevo conocimiento científico-técnico que se va acumulando en un *stock* también llamado capital tecnológico. La relación entre *inputs* utilizados y *output* obtenido es la función de producción de ideas. Esta función es la clave de cualquier explicación de cómo y cuánto se investiga.

En las últimas décadas los gobiernos han reconocido la importancia de la innovación para el progreso de sus economías y han tratado de potenciarla. Como toda actividad económica, la innovación puede ser influida por la acción del gobierno a través de varios mecanismos (OCDE, 2007): (1) El marco institucional y regulatorio de esta actividad; (2) La inversión pública directa en investigación y ciencia; (3) Apoyo a la investigación privada: incentivos fiscales, subvenciones, sociedades público-privadas, etc.; (4) Reducción de regulaciones restrictivas de la competencia en los mercados de bienes, especialmente respecto a la inversión extranjera directa, que mejora la transferencia de conocimientos entre países; (5) Condiciones macroeconómicas estables con tipos de interés reales bajos; (6) Disponibilidad de financiación. La justificación de estas estrategias y su correcto diseño requieren un conocimiento teórico y empírico profundo de la actividad innovadora y sus conexiones con el resto de actividades económicas.

La ciencia económica siempre ha sido consciente de la importancia de esta actividad, sin embargo no ha sido hasta hace bien poco que se han dado las condiciones para profundizar en su conocimiento. La famosa aportación de Robert Solow y Trevor Swan en los años cincuenta del siglo XX nos enseñó que la mera acumulación de capital productivo a través de la inversión no asegura un aumento permanente del nivel de vida, debido a los rendimientos decrecientes del capital. Sólo el progreso técnico permanente es capaz de mantener un crecimiento *per capita* permanente. Tuvieron que pasar treinta años para que, ya a finales de los ochenta, se empezara a esbozar rigurosamente qué factores económicos contribuían al progreso técnico y cómo. Este artículo trata de ser una introducción a los modelos recientes, empezando en 1990, y dentro de la tradición neoclásica, que analizan explícitamente el proceso de innovación desde un punto de vista macroeconómico. Dejamos fuera toda la literatura de la Organización Industrial que analiza comportamientos individuales o de un mercado de forma aislada del resto, así como otros enfoques alternativos del cambio tecnológico como el evolucionista, que intenta aplicar los principios de la biología (ver, por ejemplo, la panorámica de Nelson, 1995).

El objeto de los modelos de innovación dentro de la literatura del crecimiento endógeno es especificar la actividad de un sector dedicado específicamente a la innovación, con una función de producción de ideas o innovaciones, determinar cuántos recursos asignará en equilibrio una economía de mercado a este sector y su interacción con otras actividades. Con ello se puede desentrañar los incentivos para investigar y obtener conclusiones sobre políticas de apoyo al crecimiento, sobre difusión internacional de la tecnología y sobre convergencia o divergencia entre países, entre otras cuestiones. La exposición se centrará en las líneas generales de los modelos, dejando a un lado muchos de los detalles y extensiones que el lector interesado puede encontrar en la bibliografía citada. De esta forma intentamos centrarnos en las cuestiones fundamentales y en las aplicaciones y debates surgidos.

La estructura del artículo es la siguiente. En el epígrafe siguiente se presentan los modelos más sencillos, denominados de innovación horizontal porque lo que se crean son nuevas variedades de bienes intermedios que aumentan la especialización en la producción de bienes finales y con ello la productividad y la renta *per capita*. En el epígrafe tercero se aborda una segunda estrategia para explicar el proceso de innovación, conocida como innovación vertical o escalera de la calidad. En este caso los aumentos de productividad se deben a una mejora continua de las propiedades de un número fijo de bienes intermedios. En el epígrafe cuarto se revisa la evidencia empírica sobre el efecto de la I+D en el crecimiento económico, distinguiendo dos tipos de estudios: los que confeccionan una contabilidad del crecimiento y los que estiman funciones de producción. En el quinto epígrafe se aborda un tema que está recibiendo mucha atención: la difusión internacional del conocimiento y su efecto sobre la convergencia. El punto de partida de esta literatura es la constatada evidencia de que el conocimiento fluye entre países; la cuestión es cómo y en qué condiciones. En el último epígrafe se ofrecen unas conclusiones y se esbozan algunos temas que quedan fuera de esta panorámica por motivos de espacio.

2. Innovación por aumento de la variedad

En este epígrafe se presentan los modelos de innovación horizontal, que son aquellos donde la investigación consiste en descubrir nuevas variedades de bienes intermedios que permiten producir más bienes finales. La intuición de estos modelos, que surgen a partir de Romer (1990), es que el descubrimiento de nuevos materiales (plásticos, semiconductores, etc.) permite a las empresas mejorar la productividad a través de la especialización (una idea original de Adam Smith). Estos nuevos bienes intermedios conviven con los antiguos, de modo que no hay reemplazo de unos por otros sino aumento continuo de la variedad.

El punto de partida es un modelo que determina cuánto se va a invertir en I+D en una economía, cantidad que dependerá de sus parámetros «profundos»: la productividad de los investigadores y la elasticidad de la demanda de bienes intermedios, fundamentalmente. A su vez la inversión en I+D determina el ritmo de progreso técnico y económico. Sobre la base este modelo revisaremos dos cuestiones importantes. En primer lugar, los efectos de escala, que consisten en que la propia tasa de crecimiento aumenta con el tamaño de la población. Esto se obtenía en los primeros modelos de principios de los noventa, en parte como resultado de que la tecnología es un bien no rival, esto es, puede ser usado por muchas personas a la vez, de modo que parece lógico que un descubrimiento sea más rentable en un país grande. Sin embargo, los datos desmienten esta conclusión y a mediados de los noventa se modifica el modelo teniendo en cuenta el número de científicos en la economía y el efecto desbordamiento (*spillover*) de los conocimientos. Al final, las nuevas variedades obtenidas crecen proporcionalmente al ritmo de crecimiento del número de científicos y del tamaño del *spillover*. A largo plazo el número de científicos tiene que crecer al mismo ritmo de la población, y esta tasa es exógena, por tanto al final el crecimiento económico acaba dependiendo de un fenómeno exógeno y, en principio, independiente de cualquier política económica. Por eso a estos modelos se les ha bautizado como «semi-endógenos».

La segunda cuestión en la que nos detendremos es el papel de las patentes, que otorgan un poder de monopolio sobre la nueva variedad descubierta. Sin estas patentes no habría beneficio por asumir el coste de la investigación, y por tanto no habría progreso ni crecimiento. Sin embargo, el poder de monopolio implica una asignación subóptima de recursos, mejorable mediante políticas públicas.

2.1. La cantidad de I+D determina el crecimiento

Empezamos este subepígrafe con un modelo que permite relacionar directamente crecimiento económico, progreso técnico y gasto en I+D. La exposición está adaptada de Acemoglu (2008) y Barro y Sala-i-Martin (BS) (2003). La economía está formada por dos sectores: un sector competitivo formado por las empresas que producen un único bien final y un sector de bienes intermedios distintos entre sí y fabricados cada uno por una empresa que actúa como monopolista. Las empresas que fabrican bienes intermedios previamente han investigado para obtener una nueva variedad, que fabricarán en exclusiva gracias a una patente perpetua. El bien final sirve para tres propósitos en esta economía: para consumir, para producir los bienes intermedios y también se utiliza como *input* en la investigación.

La producción del bien final se obtiene con la función de producción:

$$Y_t = \frac{1}{1-\beta} L^{\beta} \int_0^{A_t} (x_{i,t})^{1-\beta} di \qquad (1)$$

donde L es la población (que suponemos constante y coincide con el empleo), x_i es el *input* intermedio de la variedad i, A_t es el número de variedades existentes en el momento t y β es un parámetro con valor entre 0 y 1. El *input* x_i se puede interpretar como factor capital con una depreciación completa en cada uso, de modo que el capital agregado de la economía es $K = \left[\int_0^A (x_i)^{1-\beta}\right]^{\frac{1}{1-\beta}}$. La función de producción se puede reescribir como $Y = \frac{1}{1-\beta} L^{\beta} K^{1-\beta}$, con la propiedad de que si todos los *inputs* se utilizan en cantidades iguales $x_i = x$, entonces $Y = \frac{1}{1-\beta} L^{\beta} A x^{1-\beta}$. Esto es, presenta rendimientos decrecientes en x pero constantes en el número de variedades A. En esta economía cada variedad adicional de *input* genera un aumento de la producción siempre en la misma cantidad, de modo que si el número de variedades A crece continuamente, también lo hará el PIB (agregado y *per capita*). La clave del modelo es explicar cómo aumenta A, y esto ocurre mediante la I+D, cuyo gasto se determina endógenamente, como veremos a continuación.

Sea N la parte de la producción final dedicada a la investigación (el gasto en I+D). La pieza fundamental de cualquiera de los modelos de I+D es la función de generación de conocimientos o ideas (A), que en este caso se concreta en el número de variedades del *input* y en los modelos de la sección siguiente en mejoras de calidad. Llamando $\dot{A}$ a la derivada respecto del tiempo, la función de generación de conocimientos es:

$$\dot{A}_t = \lambda N_t \tag{2}$$

donde λ indica la productividad de la investigación. El inverso de λ se interpreta como el coste unitario por variedad (en unidades del bien final), esto es, la cantidad de N necesaria para conseguir que $\dot{A} = 1$. Esta función es muy sencilla porque es determinista y simplemente dice que el número de variedades descubiertas es directamente proporcional a (y sólo a) el gasto en investigación, independientemente del *stock* de conocimientos existente que, como veremos luego, juega un papel fundamental. Dividiendo la expresión anterior por A_t podemos expresarla en tasa de crecimiento:

$$g_{A,t} \equiv \frac{\dot{A}_t}{A_t} = \lambda \frac{N_t}{A_t} \tag{3}$$

que resulta ser una proporción constante λ del gasto en I+D por variedad existente (N/A). La expresión anterior también indica que en el estado estacionario, para tener una tasa de crecimiento constante del número de variedades se requiere que el gasto total en I+D crezca al mismo ritmo:

$$g^*_A = g^*_N$$

Las empresas que producen el bien final (Y) demandan *inputs* intermedios (x_i) hasta que el producto marginal de cada uno iguala a su precio (p_i). De esta condición de maximización del beneficio se obtiene la demanda de cada *input*:

$$x_{i,t} = L\ p_{i,t}^{-1/\beta} \tag{4}$$

que tiene elasticidad constante $1/\beta$. Supondremos que el coste marginal para producir una unidad de cualquier *input* es fijo e igual a ψ unidades del bien final y lo produce exclusivamente la empresa que lo inventó, gracias a una patente perpetua, conseguida después de incurrir en un coste de investigación (equivalente a un coste fijo de producción). Para determinar el precio al que vende su *input*, la empresa maximiza el valor presente del flujo de beneficios ($\pi_{i,\,t}$) que va a obtener cuando empiece a producir:

$$V_{i,t} = \int_t^\infty e^{-r(s-t)} \pi_{i,s}\, ds = \int_t^\infty e^{-r(s-t)} (p_{i,t} - \psi) x_{i,t}\, ds \tag{5}$$

donde suponemos un tipo de interés constante, aunque endógeno, y que será determinado más adelante[2]. La variable V_i también representa los ingresos netos generados por inventar una nueva variedad. Maximizando V_i respecto a p_i sujeto a la restricción (4) se obtiene el precio óptimo del *input*:

$$p_{i,t} = \frac{\psi}{1-\beta} \tag{6}$$

que es el mismo para todas las variedades y en todo momento ($p_{i,t} = p_t = p$) e implica un margen $\frac{1}{1\text{-}\beta} > 1$.

Normalizando el valor del coste marginal $\psi = 1-\beta$ resulta en un precio p = 1, una demanda del *input* $x = L$ y finalmente en un beneficio constante en cada período:

$$\pi = (p-\psi)x = \beta L \tag{7}$$

Puesto que el beneficio de cada período es constante, el valor de una variedad es

$$\mathrm{V} = \frac{\pi}{r}$$

igual para todas.

Sustituyendo la demanda obtenida $x = L$ en la función de producción del bien final (1) queda:

$$Y_t = \frac{1}{1-\beta} A_t L \tag{8}$$

o en términos *per capita*

$$y_t \equiv \frac{Y_t}{L} = \frac{1}{1-\beta} A_t$$

donde se observa que el producto *per capita* sólo aumenta si aumenta el número de variedades (o *stock* de conocimientos):

$$g_{y,t} = g_{A,t}$$

Finalmente, queda por determinar la tasa de crecimiento de A en el estado estacionario. Como hemos visto en (2), dependerá del gasto en I+D. Supondremos que hay libre entrada en el sector de I+D, de modo que cualquier empresa puede empezar a investigar gastando unidades del bien final y obteniendo resultados en función de (2), ge-

[2] Alternativamente se puede definir un factor de descuento:

$$D_t = \exp\left(-\int_t^s r_j dj\right)$$

para el caso más general de un tipo de interés variable para sustituir por $e^{-r(s-t)}$.

nerando una nueva variedad de *input* por cada $1/\lambda$ unidades del bien final gastadas. Como el ingreso obtenido por una nueva variedad es V entonces las empresas entrarán (aumentará el gasto en I+D) hasta que se iguale con el coste:

$$\frac{\pi}{r} = \frac{1}{\lambda} \tag{9}$$

Si el beneficio conseguido con la nueva variedad es muy grande, habrá más empresas interesadas en investigar, para lo cual necesitarán recursos financieros, lo que aumentará el tipo de interés hasta que se cumpla la condición de arbitraje anterior. En el estado estacionario la tasa de interés será constante e igual a r^* por lo que $V = \pi/r^* = \beta L/r^*$ y con la condición de libre entrada despejamos el tipo de interés:

$$r^* = \lambda\beta L \tag{10}$$

Si los consumidores tienen preferencias normales

$$u(c_t) = e^{-\rho t}\frac{c_t^{1-\theta} - 1}{1-\theta} \tag{11}$$

donde ρ es la tasa de descuento subjetiva y $\theta > 0$, cumplirán la ecuación de Euler:

$$g_c \equiv \frac{\dot{c}}{c} = \frac{1}{\theta}(r-\rho) = \frac{1}{\theta}(\lambda\beta L - \rho) \tag{12}$$

que determina la tasa de crecimiento en el estado estacionario del consumo *per capita*.

Además, puesto que el bien final se utiliza para consumir, para producir *inputs* y para investigar, se tiene que cumplir la restricción agregada:

$$Y = C + I + N$$

donde I es la cantidad del bien final gastada en la producción de los *inputs*. Con los resultados anteriores resulta ser

$$I_t = \int_0^{A_t} \psi x_i di = A_t \psi L = (1-\beta)A_t L = (1-\beta)^2 Y_t.$$

que es una proporción fija de la producción. A su vez, el ratio (I+D)/Y es también una cantidad constante en el estado estacionario cuando g_A^* es constante. De (3) y (8):

$$\frac{N}{Y} = \frac{N}{A}\frac{A}{Y} = \frac{1}{\lambda} g_A^* \frac{1-\beta}{L} \tag{13}$$

Si I, N son proporciones fijas de Y (en el estado estacionario y con L constante) entonces también tiene que serlo el consumo agregado, y por tanto crecerán a la misma tasa. Finalmente, en términos *per capita* se cumplirá

$$g_A^* = g_N^* = g_y^* = g_c^* = \frac{1}{\theta}(\lambda\beta L - \rho) \tag{14}$$

Conclusiones

1. La tasa de crecimiento de la economía depende positivamente de la productividad de la investigación (λ) o, lo que es lo mismo, depende inversamente del coste de lograr una nueva variedad de *input*.

2. La asignación del mercado no es óptima porque no hay competencia perfecta en la producción de los *inputs* intermedios debido a las patentes. Los monopolistas que producen estos *inputs* marcan un precio superior a su coste marginal, lo que implica que cada *input* se usa en menor cantidad de la que sería óptima. Como resultado de una menor demanda y producción del *input* también tendremos menor producción del bien final y menor consumo *per capita*. Lo mismo ocurre con la tasa de crecimiento: es menor a la óptima porque al tener menos bien final se investiga menos y se descubren menos variedades en cada período.
   Para demostrar esto podemos calcular la solución del planificador para compararla con la asignación del mercado. El planificador maximiza la utilidad del consumidor representativo (11) sujeto a la restricción

$$\begin{aligned}\dot{A}_t &= \lambda N_t = \lambda(Y - C - I) = \\ &= \lambda\left[\frac{1}{1-\beta}L^{\beta}A_t x_t^{1-\beta} - Lc_t - (1-\beta)A_t x_t\right]\end{aligned}$$

   donde hemos incorporado en la función de generación de conocimientos la restricción física de recursos, según la cual los recursos dedicados a I+D son la producción del bien final menos la parte dedicada al consumo (agregado) y la parte dedicada a la producción del *input* (la inversión). También se ha introducido en la restricción del planificador el resultado de que se produce lo mismo de cada *input* ($x_{it} = x_t$).
   La solución del problema arroja la cantidad de *input* producida por el planificador

$$x^{PL} = \left(\frac{1}{1-\beta}\right)^{\frac{1}{\beta}} L \tag{15}$$

   y la tasa de crecimiento de la economía

$$g^*_{PL} = \frac{1}{\theta}\left[\left(\frac{1}{1-\beta}\right)^{\frac{1}{\beta}} \lambda\beta L - \rho\right] \tag{16}$$

   La cantidad producida del *input* es mayor que en la economía de mercado, donde $x = L$. La diferencia depende del margen que aplican las empresas monopolistas, a mayor margen 1/(1-β) mayor diferencia. A mayor *input* producido mayor consumo *per capita*, por tanto la solución del planificador asegura un mayor nivel de bienestar. La tasa de crecimiento también es mayor, puesto que $g^*_{PL} > g^*_c$ comparando (14) con (16), y su diferencia depende también del margen aplicado por las empresas monopolistas.

Este resultado lleva a recomendar medidas de intervención en una economía de mercado para mejorar la asignación y hacerla más similar a la óptima. Un primer tipo de medida es la subvención a las actividades de I+D, con objeto de reducir su coste, estimular la entrada de más empresas y con ello la obtención de más variedades en cada período, lo que contribuye a aumentar la tasa de crecimiento. Esta medida equivale a aumentar λ en la expresión (14), pero deja sin modificar la demanda del *input*, que seguiría por debajo de su óptimo. Un segundo tipo de medida iría destinada a aumentar el uso del *input* para llevarlo al nivel óptimo. Esto se conseguiría con una subvención en el precio del *input*, tal que los monopolistas consigan su beneficio y las empresas finales utilicen más cantidad de *input* y con ello obtengan más producto *per capita* y los consumidores más consumo *per capita*. Además, al aumentar el beneficio de los monopolistas, que es proporcional al *input* vendido, aumentaría también la investigación y la generación de conocimientos hasta su tasa óptima. Esta medida por tanto sitúa a la economía tanto en el nivel como en la tasa de crecimiento óptima.

3. La tasa de crecimiento depende del tamaño del país medido por su población (L), lo que se conoce como el efecto escala. Este efecto implica que el crecimiento sería más rápido en países grandes (China, India) que en países pequeños (Hong-Kong, Taiwan, Singapur). También implica que si la población crece continuamente, las variables *per capita* crecen a tasas cada vez mayores. Estas implicaciones se deben a que la cantidad demandada de cada variedad de *input* depende del tamaño del mercado exclusivamente, sin tener en cuenta el número de variedades ya disponibles, lo que hace que el beneficio de innovar sea mayor cuanto más grande es el país y por lo tanto mayores los recursos dedicados a I+D, tanto en términos absolutos como en términos relativos[3]. Como veremos en el subepígrafe 2.3., el efecto de escala no encaja con la evidencia empírica.

2.2. El número de científicos como determinante del crecimiento

En este subepígrafe exponemos el modelo de Romer (1990) y de Jones (1995b), para lo cual mantenemos todos los supuestos anteriores excepto el relativo al *input* de la investigación. Supondremos ahora que se utiliza exclusivamente trabajo en la investigación de nuevas variedades, y la cantidad total de trabajo crece a la tasa η. Sea L_A el número de científicos empleados en el sector de I+D y $L_Y = L - L_A$ el resto de trabajadores ocupados en la producción del bien final:

$$Y_t = \frac{1}{1-\beta} L_{Y,t}^{\beta} \int_0^{A_t} (x_{i,t})^{1-\beta} di = \frac{1}{1-\beta} A_t L_{Y,t} \tag{17}$$

donde el único cambio es el de L por L_Y y hay que tener en cuenta que ahora la demanda del input es $x_i = L_Y$.

---

3 Sustituyendo (14) en (13) se obtiene que el ratio I+D/PIB aumenta (hasta un máximo) con la población.

El salario (w) se calcula a partir de la condición de maximización del beneficio que requiere igualar el producto marginal de L_Y con su precio w:

$$w_t = \frac{A_t}{1-\beta} \tag{18}$$

Se observa que el salario crece con el número de variedades (que mide el progreso técnico en este caso).

La función de generación de conocimientos (variedades) es, como antes, directamente proporcional a los recursos dedicados a la investigación, que ahora son el número de científicos L_A:

$$\dot{A}_t = \lambda L_{A,t}$$

Descubrir una nueva variedad requiere $1/\lambda$ científicos, que a un salario w suponen un coste w/λ en unidades del bien final. La expresión anterior también implica que

$$g_{A,t} = \lambda \frac{L_{A,t}}{L_t} \frac{L_t}{A_t}$$

de modo que para alcanzar una tasa constante de aumento de las variedades en el estado estacionario se necesita que la proporción de científicos respecto al empleo total sea constante (lo que es imprescindible en el estado estacionario) y que el ratio L/A sea constante, para lo que A debe crecer a la misma tasa que L. Por tanto[4]:

$$g_A^* = \eta$$

Las conclusiones del modelo cambian crucialmente: por un lado, se consigue eliminar los efectos de escala, pero, por otro lado, el crecimiento económico depende exclusivamente, en el estado estacionario, del crecimiento de la población, porque esto determina el aumento del número de científicos y los científicos son los que descubren las nuevas variedades con una productividad marginal constante en la investigación.

Aparte de cambiar el *input* de la investigación, Romer (1990) también modificó la función de producción de conocimientos haciendo depender las nuevas variedades encontradas del *stock* de variedades ya existente:

[4] Examinando la condición de libre entrada en la actividad de I+D llegamos al mismo resultado. El valor de una nueva variedad para su inventor sigue siendo el mismo V de antes, igual a π/r donde ahora $\pi = \beta L_Y$. Por tanto igualando el valor de una nueva variedad a su coste de investigación:

$$\frac{\beta L_Y}{r} = \frac{w}{\lambda}$$

Sustituyendo el salario y despejando el tipo de interés:

$$r = \lambda(1-\beta)\beta \frac{L_Y}{A}$$

donde se observa de nuevo que, para alcanzar un tipo de interés constante en el estado estacionario, la tasa de crecimiento de A debe ser igual a la de L_Y que a su vez debe ser igual a la tasa de crecimiento de la población η.

$$\dot{A} = \lambda A L_A \tag{19}$$

de modo que hay un desbordamiento o *spillover* intertemporal, ya que los conocimientos conseguidos en el pasado nos ayudan a encontrar nuevas ideas. En este caso, la tasa de crecimiento de A es:

$$g_A = \lambda L_A.$$

Nótese que esta expresión incorpora directamente un efecto de escala: la tasa de progreso técnico depende del número de científicos. A medida que este número aumenta, la tasa de crecimiento se acelera. Esto, sin embargo, va en contra de la evidencia empírica, como veremos a continuación.

2.3. Efectos de escala

Jones (1995a) fue especialmente concluyente al demostrar que los efectos escala de este modelo son totalmente contra factuales. Jones aportó un gráfico similar al de la **Figura 1**, donde se observa que el número de científicos (igual que el gasto en I+D) no ha dejado de crecer en los últimos cincuenta años, y sin embargo las tasas de crecimiento de la productividad total de los factores (PTF) no han sido explosivas, más bien lo contrario.

Jones (1995b) modificó la función de conocimiento para atenuar el efecto desbordamiento de la siguiente manera:

$$\dot{A} = \lambda A^{\phi} L_A$$

donde ϕ es un parámetro que regula el desbordamiento. Esta función incorpora la posibilidad de un desbordamiento de los conocimientos si $\phi>0$ de modo que los conocimientos acumulados ayudan a descubrir ideas nuevas. También nos permite analizar el caso contrario, que cada vez sea más difícil encontrar ideas porque se van descubriendo primero las más sencillas (el llamado «fish-pond-effect»: cada vez es más difícil pescar un pez en una charca a medida que vamos sacando peces), para lo que supondríamos $\phi< 0$. En el modelo inicial no hay ninguno de los dos ($\phi=0$), mientras que Romer (1990) sería el caso particular de *spillover* con $\phi=1$:

$$\dot{A} = \lambda A L_A \quad \Rightarrow \quad g_A = \lambda L_A$$

lo que implica claramente efectos de escala porque al aumentar gradualmente el número de científicos aumenta también la tasa de crecimiento de la economía.

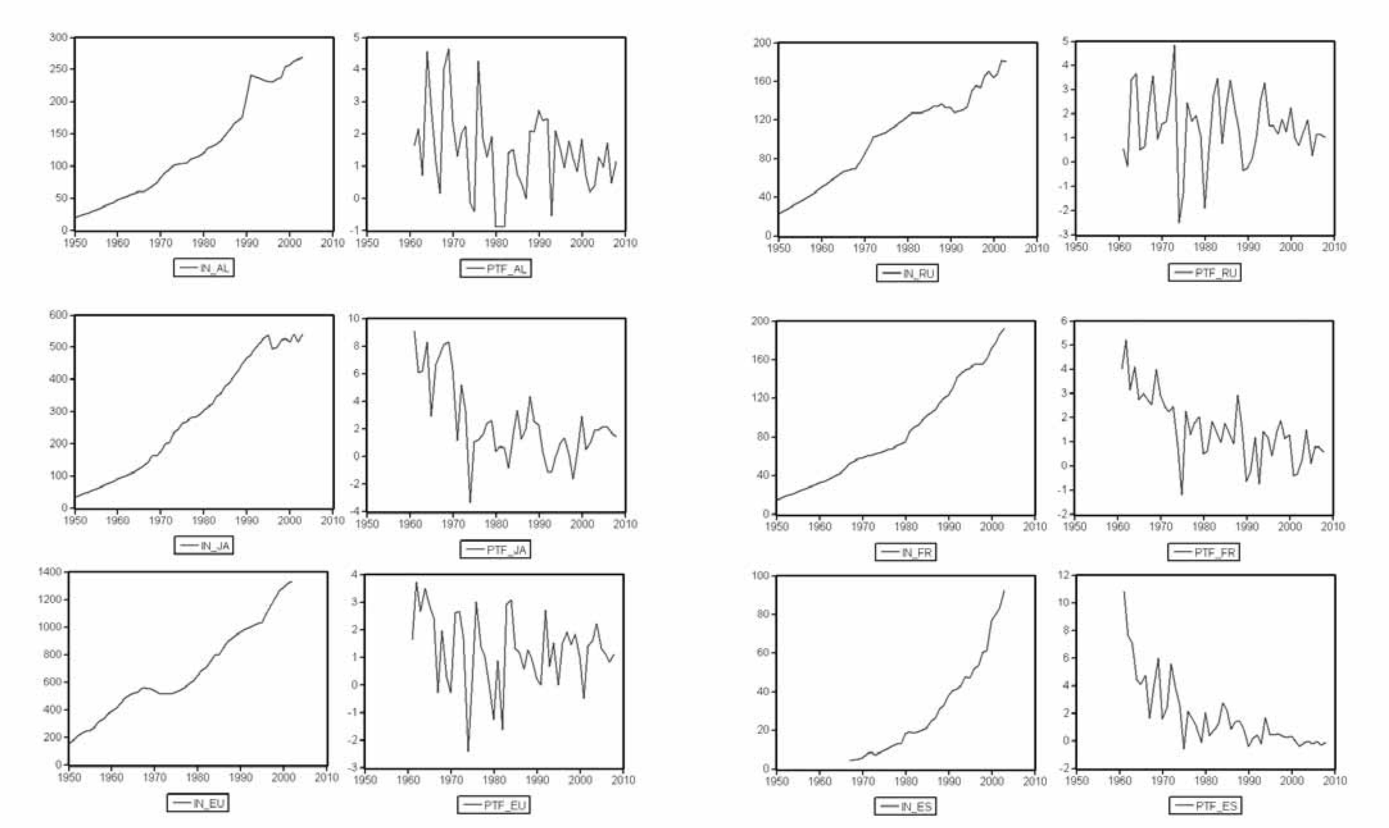
El caso de Jones, con $\phi<1$ implica:

$$g_{A,t} = \lambda A_t^{\phi-1} L_{A,t}$$

y para que g_A sea constante se requiere que la parte derecha de la expresión no crezca, esto es:

$$(\phi - 1)g_A^* + \eta = 0$$

Figura 1. *Número de investigadores (en miles) y tasa de crecimiento de la productividad total de los factores (PTF) en Alemania (AL), Francia (FR), Reino Unido (RU), Japón (JA), Estados Unidos (EU) y España (ES)*



Fuente: Elaboración propia. Los datos de la PTF están tomados de la base de datos AMECO de la Unión Europea (http://ec.europa.eu/economy_finance/indicators/annual_macro_economic_database/ameco_en.htm) y el número de investigadores de Jones (2002) y de la OCDE Research & Development Statistics (disponible en red en http://stats.oecd.org).

de donde

$$g_A^* = \frac{\eta}{1-\phi}.$$

Esto es, la tasa de progreso técnico depende del crecimiento del número de científicos, que coincide en el estado estacionario con el crecimiento de la población. Adicionalmente ahora también depende positivamente de una característica de la función de producción de ideas, el grado de *spillover*[5]. Nótese que la tasa de crecimiento a largo plazo de la renta *per capita* depende de dos parámetros exógenos y, por tanto, es independiente de las decisiones de los individuos de esta economía. En concreto es independiente de la proporción de recursos destinados a la investigación (L_A/L): crecemos igual con un 1% de científicos que con un 20%. Lo que importa sólo es el crecimiento de los recursos. Este resultado ha llevado a algunos a denominarlo modelo *semi-endógeno*.

Ha y Howitt (2007) han criticado este resultado porque la tasa de crecimiento del número de científicos ha disminuido y la tasa de crecimiento de la PTF se ha mantenido aproximadamente constante. La evidencia aportada por Ha y Howitt indica que la PTF de EEUU en los últimos cincuenta años muestra una tasa de crecimiento aproximadamente estable (sin raíz unitaria), mientras que la tasa de crecimiento del número de científicos ha ido disminuyendo (muestra raíz unitaria), lo que pone en dificultades al modelo de Jones. La **Figura 2**, sin embargo, indica que las cosas pueden no estar tan claras cuando miramos a otros países. Por ejemplo, en Francia, Alemania y Japón hay claramente una correlación positiva entre las tendencias en las tasas de crecimiento. En el caso de España no se ve tan claro porque la tasa de crecimiento de los investigadores ha ido decreciendo suavemente, mientras que la de la PTF ha caído bruscamente. El Reino Unido estaría en el mismo caso que EEUU.

3. Innovación por aumento de la calidad

En este epígrafe abordamos los modelos de innovación vertical, también llamados de escalera de la calidad. Se concibe la innovación como un proceso conducente a mejorar la productividad de los bienes intermedios existentes aumentando su calidad. De esta forma aumenta la productividad general de la economía y por tanto su renta *per capita*. En este caso, una innovación conduce a una versión del bien intermedio de mayor calidad y que expulsa del mercado a la versión existente hasta entonces. Se trata, por

[5] El mismo resultado lo podemos obtener analizando la condición de arbitraje o libre entrada, que ahora es

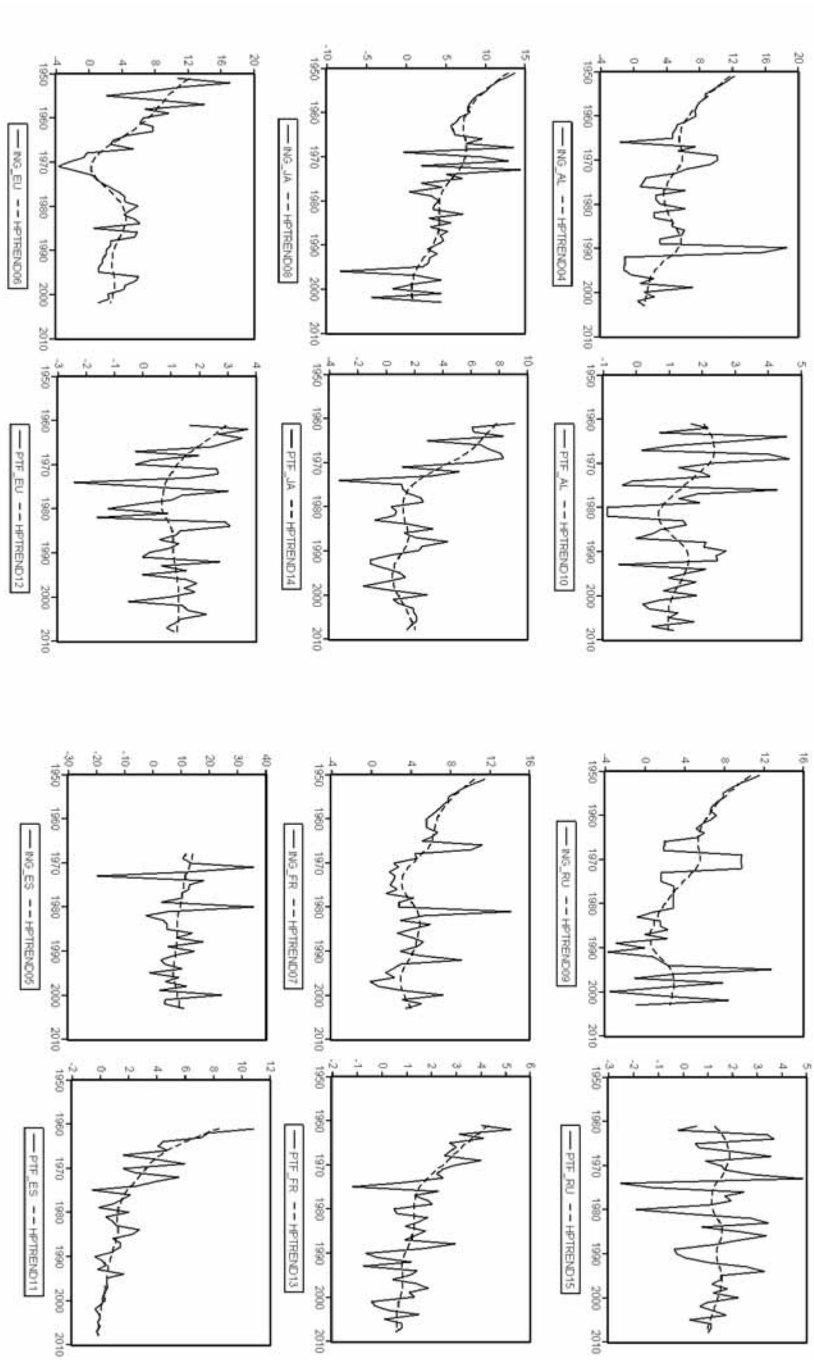
$$\frac{\beta L_Y}{r} = \frac{w}{\lambda} A^{-\phi}$$

Despejando *r* y sustituyendo *w* se obtiene

$$r = \lambda(1-\beta)\beta \frac{L_Y}{A^{1-\phi}}$$

expresión que indica que para conseguir un tipo de interés constante, dado que L_Y crece a la tasa η se requiere que $\eta - (1-\phi)\, g^*_A = 0$ de donde se obtiene la misma tasa de antes: $g^*_A = \eta / (1-\phi)$

Figura 2. *Tasas de crecimiento del número de investigadores (ING) y de la PTF para Alemania, Japón, EEUU, Reino Unido, Francia y España. Las líneas discontinuas son las tendencias calculadas por el método Hodrick-Precott con* $\lambda = 100$



Fuente: Elaboración propia (ver Figura 1).

tanto, del proceso de «destrucción creativa» (según la expresión original de Schumpeter, 1942): unas empresas desaparecen y son sustituidas por otras que fabrican productos mejores. El monopolio que consigue una empresa que innova no es perpetuo sino que se mantiene hasta que otra empresa descubre un producto mejor. La tasa de progreso técnico y económico depende, como en la innovación horizontal, de la productividad del proceso investigador (o probabilidad de éxito) y de la elasticidad de la demanda de estos bienes intermedios. En los modelos iniciales de este tipo también se producía un efecto escala como el descrito en el epígrafe anterior. Una forma de corregirlo es introducir simultáneamente aumento de las variedades, pero de un tipo que no mejora la productividad porque se supone que son simplemente imitaciones que, aunque permiten mayor especialización, también conllevan efectos negativos como la mayor complejidad de los procesos de selección y la reducción del tamaño de los mercados. Si el número de imitaciones de un producto aumenta proporcionalmente con el tamaño de la población (porque determina el número de potenciales imitadores), entonces el resultado es que desaparece el efecto de escala.

3.1. Gasto en I+D y crecimiento

Los primeros en desarrollar modelos de I+D orientada a la mejora de la calidad de los *inputs* fueron Aghion y Howitt (AH) (1992) y Grossman y Helpman (1991). El libro de AH (1998) contiene numerosas extensiones y aplicaciones de su modelo original, algunas de las cuales comentamos más adelante. En este epígrafe seguimos las líneas del modelo más sencillo y reciente de AH (2005), adaptado para poder compararlo con el modelo de variedades del epígrafe anterior.

Ahora el número de variedades del *input* es fijo e igual a m. La innovación consiste en un aumento de la calidad de los *inputs*, que traducido al modelo consiste en un aumento de su productividad A_i. La función de producción del bien final es:

$$Y_t = \frac{1}{1-\beta} L^{\beta} \int_0^m A_{i,t}^{\beta} \, (x_{i,t})^{1-\beta} \, di \tag{20}$$

que se diferencia de (1) exclusivamente en que depende de la productividad (calidad) del *input* y no sólo de su cantidad.

Para formalizar el proceso de innovación se supone que una innovación en un sector consiste en aumentar la productividad del sector en un escalón de la llamada *escalera de calidad*. Esto significa que en caso de éxito del proceso investigador se consigue que $A_{i,t} = \gamma A_{i,t-1}$, con $\gamma > 1$ aumenta en una proporción fija llamada *tamaño de la innovación*. Por tanto suponemos una tasa de incremento de la calidad $\gamma - 1$ independiente del sector y del tiempo, en caso de éxito en la investigación. La probabilidad de éxito de la investigación depende a su vez positivamente de los recursos empleados en la investigación (N_i)[6] pero inversamente del nivel de productividad ya alcanzado (A_i). Esta depen-

[6] Nótese que N_i es el gasto (en unidades del bien final) en investigación en el sector i, por tanto el gasto total en investigación será $\int_0^m N_i \, d_i$ que será igual a mN si todos los sectores gastan lo mismo en I+D.

dencia no es directamente proporcional como en los modelos anteriores sino a través de una función *f*(.) que implica rendimientos decrecientes del gasto en investigación. En resumen, la función de generación de conocimientos es:

$$g_A = \lambda f(n)(\gamma - 1) \qquad f' > 0, f'' < 0, f(0) = 0 \tag{21}$$

donde $n = n_i \equiv N_i / A_i$ va a ser igual para todos los sectores (porque los suponemos ex-ante idénticos), y no depende del tiempo porque el modelo no tiene dinámica de transición y por tanto alcanza su estado estacionario inmediatamente, como veremos más adelante. La parte $\lambda f(n)$ indica la probabilidad de éxito de obtener una innovación de tamaño marginal $(\gamma - 1)$.

La tasa de innovación g_A es constante y por tanto es directamente la tasa estacionaria, y puesto que es la misma en todos los sectores se corresponde con la tasa de crecimiento del índice de calidad agregado definido como una media:

$$A_t \equiv \frac{1}{m}\int_0^m A_{i,t} di \tag{22}$$

La demanda de *inputs* intermedios que realizan las empresas finales se obtiene igualando el precio del *input* al producto marginal obtenido, lo que implica

$$x_{i,t} = A_{i,t}\ L\ p_{i,t}^{-1/\beta} \tag{23}$$

que se diferencia de (4) en que ahora la productividad del *input* depende de su calidad. Supondremos de nuevo que el coste marginal de producir x_i una vez obtenido su diseño es ψ unidades de bien final. La empresa que produce el *input i* no tiene un monopolio perpetuo porque en cualquier momento puede aparecer una empresa que obtenga una calidad superior y sacarla del mercado. El intervalo de tiempo entre dos innovaciones determina por tanto el beneficio asociado a la innovación, y este intervalo se puede endogeneizar dentro del modelo, pero para abreviar la exposición supondremos que es de un período[7]. De este modo la empresa determina el precio de venta maximizando

$$V_i = \pi_{i,t} = (p_{i,t} - \psi)x_{i,t} \tag{24}$$

con la función de demanda para x_i determinada previamente. El resultado es

$$p_{i,t} = \frac{\psi}{1-\beta} \tag{25}$$

que es el mismo obtenido en la ecuación (6) del modelo de variedades e implica un mismo precio para todos los sectores y en todo momento. Normalizando como en el epígrafe anterior $\psi = 1 - \beta$ tenemos un precio del *input* $p_i = 1$ que implica una demanda del

[7] Ver, por ejemplo, AH (1998) o Barro y Sala-i-Martin (2003).

mismo $x_{i,t}=A_{i,t}L$. Con estos resultados el beneficio aumenta con el nivel de calidad y, también como antes, con el tamaño del mercado:

$$\pi_{i,t} = A_{i,t}\beta L \tag{26}$$

La libre entrada de empresas en la actividad investigadora requiere igualar este beneficio con el coste de conseguir una innovación. Este caso es un poco más complicado que en el modelo de variedades porque ahora las empresas se enfrentan a un proceso estocástico descrito por la función de probabilidad de éxito $\lambda f(n)$. En realidad, la condición de arbitraje consiste en igualar el beneficio marginal esperado que genera una unidad adicional invertida en investigación con su coste marginal (que es uno):

$$\lambda f'(n_{i,t})\frac{1}{A_{i,t}}\pi_{i,t} = 1 \tag{27}$$

La parte izquierda es el beneficio marginal esperado, que es el beneficio calculado antes ($\pi_{i,t}$) multiplicado por el aumento de la probabilidad de conseguirlo invirtiendo una unidad más, que es la derivada de $\lambda f(n)$ respecto a N. La parte derecha de la expresión es el coste marginal, que es simplemente la unidad adicional del bien final invertida. Sustituyendo π:

$$\lambda f'(n_{i,t})\beta L = 1 \tag{28}$$

de donde obtenemos que $n_{i,t}= n^*$ y comprobamos que la tasa g_A definida en (21) es la misma para todos los sectores y en todo momento, por tanto es g_A^*.

Determinado n podemos calcular g_A^* a partir de (21). Por ejemplo, si $f(n)=2n^{1/2}$ tendremos $n^*= (\lambda\beta L)^2$ y una tasa de progreso técnico:

$$g_A^* = 2\lambda^2\beta L(\gamma - 1) \tag{29}$$

Esta tasa depende de los parámetros de la actividad investigadora (λ, γ) y presenta un efecto de escala: será mayor con el tamaño de la economía.

Sustituyendo la demanda del *input* encontrada antes $x_{i,t} = A_{i,t}L$ en la función de producción (20) y usando la definición del índice de calidad agregado (22) tenemos una relación proporcional constante entre el producto *per capita* y el índice A

$$y_t \equiv \frac{Y_t}{L} = \frac{1}{1-\beta}mA_t$$

que implica que $g_y = g_A$ la tasa de crecimiento *per capita* de la economía está determinada por el progreso técnico. Nótese que si el número de variedades creciera a una tasa el producto *per capita* también crecería por eso y tendríamos $g_y = g_m + g_A$ que sería el resultado del efecto combinado de la innovación vertical y horizontal.

El ratio I+D/PIB se puede comprobar que es:

$$\frac{I+D}{PIB}=\frac{1}{Y}\int_0^m N_i di=\frac{1}{Y}\int_0^m \frac{N_i}{A_i}A_i di=n^*\, m\,\frac{A}{Y} \tag{30}$$

constante en el estado estacionario. Sustituyendo el valor de Y y de n^* queda

$$\frac{I+D}{PIB}=\lambda^2\beta^2(1-\beta)L^\beta$$

que depende positivamente del tamaño de la población.

Conclusiones

1. La tasa de crecimiento aumenta con la productividad (o probabilidad de éxito en este caso) de la investigación (λ) y del tamaño de la innovación o escalón de calidad (γ).

2. Existen efectos de escala: la tasa de crecimiento aumenta con el tamaño de la economía porque de nuevo el beneficio de la I+D depende del tamaño del mercado.

3. Un aumento de la competencia entre las empresas innovadoras reduciría su margen y por tanto sus beneficios con un efecto negativo sobre la tasa de progreso técnico y de crecimiento. Este extremo se puede comprobar en el modelo anterior calculando el efecto de una reducción del parámetro β, que reduciría el margen en (25), los beneficios en (26) y la tasa de crecimiento en (29). La conclusión que podemos extraer es que la protección con patentes tiene buenos resultados sobre el crecimiento, y en consecuencia las políticas de fomento de la competencia tendrían un efecto negativo sobre la tasa de crecimiento. Puesto que esto último va en contra de la evidencia empírica, el efecto de las políticas que promueven la competencia sobre la tasa de crecimiento es una de las líneas de investigación abiertas en esta literatura (ver AH 2005, sec. 4). Aghion *et al.* (2001) muestran que en un modelo más detallado el incremento de la competencia genera, además del efecto anterior, un incentivo a innovar también mayor, porque la empresa que no consigue innovar debe asumir un coste aún mayor por la pérdida de ventaja tecnológica.

3.2. Crecimiento sin efectos de escala

Como ya demostró Jones (1995a), los efectos de escala no son aceptables porque contradicen la evidencia. A continuación revisamos una propuesta de Young (1998) para eliminarlos. Otros modelos similares son los de Dinopoulos y Thompson (1998), Peretto (1998) y Segerstrom (1998).

La idea fundamental es que la innovación horizontal no genera progreso técnico. El motivo es que, a pesar de aumentar la especialización (lo que aumentaría la eficiencia), genera a la vez problemas porque reduce el tamaño de los mercados y hace más compleja la producción y el consumo. Esta idea se plasma en una función de producción similar a la (20), pero donde se neutraliza el efecto del incremento de las variedades en la producción:

$$Y_t = \frac{1}{1-\beta}\left(\frac{L}{m}\right)^{\beta} \int_0^m A_{i,t}^{\beta} \, (x_{i,t})^{1-\beta} \, di \qquad (31)$$

Supongamos adicionalmente que las variedades son imitaciones, y el número de imitadores crece a la misma tasa que la población η, de modo que es proporcional a L y para simplificar normalizamos $m = L$.

Igualando la productividad marginal de x_i a su precio p_i obtenemos la demanda del *input*:

$$x_{i,t} = A_{i,t} \, \frac{L}{m} \, p_{i,t}^{-1/\beta} \qquad (32)$$

Maximizando el beneficio del monopolista se obtiene el precio óptimo, que es el mismo: $p_i = \psi/(1-\beta)$. Normalizando $\psi = 1-\beta$ se obtiene la demanda $x_i = A_i \frac{L}{m}$ y el beneficio

$$\pi_{i,t} = A_{i,t} \beta \frac{L}{m} \qquad (33)$$

que disminuye con el número de variedades y bajo el supuesto $m = L$ no tendrá efectos de escala. Sustituyendo en la función de producción (31) y dividiendo por L queda

$$y_t = \frac{1}{1-\beta} A_t \qquad (34)$$

donde se observa que el crecimiento *per capita* se obtiene exclusivamente de la innovación vertical y no de la horizontal.

Finalmente, la tasa de crecimiento se obtiene de la condición de arbitraje (27) que ahora es

$$\lambda f'(n_{i,t}) \beta \frac{L}{m} = 1 \qquad (35)$$

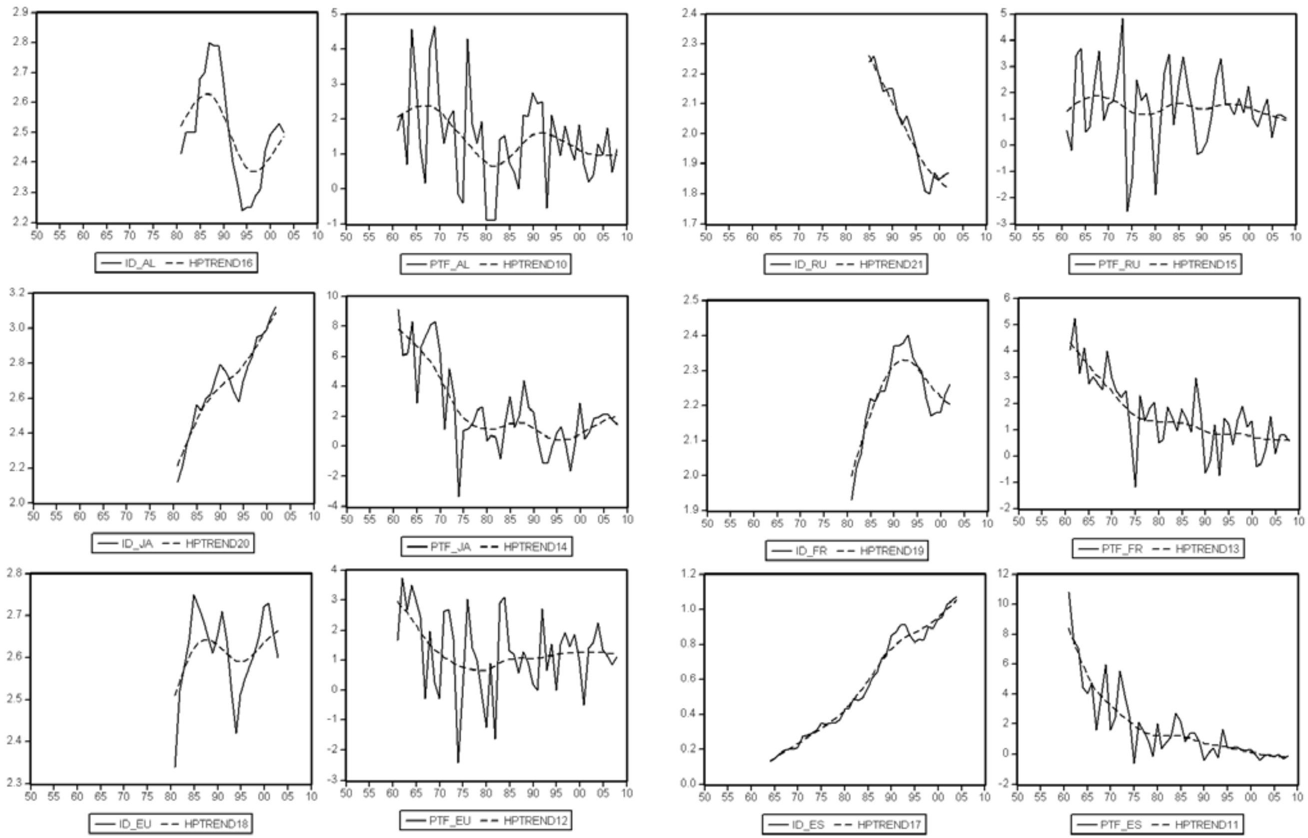
y con $m = L$ se obtiene un n^* independiente del tamaño de la economía. Aplicando este valor n^* en (21) se comprueba que la tasa de crecimiento es independiente de L.

La intensidad de investigación de la economía (I+D/PIB) sigue siendo constante; usando (30) y (34):

$$\frac{I+D}{PIB} = n^* \, m \, \frac{A}{Y} = n^* m \frac{(1-\beta)A}{LA} = n^* \, (1-\beta) \qquad (36)$$

Precisamente esta predicción del modelo hace que Ha y Howitt (2007) lo prefieran al «semi-endógeno» de Jones (ver subepígrafe 2.3) porque implica también que la tasa de crecimiento de A, que podemos medir con la PTF, permanecerá constante. El de Jones predice, en cambio, que la tasa de crecimiento de A es directamente proporcional a la tasa de crecimiento del número de científicos. Ha y Howitt (2007) observan que en EEUU el ratio I+D/PIB se ha mantenido aproximadamente constante (sin raíz unitaria), al igual que la tasa de crecimiento de la PTF, mientras que el número de científicos ha mostrado una tasa de crecimiento decreciente. Su conclusión, por tanto, es que encaja mejor con los datos el modelo de escalera de calidad. La **Figura 3** indica que esta experiencia de EEUU está lejos de ser una experiencia común a todos los países.

Figura 3. *Porcentaje de I+D respecto al PIB y tasa de crecimiento de la PTF en Alemania (AL), Francia (FR), Reino Unido (RU), Japón (JA), Estados Unidos (EU) y España (ES). Las líneas discontinuas son las tendencias calculadas por el método de Hodrick-Prescott con* $\lambda = 100$.



Fuente: Elaboración propia con datos de la OCDE para el ratio de I+D y de AMECO para la PTF.

4. Evidencia sobre el efecto de la I+D en el crecimiento

4.1. Contabilidad del crecimiento

Una fuente de evidencias es la contabilidad del crecimiento. A partir de la función de producción y una vez estimados sus parámetros se puede calcular la contribución al crecimiento de cada factor, incluido el *stock* de conocimientos, en un período de tiempo. El *stock* de conocimientos o capital tecnológico se calcula habitualmente por el método del inventario permanente, a partir de un valor inicial y acumulando la inversión en I+D con una cierta tasa de desgaste. Por ejemplo, Fraumeni y Okubo (2005) calculan una contribución de 0,38 puntos porcentuales (pp) a la tasa media de crecimiento anual del PIB en el período 1961-2000 en EEUU.

Jones (2002) desarrolla una variante de Jones (1995b) para realizar un detallado ejercicio de contabilidad del crecimiento de EEUU en el que calcula una contribución de 1,4 pp en el período 1950-1993. La función de producción es:

$$Y_t = K_t^{\alpha}(A_t H_{Yt})^{1-\alpha} \tag{37}$$

donde A se interpreta como el stock de ideas o conocimientos y H_Y es el capital humano dedicado a la producción de bienes y servicios. El capital humano se calcula multiplicando la cantidad de trabajo dedicado a la producción (L_Y) por el capital humano individual (h): $H_{Yt} = hL_{Yt}$. A su vez, el capital humano individual es el resultado de los años de educación media de la población (l_h) de acuerdo con la función minceriana $\ln h = \psi\, l_h$, donde ψ es la semielasticidad (el aumento proporcional de h cuando aumenta la educación en un año).

Jones (2002) analiza un entorno en el que las ideas circulan libremente entre países, de modo que su generación no depende sólo del esfuerzo investigador del país sino del mundo, según la función de producción de conocimiento:

$$\dot{A}_t = \partial H_{At}^{\lambda} A_t^{\phi}$$

donde A es el *stock* de conocimientos en la frontera de la investigación internacional (Jones utiliza el G5), H_A es el capital humano dedicado a la investigación en el G5, que influye en la generación de nuevas ideas con una elasticidad $\lambda > 0$. La generación de ideas depende del *stock* de ideas ya disponible con $0< \phi <1$ para evitar el efecto de escala. El *stock* de capital físico se acumula en la forma habitual:

$$\dot{K}_t = s_K Y_t - \partial_K K_t$$

donde s_K es la tasa de inversión, que se supone exógena y ∂_K es la tasa de depreciación del *stock* de capital. Cada país dedica también una parte de su trabajo a la investigación, de modo que la cantidad total se reparte entre la producción de bienes y servicios y la producción de ideas: $L_Y + L_A = L$ según el ratio $l_Y = L_Y / L$. El modelo considera exógenos los tres ratios de asignación de recursos (l_Y, s_K, l_h) y la tasa de crecimiento de la población η. Supone también que el número de investigadores (H_A) crece también a la tasa η. Las ecuaciones anteriores permiten obtener la dinámica de las cinco variables (Y, K, A, H_Y, h)[8].

La función de producción (37) se puede reescribir como:

$$y_t \equiv \frac{Y_t}{L_t} = \left(\frac{K_t}{Y_t}\right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \ell_{Yt} h_t A_t$$

donde y es la productividad (media del trabajo). A partir de esta ecuación podemos calcular el *stock* de conocimientos A como la PTF, tomando logaritmos y despejando:

$$\ln A_t = \ln y_t - \frac{\alpha}{1-\alpha} \ln \frac{K_t}{Y_t} - \ln \ell_{Yt} - \ln h_t \qquad (38)$$

Una vez calculado ln A para el período la ecuación anterior se reescribe en tasas de crecimiento:

$$\hat{y}_t = \hat{A}_t + \frac{\alpha}{1-\alpha}(\hat{K}_t - \hat{Y}_t) + \hat{\ell}_{Yt} + \hat{h}_t \qquad (39)$$

Los datos manejados por Jones (2002) indican que entre 1950 y 1993 la tasa media de crecimiento anual de la productividad del trabajo ($\hat{y}$) fue del 2%, a lo que contribuyó decisivamente el crecimiento de la PTF o *stock* de conocimientos del G5 ($\hat{A}$) con un 1,4% y en segundo lugar el aumento de la educación, que generó una tasa de crecimiento del capital humano ($\hat{h}$) del 0,6%, mientras que las otras variables aportaron cantidades marginales. Este resultado es realmente llamativo y contrasta con las bajas elasticidades estimadas en modelos econométricos, como veremos más adelante.

Borondo (2008) aplica la descomposición de la ecuación (39) a España[9]. El resultado es algo distinto, pero sigue situando al *stock* de conocimientos como fuente clave del crecimiento de la productividad. Entre 1968 y 2004 la productividad creció un 2,3% anual de media, a lo que contribuyó el crecimiento del *stock* de conocimientos (PTF) con un 1,0%, el aumento de capital humano individual aportó un 0,9% y el aumento de K/Y aportó el 0,4% restante. Es destacable en el caso de España que la PTF fue creciendo hasta 1990 pero a partir de entonces empezó a disminuir, tanto que en el período 1996-2004 no aportó sino que restó un 1% de crecimiento anual. La explicación de una variación negativa no es fácil en este modelo puesto que la función de generación de conocimientos, reescrita para la tasa de crecimiento, no lo permite:

8 El modelo está especificado con más detalle y resuelto con todo rigor en Jones (2005).

9 Los datos de PIB, del *stock* de capital y de empleo (equivalente a tiempo completo) los obtienen de la base de datos AMECO de la Comisión Europea. Toman $\alpha = 0{,}35$. El parámetro l_y (proporción de empleo en actividades no investigadoras) tiene un valor muy cercano a 1, y por tanto su logaritmo es prácticamente cero en toda la muestra. Con los resultados de De la Fuente y Doménech (2006), que estiman el efecto de la educación sobre la productividad en un panel de datos de las comunidades autónomas de España, se puede calcular una semielasticidad $\psi = 0{,}1$.

$$\hat{A}_t = \partial H_{At}^{\lambda} A_t^{\phi - 1}$$

porque H_A y A son siempre positivos. Los resultados de Jones (2002) también muestran que en EEUU la tasa de variación fue negativa muchos años. El problema parece estar en la asimilación del *stock* de conocimientos con la PTF. Como señalan Abdih y Joutz (2005), cuando se utiliza para la variable A una medida directa como el *stock* de patentes, se observa que las nuevas patentes dependen positivamente del número de investigadores y del *stock* de patentes ya disponible (con un ϕ cercano a la unidad). El problema que encuentran Abdih y Joutz es que la relación entre patentes y PTF es débil: duplicar el *stock* de patentes sólo aumenta la PTF un 10% a largo plazo. La explicación es que la difusión y aplicación de los conocimientos que representan las patentes a toda la economía puede ser un proceso más «complejo y difuso» de lo que pensamos. Adicionalmente no hay que olvidar que la PTF, por su naturaleza de residuo, puede estar recogiendo muchos otros efectos como cambios en las infraestructuras, regulación de los mercados, grado de apertura al exterior, etc.

4.2. Estimaciones econométricas

La magnitud del efecto de la I+D en el crecimiento es una cuestión muy debatida por sus dificultades, que podemos dividir en dos categorías: la dificultad de traducir los modelos teóricos a modelos empíricos y, en segundo lugar, las dificultades para obtener datos apropiados y de calidad[10]. Estos problemas han llevado a distintas estrategias recientemente comparadas en dos trabajos de Van Biesebroeck (2003 y 2004). En general, el problema más serio puede ser que al omitir variables explicativas en la regresión se produce un sesgo al alza en la estimación de los parámetros, lo que induce a sobrevalorar el papel de las variables explicativas investigadas. Esto es lo que ha encontrado Comín (2004) al analizar el efecto de la I+D en EEUU.

Una panorámica reciente de resultados empíricos se encuentra en Congressional Budget Office (2005). Las estimaciones microeconómicas que usan datos individuales de empresas o de sectores suelen encontrar efectos mayores de la I+D sobre la productividad que los enfoques macroeconómicos. Los estudios que emplean datos agregados estiman ecuaciones de la forma:

$$\hat{x}_t = \beta_0 + \rho \left(\frac{I+D}{Y} \right)_t + \nu_t \qquad (40)$$

donde la variable dependiente $\hat{x}$ puede ser la tasa de crecimiento de la PTF, de la productividad del trabajo, del PIB o del PIB *per capita*. En general, obtienen una estimación del valor de la semielasticidad ρ entre 0 y 0,6 con media en 0,1, lo que podemos in-

[10] Ver, por ejemplo, el detallado análisis de estos problemas que hacen Jimeno y Sánchez (2006) para el caso de la economía española.

terpretar como la contribución del gasto en I+D al crecimiento: una I+D de un 1% del PIB genera un 0,1% de crecimiento en la variable *x*. Nótese que si el ratio de I+D ha sido en media un 2,5% para EEUU, el resultado de Jones (2002) comentado más arriba requiere una valor de ρ= 1,4/ 2,5= 0,56, que está dentro del rango pero lejos de la media.

Cuando *x* es la PTF, el parámetro ρ se interpreta como la rentabilidad social del capital tecnológico, que resulta muy superior a la del capital físico. Para ver esta interpretación, sea *Z* el capital tecnológico y $\Delta Z = I + D$ (suponiendo que no hay depreciación tecnológica) y la función de producción

$$Y = e^{\mu t} Z^{\varepsilon} K^{\alpha} L^{1-\alpha}$$

la rentabilidad social de *Z* es su productividad marginal:

$$r_Z = \frac{\partial Y}{\partial Z} = \varepsilon \frac{Y}{Z}.$$

Teniendo en cuenta que

$$\frac{\Delta Y / Y}{\Delta Z / Z} = \varepsilon$$

despejando de la función de producción se obtiene

$$\ln PTF = \mu t + \varepsilon \ln Z$$

y tomando primeras diferencias

$$\Delta \ln PTF = \mu + \varepsilon \frac{\Delta Z}{Z} = \mu + \varepsilon \frac{I+D}{Y} \frac{Y}{Z} = \mu + r_Z \frac{I+D}{Y}$$

que es la ecuación (40) con $\rho = r_Z$. Jones y Williams (1998) analizan esta descomposición llegando a la conclusión de que la inversión en I+D actual está muy por debajo de la óptima, puesto que r_Z es muy superior al tipo de interés real, que es la rentabilidad de la inversión en capital físico.

También es importante medir el efecto dinámico que desata un aumento de la I+D y el efecto a largo plazo que producirá sobre la variable *x*. Para estimar este resultado de largo plazo la ecuación a estimar debe ser la función de generación de conocimiento, en alguno de los formatos que hemos visto en las secciones anteriores. Por ejemplo, en Denis *et al.* (2004) comparan la evolución de la productividad de la UE con la de EEUU desde 1960, destacando que hasta 1990 la productividad creció a tasas más altas en Europa, y a partir de entonces ha ocurrido lo contrario. Las causas de este retroceso con relación a EEUU se atribuyen precisamente al menor esfuerzo en I+D y en educación. Los autores ofrecen resultados empíricos sobre el efecto de estos y otros factores sobre la tasa de crecimiento de la productividad. Para ello configuran un panel de 21 países de la OCDE con datos de 1975 a 2000. Econométricamente estiman las elasticidades de impacto confirmando el importante papel de la I+D y en menor medida de la educación, la apertura y el tamaño del país, y descartan un efecto significativo de la regulación y el mercado financiero. Finalmente, los resultados anteriores se combinan con la dinámica de un modelo de crecimiento donde obtienen que a largo plazo un aumento de un punto en el ratio I+D/PIB aumenta la productividad un 18%. El resultado anterior es válido para el conjunto de la OCDE, pero no detallado por países, aunque los autores admiten que puede haber amplias diferencias.

Más recientemente Khan y Luintel (2006) aplican un enfoque innovador, capaz de superar los problemas econométricos habituales, al utilizar un panel dinámico con 9 variables explicativas de la PTF, que además permite heterogeneidad en los coeficientes de los 16 países del panel. Sus variables explicativas son el *stock* de conocimientos (diferenciando privado, público y extranjero), el capital humano, las infraestructuras, las exportaciones e importaciones de alta tecnología y la IED recibida y realizada. En los 16 países los tres *stocks* de conocimientos tienen un signo positivo y significativo, el capital humano en 13 y el resto de variables fueron significativas en sólo unos pocos países. Un resultado importante es que las diferencias entre países son notables.

Borondo (2008) estima una función de producción de conocimientos basada en el modelo de Jones (2002), comentado antes, pero ajustándolo al caso de España de la siguiente manera:

$$\dot{A}_t = \partial H_{At}^{\lambda} A_t^{\phi} \overline{A}_t^{\mu} J_t^{\kappa}. \tag{41}$$

En primer lugar, España no está en la frontera de la investigación y, por tanto, la generación de nuevas ideas en la economía española es una función no sólo del propio *stock* de ideas ya consolidadas y disponibles dentro del país (A) sino también de las nuevas ideas generadas internacionalmente en la frontera del conocimiento ($\bar{A}$) para lo que se toma EEUU. Adicionalmente depende del capital humano empleado en la investigación en España (H_A) y de un índice de juventud de la población (J) que recoge la presunción de que la edad es importante para asimilar nuevas ideas y cambios técnicos. La ecuación estimada es una versión lineal de (41):

$$\begin{aligned} \Delta \ln A_t = {} & \beta_0 + (\phi - 1)\ln A_{t-1} + \lambda \ln L_{At-1} + \mu \Delta \ln \bar{A}_{t-1} + \\ & \kappa \ln J_{t-1} + \varepsilon_t \end{aligned}$$

Los estimadores que se obtienen son todos significativos y con el signo esperado: $\phi = 0{,}53$; $\lambda = 0{,}05$; $\mu = 0{,}38$; $\kappa = 0{,}73$. La elasticidad de largo plazo la podemos calcular reescribiendo la última ecuación en su estado estacionario:

$$\ln A^* = \frac{1}{1-\phi}(\beta_0 + \lambda \ln L_A + \mu \Delta \ln \bar{A} + \kappa \ln J)$$

de donde se obtiene que la elasticidad a largo plazo del número de científicos es 0,1.

5. Difusión internacional del conocimiento y convergencia

Una de las críticas a los modelos de crecimiento endógeno es que no explican la convergencia condicional que han observado entre otros Barro y Sala-i-Martin (1992), Mankiw, Romer y Weil (1992) y Evans (1996). Los modelos de innovación pueden explicar esta cuestión introduciendo la transferencia internacional de tecnología. En este epígrafe describimos algunos modelos recientes en esta línea, pero comenzamos con una breve revisión de la evidencia empírica.

El esfuerzo para determinar la dimensión y naturaleza de la difusión tecnológica entre países es muy amplio a partir del trabajo pionero de Coe y Helpman (1995). En general se obtiene que la I+D extranjera tiene más efecto en un país cuanto más abierto al comercio, cuanto más I+D se hace en el propio país y cuanto mayor es su nivel de educación, porque es capaz de asimilar mejor la tecnología extranjera. Se trata de aplicar el concepto de «capacidad de absorción» desarrollado por Cohen y Levinthal (1990) para una empresa al conjunto de la economía. Para estos autores la capacidad de absorción es el límite a la cantidad de conocimiento científico o técnico que una empresa puede absorber. Una aportación y que recoge bien la frontera de la investigación en esta línea es la de López, Barcenilla y Sanaú (2008), de la Universidad de Zaragoza, que analizan la difusión tecnológica entre 10 sectores de seis países industriales entre 1979 y 2000. Después de una cuidada estimación de la PTF de cada sector, obtienen que la innovación obtenida de otros países tiene más efecto que la generada por el propio sector sobre su PTF. Adicionalmente comprueban que el mecanismo de difusión internacional es el comercio, ya que las externalidades encontradas son mayores en los sectores con mayor tasa de apertura exterior y con más comercio en bienes de alta tecnología.

Otro tipo de evidencia que refuerza el uso de modelos basados en la tecnología para explicar la convergencia es que las diferencias encontradas en las tasas de crecimiento *per capita* son explicadas en su mayor parte por diferencias en las tasas de crecimiento de la productividad, más que en el crecimiento del capital físico y humano. Easterly y Levine (2001) atribuyen hasta el 60% a la productividad y Klenow y Rodríguez-Clare (1997) el 90%.

En el frente teórico, una primera aportación fue la de Barro y Sala-i-Martin (1997), que analizaron la difusión internacional de tecnología usando el modelo de variedades del epígrafe 2. En su modelo hay dos países: un líder en tecnología y un seguidor. El líder hace las innovaciones invirtiendo en I+D, mientras que el otro país simplemente se dedica a adaptar la tecnología del líder, al que no se ve obligado a pagar nada. El proceso de adaptación de la tecnología requiere también un coste, como el de innovación, pero más bajo, y otorga a la empresa que lo realiza del país seguidor el monopolio. El coste de adoptar tecnología externa es creciente a medida que se recorta la distancia entre ambos países. Este supuesto justifica que en el estado estacionario se mantenga una cierta distancia entre ambos, aunque los dos crecen a la misma tasa. Esto es, hay convergencia en tasas de crecimiento pero la productividad por trabajador será siempre mayor en el país líder.

Howitt (2000) amplió el modelo de innovación vertical del epígrafe 3 para estudiar la transferencia de tecnología entre países y su potencial para generar convergencia. Basado en la evidencia empírica anterior sobre *spillovers* internacionales, el modelo supone que los países que reciben tecnología de otros sólo la pueden utilizar si hacen un gasto propio en adaptación y aprendizaje, lo que en el modelo se considera también gasto en I+D (aunque no lo sea en las estadísticas oficiales). Los países que no hacen ni siquiera este esfuerzo no se benefician de la tecnología extranjera (no tienen «capacidad de absorción») y por supuesto tampoco generan tecnología propia, de modo que no crecen en absoluto. En cambio, los países que gastan en I+D, por poco que sea, acceden a la frontera del conocimiento y cada vez que consiguen una innovación supone un salto tecnológico para ellos proporcional a la distancia a la frontera. El crecimiento en los países más atrasados será por lo tanto mayor que en los más avanzados y de ahí se obtiene la convergencia. A largo plazo todos los países terminan creciendo a la misma tasa, que estará determinada por el esfuerzo mundial en investigación.

En concreto, cuando un país consigue innovar en un sector significa que ha superado la productividad existente a escala mundial en el sector $(\bar{A})$ tal que $A_t = \gamma \bar{A}_{t\text{-}1}$. La frontera del conocimiento aumenta en la tasa bruta γ cada vez que hay una innovación en cualquier país del mundo. La probabilidad de que un país consiga innovar (μ) depende, como en el subepígrafe 3.1, del gasto en I+D normalizado por la productividad en la frontera:

$$\mu = \lambda f(n)$$

donde $n = N/\bar{A}$. La probabilidad de que aumente la frontera (μ) depende del esfuerzo conjunto de todos los países

$$\bar{\mu} = \sum_{j=1}^{h} \lambda^j f(n^j)$$

y, por tanto, la tasa de crecimiento mundial será

$$\bar{g} = \bar{\mu}(\gamma - 1).$$

Suponiendo que no hay comercio internacional (para centrarnos en la tecnología), los costes y beneficios de la I+D serían también como antes, y la tasa de crecimiento en el país sería

$$g_t = \lambda f(n)(\gamma - 1 + d_{t-1})$$

donde $d_t \equiv \ln(\bar{A}_t / A_t)$ es la distancia a la frontera. La tasa de crecimiento es mayor con esta distancia porque el salto de productividad que consigue el país es mayor con la innovación. El resultado fundamental del modelo es que la distancia esperada $(\hat{d}_t)$ evoluciona en función del esfuerzo investigador del país y del mundo

$$\hat{d}_t = (1 - \mu)\hat{d}_{t-1} + (\bar{\mu} - \mu)(\gamma - 1)$$

donde se observa que si un país no gasta en I+D (su posibilidad de innovar es $\mu=0$) la distancia tiende a infinito porque el país se estanca mientras que la frontera del conocimiento se desplaza continuamente. Pero si el país invierte en I+D, en cualquier cantidad tal que $0 < \mu < \bar{\mu}$ entonces la distancia tiende a un valor constante, lo que significa que a largo plazo su tasa de crecimiento es igual a la tasa mundial $\bar{g}$.

Howitt y Mayer-Foulkes (2005) sofistican la argumentación anterior introduciendo clubs de convergencia, esto es, la posibilidad de que no haya una única tasa de crecimiento a largo plazo para todos los países sino varias tasas para distintos grupos de países. Cada grupo se distingue por su capacidad para innovar, que depende de su grado de desarrollo y no sólo del gasto en I+D: no se obtiene el mismo resultado gastando cien millones de euros en investigación en Japón que en la R. D. del Congo. Esta idea se plasma en el modelo requiriendo un mínimo de capital humano para poder investigar (además del gasto en I+D), mínimo creciente con la frontera mundial de conocimientos. Además diferencian la actividad en I+D de la simple implementación de tecnologías extranjeras, siendo esta segunda actividad menos costosa, aunque también exige un mínimo de capital humano. De esta forma habrá tres grupos de países: los que hacen I+D y convergen a la tasa de crecimiento más alta; los países que simplemente implementan la tecnología generada en los primeros, pero que también convergen a largo plazo a la misma tasa de crecimiento; y los que quedan aislados y totalmente desconectados del progreso de los anteriores porque ni siquiera implementan la tecnología extranjera. La diferencia entre los que investigan y los que implementan está en el proceso de transición. Supongamos que al principio en ningún país se investiga y la tasa de crecimiento es cero. A partir de un cierto momento algunos países empiezan a hacer descubrimientos que les permiten aumentar su ritmo de crecimiento. Los que simplemente innovan tardan un tiempo en recibir la tecnología e implementarla, por lo que no conseguirán crecer a la misma tasa hasta un tiempo después, y mientras tanto las diferencias en nivel aumentan. De este modo tendremos a largo plazo un grupo de países «ricos» de alto nivel de renta y elevada tasa de crecimiento; un grupo de países «intermedios» de renta intermedia pero con la misma tasa de crecimiento que los primeros; y un grupo de países en la «trampa de la pobreza» con renta baja y una tasa de crecimiento más pequeña que los demás, con lo que las desigualdades aumentan continuamente. La trampa consiste en que la distancia a la frontera puede ser tan grande que el país no pueda ya nunca implementar al ritmo de los intermedios porque con sus medios nunca tendrá el capital humano necesario.

Aghion, Comin y Howitt (2006) detallan todavía más el proceso de difusión internacional de tecnología. En este nuevo modelo el país más atrasado sólo puede innovar y saltar a la frontera del conocimiento en un sector si consigue que una empresa extranjera invierta en el país, llevando con ella la tecnología. Para absorber la tecnología extranjera el país necesita empresas locales que inviertan en I+D (como en el modelo anterior) y bancos locales dispuestos a financiar esa inversión, lo que se conseguirá con más facilidad en países con más ahorro interno. Los países en la frontera, en cambio, no necesitan ahorrar mucho para innovar porque sus empresas pueden conseguir autofinanciarse o financiarse en el extranjero. El modelo implica una relación causal entre tasa de ahorro y tasa de crecimiento en países alejados de la frontera tecnológica, y ausencia de tal relación en países que ya están en la frontera. La evidencia empírica aportada por los autores apoya esta conclusión. Además comprueban que el crecimiento generado por el ahorro se obtiene a través de la PTF más que por la acumulación de capital, lo que encaja también con el modelo. Por otro lado, al poner como requisito de la inversión extranjera la cofinanciación por empresas y bancos locales, modelizan explícitamente la supervisión de los contratos resultantes, y con ello aportan una explicación a la «paradoja de Lucas», es decir, la dificultad para explicar la ausencia de flujos de capital desde los países ricos donde la rentabilidad es menor a los países pobres, donde las oportunidades son mayores. Se trata, por tanto, de un modelo donde la inversión extranjera directa es la vía de difusión de la tecnología, pero bajo ciertas condiciones de capacidad de absorción en el país receptor.

Otro modelo relacionado es el de Acemoglu, Aghion y Zilibotti (2006), que considera dos fases de desarrollo: uno inicial basado en la acumulación de capital físico y un segundo nivel basado en la innovación. La cuestión que preocupa a los autores son los mecanismos y políticas que precipitan o retardan el paso de la primera fase a la segunda. En la primera fase las empresas con éxito tienden a controlar el mercado nacional y tienen poco incentivo a innovar hasta que la competencia internacional pone en peligro su situación de dominio. Entonces comienza el proceso de transición a un modelo donde la innovación es fundamental para sobrevivir. El riesgo es que políticas proteccionistas mantengan al país en la primera fase donde se alejaría cada vez más de la frontera del conocimiento.

6. Conclusiones

En este artículo se ha pasado revista a los modelos más relevantes para explicar el vínculo entre innovación y crecimiento económico, detallando los mecanismos que permiten un aumento continuo de la productividad del trabajo dentro de la literatura de crecimiento endógeno. Las conclusiones a las que se llega revisando esta literatura son las siguientes.

En primer lugar, la evidencia indica que la actividad innovadora es un determinante fundamental del crecimiento y ya tenemos modelos teóricos que explican esta relación.

Segundo, la actividad innovadora depende de los incentivos económicos, y por tanto requiere unos derechos de propiedad intelectual (DPI). El problema, como reconoce la OCDE (2007), es evitar que estos DPI bloqueen excesivamente el acceso a los nuevos descubrimientos. Desde un punto de vista económico, los DPI generan un precio de venta de la innovación por encima de su coste marginal y por tanto su demanda y uso será menor que el óptimo social.

Tercero, el modelo más completo que hemos visto es el que conjuga la escalera de la calidad junto con la posibilidad de imitaciones (Young, 1998). En este modelo la tasa de crecimiento a largo plazo depende del esfuerzo investigador relativo de la economía medido por el gasto en I+D en proporción del PIB.

Cuarto, la contabilidad del crecimiento de Jones (2002) revela que en EEUU el progreso técnico explica 1,4 puntos de los 2 puntos porcentuales de crecimiento anual medio experimentado entre 1950 y 1993 por la productividad media del trabajo en esa economía. Aplicando un procedimiento similar para España, Borondo (2008) obtiene una contribución más modesta pero importante: un punto de los 2,3 puntos de crecimiento anual medio entre 1968 y 2004.

Quinto, las estimaciones econométricas de funciones de producción permiten estimar el efecto de un aumento del esfuerzo investigador de un 1% del PIB sobre el PIB *per capita*. A corto plazo los resultados varían entre 0 y 0,6% pero a largo plazo, teniendo en cuenta el efecto de realimentación de los conocimientos generados hoy sobre la investigación futura, el efecto puede llegar al 18% estimado para la OCDE por Denis *et al.* (2004).

Sexto, la aplicación de los modelos de innovación a la difusión internacional del conocimiento está resultando muy fructífera. Suponiendo que las ideas llegan gratuitamente de un país innovador a otro que es seguidor, pero con un coste de implementación creciente a medida que se reduce la distancia tecnológica entre ambos, los dos países convergen a una misma tasa de crecimiento a largo plazo, aunque no hay convergencia en niveles porque el país seguidor nunca llega a alcanzar al innovador. Varios autores han profundizado recientemente en la idea de que un país necesita capacidad de absorción para implementar tecnología extranjera y sin un mínimo de capacidad queda totalmente estancado, mientras que los países innovadores y los que tienen capacidad para absorber la tecnología extranjera crecen a tasas positivas. De esta forma se puede explicar la existencia de clubs de convergencia.

Para no hacer esta revisión demasiado larga, se han dejado fuera tres temas que merece la pena al menos mencionar: la competencia, las instituciones y la distribución de la renta. La competencia entre empresas generaba, en los primeros modelos de I+D, menos beneficios, menos incentivos a investigar y menor tasa de crecimiento, lo que implicaba desaconsejar el estímulo a la competencia. Modelos más actuales, como Aghion *et al*. (2001), basándose en la literatura de la organización industrial, profundizan más en el proceso de innovación introduciendo explícitamente el coste que supone para una empresa quedar atrasada en el proceso de innovación: la pérdida de su ventaja tecnológica y quedar a merced de la competencia con otras. Esto es, la competencia reduce el beneficio esperado del gasto en investigación, pero también aumenta el coste de no hacerlo.

Respecto a las instituciones, estos modelos de crecimiento endógeno con innovación pueden acomodar un rasgo enfatizado por los estudios del desarrollo: que una misma política o institución puede tener efectos distintos según el estadio de desarrollo del país. Midiendo este estadio de desarrollo como la distancia a la frontera del conocimiento (o en la práctica como el ratio del PIB *per capita* del país respecto del país líder), Acemoglu, Aghion y Zilibotti (2006) comprueban que, efectivamente, las trabas a la apertura internacional y los costes de entrada al mercado son más perjudiciales cuanto más cerca está el país a la frontera. En los estadios iniciales de desarrollo las instituciones apropiadas son las que estimulan la imitación o implementación de tecnología extranjera (financiación a través de bancos, fomento de grandes empresas nacionales, poca apertura, etc.) mientras que en estadios más avanzados las instituciones apropiadas son las que facilitan la innovación (financiación en mercados de capitales, máxima apertura, educación superior, etc.).

Respecto al tercer tema, la distribución de la renta, es muy probable que haya una interacción con el proceso de innovación en los dos sentidos. Por un lado, los cambios en la distribución de la renta pueden alterar las demandas relativas de productos y con ello «dirigir» el proceso de innovación en una u otra dirección (Foellmi y Zweimüller, 2006). Un ejemplo claro es la investigación farmacéutica, centrada en las enfermedades de los países ricos porque pueden pagar altos precios por sus innovaciones y relegando la investigación sobre enfermedades como la malaria, típicas de los países menos desarrollados. En el sentido contrario de causalidad, el proceso de innovación es probable que afecte a la distribución de la renta de un país por varias vías, una de ellas es alterando la dispersión en el capital humano de los individuos, y por tanto su productividad y sus salarios (ver la panorámica sobre esta cuestión de García Peñalosa, 2003). La «brecha-digital» entre los ciudadanos según que utilicen más y mejor los recursos disponibles por Internet, es un ejemplo.

Los tres temas anteriores forman parte del elenco de problemas económicos cuyo análisis puede ser abordado con la literatura descrita en este artículo, pero no son los únicos campos activos de investigación. El papel de la protección internacional de la propiedad intelectual y de la inversión extranjera directa en la transmisión del conocimiento y su efecto sobre el crecimiento en los países más atrasados; el diseño de incentivos a la innovación, tanto aplicada como de base y, más en concreto, el incentivo a la investigación en las universidades son otros tantos ejemplos de cuestiones abiertas para el futuro. Más aún, otras disciplinas científicas están volviendo sus miradas a la economía para interpretar mejor las causas y consecuencias del avance tecnológico. Por ejemplo, la creciente preocupación sobre el cambio climático está generando gran cantidad de investigaciones sobre nuevas tecnologías para reducir la emisión de carbono a la atmósfera. Muchos especialistas en medio ambiente están buscando en la literatura revisada en este artículo claves para comparar el incentivo privado con el retorno social, la eficacia de políticas de estímulo a la investigación y la difusión internacional de estas nuevas tecnologías[11].

7. Referencias

ABDIH, Yasser y JOUTZ, Frederick (2005), «Relating the knowledge production function to total factor productivity: An endogenous growth puzzle», IMF WP 05/74.

ACEMOGLU, Daron (2008), *Introduction to Modern Economic Growth,* Princeton University Press, forthcoming.

ACEMOGLU, Daron; AGHION, Phillipe y ZILIBOTTI, Fabrizio (2006), «Distance to Frontier, Selection and Economic Growth», *Journal of European Economic Association* 4 (1), págs. 37-74.

AGHION, P.; HARRIS, C.; HOWITT, Peter y VICKERS, J. (2001), «Competition, imitation and growth with step-by-step innovation», *Review of Economic Studies 68*, págs. 467-92.

AGHION, Philippe y HOWITT, Peter (1992), «A Model of Growth Through Creative Destruction», *Econometrica*, 60 (2), págs. 323-51.

AGHION, Philippe y HOWITT, Peter (1998), *Endogenous Growth Theory*, MIT Press

AGHION, Philippe y HOWITT, Peter (2005), «Growth with Quality-Improving Innovations: An Integrated Framework», en P. AGHION y S. DURLAUF (eds.), *Handbook of Economic Growth*, Elsevier.

AGHION, Philippe y HOWITT, Peter (2006), «Appropriate Growth Policy: A Unifying Framework», *Journal of European Economic Association* 4 (2-3), págs. 269-314.

AGHION, Philippe; COMIN, Diego y HOWITT, Peter (2006), «When does domestic saving matter for economic growth?», NBER WP 12275.

BARRO, Robert y SALA-I-MARTIN, Xavier (1992), «Convergence», *Journal of Political Economy* 100, 2, págs. 223-251.

BARRO, Robert y SALA-I-MARTIN, Xavier (1997), «Technological Diffusion, Convergence, and Growth», *Journal of. Economic Growth*, Vol. 2, N.º 1, págs. 1-26.

[11] Ver, por ejemplo, Pizer y Popp (2007) y las numerosas referencias citadas por ellos.

BARRO, Robert y SALA-I-MARTIN, Xavier (2003), *Economic Growth*, The MIT Press, 2.ª ed.
BORONDO, Carlos (2008), «Una estimación de la 'función de producción de ideas en España», *Principios. Estudios de Economía Política*, 10, págs. 43-63.
COE, David y HELPMAN, Elhanan (1995), «Internacional R&D spillovers», *European Economic Review* 39 (5), págs. 859-887.
COHEN, W. y LEVINTHAL, D. (1990), «Absorptive capacity: a new perspective on learning and innovation», *Administrative Science Quarterly* 35 (1), págs. 128-152.
COMIN, Diego (2004), «R & D: A Small Contribution to Productivity Growth», NBER WP 10625.
CONGRESSIONAL BUDGET OFFICE (2005), *R&D and productivity growth: A background paper,* disponible en http://www.cbo.gov/ftpdocs/64xx/doc6482/06-17-R-D.pdf
DE LA FUENTE, Ángel y DOMÉNECH, Rafael (2006), «Capital humano, crecimiento y desigualdad en las regiones españolas», *Moneda y Crédito*, marzo.
DENIS, C.; MCMORROW, K. y RÖGER, W. (2004), «An analysis of EU and US productivity developments», European Commission, *Economic Papers* 208.
DINOPOULOS, Elias y THOMPSON, Peter (1998), «Schumpeterian Growth Without Scale Effects», *Journal of Economic Growth* 3, págs. 313-335.
EASTERLY, William y LEVINE, Ross (2001), «It's Not Factor Accumulation: Stylized Facts and Growth Models» World Bank Economic Review, Volume 15, Number 2.
EVANS, Paul (1996), «Using Cross-country Variances to Evaluate Growth Theories», *Journal of Economic Dynamics and Control* 20, págs. 1027-1049.
FOELLMI, Reto y ZWEIMÜLLER, Josef (2006), «Income distribution and demand-induced innovations», *Revie of Economic Studies* 73, págs. 941-960.
FRAUMENI, Barbara y OKUBO, Sumiye (2005), «R&D in the National Income and Product Accounts: A First Look at Its Effect on GDP» en CORRADO *et al.* (eds.), *Measuring Capital in the New Economy*, NBER and the University of Chicago Press.
GARCIA PEÑALOSA, Cecilia (2003), «Distribution and Policy in the New Growth Literature», en N. SALVATORI (ed.), *Old and New Growth Theories: An Assessment*, Edgar Allen.
GROSSMAN, Gene M. y HELPMAN, Elhanan (1991), *Innovation and Growth in the Global Economy*, MIT Press
HA, J. y HOWITT, P. (2007), «Accounting for trends in Productivity and R&D: A Schumpeterian Critique of Semi-Endogenous Growth Theory», *Journal of Money, Credit and Banking* 39 (4), 733-774.
HOWITT, Peter (2000), «Endogenous Growth and Cross-country Income Differences», *American Economic Review* 90, págs. 829-46.
HOWITT, Peter y David Mayer-FOULKES (2005), «R&D, Implementation and Stagnation: A Schumpeterian Theory of Convergence Clubs», *Journal of Money, Credit and Banking* 37, págs. 147-77.
JIMENO, Juan Francisco y SÁNCHEZ, Rocío (2006), «La dinámica de la productividad de la industria española», en Julio SEGURA (coord.), *La productividad en la economía española*, Instituto de Estudios Económicos, 105-127.
JONES, Charles (1995a), «Time Series Tests of Endogenous Growth Models», *Quarterly Journal of Economics*, mayo, págs. 495-525
JONES, Charles (1995b), «R&D-Based Models of Economic Growth», *Journal of Political Economy* 103 (4), págs. 759-784
JONES, Charles (2002), «Sources of US Economic Growth in a World of Ideas», *American Economic Review* 92 (1), págs. 220-239.
JONES, Charles y WILLIAMS, John C. (1998), «Measuring the Social Return to R&D», *Quarterly Journal of Economics* 113, págs. 1.119-1.135
LÓPEZ PUEYO, Carmen; BARCENILLA, Sara y SANAÚ, Jaime (2008), «International R&D spillovers and manufacturing productivity: A panel data analysis», *Structural Change and Economic Dynamics* 19, págs. 152-172.
KHAN, Mosahid y LUINTEL, Kul B. (2006), «Sources of knowledge and productivity: How robust id the relationship?», OECD, STI/WP 2006/6.
KLENOW, Peter J. y RODRÍGUEZ-CLARE, Andrés (1997), «Economic growth: A review essay» *Journal of Monetary Economics*, 40 (3), págs. 597-617.
MANKIW, N. Gregory; ROMER, David y WEIL, David (1992), «A contribution to the empirics of economic growth», *Quarterly Journal of Economics* 107 (2), págs. 407-437.
NELSON, Richard (1995), «Recent Evolutionary Theorizing About Economic Change», *Journal of Economic Literature* 33, págs. 48-90.
OCDE (1997), *Innovation and Growth. Rationale for an innovation strategy.*
PERETTO, Pietro (1998), «Technological change and population growth», *Journal of Economic Growth* 3 (4), págs. 283-311.
ROMER, Paul (1990), «Endogenous Technological Change», Journal of Political Economy 98 (5), S71-S102.
SEGERSTROM, P. S. (1998), «Endogenous growth without scale effects», *American Economic Review* 88, págs. 1.290-1.310.
SCHUMPETER, Josep Alois (1942), *Capitalism, Socialism and Democracy*, New York: Harper.
Van BIESEBROECK (2003), «Revisiting some productivity debates», NBER WP 10065.
Van BIESEBROECK (2004), «Robustness of Productivity Estimates», NBER WP 10303.
YOUNG, Alwyn (1998), «Growth without Scale Effects», *Journal of Political Economy* 106 (1), págs. 41-63.