



## REVISTA ANÁLISIS ECONÓMICO

UAM-Azcapotzalco, División de Ciencias Sociales y Humanidades

Análisis Económico

Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco

analeco@correo.azc.uam.mx

ISSN (Versión impresa): 0185-3937

MÉXICO

2001

Lilia Rodríguez Tapia / Daniel Ruiz Sandoval Valverde

### EL CONCEPTO DE CAPITAL NATURAL EN LOS MODELOS DE CRECIMIENTO EXÓGENO

*Análisis Económico*, segundo semestre, año/vol. XVI, número 033

Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco

Distrito Federal, México

pp. 109-128



# El concepto de capital natural en los modelos de crecimiento exógeno

*Lilia Rodríguez Tapia  
Daniel Ruiz Sandoval Valverde\**

## **Introducción**

En este trabajo se analiza la relación entre el crecimiento económico y los recursos naturales (o el medio ambiente en su acepción más amplia) como fuerza impulsora y limitantes del mismo. Para ello se hace una revisión de las ideas sobre el crecimiento económico planteadas por los exponentes más sobresalientes en la historia del pensamiento económico. Se identifican los elementos comunes a estos economistas que permiten incorporar al medio ambiente como factor de producción, y a continuación se discute el concepto de sustentabilidad, basado en la definición de capital natural, a la luz de los modelos tradicionales de crecimiento exógeno y se comentan las aportaciones de un modelo de crecimiento sustentable elaborado por Barbier y Markandia. Finalmente se identifican los vacíos teóricos existentes que es necesario salvar para llegar al planteamiento de un modelo que describa integralmente las condiciones necesarias para el crecimiento sustentable del ingreso per cápita y se comentan brevemente los avances observados en cuanto a la incorporación del medio ambiente en los modelos de crecimiento endógeno.

El problema del crecimiento es central en el pensamiento económico, si bien el interés por el tema y el enfoque metodológico han variado a lo largo del tiempo. En cuanto a las implicaciones ambientales del crecimiento económico, se trata de un tema relativamente reciente, que no se perfila con toda claridad sino hasta la década de los ochenta con la aparición del informe Brundtland (WCED,

---

\* Profesores-Investigadores del Departamento de Economía de la UAM-Azcapotzalco (lrt@correo.azc.uam.mx y druizsan@campus.ccm.itesm.mx).

1987) y el concepto de sustentabilidad. Es cierto que ya algunos economistas clásicos habían planteado las limitaciones que el entorno natural imponía al crecimiento económico (Ricardo, 1817) y que el análisis microeconómico de los recursos naturales se remonta por lo menos al artículo de Jevons (1865) titulado *La cuestión del carbón*. No obstante estos argumentos no ocuparon un lugar central en el debate sobre el desarrollo y el crecimiento económico, por lo que el análisis de los recursos naturales se desarrolló como una rama subsidiaria de la teoría económica. No fue sino hasta la segunda mitad del siglo XX cuando el Club de Roma (Meadows, 1972) colocó a los recursos naturales escasos en el centro del análisis del fenómeno del crecimiento. Desde entonces las consideraciones sobre el papel que juega el entorno natural en el proceso de crecimiento se han multiplicado y en la actualidad existe una copiosa bibliografía que explora aspectos muy diversos del tema con metodologías igualmente variadas.

Como una revisión detallada de este debate resultaría sumamente extensa, y con el fin de acotar el ámbito de análisis, se identificaron los conceptos y variables fundamentales que permiten estudiar este problema. A partir de ellas se analizan las aportaciones de algunos autores relevantes hasta llegar a delimitar el problema del crecimiento sustentable del ingreso per cápita. Dichos conceptos y variables son los siguientes:

1) Crecimiento económico: la definición e identificación de las fuentes del crecimiento constituye el punto de partida en cualquier modelo y con ello se determina en buena medida los resultados del mismo.

2) Acumulación de capital: se le considera como la causa fundamental del incremento del producto y las variables que influyen en ella definen la función de crecimiento del acervo de capital.

3) Población: los modelos que se comentan a continuación proponen distintas funciones de crecimiento demográfico, cada una de las cuales sustentada en diversas consideraciones teóricas y empíricas. La elección de una función de crecimiento demográfico específica altera, a su vez, los resultados del modelo. Esta variable proporciona también una conexión directa con el concepto de sustentabilidad, ya que al permanecer la tecnología constante un aumento de la población incrementa la presión sobre los recursos naturales.

4) Estado estacionario: define las condiciones en las que la acumulación de capital se detiene y la presión sobre los recursos naturales permanece constante. Este concepto permite vincular el enfoque del crecimiento de Smith y Ricardo con el planteamiento de crecimiento cero desarrollado por el Club de Roma. Además, el concepto de sustentabilidad se define en función del estado estacionario, aunque existen discrepancias al respecto.

5) Capital Natural: la definición del acervo de recursos naturales y servicios ambientales proporcionados por el ecosistema como un bien de capital posibilita su incorporación a los modelos de crecimiento y, de esta manera, formalizar el concepto de sustentabilidad en relación con el crecimiento económico.

6) Sustentabilidad: utilización del capital natural que permite conservar el flujo de bienes y servicios proporcionado por dicho acervo a lo largo del tiempo. Una definición más concreta apunta que los recursos naturales se utilizan sustentablemente cuando:

a) La tasa de utilización del recurso no excede su tasa de renovación.

b) La tasa de utilización de los recursos no renovables no excede la tasa a la cual los sustitutos renovables se desarrollan.

c) La tasa de emisión de agentes contaminantes no exceda la capacidad de asimilación del medio ambiente.

7) Tecnología: en todos los modelos de crecimiento analizados en este trabajo el progreso técnico es exógeno. El cambio tecnológico permite aumentar el producto con la misma cantidad de factores de producción. Si consideramos al medio ambiente como un factor productivo, los avances tecnológicos disminuyen las presiones sobre los recursos naturales.

Cabe hacer notar que los modelos y autores que se comentan a continuación incorporan un gran número de variables además de las mencionadas. Sin embargo se considera que los elementos indicados anteriormente constituyen el núcleo esencial del problema y proporcionan el hilo conductor de la discusión a través de los diferentes modelos. Una vez señaladas las herramientas fundamentales, podemos entrar a la discusión del problema del crecimiento económico en la teoría económica tradicional.

## 1. El problema del crecimiento económico

### 1.1 El planteamiento de Adam Smith

Uno de los primeros análisis del crecimiento económico fue proporcionado por Adam Smith (1776), quien propuso que el crecimiento del producto nacional era una función, en última instancia, de la acumulación de capital. El razonamiento de Smith partía de una función de producción como la siguiente, que es una formalización matemática de sus argumentos elaborada por Aldeman (1978: 37-50):

$$Y = f(K, L, N, U) \quad (1)$$

Donde:

K = acervo de capital      N = recursos naturales  
L = trabajo                      U = instituciones

Para Smith tanto la disponibilidad de recursos naturales como el marco institucional son exógenas al proceso de crecimiento, por lo que el incremento del producto nacional puede expresarse de la siguiente manera:

$$(dY / dt) = (\sigma f / \sigma K) (dK / dt) + (\sigma f / \sigma L) (dL / dt) \quad (2)$$

Por otro lado, el crecimiento del número de trabajadores es una función de la diferencia entre el salario monetario actual ( $W$ ) y el salario de subsistencia ( $w$ ):

$$(dL_s / dt) = q (W - w) \quad (3)$$

donde  $q > 0$ . La demanda de trabajo es una función del crecimiento del acervo de capital y del ingreso:

$$(dL_d / dt) = a (dK / dt) + b (dY / dt) \quad (4)$$

donde  $a$  y  $b$  son factores positivos de proporcionalidad.

Si el mercado de trabajo opera libremente, la demanda y la oferta de trabajo se igualarán en el largo plazo:

$$(dL_s / dt) = a (dK / dt) + b (dY / dt) \quad (5)$$

Pero como lo muestra la ecuación (3), esta igualdad puede expresarse como:

$$q (W - w) = a (dK / dt) + b (dY / dt) \quad (6)$$

Es decir, el crecimiento de la población depende de la diferencia entre el salario de subsistencia y el nominal. Si la demanda de trabajo aumenta sostenidamente impulsada por la acumulación del capital y el crecimiento del ingreso, entonces ( $W > w$ ) y la población crecerá. Mientras la acumulación de capital continúe, la población crecerá indefinidamente. Pero veamos entonces cuál es el límite de la acumulación del capital.

Para Smith la acumulación del capital es una función de la diferencia entre la tasa de beneficio corriente ( $R$ ) y la tasa mínima ( $r$ ), así como del nivel de ingreso:

$$(dK / dt) = f(R - r, Y) \quad (7)$$

La acumulación del capital depende, por lo tanto, del comportamiento en el tiempo de  $(R - r)$ . Ahora bien, Smith pensaba que la tasa de beneficio corriente tendería a disminuir debido a la competencia entre los capitalistas, por lo que se llegaría a una situación en la cual  $(R = r)$  y la acumulación del capital se detendría. Ello conllevaría que la demanda de trabajo dejaría de crecer, resultando que  $(W = w)$  y el crecimiento de la población sería igual a cero. Esta situación es la que se conoce como estado estacionario, y era compatible (dependiendo de las condiciones iniciales del modelo) con un mundo finito en el que los recursos naturales representan un límite físico al crecimiento del producto.

## 1.2 Los límites del crecimiento en David Ricardo

De acuerdo con Aldeman (1978: 56–74), Ricardo utiliza básicamente la misma función de producción de Smith descrita por la ecuación (1), pero introduce la consideración de que para aumentar la producción de alimentos con una dotación dada de tierras (margen intensivo), se requiere de la aplicación de cantidades de trabajo crecientes. Este es el postulado medular de la teoría ricardiana del crecimiento, pues de él se derivan los resultados a largo plazo del modelo. Ricardo también plantea otros enunciados que lo diferencian de Smith, como es la noción de un salario de subsistencia determinado históricamente, la existencia de una tasa de crecimiento demográfico máxima determinada biológicamente y la participación de la masa de salarios en el producto como una de las variables independientes en la función que describe la acumulación del capital.

La primera consideración no influye de manera esencial en el resultado a largo plazo del modelo. La segunda es relevante para el análisis de la sustentabilidad puesto que se relaciona con la capacidad del ecosistema para soportar una tasa de crecimiento demográfico determinada, con lo cual se introduce la primera limitación ambiental al crecimiento económico. La consideración tercera es el resultado de los rendimientos decrecientes de la aplicación de unidades adicionales de trabajo a una superficie dada de tierra (margen intensivo) y explica la tendencia decreciente de la tasa de ganancia en Ricardo. En este esquema la acumulación de capital es también la causa primordial del crecimiento del producto.

Veamos cómo explica Ricardo el crecimiento de la población. Al igual que Smith, para Ricardo el crecimiento de la población se debe a la diferencia entre el salario de subsistencia y el salario corriente:

$$(dL_s / dt) = q(W - w(t)) \leq Q(t) \quad (8)$$

donde  $w(t)$  es un salario de subsistencia históricamente determinado y  $Q(t)$  es la tasa máxima de crecimiento demográfico biológicamente posible. El salario de subsistencia depende, a su vez, de los rendimientos agrícolas y de las condiciones socioculturales:

$$w(t) = w(\sigma f / \sigma N), U] \quad (9)$$

El salario corriente es una función de la oferta y la demanda de trabajo:

$$W = w(L_d / L_s) \quad (10)$$

y la demanda de trabajo, al igual que en Adam Smith, está determinada por la acumulación de capital:

$$(dL_d / dt) = q(dK / dt) \quad (11)$$

Como puede observarse, el resultado es el mismo que en el enfoque de Smith, mientras  $W > w(t)$  la tasa de crecimiento demográfico será positiva. Nuevamente es necesario dilucidar los determinantes de la acumulación de capital para definir el resultado del modelo a largo plazo. A diferencia de Smith, Ricardo enuncia la siguiente función para explicar la acumulación del capital:

$$(dK / dt) = f(R - r, Y - wL) \quad (12)$$

Aquí la acumulación depende del diferencial entre la tasa de ganancia corriente y la tasa mínima, pero también de la participación de los salarios en el producto nacional. Como se sabe, Ricardo (1817: 26 y 36) definió la tasa de ganancia corriente como el residuo que queda después de pagar los salarios en una tierra que no paga renta. Con ello la tasa de ganancia queda unida con los rendimientos agrícolas y al igual que éstos, muestra una tendencia decreciente. Al disminuir los rendimientos agrícolas por unidad adicional de trabajo, la participación de los salarios en el producto se incrementa,  $R$  disminuye hasta igualarse con  $r$  y la acumulación de capital se detiene. Como consecuencia el crecimiento de la demanda de

trabajo también se iguala a cero y la población permanece constante. El enfoque de Ricardo conduce al estado estacionario al igual que Adam Smith pero por caminos diferentes, en el segundo es la competencia entre los capitalistas lo que hace disminuir la tasa de ganancia y en el primero las limitaciones impuestas por la dotación de recursos naturales frenan la acumulación adecuando el tamaño de la economía a la capacidad de carga de la tierra. Mientras que el modelo de Smith puede ser o no sustentable dependiendo de las condiciones iniciales, el de Ricardo se ajusta plenamente a las condiciones de sustentabilidad al introducir un límite a la explotación del recurso natural más importante: la tierra.

La necesidad del estado estacionario en ambos autores y la posibilidad de sustentabilidad en el modelo de Smith, así como la necesidad de la sustentabilidad en Ricardo, se debe claramente a una función de población que asocia el crecimiento demográfico a la acumulación del capital a través del salario, ya que de esta manera al detenerse la acumulación cesa también el crecimiento de la población. Esta asociación, por otra parte, fue desmentida por la evidencia empírica, ya que lejos de arribar al estado estacionario la economía mundial ha mostrado un crecimiento sostenido en el largo plazo. Finalmente, tanto Smith como Ricardo subestimaron el papel del cambio tecnológico en el proceso de crecimiento económico, así como en la expansión de la frontera de sustentabilidad. La presencia de un cambio tecnológico exógeno y creciente elimina el destino fatal del estado estacionario incluso suponiendo una tasa de crecimiento demográfico constante, como sería demostrado a mediados del siglo XX.

### 1.3 El crecimiento ilimitado de Robert Solow

Después de un prolongado periodo de haber sido relegada, la discusión sobre el crecimiento económico pasa nuevamente al primer plano con la obra de Robert Solow (1956), quien intenta proporcionar una explicación del papel de la acumulación del capital en el crecimiento del ingreso, así como dilucidar las causas de las grandes diferencias en las tasas históricas de crecimiento del ingreso per cápita de distintos países.

En la versión simplificada del modelo de Solow expuesta por Jones (1974: 91-96) se parte de los supuestos neoclásicos tradicionales y de la identidad keynesiana sin gobierno y sector externo expresada por:

$$Y \equiv C + I \tag{13}$$

dividiendo entre la población  $L$  se obtiene:

$$(Y / L) = (C / L) + (I / L) \quad (14)$$

Por otro lado  $(Y / L)$ , el producto per cápita, puede expresarse como el resultado de una función de producción per cápita:  $f(k) = y$ ; donde  $k = (K / L)$ , e  $y = (Y / L)$ . Por lo tanto:

$$f(k) = (C / L) + (I / L) \quad (15)$$

A su vez se sabe que la tasa de crecimiento de  $k$  puede definirse como:

$$(\dot{k} / k) = (\dot{K} / K) - (\dot{L} / L) \quad (16)$$

El último término de la ecuación  $(\dot{L} / L)$  representa la tasa de crecimiento porcentual de la población, que se supone constante y exógena  $(\dot{L} / L) = n$ . De tal manera que (16) se convierte en:

$$(\dot{k} / k) = (\dot{K} / K) - n \quad (17)$$

despejando  $\dot{k}$ :

$$\dot{k} = (\dot{K} / L) - n k \quad (18)$$

reordenando:

$$(\dot{K} / L) = \dot{k} + n k \quad (19)$$

Como el modelo supone que todo lo que se ahorra se invierte, entonces  $(\dot{K} / L) = (I / L)$ ; sustituyendo 19 en 15 se obtiene:

$$f(k) = (C / L) + \dot{k} + n k \quad (20)$$

despejando  $\dot{k}$

$$\dot{k} = f(k) - (C / L) - n k \quad (21)$$

como  $f(k) = (Y / L)$ , entonces:

$$\dot{k} = (Y / L) - (C / L) - n k \quad (22)$$

Ahora bien,  $(Y/L) - (C/L) = (S/L)$ ; y a su vez  $S = s Y$ ; por lo que  $(S/L) = s (Y/L)$ ; y  $(Y/L) = f(k)$ . Por lo tanto:

$$\dot{k} = s f(k) - n k \quad (23)$$

Esta ecuación indica que para incrementar el ingreso per cápita la acumulación de capital debe crecer a tasas superiores a las de la población (bajo el supuesto de que no hay depreciación), a fin de elevar la razón capital trabajo. Pero la utilización de una función Cobb-Douglas de coeficientes variables permite ajustes continuos de la razón capital trabajo, de tal manera que, a largo plazo, el acervo de capital crece a la misma tasa que la población, manteniendo la razón capital trabajo y el ingreso per cápita constantes.

En el modelo de Solow la población y el acervo de capital continúan creciendo indefinidamente sin ningún límite físico impuesto por la dotación de recursos naturales. La única manera de que esto sea posible, es asumir sustituibilidad perfecta entre los recursos naturales y el capital físico gracias al cambio tecnológico exógeno, con lo cual el sistema evita llegar al estado estacionario o al colapso.

En este punto es necesario hacer una aclaración de suma importancia. En la versión del modelo de Solow expuesta por Sala-i-Martin (1994: 22-25), se denomina al punto de equilibrio de largo plazo como estado estacionario porque el ingreso per cápita y la razón capital trabajo permanecen constantes. Sin embargo, esta definición no coincide con la utilizada por los clásicos, para los cuales el estado estacionario equivalía al cese de la acumulación de capital y del crecimiento demográfico, lo cual no ocurre en el modelo de Solow. Es decir, en palabras del propio Jones (1975: 93), la “profundización del capital” se detiene pero la “ampliación del capital” continua. Ello es tanto más consecuente con la visión de Solow, puesto que su creencia en la posibilidad de sustituir ilimitadamente recursos naturales por capital físico lo llevó a afirmar que “el mundo puede, en efecto, continuar sin recursos naturales, por lo que el agotamiento es sólo un incidente, no una catástrofe” (Solow: 1974). Si bien esta frase simplifica de manera extrema su propio argumento, permite resaltar el papel de los recursos naturales en la escuela neoclásica del crecimiento y evidencia la razón por la que en este modelo no se llega a un estado estacionario.

Es conveniente analizar con mayor detalle el planteamiento de la sustitución perfecta entre recursos naturales y capital físico, pues ello clarifica en gran medida el papel de mercado y la tecnología en la determinación de la tasa de explotación de los recursos naturales.

Solow propone que el mecanismo del mercado propicia la extracción de recursos naturales no renovables de fuentes a bajo costo y que el precio del mercado deberá incrementarse a una tasa igual a la tasa de interés compuesto para que el productor decida extraer el recurso en lugar de esperar mejores precios en el futuro. Conforme el yacimiento se agota el precio se incrementa exponencialmente hasta hacer rentable la explotación de otras fuentes a mayores costos de extracción. Adicionalmente se incorpora la existencia de una tecnología capaz de sustituir el recurso no renovable por una fuente que sí lo sea pero a muy altos costos. Esta tecnología se denomina *backstop technology*, que será traducida como “tecnología de límite”. Tal tecnología entrará en funcionamiento tan pronto como los precios del recurso no renovable alcancen un nivel suficientemente alto para hacerla rentable. De hecho dicha tecnología fija un techo al incremento del precio del recurso no renovable y los avances experimentales en ese campo afectarán los precios corrientes del recurso de manera instantánea.

El argumento de Solow descansa, fundamentalmente, en la existencia de una tecnología que permita sustituir el recurso no renovable y el mercado se encargará del resto. Finalmente el problema se reduce al valor de la elasticidad de sustitución de los recursos renovables por los no renovables. De acuerdo con Solow, “si la elasticidad de sustitución entre los recursos no renovables y otro tipo de insumos es mayor a la unidad; y si la elasticidad del producto con respecto al capital manufacturado excede la elasticidad del producto con respecto a los recursos naturales, entonces una población constante podría mantener un nivel de consumo constante indefinidamente”.<sup>1</sup> En otras palabras, pequeños incrementos en el precio de los recursos no renovables ocasionarían su sustitución por otros materiales en cantidades más que proporcionales y los incrementos en el producto nacional se lograrían principalmente con base en aumentos en el uso de capital manufacturado y no con una mayor utilización de recursos naturales.

Como puede observarse, Solow no argumenta que el mercado necesariamente resolverá el problema del agotamiento de los recursos no renovables, sino que simplemente apunta hacia las condiciones necesarias para que ello suceda. Entre estas condiciones, además de las ya señaladas, se encuentra la existencia de una tasa de descuento de mercado que se iguale con la tasa óptima a la que la sociedad está dispuesta a descontar el bienestar de las generaciones futuras y el funcionamiento de un mercado de futuros a muy largo plazo con información perfecta. No obstante, en otro ensayo más reciente (1991), Solow se pronuncia a favor de sustituir recursos naturales con capital manufacturado siempre que ello sea posible y a

<sup>1</sup> Solow (1974: 174).

condición de que se mantenga el flujo de dividendos constante. Así Solow concluye que “lo que estamos obligados a legar a las generaciones futuras es la capacidad de generar bienestar, no un producto o un recurso natural en particular”,<sup>2</sup> con lo cual sienta las bases del concepto de “sustentabilidad débil” que será detallado más adelante.

## 2. El problema de la sustentabilidad

La visión presentada anteriormente no carece de fundamento histórico. Después de todo, la historia de la industrialización es la historia de la capacidad de nuestra civilización para sustituir un recurso natural por otro mediante el avance tecnológico. En las primeras fases de la revolución industrial, el combustible principal era el carbón vegetal, el cual se utilizaba tanto en la producción de hierro como de otras manufacturas intensivas en energía, como el vidrio o la cerámica. El crecimiento sostenido de la producción industrial en Inglaterra durante el siglo XVIII rebasó la capacidad de los bosques para proporcionar la materia prima del carbón vegetal, con lo cual su precio comenzó a incrementarse de manera continua a partir de 1750 (Cameron, 1989). Ello impulsó la innovación tecnológica de tal manera que se hizo posible sustituir el carbón vegetal con carbón mineral mediante el proceso de coquización y nuevos métodos en la producción de hierro. Pero aún quedaba un problema por resolver, conforme la demanda de coque crecía, se hizo necesario extraerlo a mayores profundidades. Así, la inundación de las minas se convirtió en el principal obstáculo a la producción de hierro. Nuevamente la innovación tecnológica resolvió el problema al inventarse la primera bomba de agua a vapor en 1712. Sin embargo esta bomba era insegura y requería grandes cantidades de energía para funcionar. No fue sino hasta 1769, cuando James Watt perfeccionó la máquina de vapor de Newcomen, que el bombeo del agua de las minas se volvió una operación rutinaria. A partir de entonces el avance tecnológico ha multiplicado las fuentes de energía disponibles para la humanidad en varias ocasiones. La posibilidad de utilizar petróleo y sus derivados tanto en la generación de electricidad como en los procesos manufactureros y el transporte a menor costo que el coque, relegó al carbón mineral aún antes de que se presentaran los primeros signos de escasez. Actualmente existe la posibilidad de licuar el carbón mineral para sustituir al petróleo, con lo que nuestras reservas energéticas continúan incrementándose. Esto, aunado a la eficiencia energética creciente de los procesos industriales y de transporte, parece demostrar la validez del argumento de Solow.

<sup>2</sup> Solow (1991: 182).

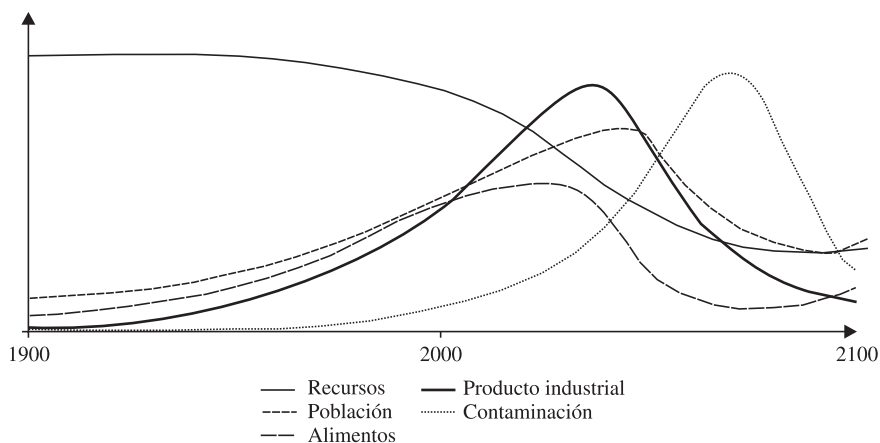
A pesar de ello, es importante señalar que en el ejemplo presentado se sustituye un recurso natural por otro, y no por un material manufacturado en su totalidad. Esto implica que siempre será necesario disponer de un acervo adicional de recursos naturales para poder sustituir los que se agotan. Si el acervo es lo suficientemente grande como para eliminar consideraciones de largo plazo, entonces el crecimiento sin límites es una proposición razonable, pero aún estamos lejos de encontrarnos en una situación como esa. Por otro lado, el mismo Solow reconoce que es necesaria una población constante para que la sustitución de recursos naturales por capital manufacturado sea exitosa. Además, no sólo se trata del agotamiento de los recursos, sino de la descarga de contaminantes al ecosistema, lo cual impone otro límite a las posibilidades del crecimiento.

La propuesta del Club de Roma, que posteriormente se transformaría en el paradigma de la sustentabilidad, constituye una respuesta a la evidencia empírica de que los recursos naturales no son perfectamente sustituibles por el capital físico y conlleva un replanteamiento de las nociones establecidas sobre el crecimiento económico. En 1972 (Meadows) las predicciones apocalípticas de este grupo de científicos sistematizadas en *Los límites del crecimiento* llaman la atención hacia los límites físicos del crecimiento económico. El grupo dirigido por Meadows desarrolló una serie de estimaciones con base en un modelo denominado “World 3”. El modelo permite generar un gran número de escenarios distintos dependiendo de los supuestos iniciales. El escenario más discutido es el que se conoce como “escenario 1”, en el cual la sociedad prosigue su trayectoria histórica sin ningún cambio de política. La población continúa creciendo a las tasas esperadas y los cambios tecnológicos se desarrollan de acuerdo con la tendencia preestablecida. A medida que la economía mundial y la población continúan creciendo se aplican más insumos agrícolas para incrementar la producción de alimentos, pero la emisión de contaminantes y la demanda de recursos no renovables se incrementa también.

A principios del siglo XXI los altos niveles de contaminación comienzan a interferir con la producción de alimentos disminuyendo los rendimientos agrícolas. La producción total de alimentos comienza a caer a partir del año 2015. Paralelamente la escasez de recursos no renovables hace necesarias mayores inversiones en este sector, lo cual, aunado a las mayores inversiones necesarias para sostener la producción de alimentos, se traduce en una disminución del producto industrial. La menor producción industrial afecta a su vez a la agricultura, con lo cual la escasez de alimentos se agrava. La falta de servicios sanitarios y alimentos tiene como consecuencia una drástica disminución de la población a mediados del siglo XXI. Existen otras variantes en las que se alteran los supuestos iniciales y se obtienen resultados distintos pero el argumento central continúa siendo el mismo: de no

adoptarse medidas tendientes a reducir de manera significativa el crecimiento de la población, la extracción de recursos naturales y la emisión de contaminantes la economía mundial se encamina hacia el colapso. Veinte años después, el Club de Roma actualizó sus puntos de vista en un segundo volumen titulado *Más allá de los límites del crecimiento* (Meadows, et al, 1991). Aunque esta nueva versión incorpora matices como los cambios tecnológicos y la disminución de la tasa de crecimiento demográfico sus conclusiones esenciales se mantienen sin variación. Si bien el Club de Roma se deslinda de la tesis del “crecimiento cero” al enunciar que la sociedad humana podría continuar creciendo de acuerdo con objetivos sociales, su posición es inequívoca en cuanto al crecimiento físico del sistema, el cual en este enfoque, debe detenerse si se quiere evitar la catástrofe.

**Figura 1**  
**Escenario de colapso ambiental**  
**si se mantienen las tendencias actuales**



Fuente: tomado de Meadows (1991).

La noción de que el crecimiento del producto tiene lugar en un mundo finito comienza a tomar forma y es sistematizada sobre la base de los conceptos de sustentabilidad y capital natural. La concepción de la base de recursos naturales y servicios ambientales proporcionados por el ecosistema como un acervo que proporciona un flujo de servicios ha permitido vincular el concepto de sustentabilidad

con el de acumulación de capital, ya que tanto el capital natural (KN) como el capital físico o capital manufacturado (KM) rinden un ingreso que se define como “la cantidad máxima que una comunidad puede consumir en un periodo dado y continuar en posibilidad de consumir la misma cantidad al final del periodo” (Hicks, 1946). Ello significa que el acervo de capital disponible debe rendir el mismo flujo de ingreso al año siguiente. En otras palabras, el acervo de capital debe permanecer constante (Daly, 1994).

De esta manera la sustentabilidad se define como el nivel de consumo que permite mantener el mismo flujo de ingreso a lo largo del tiempo. Así mismo se postula que el incremento del capital manufacturado se realiza a costa de una disminución del capital natural, por lo cual existe un costo de oportunidad entre los servicios obtenidos del incremento del acervo de capital y los servicios perdidos por la disminución del acervo del capital natural. Este costo de oportunidad puede expresarse como una razón de eficiencia:

$$(KM \text{ servicios obtenidos}) / (KN \text{ servicios sacrificados}).$$

Debe notarse que el supuesto de sustituibilidad conduce a distintas definiciones de sustentabilidad. Si se supone sustituibilidad perfecta entre el capital natural y el capital manufacturado, basta con asegurar que los servicios obtenidos de la ampliación del capital manufacturado iguallen a los servicios sacrificados por la disminución del capital natural para alcanzar la sustentabilidad. Esto es lo que se conoce como sustentabilidad débil o al estilo de Solow (Turner, 1994). El criterio que abandona el supuesto de sustituibilidad para incorporar el de complementariedad requiere que el acervo de capital natural permanezca constante independientemente de los incrementos en el acervo de capital manufacturado. Este principio se conoce como sustentabilidad fuerte.

Existen otras definiciones de sustentabilidad asociadas a la capacidad de asimilación de contaminantes por parte del ecosistema y a la capacidad de renovación de los recursos naturales. Desde esta perspectiva el desarrollo sustentable se entiende como el crecimiento económico cuya generación de desechos contaminantes no rebasa la capacidad de asimilación del ecosistema y la extracción de recursos no sobrepasa su capacidad de renovación. En este sentido, la sustentabilidad implica, al menos en términos físicos, un estado estacionario.

A partir de estos elementos se visualiza una política que busca “maximizar los beneficios netos del desarrollo económico sujeto al mantenimiento de los servicios y calidad de los recursos naturales a lo largo del tiempo” (Barbier y Markandya, 1993).

## 2.1 Las condiciones económicas óptimas del desarrollo sustentable

Sobre estos elementos Barbier y Markandya (1993) diseñaron un modelo que intenta identificar la ruta de crecimiento óptimo para una economía sujeta a tres restricciones biofísicas a largo plazo:

- 1) Extracción de recursos naturales por debajo de sus tasas de regeneración.
- 2) Extracción de recursos no renovables a tasas que permitan sustituirlos por recursos renovables.
- 3) Emisión de desechos en cantidades que no rebasen la capacidad asimilativa del ambiente.

Con estas restricciones se construye una función de degradación ambiental  $\dot{S}$  cuyas variables independientes son:

W = flujo de desechos generados.

A = capacidad de asimilación del ecosistema.

R = flujo de recursos naturales extraídos.

G = capacidad regenerativa de los recursos naturales.

E = flujo de recursos no renovables extraídos.

Matemáticamente, la función se expresa como:

$$\dot{S} = f([W - A], [(R - G) + E]) \quad (24)$$

Esta función es creciente con respecto a sus argumentos, es decir, la degradación ambiental aumenta conforme crece la cantidad de desechos netos generados. La condición para una degradación ambiental igual a cero es por lo tanto  $W = A$  y  $(R + E) = G$ . La extracción de recursos naturales y la generación de desechos son a su vez funciones del consumo (C):

$$W = W(C) \quad R = R(C) \quad E = E(C)$$

Las primeras y segundas derivadas de estas funciones son mayores que cero, lo que implica que un aumento en el consumo genera impactos ambientales crecientes. La capacidad de asimilación y regeneración son funciones del acervo de capital natural disponible (X):

$$A = A(X) \quad G = G(X)$$

Las primeras derivadas de estas funciones son positivas, las segundas, negativas lo que significa que la capacidad de asimilación y regeneración del ecosistema crece de manera decreciente ante incrementos en el acervo de capital natural. Además se introduce un nivel mínimo de acervo de capital natural que garantiza una actividad económica sustentable ( $\underline{X}$ ). Sustituyendo en (24):

$$\dot{S} = h(C, X), \text{ para } X \geq \underline{X} \quad (25)$$

y

$$\dot{S} > 0 \text{ para } X < \underline{X} \quad (26)$$

Finalmente se establece una conexión entre la tasa de cambio de la degradación ambiental  $\dot{S}$  y la tasa de cambio del acervo de capital natural  $\dot{X}$ :

$$\dot{X} = -a S \quad (27)$$

por lo tanto:

$$\dot{X} = -a h(C, X) \text{ para } X \geq \underline{X} \quad (28)$$

y

$$\dot{X} < 0 \text{ para } X < \underline{X} \quad (29)$$

Donde:  $a$  es una constante.

Con estos elementos es posible explorar las condiciones para el crecimiento ambientalmente sustentable partiendo de una función de utilidad como la siguiente:

$$U = (C, X) \quad (30)$$

En esta función existe un costo de oportunidad entre el nivel de consumo y la calidad ambiental. En el equilibrio de largo plazo la utilidad de una unidad de consumo sacrificada hoy debería ser igual al valor presente descontado del mayor nivel de consumo y la mejor calidad ambiental heredadas a las generaciones futuras. Dada una tasa positiva de preferencia en el tiempo  $r$ , el problema consiste en maximizar

$$e^{-rt} U(C, X) dt \quad (31)$$

sujeto a:

$$\dot{X} = -a h(C, X) \quad (32)$$

En este caso la variable de estado es el acervo ambiental  $X$  mientras que la variable de control es el consumo  $C$ , la cual es manipulada por el planificador a fin de maximizar su valor sujeto a la restricción dinámica impuesta por  $X$ .

Planteando el Hamiltoniano:

$$H = e^{-rt} \{U(C, X) + P [-a h(C, X)]\} \quad (33)$$

Tomando la derivada del Hamiltoniano con respecto a la variable de control e igualando a cero:

$$dH/dC = U_c - P a h_c = 0 \quad (34)$$

o bien,

$$P = U_c / a h_c > 0 \quad (35)$$

Tomando la derivada del Hamiltoniano con respecto a las variables de estado:

$$dH/dX = U_x - P a h_x \quad (36)$$

e igualando con el negativo de la derivada del multiplicador con respecto al tiempo:

$$\dot{P} - rP = -dH/dX = -U_x + P a h_x \quad (37)$$

$$\dot{P} = [r + a h_x] P - U_x \quad (38)$$

$P(t)$  representa el precio que la sociedad debe pagar por un nivel determinado de calidad ambiental. El comportamiento del sistema desde cualquier punto inicial está dado por las ecuaciones (37) y (38) planteadas como sigue:

$$\dot{P} = 0 \text{ si } [r + a h_x] P = U_x \quad (39)$$

$$\dot{X} = 0 \text{ si } h(C, X) = 0 \quad (40)$$

Ello implica que existe una tasa de descuento y un precio sombra de la calidad ambiental que igualan los incrementos obtenidos en la utilidad provenientes de los incrementos en el acervo ambiental. Por otro lado, existe un nivel de consumo compatible con un acervo ambiental que permite mantener dicho acervo constante. El sistema alcanza el equilibrio cuando  $\dot{P} = 0$  y  $\dot{X} = 0$ . No obstante, como indica la ecuación (27), mientras exista una degradación ambiental neta positiva, el acervo de recursos naturales tenderá a disminuir. Las ecuaciones (28) y (29) indican que existe un límite mínimo aceptable de calidad ambiental. O sea que la condición mínima para un crecimiento económico sostenible a largo plazo es, de acuerdo con la ecuación (24):

$$W = A; R + E = G \text{ con lo cual } \dot{S} = 0$$

En este modelo la elección de una ruta de crecimiento sostenible depende de las condiciones iniciales del nivel de calidad ambiental y la tasa de descuento. La combinación de un bajo nivel de calidad ambiental y una tasa de descuento demasiado alta dará por resultado una tasa de crecimiento no sustentable, pues un nivel bajo de calidad ambiental presiona a los usuarios de los recursos naturales a descontar el futuro a tasas muy altas y los incrementos en la función de utilidad obtenidos por incrementos en el acervo ambiental serán menores que el costo social que ello implica:  $U_x < \dot{X}$ . Cuando esto ocurre, la decisión óptima será permitir reducciones en el acervo ambiental hasta que  $U_x = \dot{X}$ ; o lo que es lo mismo,  $\dot{P} = \dot{X} = 0$ . Pero dependiendo de la forma específica de ambas funciones, este equilibrio podría ocurrir en niveles inferiores al acervo mínimo ambiental  $\underline{X}$ , con lo que la sociedad se dirigirá hacia un colapso ecológico asegurado.

Por el contrario, cuando  $U_x > \dot{X}$ , la decisión racional es permitir que los incrementos en el acervo ambiental continúen hasta que la utilidad proporcionada por dichos incrementos iguale a los costos en términos del sacrificio en el consumo requerido, con lo cual la economía se encontraría en una ruta de crecimiento sustentable.

Por otro lado puede observarse que el modelo no llega a un estado estacionario. Siempre y cuando el nivel de consumo no presione la calidad ambiental por debajo del nivel de sustentabilidad, la economía puede seguir creciendo indefinidamente. En este sentido el modelo no parece ajustarse al postulado de la existencia de un mundo finito. Pero sí considera la posibilidad de un colapso una vez que la degradación ambiental ha rebasado cierto límite crítico. El crecimiento demográfico, por su parte, no aparece como un problema relevante.

## Conclusiones

El problema de las repercusiones del crecimiento económico sobre el medio ambiente, así como las limitaciones que el segundo impone al primero no ha sido agotado, pues falta definir relaciones entre todas las variables involucradas. Al plantear la inevitabilidad de un estado estacionario los clásicos nos legaron elementos susceptibles de ser rescatados para la formulación de las condiciones de sustentabilidad en un modelo formal, pero las funciones de crecimiento demográfico que utilizaban no describen el comportamiento real de la población, lo cual sin duda constituye su limitación más evidente. Ricardo introduce la noción de un límite biofísico al proceso de crecimiento pero de no utilizar una función de población que asocia el crecimiento demográfico con los salarios, el crecimiento económico desembocaría en el colapso ambiental y no en un estado estacionario.

El esquema neoclásico ignoró por completo la restricción de los recursos naturales, pero dejó la puerta abierta para incorporar el capital natural al modelo a partir de la depreciación. El argumento de Solow sobre la sustitución perfecta entre capital natural y capital manufacturado no debe ser tomado a la ligera, pues si bien la sustitución perfecta no existe, si hay cierto grado de sustituibilidad entre ambos y el mecanismo de precios puede contribuir al desarrollo de nuevas tecnologías o a disminuir la tasa de explotación cuando no se cuente con sustitutos cercanos.

El modelo de Barbier y Markandya muestra la posibilidad de alcanzar una tasa de crecimiento compatible con la capacidad de renovación de los recursos naturales y la tasa de asimilación del ecosistema y explica las causas que pueden llevar a una economía a elegir tasas de crecimiento no sostenibles. Este modelo, sin embargo, no permite analizar el papel del crecimiento demográfico en el proceso y, aparentemente, incluye la posibilidad de un crecimiento ilimitado, lo cual deja ciertas dudas a cerca de su coherencia con los postulados más generales de sustentabilidad.

Por último, observamos oportunidades para desarrollar planteamientos que clarifiquen la relación entre capital natural y capital manufacturado en modelos de crecimiento sujetos a restricciones biofísicas.

## Referencias bibliográficas

- Aldeman, I. (1978). *Teorías del desarrollo económico*, México: FCE.
- Barbier, Edward y Anil Markandya (1993). "Environmentally sustainable development: optimal economic conditions" in *Economics and ecology*, Edward Barbier, Londres: Chapman & Hall.

- Cameron, Rondo (1989). *A concise economic history of the world*, Oxford: Oxford University Press.
- Daly, Herman (1994). "Operationalizing sustainable development by investing in natural capital" in *Investing in natural capital*, Jansson, Ann *et al.* Washington: Island.
- Daly, Herman (1991). "Institutions for a steady-state economy" in *Steady-State economics*. Washington: Island.
- Hicks, J.R. (1946). *Valor y capital*, México: FCE.
- Jevons, W. Stanley (1865). *The coal question*. Londres: Macmillan.
- Jones, Hywel (1974). *Introducción a las teorías modernas del crecimiento económico*, Barcelona: Antoni Bosch.
- Meadows, Donella *et al.* (1972). *Los límites del crecimiento*, Nueva York: Universe.
- Meadows, Donella *et al.* (1991). *Más allá de los límites del crecimiento*, México: El País-Águilar.
- Ricardo, David (1817). *On the principles of political economy and taxation*, Londres: Murray.
- Sala-i-Martin, Xavier (1994). *Apuntes de crecimiento económico*, Barcelona: Antonio Bosch.
- Solow, Robert (1956). "A contribution to the theory of economic growth" in *Quarterly Journal of Economics*, 70, 1, 65-94.
- Solow, Robert (1974). "The economics of resources or the resources of economics" in *American Economic Review*, vol. 64, núm. 2, pp. 1-14.
- Solow, Robert (1991). "Sustainability: an economist perspective", in Dorfman, Robert y Nancy Dorfman (1993), *Economics of the environment*, New York: Norton.
- Turner, R.K. (1994). "Sea Level Rise and Coastal Wetlands in the U.K." in *Investing in natural capital*. Jansson, Ann, *et al*, Washington: Island.
- WCED (Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo) (1987). *Nuestro futuro Común*, Oxford University Press.