
LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA DESDE UNA PERSPECTIVA EVOLUTIVA

Óscar A. Benavides*

Resumen

Benavides, Óscar, "La innovación tecnológica desde una perspectiva evolutiva", Cuadernos de Economía, v. xxiii, n. 41, Bogotá, 2004, páginas 49-70

Este artículo analiza el proceso de innovación tecnológica desde la economía política, específicamente, desde la perspectiva evolutiva. Se adopta el enfoque schumpeteriano en el cual el proceso de innovación tecnológica puede ser visto como un proceso de aprendizaje. En ese sentido, la innovación tecnológica representa un cambio en el conocimiento y, por ende, tiene un carácter epistemológico. Esta conceptualización, junto con el análisis histórico del proceso de innovación tecnológica y su formalización, permite entender los cambios que se han presentado en el proceso de innovación tecnológica durante los últimos doscientos cincuenta años.

Palabras clave: aprendizaje, innovación tecnológica. **JEL:** D83, O31, B11.

* Profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería y miembro de la Unidad de Estudios en Interacciones Económicas. Doctor en Ciencias Económicas de la Universidad Nacional de Colombia. Enviar los comentarios al correo: obenavid@escuelaing.edu.co. Artículo recibido el 25 de agosto de 2004, y aprobado el 2 de noviembre del mismo año.

Abstract

Benavides, Óscar, "Technological innovation from the evolutionary point of view", *Cuadernos de Economía*, v. XXIII, n. 41, Bogotá, 2004, pages 49-70

This article analyses the technological innovation process from an economic policy point of view, specifically from an evolutionary perspective. It adopts a Schumpeterian approach from which the process of technological innovation can be seen as being a learning process. In this sense, technological innovation represents a change in knowledge and is therefore epistemological by nature. Such conceptualisation, together with a historical analysis of the process of technological innovation and its formalisation, will lead to understanding those changes which have happened in the process of technological innovation during the last two hundred and fifty years.

Key words: learning, technological innovation. **JEL:** D83, O31, B11.

Résumé

Benavides, Óscar, "L'innovation technologique depuis une perspective évolutive", *Cuadernos de Economía*, v. XXIII, n. 41, Bogotá, 2004, pages 49-70

Cet article analyse le processus d'innovation technologique dans le cadre de l'économie politique, et plus spécifiquement, depuis la perspective évolutive. L'approche schumpéterienne dans laquelle le processus d'innovation technologique peut être vu comme un processus d'apprentissage est adoptée. Dans ce sens, l'innovation technologique représente un changement dans la connaissance et a, ainsi, un caractère épistémologique. Cette conceptualisation, ajoutée à l'analyse historique du processus d'innovation technologique et de sa régularisation, permet de comprendre les changements qui ont eu lieu dans le processus d'innovation technologique pendant les deux cent cinquante dernières années.

Mots clés: apprentissage, innovation technologique. **JEL:** D83, O31, B11.

El conocimiento tecnológico ha sido objeto de estudio para los economistas desde finales del siglo XVIII. Por ejemplo, para los economistas clásicos el conocimiento tecnológico era un factor determinante en el desarrollo de la sociedad, sin embargo, los desarrollos posteriores, en particular los de la escuela neoclásica, se enfocaron en el análisis de otros problemas en los que la tecnología quedaba en un papel secundario. No obstante, los desarrollos teóricos de los últimos treinta años en áreas como el crecimiento económico, la organización industrial y la historia económica, han hecho que el análisis del conocimiento tecnológico haya cobrado nueva vigencia.

De igual manera, en los últimos veinte años se ha intentado analizar el cambio tecnológico desde diferentes perspectivas, siendo la más importante la evolutiva, desde la cual se ha desarrollado el concepto de innovación tecnológica para entender el cambio tecnológico. La nueva conceptualización de la tecnología desde la perspectiva evolutiva ha estado acompañada de una creciente preocupación de los historiadores económicos por identificar los patrones de innovación tecnológica a través de la historia. Por último, también hay una creciente preocupación por dar estructura formal a dicho proceso. Infortunadamente, cada una de estas perspectivas ha marchado por diferente camino, lo que ha generado que el análisis económico de la tecnología sea un conjunto de estudios dispersos, y en muchos casos con poca relación entre sí.

Es importante destacar que el análisis evolutivo ha permitido entender mejor el proceso de innovación tecnológica, sin embargo, como se muestra en este artículo, no permite explicar de manera satisfactoria ciertos problemas. En particular, los desarrollos logrados hasta el momento explican el cambio tecnológico pero no los cambios que se han dado en el proceso de innovación tecnológica. De hecho éste no ha sido un proceso homogéneo, pues en diferentes épocas ha adoptado diferentes formas. Por ejemplo, en los últimos 250 años se ha pasado de procesos de innovación realizados por inven-

tores, a procesos realizados por grupos de investigación y desarrollo (I&D) que hacen parte de determinadas firmas.

El documento que se presenta a continuación analiza el proceso de innovación tecnológica a partir del conjunto de esfuerzos realizados por los economistas para explicar los cambios en el conocimiento tecnológico, es decir, la Economía política de la innovación tecnológica. Una vez identificados los aportes de los autores, se aborda el problema desde la perspectiva evolutiva de inspiración shumpeteriana. Con este enfoque, luego se realiza una revisión de la innovación tecnológica como un proceso de aprendizaje, destacando de esta manera su carácter epistemológico. Por último, es importante destacar que con base en la conceptualización, la evidencia histórica y los modelos de aprendizaje, se pueden entender los cambios que se han observado en el proceso de innovación tecnológica; sin embargo, en este artículo sólo se aborda el primer aspecto. En particular, se muestra que las principales características del conocimiento tecnológico se derivan de que tienen su origen en procesos de aprendizaje, que en diferentes momentos presentan diferentes características que son capturadas a través de los procesos de aprendizaje. Es decir, que si se quiere entender los cambios que se han presentado en el proceso de innovación tecnológica, es necesario entender los cambios que se han experimentado en los procesos de aprendizaje.

LA ECONOMÍA POLÍTICA DE LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA

En una larga tradición que se remonta hasta el siglo XVIII, los economistas han mostrado la importancia que tiene el avance del conocimiento tecnológico en el desarrollo económico de la sociedad capitalista [Freeman 1988, 858]. Adam Smith, por ejemplo, en el libro primero de *La riqueza de las naciones*, al desarrollar la idea de división del trabajo mostró algunas de las causas y de las consecuencias del avance tecnológico. En relación con las causas que originan cambios en el conocimiento tecnológico, señaló que éste se generaba como resultado de “la mayor destreza de cada obrero en particular [...] el ahorro de tiempo que comúnmente se pierde al pasar de una ocupación a otra y la invención de un gran número de máquinas que facilitan y abrevian el trabajo” [Smith 1776/1992, 11].

Asimismo, con respecto a sus consecuencias, concluyó que el avance tecnológico era el factor que podía conducir a mayor bienestar y que “en una sociedad bien gobernada [daba lugar] a esa opulencia universal que se derrama hasta las clases inferiores del pueblo” [Smith 1776/1992, 13]. De esta manera, Smith mostró la estrecha relación que existe entre el avance en

el conocimiento tecnológico, el crecimiento de la economía y el bienestar de la sociedad.

En el siglo XIX, Marx asignó un papel clave al conocimiento tecnológico como elemento explicativo de la evolución socio-económica de la sociedad capitalista. Marx, señaló que la tecnología “nos muestra la actitud del hombre ante la naturaleza, el proceso directo de producción de su vida, y, por lo tanto, de las condiciones de su vida social y de las ideas y representaciones espirituales que de ellas se derivan” [Marx 1867/1984, Vol. I, p. 303]. Asimismo, identificó el papel clave de los empresarios en este proceso al afirmar que “la burguesía no puede existir sin revolucionar constantemente los medios de producción” [Freeman 1988, 858].

Marx colocó la tecnología “en el centro de aquellas actividades que son claramente humanas [pues] contiene aquellos instrumentos que determinan la efectividad de la búsqueda de objetivos del hombre y que están conformadas no sólo por sus necesidades básicas instintivas, sino también por aquellas que han sido formuladas y conformadas por su propio cerebro.” [Rosenberg 1982, 52]. De igual manera, Marx fue el primero en plantear una teoría crítica de la tecnología en términos evolucionistas, pues de acuerdo con su perspectiva, la tecnología permite configurar la realidad física creando artefactos que transforman la naturaleza, convirtiéndola en una extensión del cuerpo humano.

En ese contexto, Marx sugiere extender el análisis evolutivo de la naturaleza planteado por Darwin “de la historia de la tecnología de la naturaleza [...] a la historia de los órganos productivos del hombre” [Marx 1867/1984, 303]. No obstante, como se demostrará en este documento, existen diferencias que no permiten conciliar completamente la evolución darwiniana y la concepción marxista, debido a que, por ejemplo, mientras que para el primero es un proceso autocreador, para el segundo es un proceso dirigido por individuos que actúan de manera consciente.

En la primera mitad del siglo XX sólo algunos pocos economistas, entre ellos Schumpeter, retomaron el análisis del cambio tecnológico. Para Schumpeter, hasta ese momento, el cambio tecnológico “era solamente objeto de estudio por parte de la historia económica [...] que es una parte de la historia universal” [Schumpeter 1912/1997, 69]. De hecho, en ese momento no existía una teoría económica del cambio tecnológico. Para Schumpeter, el avance en el conocimiento tecnológico constituye un elemento esencial del análisis económico, y sentó las bases para su desarrollo al introducir el concepto de ‘innovación tecnológica’.

Desde la perspectiva schumpeteriana, la innovación tecnológica representa cambios cualitativos que implican alteraciones en la técnica de producción y en la organización productiva. A partir de lo anterior, en el presente texto se va a considerar que la innovación tecnológica tiene una dinámica interna, que no sólo se adapta a un entorno cambiante, sino que resulta determinante en la configuración del mismo.

Al igual que Marx, Schumpeter asignó un papel clave a los empresarios en las transformaciones tecnológicas, al señalarlos como los portadores del cambio en el proceso productivo [Hodgson 1993]¹. Para Schumpeter la innovación tecnológica es un proceso en el que se ponen en práctica nuevas combinaciones entre materiales y fuerzas. De estas nuevas combinaciones pueden surgir nuevos bienes o el mejoramiento de su calidad; nuevos métodos de producción; nuevos mercados; nuevas fuentes de materias primas o una nueva organización en la industria. También Schumpeter [1912/1997] señaló que:

el mejor método de producir, en sentido teórico, es el más ventajoso entre los probados empíricamente y que se haya hecho familiar [...], pero no el mejor de los métodos posibles en ese momento [Schumpeter 1912/1997, 76].

Otro importante aporte de Schumpeter fue el análisis de las prácticas productivas a las que denominó rutinas, que son el conjunto de ideas o reglas que rigen la conducta diaria de las firmas. Desde esa perspectiva, la innovación tecnológica representa cambios en las rutinas, las que en virtud del profundo enraizamiento originado en la práctica diaria presentan resistencia al cambio. Con base en estos avances podemos afirmar que, a pesar de los aportes de Marx y Schumpeter, durante la segunda mitad del siglo XIX y gran parte del XX, el análisis económico acerca de las causas y consecuencias del avance del conocimiento tecnológico fue realizado por historiadores y estudiosos de la tecnología y no por los economistas, ya que su análisis se enfocó hacia el estudio de modelos estáticos, en los que el cambio tecnológico quedaba relegado al papel de una variable exógena. Para la teoría neoclásica, y en particular para el equilibrio general competitivo, las innovaciones tecnológicas son el resultado de eventos exógenos que perturban 'temporalmente' el estado de equilibrio [Lundvall 1992, 8].

1 Hodgson, en el capítulo X, analiza el enfoque evolutivo de Schumpeter haciendo especial énfasis en sus ideas sobre el cambio en economía y las afinidades y simpatías por la obra de Walras. Con este argumento, Hodgson señala que el trabajo de Schumpeter se aparta del evolucionismo darwiniano.

Es importante destacar que el conocimiento tiene características que lo diferencian de las otras mercancías y le asemejan a un bien público, en particular en lo relacionado con la no rivalidad y la no exclusión. Por todo lo anterior, el conocimiento tecnológico no es posible analizarlo en un marco de equilibrio competitivo, el cual es de naturaleza estática y del que no pueden derivarse consideraciones dinámicas [Mas-Collel *et al.* 1995, 359]².

Por todo lo anterior, en este documento se mostrará que la innovación tecnológica, requiere un marco teórico en el que las interacciones estratégicas que subyacen la no rivalidad y no exclusión, puedan ser incorporadas. De igual manera, el marco debe tener una naturaleza dinámica que sirva para analizar procesos de cambio permanente. En este texto se demostrará que la teoría de los juegos evolutivos ofrecen estas posibilidades de análisis. A manera de adelanto, es importante destacar que los juegos evolutivos permiten analizar interacciones estratégicas de carácter dinámico que, de acuerdo con lo señalado hasta el momento, resultan adecuadas para entender el proceso de innovación tecnológica.

Retomando los aportes de Schumpeter, es importante destacar que su concepto de rutina productiva fue desarrollado posteriormente por los economistas evolutivos y representa una alternativa al enfoque neoclásico que señala que las acciones escogidas por los productores son aquellas que maximizan su variable objetivo, en este caso específico la función de beneficios. A diferencia del enfoque neoclásico, las acciones tomadas por los agentes son, en muchas ocasiones, la consecuencia de hábitos, costumbres (en el caso de los consumidores) o reglas de dedo o rutinas (en el caso de los productores) y que resultan apropiadas para una situación concreta³.

La diferencia entre las acciones que son tomadas como resultado de procesos de optimización y aquellas que se rigen por hábitos, costumbres, o rutinas, radica en que en el primer caso, se asume que los agentes tienen un perfecto conocimiento de las circunstancias en que se encuentran y tienen la capacidad, tanto informacional como computacional, para escoger la opción que maximiza su variable objetivo. En el segundo caso —es decir, las acciones

2 Relacionado con conocimiento y bienes públicos. Para un análisis detallado sobre los límites del equilibrio general y los fenómenos dinámicos, ver Lozano *et al.* [1997] y Monsalve [2002, cap. II].

3 El concepto de rutina y su diferencia con las decisiones tomadas con base en procesos de optimización, se encuentra en Nelson [1993, 249]. La discusión acerca de la unidad de análisis en la perspectiva evolucionaria es desarrollada por Hodgson [1993, Parte I, Cap. III].

tomadas a partir de rutinas—, se tienen en cuenta los límites en la capacidad cognoscitiva para la solución real de problemas; de ahí la importancia que en los enfoques evolutivos tiene el concepto de ‘racionalidad acotada’, desarrollado por Herbert Simon.

El trabajo de Schumpeter sirvió de base para los desarrollos posteriores con los que se demostró que no es posible analizar el cambio tecnológico dentro de las posibilidades que ofrece el equilibrio general, pues se requiere de un marco teórico de naturaleza dinámica en el cual el cambio en el conocimiento tecnológico sea el resultado de un proceso desarrollado por parte de los productores, es decir, que sea un proceso de carácter endógeno⁴. Las ideas de Schumpeter han sido retomadas en los últimos veinte años para la formulación del enfoque evolutivo del cambio tecnológico, el cual es acogido en este trabajo pero incluyendo algunas modificaciones y formalizando mediante juegos evolutivos. Esta nueva alternativa combina el análisis histórico con una ‘nueva’ conceptualización de los procesos “a través de los cuales las tecnologías evolucionan a lo largo del tiempo”⁵.

Los desarrollos teóricos recientes sobre la innovación tecnológica bajo la perspectiva evolutiva comenzaron en 1982 con el trabajo de Nelson y Winter, quienes elaboraron una teoría de la firma desde una perspectiva evolutiva en la que siguieron los aportes de Schumpeter sobre el cambio económico y las ideas de Simon sobre comportamiento bajo racionalidad acotada. Con estos elementos Nelson y Winter construyeron un modelo evolutivo de innovación tecnológica gobernado por mecanismos de variación y selección. En este caso, lo análogo a la especie es la rutina, y aunque la competencia es importante, opera a través de mecanismos de selección de manera que las empresas con rutinas más adaptables prosperarán y crecerán⁶.

Posteriormente, en 1990, Mokyr planteó, desde una perspectiva histórica, la idea de que la técnica o rutina productiva —descrita como un método para producir mercancías— es análoga a la especie, por tanto, una innovación tecnológica es equivalente a la aparición de una nueva especie [Mokyr 1990,

4 Un análisis detallado acerca del proceso de innovación tecnológica y el concepto de equilibrio se encuentra en Mokyr [1990, cap. XI] y Elster [2000].

5 Los trabajos seminales desde la perspectiva teórica son de Nelson y Winter [1977 y 1982]. El abordaje histórico se encuentra en Rosenberg [1982 y 1994]. La definición es de Nelson y Winter [1977, 36].

6 Para una explicación detallada ver Nelson y Winter [1982, cap. I] y Mokyr [1990, cap. XI].

cap. XI]⁷. El enfoque de Mokyr se ubica en el ámbito de la epistemología evolutiva, según la cual la cultura, la ciencia, y en general el conocimiento, cambian por medio de mecanismos similares a los que producen los cambios en las especies⁸. A partir de esta analogía entre lo epistemológico y lo biológico Mokyr analiza el proceso de innovación tecnológica. Dado que este autor destaca la naturaleza epistemológica de la tecnología, la innovación tecnológica representa cambios en el conocimiento de los individuos, y de acuerdo con su perspectiva, ese es el ámbito en el que debe hacerse su análisis: desde el mundo de las ideas.

Para Mokyr las nuevas ideas en la producción constituyen ‘variaciones’ o ‘mutaciones’ de las ideas existentes, pero a diferencia de las mutaciones biológicas, éstas no son mutaciones aleatorias ya que se ajustan a las necesidades de la sociedad y se conservan para perpetuarse. El proceso de selección permite que sólo las mejores ideas sobrevivan y que en algunos casos reemplacen, o en otros coexistan con las ideas establecidas. No obstante, en algunos casos las nuevas ideas no sobreviven a la confrontación con las antiguas ideas, las cuales permanecerán hasta que sean confrontadas por otras nuevas. Para Mokyr la idea o conceptualización de cómo producir puede considerarse como el *genotipo*, mientras que la técnica real empleada por la firma para producir la mercancía sería el *fenotipo* del miembro de la especie.

Desde esta perspectiva, el juego no tiene un carácter estático sino que de acuerdo con lo señalado anteriormente, es de naturaleza dinámica y no se da entre empresas sino entre *rutinas*. En este contexto, ganar el juego implica que una nueva rutina es más adaptativa, es decir, que tiene una mayor probabilidad de supervivencia y reproducción⁹. Esto no significa que una rutina domine completamente el entorno tecnológico por largos períodos, pues tan pronto se presenten mutaciones que sobrevivan, la competencia (juego evolutivo) se presentará nuevamente. De hecho, esta es la dinámica que asegura la evolución de la tecnología a través del tiempo y garantiza la variedad y diversidad de técnicas¹⁰.

7 Ver también en Mokyr [1998b] y [2000].

8 Un trabajo clásico sobre epistemología evolucionaria es el de Cavalli-Sforza y Feldman [1981].

9 Los procesos adaptativos en economía son analizados de manera detallada por Holland [1988].

10 En el análisis de la tecnología se ha encontrado que la diversidad y la variedad son condiciones necesarias para su evolución. Esta idea es desarrollada por Basalla [1991, cap. I].

No obstante, es importante destacar que esta analogía entre los procesos de evolución biológica y tecnológica es incompleta y podemos identificar las siguientes diferencias:

1. Mientras que los procesos de mutación tecnológica son el resultado de procesos deliberados y diseñados (como se señaló al hablar de la concepción marxista del cambio tecnológico), la mutación biológica se presenta de manera aleatoria. Es importante destacar que debido a que las innovaciones tecnológicas no son el resultado del azar, son más adaptativas que si se dieran de una manera puramente aleatoria. Sin embargo, es bueno aclarar que esto no significa que el resultado final sea ajeno al azar, pues muchas innovaciones tecnológicas han sido el resultado de procesos en los cuales se buscaba un resultado, pero finalmente se obtenía uno diferente¹¹.
2. Otra diferencia tiene que ver con los procesos de hibridación, pues mientras en la evolución biológica sólo se presentan intercambios de información entre especies muy cercanas que en general no se reproducen, en la evolución tecnológica este proceso es muy frecuente ya que diferentes rutinas se combinan dando origen a otras. En relación con este punto es necesario destacar que en el contexto de la innovación tecnológica se pueden encontrar muchos ejemplos en los cuales la 'fertilización por cruce' ha dado origen a otras nuevas tecnologías [Basalla 1991, 171]¹².
3. Otro aspecto que establece diferencia entre los dos procesos radica en que la innovación tecnológica tiene características lamarckianas, pues mientras los rasgos adquiridos (aprendidos, en el caso de la tecnología) se transmiten deliberadamente de generación en generación, este proceso no ocurre en biología¹³. De hecho, en el ámbito tecnológico las rutinas que han resultado exitosas en el pasado se transmiten de manera deliberada para ser utilizadas en procesos por parte de las generaciones posteriores.
4. Igualmente, los dos procesos se diferencian debido a que no existe un equivalente epistemológico al ADN, es decir, de acuerdo con Basalla [1991, 253], "los que postulamos teorías de la evolución tecnológica

11 Ver en Mokyr [1990, 279], sobre procesos de serendipia.

12 El autor cita el caso del motor a vapor, como un ejemplo, en el que dos tecnologías la del carruaje de caballos y la bicicleta, se combinaron para llegar al automóvil.

13 Ziman [2000], describe las analogías que existen entre ambos procesos y las conceptualiza una perspectiva de los sistemas complejos.

tenemos igualmente nuestros Darwin, pero no nuestro Mendel". Esta diferencia ha sido enfatizada pues se ha considerado que en los procesos evolutivos debe existir una unidad de análisis a partir de la cual se pueda entender la mutación y la selección. El uso del concepto de *meme* como unidad de análisis de los procesos epistemológicos, y análogo al de gene en lo biológico, no ha estado exento de críticas¹⁴.

5. El quinto aspecto que ha dado lugar a controversias acerca de la conveniencia de aplicar esquemas analíticos similares para la evolución biológica y tecnológica, tiene que ver con la reproducción. En particular, desde la perspectiva biológica, la reproducción requiere, en la gran mayoría de los casos, de dos miembros de la especie. En contraste, la reproducción tecnológica es muy diferente, ya que no precisa, en sentido estricto, de este tipo de mecanismos.
6. Finalmente, mientras que la evolución biológica implica la adaptación a un medio ambiente cambiante y es irreversible en todos los casos, la innovación tecnológica es ante todo una transformación intencionada del entorno, que puede o no resultar irreversible. En relación con este último aspecto, se ha encontrado que en algunos casos la innovación tecnológica también es irreversible, siendo ésta una característica que se presenta con bastante frecuencia [David 1985]. No obstante, no hay consenso acerca de que ésta sea una característica esencial de la innovación tecnológica.

Este tipo de problemas ha hecho que las primeras explicaciones evolutivas de la tecnología hayan sido objeto de críticas. Sin embargo, en las conceptualizaciones recientes del proceso de innovación tecnológica no se ha tratado de forzar la analogía entre los procesos de innovación tecnológica y biológica en cuanto a unidades de análisis y procesos. Los desarrollos recientes sobre modelos evolutivos del cambio tecnológico no necesitan imitar la evolución biológica¹⁵. En su lugar, se han adoptado otros criterios que buscan destacar más aquellos elementos y estructuras comunes que aquellos que diferencian un proceso del otro. En lugar de colocar los procesos de evolución tecnológica en términos biológicos, se ha adoptado el concepto de sistemas complejos, en el que las seis diferencias ya señaladas no son importantes¹⁶.

14 Para un análisis detallado del debate entre genes y memes, ver Ziman [2000].

15 En Jablonka y Ziman [2000] se enfatiza en este aspecto haciendo referencia al trabajo de Maynard Smith.

16 Para un análisis detallado de los sistemas complejos ver Weisbuch [1991] y Kirman [1997].

En este documento se adopta la nueva perspectiva sobre la evolución tecnológica que no está inspirada en la Biología, aunque se considera el modelo biológico como el estándar de todos los procesos evolutivos¹⁷. Al igual que los sistemas complejos, aquí se considera que la evolución está en función de la tasa de mutación y del tamaño de la población, y que las interacciones entre los miembros de la población son un factor determinante de la evolución tecnológica. En este esquema la población no está constituida por individuos sino por ideas sobre cómo producir bienes, es decir, por rutinas. En caso de que las diferentes rutinas no interactúen entre sí, es decir, siempre que estén aisladas, en este documento se dirá que existe baja dimensionalidad del conocimiento tecnológico. Por el contrario, en la medida en que las diferentes rutinas tengan una alta interacción entre sí, se dirá que el conocimiento tecnológico tiene alta dimensionalidad.

Un segundo aspecto clave en el análisis de la evolución lo constituye la reproducción de la población o especie. En el ámbito biológico, cuando se requieren dos miembros de la misma especie, éstos se encuentran “aislados desde el punto de vista de la reproducción y las posibilidades de que se produzca un salto en la evolución están limitadas [ya que] la especie mutante no encontrará pareja con características similares y la mutación probablemente desaparecerá” [Mokyr 1990, 282]. A pesar de que el conocimiento tecnológico no requiere para su reproducción de este tipo de mecanismos en sentido estricto, la reproducción implica cierto grado de complementariedad. Aquí la complementariedad no sólo es vista como una relación de carácter técnico entre las rutinas productivas, sino que tiene que ver con la capacidad de una innovación para vencer la resistencia al cambio tecnológico¹⁸.

En la innovación tecnológica es frecuente que se presenten complementariedades, ya que muchos inventos necesitaron de otros para generar evolu-

17 En esta perspectiva se ubican los trabajos de David [2000] y Nelson [2000].

18 De acuerdo con Mokyr [1998a], históricamente, la resistencia a la innovación tecnológica se presenta por varias razones: Primero, de tipo económico, como por ejemplo debido a la pérdida de puestos de trabajo o depreciación de diversas formas de capital. Segundo, se da por razones ideológicas cuando existe tecnofobia o cuando el conocimiento desarrollado no hace parte del aceptado por la comunidad científico-tecnológica. Tercero, existe resistencia porque las innovaciones no presentan complementariedades estratégicas. Cuarto, se genera resistencia cuando una innovación no hace parte de sistemas tecnológicos existentes, como ocurre en el caso de externalidades de red y estándares. Finalmente, se presenta resistencia cuando la innovación depende de la frecuencia, como ocurre con los procesos de trayectoria dependiente y retroalimentación positiva.

ción tecnológica [Mowery y Rosenberg 1989]. Muchos inventos hubieran estado condenados a desaparecer a menos que hubieran encontrado un complemento necesario que les permitiera perpetuarse. Es importante destacar que aunque existan muchas rutinas, para que el avance tecnológico se presente es necesario que exista complementariedad entre ellas, de tal manera que se garantice la reproducción. Sería una situación análoga a la de un miembro de una especie mutante que no encontrara otro de su misma especie para reproducirse y, como consecuencia, la mutación desaparecería y el proceso evolutivo se detendría, lo que en el caso de la tecnología representaría su estancamiento. En concreto, el avance de la tecnología requiere de complementariedad entre las diferentes rutinas, en cualquier otro caso es probable que la mutación no se pueda reproducir y termine por desaparecer.

Un tercer aspecto que es importante destacar en los procesos evolutivos, muy relacionado con la reproducción de la especie, es el principio de herencia, es decir, la manera como las características se transmiten de una generación a otra. A diferencia de los procesos de evolución biológica en los que la información se transmite a través de los genes, el conocimiento tecnológico es adquirido y transmitido por los individuos a través de procesos de aprendizaje [Mokyr 1990, cap. X]¹⁹.

Para efectos de la evolución tecnológica, es importante destacar que la adquisición de conocimiento se realiza de diferentes formas: Primero, mediante la observación por parte del individuo de la 'naturaleza', ya sea por investigación o métodos menos formales. Segundo, aprendizaje de otros individuos; que puede ser aprendizaje intencional a través de la comunicación y la educación o infiriendo el conocimiento de otros, observando su comportamiento [Arrow 1994]. A lo largo de este documento denominaremos al primer proceso aprendizaje 'individual' y al segundo aprendizaje 'social'.

En el 'aprendizaje individual', las mutaciones son el resultado de un pequeño número de ideas que se encuentran aisladas, lo cual implica que tengan muchas dificultades para reproducirse hasta que encuentren otras que les permitan hacerlo. Esto hace que la mutación sea lenta, que no se presente, o que una idea mutante desaparezca y por tanto el proceso de innovación tecnológica sea muy lento, o que eventualmente no se presente. En estos casos, se dirá que existe baja dimensionalidad del conocimiento debido a que la interacción

19 Ver también Mokyr [1998 y 2000].

entre las rutinas es muy baja. Asimismo, en este tipo de situaciones también existe una baja complementariedad, debido a que el nuevo conocimiento no se enmarca dentro de las estructuras existentes. Estos dos aspectos juntos hacen que el cambio en el conocimiento sea bastante lento.

Por el contrario, en el proceso de 'aprendizaje social', las mutaciones se presentan de una manera más frecuente en la medida en que son el resultado de combinaciones entre diferentes ideas (o rutinas referidas al ámbito estrictamente tecnológico), pero que en este caso no se encuentran aisladas. En contraste con el aprendizaje individual, este tipo de procesos presenta alta interacción que determina alta dimensionalidad del conocimiento. Asimismo, el nuevo conocimiento hace parte de estructuras más complejas en las que la acción escogida por parte de un miembro de la población se enmarca en un contexto en el cual las acciones de los otros son determinantes para reproducirse. Es decir, que el nuevo conocimiento tiene una alta complementariedad que le permite reproducirse con mayor rapidez. La alta dimensionalidad y alta complementariedad determinan un ritmo de evolución mayor²⁰.

La aplicación de estos dos procesos de aprendizaje al ámbito del conocimiento tecnológico permite explicar diversas formas de avance en este tipo de conocimiento. La evidencia mostrará que históricamente es posible identificar innovaciones tecnológicas que se obtienen como resultado de procesos de aprendizaje individual, mientras que otras tienen características de aprendizaje social que permiten entender los cambios que ha experimentado la innovación tecnológica en los últimos 250 años. A manera de síntesis, es importante señalar que es posible analizar el proceso de innovación tecnológica como un proceso de aprendizaje que ha experimentado cambios sustanciales, los cuales pueden ser descritos en términos de dos variables: dimensionalidad y complementariedad.

LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA COMO UN PROCESO DE APRENDIZAJE

La descripción de los procesos de aprendizaje son importantes para el enfoque evolutivo de la innovación tecnológica desde el punto de vista metodológico, en la medida en que permiten hacer énfasis únicamente en dos aspectos del

20 Basalla en los capítulos V y VI hace un análisis y presenta ejemplos de procesos en los que se presentan 'cruces' entre tecnologías.

conocimiento tecnológico: dimensionalidad y complementariedad, como se señaló previamente. No obstante, el análisis de la innovación tecnológica como un proceso de aprendizaje ha sido formulado desde hace por lo menos cuarenta años²¹. Esta conceptualización también ha sido formulada en los trabajos ya citados de Rosenberg, Mokyr, David y Nelson. La primera referencia a la relación entre el aprendizaje y la innovación tecnológica fue propuesta por Arrow en 1962 y 1990, refiriéndose a lo desarrollado en el proceso de producción de la siguiente manera:

No debe pensarse que todo el conocimiento tecnológico es el producto de una investigación deliberada en lo desconocido. En muchos procesos corrientes de producción el conocimiento no siempre es obtenido explícitamente, es adquirido por observaciones no controladas ni planificadas, (en un proceso) conocido como *learning by doing*.

De esta manera Arrow destaca el proceso de aprendizaje que se presenta en los procesos de producción, aunque no desconoce la importancia de los procesos de I&D, a los que denomina como 'investigación en lo desconocido'. No obstante, Arrow no muestra la relación que existe entre el proceso de aprendizaje que se presenta entre las actividades de I&D y el aprendizaje en los procesos de producción. Más aún, el proceso de *learning by doing* planteado por Arrow, lo desarrolló en un marco compatible con el equilibrio general competitivo, lo cual, como se señaló previamente, resulta incongruente dadas las características del conocimiento tecnológico. Asimismo, para Arrow el aprendizaje es visto como un subproducto que se genera de manera no intencionada, es decir, como una externalidad, pero no entra a describir el proceso mediante el cual se genera nuevo conocimiento.

Por su parte, posteriormente David [1975] señaló que la comprensión del cambio tecnológico se hace inseparable de su historia y lo plantea de la siguiente manera:

[...] debido a que el aprendizaje tecnológico depende de la acumulación de experiencia en la producción, la selección de lo que se va a producir y especialmente de la forma de producirlo, utilizando los métodos conocidos actualmente, también determinará, lo que se va a aprender en el futuro. La elección de la técnica pasa a ser el vínculo por el cual las condiciones económicas dominantes pueden influir en las dimensiones futuras del conocimiento tecnológico [David 1975].

21 El trabajo pionero es de Arrow [1962]. Ver también Arrow [1991] y David [1975].

Con esta afirmación David agregó al concepto de *learning by doing*, desarrollado por Arrow, varios elementos adicionales que no estaban presentes en dicho trabajo: el qué y el cómo producir. Asimismo introduce la dimensión intertemporal del proceso de aprendizaje. Sin embargo, David no entra a analizar los procesos de aprendizaje en forma detallada ya que su planteamiento está formulado en términos generales. Un avance importante en relación con las ideas de Arrow y David, lo hizo Rosenberg [1982] cuando señaló lo siguiente:

mi planteamiento es que podemos considerar fructíferamente la innovación tecnológica como un proceso de aprendizaje, mejor dicho, como varias clases distintas de procesos de aprendizaje [...] Un primer paso esencial, entonces, es reconocer que existen varias clases diferentes de aprendizaje [Rosenberg 1982, 125].

De esta manera Rosenberg señala que el análisis del proceso de innovación tecnológica requiere el análisis de los procesos de aprendizaje que se llevan a cabo en la fase de I&D, producción y el uso de la tecnología. Para Rosenberg el proceso de I&D es un proceso de aprendizaje en la generación de nuevas tecnologías. Existe un proceso de aprendizaje que se lleva a cabo en la etapa de fabricación, después de que se ha diseñado el producto, es decir, el proceso de *learning by doing*. Por último, Rosenberg considera otro proceso de aprendizaje que se inicia una vez el producto ha sido utilizado por parte del usuario final y que captura las características de su funcionamiento óptimo, conocido como *learning by using*. Estos tres procesos de aprendizaje dan lugar a innovaciones tecnológicas. Finalmente, Rosenberg [1982] concluye afirmando lo siguiente:

Este artículo debe contemplarse, por consiguiente, como parte de una empresa intelectual más grande, cuyo propósito es identificar los varios tipos diferentes de procesos de aprendizaje, así como la naturaleza de estos procesos y las formas por las cuales alimentan los modelos principales de actividades que constituyen la innovación tecnológica [Rosenberg 1982, 125].

De acuerdo con lo anterior, Rosenberg ve el análisis de la innovación tecnológica como el resultado de un conjunto de procesos de aprendizaje en los que se hace necesario un mayor análisis para su entendimiento, con el propósito de conocer la dinámica del proceso de innovación tecnológica.

Posteriormente Mokyr, en 1990, señaló que dado el carácter epistemológico de la tecnología, “ésta no existe fuera del cerebro de la gente: es algo que los individuos saben, por lo tanto la innovación tecnológica es un cambio en el conocimiento de los individuos”. De manera similar al análisis proveniente de la Biología, plantea un proceso evolutivo en el que las diferentes rutinas,

es decir, las 'ideas' de cómo producir, en nuestro caso rutinas, compiten entre sí. Mokyr señala que la competencia dinámica no se da entre firmas, sino entre rutinas. Los trabajos posteriores han hecho énfasis en el carácter adaptativo y cambiante a lo largo del tiempo por parte de los agentes económicos. Windrum, por ejemplo, ha dicho que el estudio de la producción de nuevo conocimiento, competencias y comportamiento, es decir, la innovación tecnológica es posible analizarla como un proceso de aprendizaje en el que los agentes buscan nuevas maneras de hacer cosas.

En la misma perspectiva, Bassanini en 1996, describió la tecnología como un 'método para hacer algo' que requiere de tres elementos: la información del método, medios físicos para aplicar el método, y el entendimiento del método en sí mismo. Estos tres elementos constituyen lo que en la literatura de la innovación se conoce como 'capacidades tecnológicas' [Bassanini 1997]²². De acuerdo con Bassanini, dichas capacidades tecnológicas pueden ser acumuladas y modificadas cualitativamente a través de "actividades de producción (*learning by doing*), *learning by using*, investigación y desarrollo (I&D), formas que generalmente son complementarias.

Posteriormente, David en 2000, señaló lo siguiente:

Gran parte del moderno discurso acerca de la innovación tecnológica [...] tiene que ver con una o más formas de aprendizaje [...] [es decir] el proceso cognoscitivo a través del cual la gente interactúa, interpreta y altera su control tecnológico sobre su entorno externo [...] [el proceso de innovación] es posible verlo como extensiones, refinamientos y elaboraciones de lo que comúnmente ha sido descrito por economistas e historiadores de la tecnología bajo el nombre de *learning by doing* y *learning by using* [David 2000, 118].

Esta vez, el énfasis de David tiene que ver con el proceso cognoscitivo que se encuentra detrás de los procesos de innovación tecnológica. Asimismo, destaca dos procesos de aprendizaje que se han identificado y que constituyen la base de la innovación tecnológica. Finalmente, señala lo siguiente: "este documento se aventura dentro de la 'caja negra' de los modelos de comportamiento en el aprendizaje para identificar algunos de los mecanismos psicológicos y epistemológicos que pueden considerarse mediante las transformaciones cognoscitivas que manejan adaptación tecnológica útil."

22 Ver también Nelson y Winter [1982].

El planteamiento de David [2000] orienta la investigación de la innovación tecnológica al análisis de los procesos de aprendizaje en la perspectiva económica y lo señala de la siguiente manera:

Mi preocupación es [establecer] la conexión secreta o la falta de conexión entre los diferentes procesos de “aprendizaje”, específicamente entre el progreso cognoscitivo que busca la comprensión compleja y los procesos físicos imperfectamente observados y la evolución del control humano bajo condiciones de incertidumbre. Una novedad consiste sencillamente en examinar una estructura de análisis que reúne dos conceptualizaciones de aprendizaje en la esfera de tecnología que, curiosamente, ha tenido un desarrollo bastante separado en la literatura económica [David 2000, 118-119].

Con base en lo anterior, es importante destacar que David propone integrar los procesos de aprendizaje en el análisis de los procesos de innovación tecnológica. Es decir, que es posible analizar la innovación tecnológica como un proceso de aprendizaje, pues aunque existen antecedentes en este tipo de conceptualización, no se ha hecho un análisis sistemático, en el que teniendo como trasfondo la evidencia histórica se puedan identificar los cambios que se han experimentado en el proceso de innovación tecnológica en los últimos 250 años.

De acuerdo con lo señalado anteriormente, es posible desarrollar un marco conceptual en el que, desde el punto de vista histórico, se pueda analizar la innovación tecnológica como un proceso de aprendizaje que ayuda a explicar los cambios en el proceso de innovación tecnológica.

La innovación tecnológica es vista como un proceso evolutivo en el que se desarrolla una creciente diversidad de opciones a través de la creación por mutación de nuevas oportunidades, y la selección dentro del nuevo conjunto de opciones disponibles. Las opciones existentes pueden ser cambiadas por soluciones mejoradas o por la creación de nuevas opciones radicalmente nuevas que pueden coexistir con las reemplazadas [Dosi *et al.* 1997] .

CONCLUSIONES

La innovación tecnológica ocurre cuando se aplican nuevas rutinas en la producción de mercancías. Las nuevas opciones representan variaciones de las características observadas de una tecnología existente. Algunas de estas nuevas ideas no ‘sobreviven’ la confrontación con las ideas previamente existentes; otras, pueden adaptarse, ya sea para reemplazar a las ya existentes o para coexistir con ellas. Así, las innovaciones tecnológicas ocurren como

una competencia dinámica entre las nuevas y las viejas rutinas. Esta confrontación genera “modificaciones en el conjunto de eventos disponibles, introduciendo nuevas opciones que previamente eran inalcanzables y que no podían ser pronosticadas de manera precisa” [Arrow 1969, 160]. Por lo tanto, en este artículo se considera que la innovación tecnológica representa cambios en el conocimiento tecnológico generado por una competencia dinámica entre rutinas, es decir, por un proceso de aprendizaje.

La caracterización de la innovación tecnológica como un proceso de aprendizaje y su abordaje desde la perspectiva histórica (como se plantea en Benavides [2004, caps. II al IV]) permite identificar dos características del conocimiento tecnológico: la complementariedad y la dimensionalidad. El proceso experimentado durante la Primera Revolución Industrial se caracterizó por ser un proceso de ‘aprendizaje individual’. La innovación típica en esa época se debió a la destreza y habilidad mecánica de un inventor aislado, es decir, un proceso de baja dimensionalidad. Igualmente, los inventos no hacían parte de estructuras tecnológicas complejas y no obedecían a los desarrollos de los otros inventores, es decir, que existía baja complementariedad. No obstante, dichas innovaciones proporcionaron la base esencial para desarrollos posteriores²³. En contraste, el proceso de innovación tecnológica desarrollado durante la segunda Revolución Industrial, pero principalmente, durante el siglo XX, presentó características diferentes, que se asemejan más a un proceso de ‘aprendizaje social’: un proceso de alta dimensionalidad y alta complementariedad del conocimiento.

A partir de esta conceptualización, de las características señaladas y del análisis formal, [Benavides 2004, cap. V], se presentan los elementos conceptuales que permiten mostrar la estrecha relación que existe entre los procesos de innovación tecnológica y los procesos de aprendizaje en una perspectiva evolutiva. Específicamente, se muestran las condiciones bajo las cuales los modelos de aprendizaje permiten entender la narración histórica. Con lo anterior, se demostrará que el comportamiento de la tecnología descrito por Paul David y W. Brian Arthur acerca de *path dependence* y *lock-in*, se origina principalmente en la naturaleza evolutiva de los procesos de innovación tecnológica, los cuales, a su vez, son el resultado de procesos de aprendizaje.

Asimismo, se muestra que los cambios en el proceso de innovación tecnológica pueden ser entendidos analizando los cambios en los procesos de aprendiza-

23 Para un análisis detallado sobre este aspecto ver Mowery y Rosenberg, Capítulo X.

je, es decir, en el cambio que se ha experimentado en la dimensionalidad y en la complementariedad del conocimiento tecnológico. Por último, es importante destacar que a pesar de que en los últimos veinte años se ha avanzado de manera significativa en el análisis del cambio tecnológico, en la literatura actual no existe un desarrollo en el que a partir de la evidencia histórica y de la conceptualización se identifiquen y formalicen los cambios que se han presentado en el proceso de innovación tecnológica. De hecho, en los trabajos existentes no se considera que la innovación tecnológica ha cambiado de naturaleza en los últimos 250 cincuenta años, sino que sólo ha cambiado de ritmo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anderson, P. W., Arrow, K. J. y Pines, D. (1988). The economy as an evolving complex system. *The proceedings of the evolutionary paths of the global economy workshop*. Santa Fe, New Mexico: Institute Studies in the Science of Complexity.

Arrow, Kenneth (1991). *Returns to scale, information and economic growth*. Technical Report No. 15. Stanford: Institute for Theoretical Economics, Stanford Press.

Arthur, W. Brian (1994). *Increasing returns and path dependence in the economy*. Michigan: The Michigan University Press.

Basalla, George (1991). *La evolución de la tecnología*. Barcelona: Ed. Crítica.

David, Paul (1975). *Technical choice, innovations and economic growth*. UK: Cambridge University Press.

David, Paul (1985). Clio and the economics of QWERTY. *American Economic Review*, 75, may: 332-337.

David, Paul (1989). *Computer and dynamo: the modern productivity paradox in a not-too-distant mirror*. Stanford: Center of Economic Policy and Research, No. 172, Stanford University.

Dosi, G., Marengo, L. y Fagiolo, G. (1997). *Alternative methodologies for modeling evolutionary dynamics*. Laxemburg: Working Paper IIASA, International Institute for Applied Systems Analysis.

Dosi, G., Freeman, C., Nelson, R., Silverberg, G. y Soete (1988). *Technical change and economic theory*. London: Pinter.

Freeman, Christopher (1988). Innovation. En J. Eatwell, M. Milgate y P. Newman (comps), *The New Palgrave: A Dictionary of Economics*. Mc Millan Press, Vol II, p. 858.

Hodgson, Geoffrey (1993). *Economics and evolution. Bringing life back into economics*. The University of Michigan Press.

Holland, John (1988). The global economy as an adaptive process. En Anderson, Arrow y Pines (eds). *The economy as an evolving complex system*. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company.

Jablonka, Eva y Ziman, John (2000). Biological evolution: processes and phenomena. En J. Ziman (Ed.), *Technological innovation as an evolutionary process*. Cambridge: University Press.

Jones, Charles (1999). *Was an industrial revolution inevitable? economic growth over the very long-run*. NBER Working paper 7375.

Kelm, Matthias (1997). Schumpeter's theory of economic evolution: a Darwinian interpretation. *Journal of Evolutionary Economics*. 7: 97-130.

Lozano, F., Monsalve, S. y Villa, E. (1997). El modelo Arrow-Debreu es un modelo estático. *Cuadernos de Economía*. XVI(26):21-46.

Lundvall, Ake (1992). *National system of innovation*. London: Pinter.

Marx, Carlos (1867/1984). *El Capital*. (XVIII ed., Vol. I) Barcelona: Fondo de Cultura Económica.

Mas-Colell, A., Whinston, M. y Green, J. (1995). *Microeconomic theory*. Oxford University Press.

Mokyr, Joel (1990). *The lever of the riches*. Oxford: University Press.

Mokyr, Joel (1997). Are we living in the middle of an industrial revolution? *Federal Reserve Bank of Kansas City*, 82(2) Second Quarter.

Monsalve, Sergio (2002). *Introducción a los conceptos de equilibrio en economía*. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá: Unibiblos.

Mowery, David y Rosenberg, Nathan (1989). *Technology and the pursuit of economic growth*. Cambridge: University Press.

Nelson, Richard (1993). Routines. En Hodgson, Samuels y Rool (Eds.), *The Elgar companion to institutional and evolutionary economics*. II: 249.

Nelson, Richard (1995). Recent evolutionary theorizing about economic change. *Journal of Economic Literature*. XXXIII: 48-90.

Nelson, Richard (2000). Selection criteria a selection processes in cultural evolution theories. En J. Ziman (Ed.), *Technological innovation as an evolutionary process*. Cambridge: University Press.

Nelson, Richard y Winter, Sydney (1977). In search us useful theory of innovation. *Research Policy*. 6: 36-76.

Nelson, Richard y Winter, Sydney (1982). *An evolutionary theory of economic change*. Cambridge: University Press.

Rosenberg, Nathan (1982). *Inside in the black box technology and economics*. Cambridge: University Press.

Rosenberg, Nathan (1994). *Exploring in the black box: technology, economics and history*. Cambridge: University Press.

Schumpeter, Joseph (1911/1997). *La teoría del desenvolvimiento económico*. México DF: Fondo de Cultura Económica.

Smith, Adam (1776/1992). *Investigación sobre la naturaleza y causa de la riqueza de las naciones*. México DF: Fondo de Cultura Económica.

Ziman, John (Ed.) (2000). *Technological innovation as an evolutionary process*. Cambridge: University Press.