

Condiciones técnicas para el crecimiento sostenible en la teoría económica.

Un análisis

Catalina Granda C.¹

Recibido para evaluación: 03 de Agosto de 2007

Aceptación: 20 de Noviembre de 2007

Recibido versión final: 30 de Noviembre de 2007

RESUMEN

La teoría económica y sus modelos anteponen como condiciones para el crecimiento sostenible los rendimientos de escala, la sustitución entre factores productivos y el progreso tecnológico.

En el presente trabajo se propugna por una revisión de tales condiciones, particularmente de la sustitución entre recursos naturales y capital construido por el hombre y del cambio técnico, acorde con el reconocimiento de la inevitable escasez física de los recursos, concomitante a las acciones del ser humano en un mundo regido por restricciones termodinámicas. Al respecto, se analiza el papel que dichas condiciones desempeñan en las teorías del crecimiento económico con recursos, a la vez que se indican sus limitaciones y objeciones desde una perspectiva biofísica. Finalmente, se efectúa una breve reflexión acerca de cuán inapropiadas son las representaciones teóricas de las actividades económicas para dar cuenta del crecimiento en presencia de recursos naturales que se agotan o degradan.

PALABRAS CLAVE: Recursos Agotables y Crecimiento Económico, Energía, Teoría Económica, Rendimientos a Escala, Sustitución, Cambio Tecnológico, Sostenibilidad.

ABSTRACT

Economic theory and its models point out returns to scale, substitution among productive factors and technological progress as conditions for sustainable growth.

This work aims at a critical appraisal of these conditions, particularly the ones related to substitution between natural resources and man-made capital and technical change, by recognizing the inevitable physical scarcity of resources concomitant to the human actions in a world governed by thermodynamic restrictions. To do so, the role that the mentioned conditions play in the theories of economic growth with resources is analyzed, and its limitations and objections from a biophysical perspective are indicated as well. Finally, a brief consideration as to how inappropriate the theoretical representations of economic activities are to take account of growth in spite of resource exhaustion or degradation is carried out.

KEY WORDS: Exhaustible Resources and Economic Growth, Energy, Economic Theory, Returns to Scale, Substitution, Technological Change, Sustainability.

1. Economista, Universidad Nacional de Colombia. Aspirante a Profesora Auxiliar, Universidad de Antioquia. cgranda@udea.edu.co c2granda@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

Condiciones técnicas para el crecimiento económico ganó terreno, gracias a la hipótesis planteada en el Informe para el Club de Roma, según la cual existen límites biofísicos al crecimiento que llevarían eventualmente éste a su colapso; además surgen las problemáticas de la emergencia del movimiento ambientalista y de los incrementos desmesurados en los precios del petróleo.

Estos hechos exigieron a la economía convencional dar respuestas mediante la incorporación de los recursos naturales y la contaminación en su marco analítico. Tales respuestas se dieron a conocer luego de la divulgación de *Los Límites del Crecimiento*. En ellas, la teoría neoclásica del crecimiento provee el marco analítico y, en concordancia con la preocupación en boga por las restricciones a la expansión económica. **Un análisis**¹

En tal sentido, son conocidas las disertaciones de Solow (1974a), Stiglitz (1974) y Dasgupta y Heal (1974), publicadas en un número especial de la *Review of Economic Studies*. En estos trabajos, Solow (1974b, p. 10) y Stiglitz (1974, p. 123) afirman que la seriedad del problema del agotamiento de los recursos depende de modo importante de tres aspectos tecnológicos: 1. los rendimientos (constantes) a escala; 2. la facilidad con la que factores hechos por el hombre (especialmente el capital) puedan sustituir los recursos no renovables en la producción; y 3. la probabilidad de que haya progreso tecnológico (en particular, ahorrador de recursos naturales).

2. RENDIMIENTOS A ESCALA

Al respecto, este trabajo se centra en los rendimientos constantes a escala, dado que en una buena cantidad de modelos de crecimiento, se asume que la función de producción agregada presenta esta característica.

En efecto, el supuesto de que la función de producción exhibe rendimientos constantes a escala sobresale en el modelo de crecimiento (exógeno) neoclásico. Cabe señalar que Solow (1979), al enunciar este modelo, puso de manifiesto que

“Esto equivale a suponer que no hay ningún recurso escaso no aumentable, como la tierra. El rendimiento constante a escala parece el supuesto natural a formular en una teoría de crecimiento. El caso de la tierra escasa conduciría a rendimientos decrecientes a escala del capital y la mano de obra” (p. 153).

Con esta afirmación, junto con la no- inclusión de la tierra como factor productivo, este autor pone en evidencia la omisión que las primeras teorías modernas del crecimiento económico hacen de los recursos naturales. La exclusión de los factores no- reproducibles en la teoría neoclásica del crecimiento, como puede constatar, simplemente refuerza las implicaciones de la caracterización de la producción adoptada.

En cuanto a tales implicaciones, vale la pena destacar que la propiedad de rendimientos constantes de escala descansa en la noción de replicación. Esto significa que si todos los insumos relevantes son identificados correctamente, entonces es posible replicar el proceso productivo. Por tal razón, esta propiedad halla su forma matemática en la función de producción homogénea de primer grado, la cual requiere a su vez de la expresión en términos pecuniarios de los factores y el producto².

Lo anterior contrasta con la medición de los factores productivos en términos físicos, para la cual el atributo de rendimientos constantes a escala resulta problemático dado que, según advierte Lewin (2005), en virtud de este atributo se omiten la heterogeneidad y las situaciones “únicas” inherentes a una consideración de los factores desde una perspectiva física y de la realidad observable.

Pese a esto, algunos de los modelos de crecimiento endógeno más importantes continúan incorporando el supuesto de rendimientos constantes a escala dentro de sus principales rasgos, con todas las implicaciones asociadas a este proceder. En tal sentido, Rebelo (1991) resalta en su presentación del modelo AK que lo único requerido para la viabilidad del crecimiento endógeno



*. Este trabajo se deriva de la tesis de Maestría “Elementos para una crítica a las teorías del crecimiento económico basados en los conceptos de capital y cambio tecnológico y sus nexos con los recursos naturales y la energía”, realizada en la Universidad Nacional de Colombia (sede Medellín) entre 2004 y 2006. La autora desea agradecer al profesor Luis Jair Gómez Giraldo, por su acompañamiento a lo largo de la elaboración de la tesis; asimismo, al investigador Reiner Kimmel, del Instituto de Física Teórica de la Universidad de Würzburg (Alemania), por facilitarle algunas de sus publicaciones y prestarle asesoría en temas propios de esta revisión crítica.

2. Ayres (2001) nota que el atributo de rendimientos constantes a escala se justifica fácilmente cuando los factores de producción son medidos en unidades monetarias, ya que éste significa simplemente que doblar el precio de los insumos duplica el valor del producto (p. 818, footnote 2).

sostenido es la existencia de un “núcleo” de bienes de capital producido bajo rendimientos constantes a escala y sin la contribución directa o indirecta de factores no reproducibles, como la tierra.

Similarmente, este autor expone que si la producción de bienes de capital requiriese factores no- reproducibles y éstos hiciesen viable el crecimiento sostenido, ella (la producción) debería exhibir rendimientos crecientes a escala. Tal consideración, de acuerdo con Dasgupta y Heal (1979), se basaría en que este tipo de rendimientos presumiblemente puede compensar las limitaciones impuestas por la no reproducibilidad de los recursos naturales (p. 197).

No sobra señalar, por último, que las afirmaciones de Solow (1979) e incluso del mismo Rebelo son ciertamente corroboradas por Aghion y Howitt (1998), quienes desarrollan una aproximación AK al crecimiento endógeno en la que introducen un recurso no- renovable en la función de producción. Dicha aproximación conlleva que no es posible el crecimiento sostenido en presencia de recursos no- renovables porque éstos dan lugar a rendimientos decrecientes del capital (cap. 5).

3. SUSTITUCIÓN ENTRE FACTORES PRODUCTIVOS

Los supuestos e hipótesis sobre los cuales se sustenta la asignación de recursos en la economía neoclásica conceden un papel crucial a la sustitución de un bien por una alternativa similar, toda vez que a través de ésta, se puede evitar la escasez de una mercancía particular en la producción o en el consumo (Stern, 1997, p. 199).

En particular, la asunción de conductas optimizadoras (maximizadoras del beneficio o minimizadoras del costo) por parte de los empresarios bajo condiciones de competencia perfecta y productos marginales decrecientes conlleva la posibilidad de sustituir un factor por otro en la medida en que este último sea más productivo y ello se refleje en los precios de mercado³. Esta posibilidad es sólo un reflejo de que una producción dada se puede obtener mediante diversas combinaciones de factores.

En general, las representaciones del crecimiento económico con recursos naturales se caracterizan por la asunción de posibilidades de sustitución estricta entre los recursos naturales y el capital hecho por el hombre toda vez que las funciones de producción empleadas sólo poseen dos insumos (R y K) y/o presentan capital maleable⁴. En términos más técnicos, esto significa que se supone que la elasticidad de sustitución⁵ entre esos elementos es constante y alta (*i.e.*, igual o superior a uno).

En particular, la asunción de conductas optimizadoras (maximizadora del beneficio o minimizadora del costo) por parte de los empresarios bajo condiciones de competencia perfecta y productos marginales decrecientes conlleva la posibilidad de sustituir un factor por otro en la medida que este último sea más productivo y ello se refleje en los precios de mercado⁶. Esta posibilidad es sólo un reflejo de que una producción dada se puede obtener mediante diversas combinaciones de factores.

Lo anterior contrasta con la ley de la conservación de la materia- energía, que prescribe que ni el capital, ni el trabajo pueden crear los recursos de los cuales se derivan y sobre los que operan (Cleveland, 1987, p. 67; Daly, 1999, p. 33; Cleveland y Ruth, 1999, p. 68). Dicho en otras palabras, todo proceso productivo posee requerimientos mínimos de materia y energía⁷ que le imponen límites a la sustitución de recursos naturales por otros factores productivos, haciendo de los primeros -y, especialmente, de la energía- un factor esencial de la producción (Stern, 1997, pp. 199-200; Stern, 2004, p. 3).

En igual sentido, cabe resaltar que la heterogeneidad de los recursos naturales hace imposible encontrar sustitutos para la totalidad de los mismos (Sollner, 1999, p. 105). Además, la naturaleza desempeña algunas funciones económicas, como las de sustentación de la vida, que no pueden ser ejercidas por el capital hecho por el hombre. Por consiguiente, las múltiples cualidades y funciones del entorno natural restringen sus posibilidades de sustitución por parte del capital (Pearce y Turner, 1995, pp. 79- 80).



3. En efecto, si las firmas obedecen las condiciones de la teoría de la determinación de la demanda de factores por la productividad marginal, la relación marginal de sustitución técnica se hace igual a la razón de precios de los insumos (Nicholson, 1992, p. 665).

4. La hipótesis de maleabilidad postula que todos los bienes de capital están formados por una materia homogénea e indestructible que puede aplicarse a cualquier uso y amoldarse a diferentes formas sin dificultad significativa. De esta manera, se desvirtúa la especificación y la heterogeneidad como características esenciales de los bienes de capital; asimismo, se concibe el capital como compuesto de un conjunto de elementos perfectamente sustituibles entre sí (Harcourt, 1975, pp. 190-192, 195-196).

La noción de capital maleable es un supuesto de partida en las representaciones del crecimiento económico con recursos agotables que proponen Solow (1974a), Stiglitz (1974) y Dasgupta y Heal (1974, 1979), de lo que se infiere que en éstas cada componente del capital es un sustituto perfecto de cualquiera de los otros.

5. La elasticidad de sustitución es un coeficiente que mide la sensibilidad de las proporciones de factores a cambios en los precios relativos de los mismos.

6. En efecto, si las firmas obedecen las condiciones de la teoría de la determinación de la demanda de factores por la productividad marginal, la relación marginal de sustitución técnica se hace igual a la razón de precios de los insumos (Nicholson, 1992, p. 665).

7. Dado que toda actividad económica involucra transformación de materia, y para ello se necesita energía, la segunda ley de la termodinámica estipula que todo proceso de producción requiere una cantidad mínima de energía.

4. CAMBIO TECNOLÓGICO

La tecnología es concebida por los economistas como una *fórmula* o *conocimiento* que permite a las empresas combinar el capital y el trabajo con el fin de elaborar productos que satisfacen una demanda solvente (Barro y Sala-i-Martin, 2004, p. 24). De esta manera, se conoce como cambio tecnológico a la expansión del conjunto de tecnologías de producción disponibles y, por ende, el mejoramiento de las instrucciones para la combinación de los factores productivos en el tiempo. En la medida en que dicho cambio contribuye al incremento de la producción desproporcionadamente en comparación con el esfuerzo y el costo necesario para llevarlo a cabo, brindando a la sociedad mayor bienestar (entendido como disposición sobre bienes y servicios), se le denomina *progreso tecnológico* (Mokyr, 1993).

Los economistas neoclásicos han intentado explicar el crecimiento económico introduciendo una variable de mejoramiento tecnológico que, en el modelo de Solow- Swan, es de carácter exógeno, en tanto que en los modelos de crecimiento endógeno, se relaciona con las decisiones de inversión en tecnología. En general, todos estos modelos consideran que el cambio técnico es el “motor” del crecimiento económico; sin embargo, ninguno de ellos se preocupa por estudiar la naturaleza de la innovación y el cambio tecnológico, dejando sin esclarecer la principal fuente a la que le atribuyen el crecimiento.

Dado que la tecnología cambia en virtud de la creatividad humana, por la que los hombres conciben nuevas ideas o acciones, muchos economistas tienden a creer que el progreso tecnológico es ilimitado y “salvará” a la humanidad de los problemas asociados al agotamiento y/o degradación de los recursos naturales. Esta postura optimista se refleja en diversas variantes de los modelos de crecimiento con recursos naturales, a saber, el progreso tecnológico aumentativo de recursos, la inclusión del conocimiento como parte del capital y la tecnología de contención. Como se mostrará seguidamente, estas variantes poseen algunas inconsistencias y contradicciones no sólo desde el punto de vista teórico, sino también desde las realidades biofísicas que atañen al crecimiento económico como proceso de transformación de materia- energía.

Una de estas realidades da cuenta de que mucho de lo que es llamado progreso tecnológico ha tenido lugar mediante la utilización por el hombre de cantidades crecientes de formas de energía con el propósito de llevar a cabo actividades específicas de transformación material. Tal utilización de energéticos se remonta a las sociedades primitivas y ha permitido configurar a lo largo de la historia diversas estructuras socio- económicas y culturales conforme la creatividad humana ha dado paso a nuevos modos de conversión de energía, así como a nuevas fuentes⁸.

4.1. Progreso tecnológico aumentativo de recursos

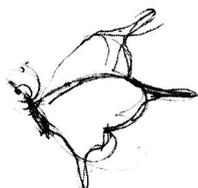
En las disertaciones de Solow (1974a), Stiglitz (1974) y Dasgupta y Heal (1974), se toma la forma típica del modelo de Solow- Swan con cambio tecnológico exógeno en el que se incluye, junto con el capital y el trabajo, un recurso agotable en la función de producción. Sobre esta base, se concluye -en palabras de Dasgupta y Heal (1979)- que la existencia de un acervo finito de recursos necesarios para la producción no implica que la economía deba estancarse si coexiste una tasa positiva constante de progreso tecnológico aumentativo de recursos.

Este tipo de progreso tecnológico permite generar la misma cantidad de producto con relativamente menos recursos naturales debido a que incrementa la eficiencia en el uso de éstos al propender por su mejor aprovechamiento y la reducción de desechos por unidad de producción. Así, se regula la eventual desaparición de los recursos, incluso si la elasticidad de sustitución entre capital reproducible y recursos agotables es nula.

4.2. El conocimiento como capital

Alternativamente a la aproximación AK ya mencionada, Aghion y Howitt (1998) desarrollan un modelo de crecimiento endógeno enmarcado en la representación schumpeteriana, en el que introducen un recurso no- renovable en la función de producción. Esta aproximación, en contraste con el modelo lineal, conlleva crecimiento sostenido, al menos bajo ciertas circunstancias (cap. 5).

8. En particular, el advenimiento de la Revolución Industrial abrió paso a la utilización creciente de combustibles fósiles, comenzando con el carbón en la medida que los múltiples usos de la máquina de vapor condujeron al abaratamiento de ese recurso energético y a economías de escala que sustentaron el desarrollo de la manufactura, el crecimiento de la demanda de productos y, por ende, un aumento en el consumo de todo tipo de materiales. Más adelante, el descubrimiento del petróleo estimuló el desarrollo de maquinarias (e.g., motores a gasolina, de combustión interna y Diesel) e industrias que constituyen el complejo productivo hoy dominante.



Tal conclusión radica en la distinción que Aghion y Howitt (1998) efectúan entre dos tipos de capital - el capital tangible y el capital intelectual-, así como en la caracterización de la acumulación del último como menos intensiva en recursos en comparación con la acumulación del primero (cap. 5). Así las cosas, como anota England (2000), la acumulación de "capital intelectual" puede compensar los rendimientos constantes a escala e influir en las restricciones biofísicas sobre la actividad económica (p. 426).

De otro lado, Smulders (1999) desarrolla un modelo en el que introduce tres factores en la función de producción: calidad ambiental, uso de servicios del medio ambiente y acervo de conocimiento hecho por el hombre (que incluye el capital). Todos estos aspectos se asumen esenciales. Asimismo, este autor supone que la producción exhibe rendimientos constantes con respecto al insumo de conocimiento hecho por el hombre, dejando los otros factores fijos.

Estos resultados son, guardadas las particularidades, semejantes a los de los modelos lineales a la Rebelo y los de crecimiento endógeno con recursos de Aghion y Howitt (véase: Luzzati, 2004, pp. 335- 336)⁹. En este contexto, cabe resaltar que tanto el trabajo de Aghion y Howitt (1998, cap. 5) como el de Smulders (1999) sustentan el crecimiento económico en la generación de nuevas ideas, en el entendido de que éstas pueden vencer las limitaciones biofísicas inherentes a las actividades económicas; de este modo, concluyen que el conocimiento humano puede provocar crecimiento sostenido independiente del entorno natural y de los efectos que sobre éste pueda tener aquél.



4.3. Tecnología de contención

Algunos economistas neoclásicos convierten la esperanza inherente a su noción de progreso tecnológico ilimitado y omnipotente en postulado teórico al plantear la posibilidad de que, en último extremo, aparezca una invención o un recurso renovable que salve a la humanidad de la catástrofe que entraña el deterioro y ulterior agotamiento de los recursos no- renovables, o que por lo menos posponga dicha catástrofe durante un lapso indeterminado de tiempo.

Dicha tecnología, a la que W. D. Nordhaus dio el nombre de tecnología de contención (*backstop*), comporta la particularidad de que podría sustituir perfectamente los recursos agotables en el futuro de manera de satisfacer los requerimientos mínimos de materia y energía, dependiendo de si la cantidad de recursos demandada al costo de tal tecnología es suficiente para cumplir los requerimientos mencionados (Bretschger, 2005, p. 158).

Sin embargo, este planteamiento no toma en cuenta que el mero conocimiento no puede crear la energía y la materia cuyos requerimientos pretende suplir. De hecho, el cambio tecnológico necesita estos elementos para concretarse. Consecuentemente, la tecnología de contención, al estar rigida por las leyes de la termodinámica, es un imposible desde el punto de vista físico.

5. SUSTITUCIÓN, CAMBIO TECNOLÓGICO Y ESENCIALIDAD DE LOS FACTORES PRODUCTIVOS

La teoría neoclásica supone que la sustitución y el progreso tecnológico son fenómenos distintos y analíticamente separados, aunque pueden ocurrir simultáneamente. En tal sentido, se dice que la sustitución entre factores tiene lugar dentro de métodos de producción conocidos y no implica la introducción de nuevas tecnologías o innovaciones.

No obstante, la distinción entre sustitución y progreso tecnológico resulta extremadamente complicada en la práctica, ya que a menudo no se sabe si una técnica conocida está disponible pero no se utiliza, o si simplemente es desconocida (Mokyr, 1993, p. 350). De esto, se deriva la dificultad de diferenciar entre sustitución pura entre factores productivos y cambio tecnológico inducido por variaciones en los precios relativos de los diversos insumos (Victor, 1991, p. 199).

Lo anterior pone de presente que, pese a la suposición neoclásica, el cambio tecnológico no es diferente de la sustitución. Tal como señala Stern (2004), el desarrollo de tecnologías de producción nuevas y más eficientes comporta una sustitución de factores productivos por

9. No obstante, la asunción de esencialidad de los factores junto con la violación de las condiciones de Inada dan lugar a una contradicción pues, como demuestran Barro y Sala-i-Martin (2004), los rendimientos constantes a escala y las condiciones de Inada implican que todos los factores son esenciales en la función de producción neoclásica (ch. 1); en consecuencia, el incumplimiento de uno de tales atributos vulnera el supuesto de que el producto es nulo en ausencia de calidad ambiental y/o del flujo de servicios ambientales.

conocimiento incorporado en bienes de capital mejorados y trabajadores más hábiles (p. 10).

Las posibilidades de sustitución entre los elementos productivos determinan la existencia de requerimientos mínimos de insumos, esto es, de factores *esenciales* que comportan restricciones sobre la producción en la medida que, dadas cantidades positivas de los otros factores, la producción se hace nula cuando sus magnitudes son cero y estrictamente positiva cuando estos se presentan en cantidades positivas. Tales posibilidades se supeditan, a su vez, a la forma funcional asumida en los distintos modelos de la producción y el crecimiento económico y, especialmente, a la *elasticidad de sustitución*. Atendiendo a esta consideración, podría decirse entonces que el asunto de la esencialidad estriba también en el cambio tecnológico en la medida que éste apunte a la sustitución, mediante el descubrimiento o desarrollo de sustitutos que hagan no esenciales recursos que así han sido¹⁰.

No obstante, como se ha visto en relación con la tecnología de contención, la sustitución de recursos naturales por conocimiento posee límites, lo que muestra que la concepción de ideas por los humanos no puede superar las restricciones físicas inmanentes a las actividades económicas, de modo que los recursos constituyen un elemento fundamental de la producción.

6. SÍNTESIS Y REFLEXIONES

Los fundamentos naturales de la producción sólo comenzaron a abordarse a raíz de las preocupaciones ambientales y por la escasez de recursos a fines de la década del sesenta del siglo pasado, así como sobre los límites y/o la sostenibilidad del crecimiento económico a comienzos de los setenta. Dichas preocupaciones indujeron a los economistas teóricos modernos a incorporar los recursos naturales en sus representaciones del crecimiento.

Hasta los años noventa del siglo pasado, la teoría neoclásica del crecimiento económico sostuvo dos razones por las que los recursos naturales no son, en último término, esenciales para la producción y el bienestar humano. Tales razones son, según Dasgupta y Heal (1974 y 1979), la acumulación de capital manufacturado, que sustituye los recursos en desaparición en cuanto sea posible, y/o el progreso tecnológico, que mejora la eficiencia en el uso de estos recursos o permite desarrollar sustitutos.

La tecnología es concebida por los economistas convencionales como el conocimiento de las combinaciones de capital y trabajo que le permiten a las empresas elaborar productos que satisfacen una demanda efectiva, de lo que se colige que el cambio o progreso tecnológico consiste en la ampliación y mejoramiento del conjunto de técnicas de producción con miras a proporcionar mayores bienes y servicios a la sociedad.

Con la consolidación de la corriente neoclásica, se arraiga en el pensamiento de los economistas la creencia en que el progreso tecnológico, a través de la generación de conocimiento, puede compensar las contingentes limitaciones asociadas a la finitud de recursos naturales necesarios para la producción. Mas aún, a partir de la década de los noventa las nuevas teorías del crecimiento arguyen que exclusivamente el cambio tecnológico, a través de la creación de nuevas ideas, da lugar a una expansión económica ilimitada en la que los recursos naturales pueden incluso no desempeñar papel alguno¹¹.

La teoría económica de los recursos naturales se ha desenvuelto con base en una premisa fundamental, a saber, que la escasez de recursos naturales no puede ser un problema serio a largo plazo dado que el cambio tecnológico responde a ello extendiendo la vida de estos (por ejemplo, mediante el reciclaje), incrementando la eficiencia de su uso (al reducir el desecho por unidad de producción), localizando nuevos depósitos y descubriendo o desarrollando sustitutos con precios comparables (Smith, 1980, citado en Cleveland, 1987, p. 65; Dasgupta, 1993).

De esta manera, las teorías del crecimiento con recursos naturales concluyen que el conocimiento humano puede dar lugar a crecimiento económico sostenido independiente del entorno natural. En la disertación neoclásica, el progreso tecnológico compensa el agotamiento de los recursos y constituye la fuente del crecimiento, en tanto que en los modelos que se enmarcan en la teoría del crecimiento endógeno la creación de nuevas ideas subsana los rendimientos constantes



10. Para una apreciación de la perspectiva neoclásica al respecto, véase Dasgupta y Heal (1974).

11. Para una ilustración de este punto de vista, véanse Rebelo (1991) y los modelos de crecimiento endógeno con recursos naturales que parten de la aproximación de este autor.

a escala y conduce a una expansión económica que no es restringida por la naturaleza. Así las cosas, estos enfoques del crecimiento se sustentan en el convencimiento de que la inteligencia humana puede vencer las limitaciones biofísicas inherentes a las actividades de producción y consumo.

En este artículo, se ha mostrado específicamente que, como nota Stern (2004), contrario a la distinción neoclásica entre sustitución y cambio tecnológico, el desarrollo de técnicas de producción nuevas y más eficientes facilita la sustitución al ser él mismo una sustitución de factores productivos por conocimiento incorporado en bienes de capital mejorados y trabajadores más habilidosos (p. 10). Así las cosas, los argumentos que aducen las teorías del crecimiento económico con recursos naturales para justificar que éstos no son necesarios, se reducen a uno solo: sustitución entre los elementos de la producción.

Sin embargo, este argumento no toma en cuenta que la sustitución de factores productivos por conocimiento presenta límites claros puesto que la generación y el mantenimiento de maquinaria y trabajadores, sin importar el grado de sofisticación y habilidad que tengan incorporados, requieren de energía, materiales y servicios ecosistémicos (Stern, 2004; Cleveland, 2003). Luego, el cambio tecnológico no ocurre en el vacío, obedeciendo las mismas restricciones termodinámicas que la sustitución (Sollner, 1999).

En este sentido, se ha indicado que, a lo largo de la historia, el progreso tecnológico ha sido alimentado por el descubrimiento y utilización creciente de formas de energía. En particular, los energéticos fósiles han impulsado en los últimos dos siglos el desarrollo y uso de máquinas -de vapor y de combustión interna, motores eléctricos- y sustancias químicas -fertilizantes y pesticidas- que reemplazan o potencian el trabajo animal y humano (Ayres, 2001; Cleveland *et al.*, 1984; Gómez G., 2002, cap. IX; Kümmel, 2001; Ayres y van den Bergh, 2005).

De este modo, puede decirse que el cambio tecnológico no es algo forjado sólo por la mente humana, sino que también es determinado en parte por los atributos físicos de las energías disponibles en el medio ambiente (Kaufmann, 1992, citado en Cleveland y Ruth, 1999, p. 88, y Cleveland, 2003, p. 8). Ergo, si el conocimiento es considerado el "motor" del crecimiento económico, entonces el "combustible" que propulsa tal motor ha sido en las pasadas dos centurias los crecientemente utilizados energéticos fósiles (Luzzati, 2004, p. 339).

Empero, es tal la creencia de los economistas en el progreso tecnológico ilimitado y, por ende, en que el crecimiento económico puede desligarse de la naturaleza, que abrigan la esperanza de llegar a descubrir o desarrollar una fuerza que se perpetúe a sí misma. Dicha fuerza, a la que denominan tecnología de contención, permitiría la producción de bienes sin insumo natural alguno mediante la sustitución continua de éste por un compuesto de trabajo y capital; así, esta tecnología lleva a asumir que los recursos naturales, aunque útiles, no son indispensables.

No se niega la importancia de las ideas, las cuales ciertamente han facultado al hombre para "arreglárselas" ante los problemas de agotamiento de recursos que históricamente ha enfrentado; pero tampoco se puede desconocer que la implementación de éstas a través del cambio tecnológico es un proceso de trabajo gobernado por las mismas leyes físicas y ecológicas que cualquier otro proceso de este tipo, lo que también es válido para la tecnología *backstop* (Cleveland, 1987, p. 69; Sollner, 1999).

Además, el razonamiento subyacente a la esperanza mencionada parece débil dado que nada garantiza que el progreso tecnológico será lo suficientemente rápido y contundente como para evitar que la escasez de recursos constituya una restricción¹². En últimas, pretender que la "salvación" venga del avance de la tecnología es una extrapolación -basada en una apreciación equivocada- de lo que ha ocurrido en los pasados dos siglos, semejando más un acto de fe en el ser humano que un argumento científico (Luzzati, 2004, p. 331).

La producción y, en general, la actividad económica constituye un proceso de organización y transformación de energía y materia de baja entropía en energía y materia de alta entropía que se lleva a cabo a través de un conjunto de operaciones en un lapso de tiempo determinado y es irreversible (Colacchio y Soci, 2003, p. 101; Ayres, 1978; Georgescu-Roegen, 1996). En virtud de ello, los principios físicos y biológicos sugieren la importancia de los flujos materiales, energéticos y de información, así como una fuerte interdependencia entre estos flujos y los agentes que los extraen, transforman y utilizan (Christensen, 1989).



12. Dasgupta y Heal (1974) reconocen indirectamente esta objeción al enfocar su atención en la incertidumbre relacionada con el tiempo exacto que tome descubrir una tecnología de contención disponible. La inquietud de estos autores es abordada posteriormente por Dasgupta y Stiglitz (1981), quienes estudian los patrones de consumo intertemporal de recursos agotables a que puede dar lugar dicha incertidumbre.

Sería preciso que la formulación teórico- económica de la producción reflejase estas características. No obstante, los economistas asumen lo que ocurre dentro del proceso productivo como un dato, por lo que difícilmente se puede decir que la función de producción neoclásica describa de manera fiel el componente estrictamente técnico de la producción, y menos que lo analice (Colacchio y Soci, 2003, p. 101). En particular, la autonomía de los factores productivos y el principio de productividad (marginal) separable dan poca cuenta de la interdependencia sugerida por las leyes físicas y ecológicas (Christensen, 1989, p. 19).

La teoría neoclásica de la producción viola las leyes de la termodinámica al asumir implícitamente que el capital o el trabajo “crean” el producto, al igual que los materiales y la energía que se requieren para la producción¹³ (Christensen, 1989, p. 23). Más aún, esta teoría plantea que cuando el capital o el trabajo no “crean”, se pueden sustituir entre sí y con los recursos naturales toda vez que no establece distinción física alguna entre estos elementos.

No obstante, la posibilidad de sustitución libre entre factores fundamentalmente diferentes enfrenta restricciones físicas que la limitan en tanto los insumos productivos poseen atributos de diversa índole que los hacen sustitutos pobres (Stern, 1997). En cuanto a la sustitución de recursos naturales por capital, cabe considerar en ese sentido que la construcción y mantenimiento de un aumento en el acervo de medios de producción entrafía un incremento del agotamiento de los recursos naturales (Daly, 1999, p. 33).

Por tal razón, puede decirse que las funciones de producción neoclásicas abstraen totalmente que la disponibilidad de los factores de origen humano depende de la existencia del medio natural; es decir, que el capital y el trabajo se combinan para extraer y aprovechar recursos del ambiente, pero no pueden crear en un sentido físico la energía y los materiales de los que se componen y sobre los cuales operan (Cleveland *et al.*, 1984, p. 893; Daly, 1999).

Al tratar los recursos naturales indiferentemente frente a otros factores de la producción, las formas funcionales estándar de la producción asumen elasticidades de sustitución altas al punto de ser irreales desde una perspectiva biofísica y, de este modo, revelan su desatención hacia la interdependencia entre los recursos naturales y el capital hecho por el hombre (Stern, 2004, p. 7; Cleveland, 2003; Sollner, 1999, p. 112; Cleveland y Ruth, 1999; Cleveland, 1987, pp. 67- 68).

En suma, la teoría de la producción ignora los aspectos físicos relevantes de la actividad económica y reemplaza la complementariedad y heterogeneidad propia de los procesos productivos reales con una suerte de homogeneidad, separabilidad y sustituibilidad entre factores, razón por la cual constituye una construcción que posee poca aplicación a los procesos de transformación material y energética englobados bajo el término producción.

En consecuencia, las teorías ortodoxas del crecimiento económico con motivaciones ecológicas ignoran las restricciones naturales al crecimiento al considerar irrelevantes la finitud de la tierra y la capacidad de sus recursos, pues gracias a las posibilidades de sustitución y/o el progreso tecnológico no existen límites desde la perspectiva de la economía (Sollner, 1999, p. 105).

Lo anterior significa, en relación con la sostenibilidad del desarrollo, que la justicia intergeneracional y el eventual agotamiento de los recursos naturales son reconciliados invocando posibilidades de sustitución y progreso tecnológico inducido, las cuales son vistas como altas en una economía de mercado y -se cree- evitarán a las generaciones futuras cualquier problema relacionado con los recursos (Luzzati, 2004, p. 331; Víctor, 1991, p. 195). Pero, como se desprende de este análisis, no es posible zanjar el asunto de la justicia intergeneracional ante el agotamiento de los recursos naturales invocando simplemente la sustitución y el progreso tecnológico; por el contrario, este asunto debe ser aceptado como un problema real que amerita una discusión seria (Sollner, 1999), una discusión que rebase los límites de la economía convencional.

BIBLIOGRAFIA

- Aghion, P. y Howitt, P., 1998. *Endogenous Growth Theory*. Cambridge: MIT Press, Chapter 5.
 Ayres, R. U., 2001. The minimum complexity of endogenous growth models: the role of physical



13. De ahí que, desde una perspectiva física, se considere que las funciones de producción neoclásicas son inapropiadas para representar los sectores procesadores de materiales en la economía.

- resource flows. *Energy*, Vol. 1, Issue 1, pp. 817- 838.
- Ayres, R. U., 1978. Application of Physical Principles to Economics. In: *Resources, Environment, and Economics: Applications of the Materials/Energy Balance Principle*. New York: John Wiley & Sons, Chapter 3.
- Ayres, R. U. y Van den Bergh, J. C. G. M., 2005. A theory of economic growth with material/energy resources and dematerialization: Interaction of three growth mechanisms. *Ecological Modelling*, Vol. 38, pp. 96 - 118.
- Barro, R. J. y Sala-i-Martin, X., 2004. *Economic Growth*. Second edition. Cambridge and London: MIT Press.
- Cleveland, C. J. et al., 1984. Energy and the U.S. Economy: A Biophysical Perspective. *Science*, Vol. 54, Nos. 2- 3, August, pp. 148 - 163.
- Christensen, P. P., 1989. Historical Roots for Ecological Economics– Biophysical versus Allocative Approaches. *Ecological Economics*, Vol. 1, Issue 1, pp. 17 - 36.
- Cleveland, C. J., 2003. Biophysical Constraints to Economic Growth. In: Al Gobaisi, D. (editor). *Encyclopedia of Life Support Systems*. Oxford: EOLSS.
- Cleveland, C. J., 1987. Biophysical Economics: Historical Perspective and Current Research Trends. *Ecological Modelling*, Vol. 38, pp. 47,- 73.
- Cleveland, C. J. y Ruth, M., 1999. ¿Cuándo, dónde y por cuánto los límites biofísicos restringen el proceso económico? Una investigación sobre la contribución de Georgescu- Roegen a la economía ecológica. Traducción de Ramón Alonso Berrío. En: *Economía ¿Ecológica?* Medellín: Universidad Nacional de Colombia, pp. 61 - 96.
- Cleveland, C. J. et al., 1984. Energy and the U.S. Economy: A Biophysical Perspective. *Science*, Vol. III, pp. 890 - 302.
- Colacchio, G. y Soci, A., 2003. On the aggregate production function and its presence in modern macroeconomics. *Structural Change and Economic Dynamics*, Vol. 14, Issue 1, March, pp. 75 - 107.
- Costanza, R. y Daly, H. E., 1992. Natural Capital and Sustainable Development. *Conservation Biology*, Vol. 6, No. 1, March, pp. 37 - 46.
- Daly, H. E., 1999. Georgescu- Roegen vs. Solow/Stiglitz. Traducción de Ramón Alonso Berrío. En: *Economía ¿Ecológica?* Medellín: Universidad Nacional de Colombia, pp. 31 - 40.
- Daly, H. E., 1994. De la economía de un mundo vacío a la de un mundo lleno. Reconocimiento de una coyuntura histórica en el desarrollo económico. Traducción de Mercedes Guhl Corpas. En: *Desarrollo Económico Sostenible*. Bogotá: Tercer Mundo- Uniandes.
- Dasgupta, P., 1993. Natural Resources in an Age of Substitutability. In: Kneese, Allen V. and Sweeney, James L. (editors). *Handbook of Natural Resource and Energy Economics*. 3 volumes. Amsterdam: North- Holland, Vol. III, pp. 1111 - 1130.
- Dasgupta, P. S. y Heal, G. M., 1974. The Optimal Depletion of Exhaustible Resources. *Review of Economic Studies*, Vol. 41, Symposium on the Economics of Exhaustible Resources, pp. 3 - 28.
- Dasgupta, P. y Stiglitz, J., 1981. Resource Depletion under Technological Uncertainty. *Econometrica*, Vol. 49, N° 1, January, pp. 85 - 104.
- England, R. W., 2000. Natural capital and the theory of economic growth. *Ecological Economics*, Vol. 34, N° 3, September, pp. 425 - 431.
- Georgescu- Roegen, N., 1996. *La Ley de la Entropía y el Proceso Económico*. Traducción de Luis Gutiérrez Andrés y María Victoria López Paños. Madrid: Argenteria- Visor, Colección Economía y Naturaleza, Serie Textos Básicos 3.
- Gómez G., L. J., 2002. *Introducción a la ecología global*. Medellín, Universidad Nacional de Colombia- Facultad de Ciencias Humanas y Económicas.



- Kümmel, R., 2001. Energy, Creativity, and Sustainable Growth. In: Tolba, M. K. (editor). *Our Fragile World. Challenges and Opportunities for Sustainable Development*. Oxford: EOLSS, pp. 409 - 425.
- Lewin, P., 2005. The Capital Idea and the Scope of Economics. *Review of Austrian Economics*, Vol. 18, Nº 2, pp. 145 - 167.
- Luzzati, T., 2004. Growth theory and the environment. In: van den Bergh, Jeroen C. J. M. (editor). *Handbook of Environmental and Resource Economics*. Cheltenham and Northampton: Edward Elgar, pp. 329 - 341.
- Mokyr, J., 1993. La palanca de la riqueza. Creatividad tecnológica y progreso económico. Traducción de Esther Gómez Parro. Madrid: Alianza.
- Mokyr, J., 1993. La palanca de la riqueza. Creatividad tecnológica y progreso económico. Traducción de Javier Quesada. Barcelona: Oikos-Tau.
- Nicholson, W., 1992. *Microeconomic Theory. Basic Principles and Extensions*. Fifth edition. Fort Worth: The Dryden Press.
- Pearce, D. W. y Turner, R. K., 1995. *Economía de los Recursos Naturales y del Medio Ambiente*. Traducción de Carlos Abad Balboa y Pablo Campos Palacín. Madrid: Celeste-Colegio de Economistas de Madrid.
- Rebelo, S., 1991. Long- Run Policy Analysis and Long-Run Growth. *Journal of Political Economy*, Vol. 99, Nº 3, June, pp. 500 - 521.
- Stern, D. I., 2004. Economic Growth and Energy. In: Van den Bergh, Jeroen C. J. M. (editor). *Handbook of Environmental and Resource Economics*. Cheltenham and Northampton: Edward Elgar, pp. 610 - 621.
- _____, 1997. Limits to substitution and irreversibility in production and consumption: A neoclassical interpretation of ecological economics. *Ecological Economics*, Vol. 21, No. 3, June, pp. 97 - 142.
- Victor, P. A., 1991. Indicators of sustainable development: some lessons from capital theory. *Ecological Economics*, Vol. 4, pp. 29 - 46.
- Solow, R. M., 1974b. The Economics of Resources or the Resources of Economics. *American Economic Review*, Vol. 64, Nº 2, May, pp. 1- 14.
- Solow, R. M., 1979. Un modelo de crecimiento. Traducción de Eduardo L. Suárez. En: Sen, Amartya (comp.). *Economía del crecimiento*. México: Fondo de Cultura Económica, Serie Lecturas del Trimestre Económico 28, pp. 151- 182.
- Stern, D. I., 2004. Economic Growth and Energy. In: Cleveland, Cutler (editor). *Encyclopedia of Energy*, 6 Volumes. Elsevier, Volume 2, pp. 1- 17.
- Stern, D. I., 1997. Limits to substitution and irreversibility in production and consumption: A neoclassical interpretation of ecological economics. *Ecological Economics*, Vol. 21, Nº 3, June, pp. 197 - 215.
- Stiglitz, J., 1974. Growth with Exhaustible Resources: Efficient and Optimal Growth Paths. *Review of Economic Studies*, Vol. 41, Symposium on the Economics of Exhaustible Resources, pp. 123 - 137.
- P. A., 1991. Indicators of sustainable development: some lessons from capital theory. *Ecological Economics*, Vol. 4, pp. 191 - 213.

