CRECIMIENTO Y COMERCIO NORTE-SUR: TRANSFERENCIA TECNOLOGICA *VERSUS* MEJORA DE LOS ECOSISTEMAS

Francisco José Cabo García*
Elena Escudero Puebla*
Guiomar Martín-Herrán*

Este trabajo investiga la relación entre biodiversidad y crecimiento económico en un modelo de comercio Norte-Sur. El modelo plantea dos escenarios diferentes con relación a un proceso de transferencia de capital del Norte al Sur. En el primer escenario, estas transferencias de capital dan lugar a mejoras tecnológicas que permiten incrementar la eficiencia del proceso productivo del Sur; mientras que, en el segundo escenario, dichas transferencias se dedican a aumentar las capacidades máximas de las diversas especies que puede sostener el ecosistema del Sur. Utilizando la teoría de juegos diferenciales se prueba la existencia y la optimalidad de trayectorias que implican crecimiento económico sostenido respetuoso con la biodiversidad.

Palabras clave: *ecosistemas, crecimiento económico, comercio internacional, comercio Norte-Sur, desarrollo sostenible, transferencia de capitales.*

Clasificación JEL: *C73, F43, Q20.*

1. Introducción

El objetivo de este artículo es contribuir a la literatura reciente que investiga los nexos entre comercio internacional, biodiversidad y crecimiento económico.

Plantear los problemas medioambientales en términos de las externalidades negativas de carácter ocasional, tal y como sigue haciendo la economía convencional de sistema cerrado, constituye un serio error puesto que, en lugar de comportamientos ocasionales, lo que existe son interdependencias físicas e inevitables entre las actividades humanas y la naturaleza, que nos llevan a ver los residuos generados como algo inherente a los procesos de producción y consumo (Ayres y Kneese, 1969), a la vez que el medio ambiente no puede considerarse como una mercancía divisible y parcelable, sino como un sistema complejo, dinámico, sinérgico e incierto.

Desde que la Comisión Brundtland definió en 1987 el término de «desarrollo sostenible» sobre la base de igualdad intrageneracional e intergeneracional, se ha llevado a cabo un amplio proceso de investigación. Autores como Solow (1993) han señalado que no tendría sentido interpretar el desarrollo sostenible como

* Universidad de Valladolid.
Esta investigación ha sido subvencionada parcialmente por el proyecto de la Junta de Castilla y León VA12/99.

el requisito de dejar los recursos disponibles en su situación inicial. Otros autores, como Pearce *et al.* (1990), han mantenido que, aunque cierta sustitución es posible, sin embargo cada generación debería dejar intacto el *stock* total de «capital natural».

El capital natural se define como las disponibilidades de recursos naturales o activos medioambientales tales como océanos, bosques o tierra cultivable, que produce un flujo de bienes susceptibles de ser utilizados ahora y en el futuro. El principio de sostenibilidad fuerte establece que el capital natural debe ser tratado como una categoría distinta del capital construido por el hombre, debido a las posibilidades de sustitución imperfectas; sin embargo, la existencia de un posible intercambio entre ambos tipos de capital nos obliga a definir la riqueza de una forma comprensiva, reconociendo cierta sustituibilidad entre bienes manufacturados y precauciones medioambientales. De este modo, el desarrollo sostenible es, como señalan Agnion y Howitt (1998), «desarrollo que tiene en cuenta, no sólo la riqueza de las generaciones actuales, sino también la de las generaciones futuras, donde la riqueza se define de una forma comprensiva, donde se tienen en cuenta todas las posibilidades de sustitución tecnológica entre diferentes tipos de capital y donde también se tienen en cuenta todas las restricciones impuestas por el carácter finito de los recursos y los costes medioambientales de producción y consumo». En la práctica, esta definición, se ha traducido en que en una sociedad que se desarrolla se deben alcanzar simultáneamente objetivos económicos y ambientales, tanto para el presente como para futuras generaciones. Como resultado, se plantean ahora una diversidad de objetivos asociados a un desarrollo medioambientalmente sostenible. Los objetivos económicos consideran la necesidad de crecimiento económico, mayor equidad y eficiencia. Se supera así la sola noción de crecimiento económico. Los objetivos ambientales incluyen el preocuparse por la integridad de los sistemas, la biodiversidad, la capacidad de asimilación y los temas globales. La conservación del medio ambiente se convirtió en tema esencial en la Conferencia sobre Medio Ambiente y Desarrollo que tuvo lugar en Río en 1992. Actualmente, una línea de investigación fundamental en el análisis económico tiene como preocupación el crecimiento y la conservación de la diversidad biológica.

La literatura ha señalado el contraste entre los modelos de producción en los países menos desarrollados, intensivos en recursos naturales, y los países desarrollados, intensivos en capital. Las relaciones comerciales conectan, en un mundo de comunicación rápida y relativamente barata, los países desarrollados y los países en vías de desarrollo. Un país puede aumentar su productividad total invirtiendo en investigación y desarrollo, pero los países pueden también aumentar ésta comerciando con otros países que tienen amplios *stocks* de conocimiento debido a sus amplias actividades de I+D; la expansión comercial puede permitir el acceso a tecnología extranjera más avanzada y, por tanto, contribuir al crecimiento en países en vías de desarrollo, tal y como señalan Coe y Helpman (1995). Este resultado se demuestra en Bayoumi, Coe y Helpman (1999), usando un modelo econométrico MULTIMOD desarrollado por el Fondo Monetario Internacional, que implica transmisión del conocimiento entre países industriales y de los países industriales a los países en desarrollo a través del comercio.

Existe una gran variedad de trabajos que analizan varios aspectos del comercio Norte-Sur. Galor (1986), planteando un juego diferencial no cooperativo, muestra la ineficiencia dinámica del comercio Norte-Sur. Chichilnisky (1993, 1994) señala que el acceso gratuito a los recursos del Sur implica sobreexplotación y polución excesiva. Brander y Taylor (1998), en un modelo de dos bienes y dos países, demuestran que las ganancias del comercio pueden no ser satisfechas por un acceso libre a los recursos, siendo beneficiosa la imposición de aranceles o impuestos para alcanzar el óptimo. En nuestro trabajo planteamos un modelo Norte-Sur, en el que ambas economías se relacionan a través del comercio, para estudiar el crecimiento económico y la conservación del medio ambiente de manera conjunta. Nos preguntamos bajo qué circunstancias el crecimiento económico está influido por la preocupación por el medio ambiente y si es posible tener simultáneamente una mejora medioambiental y un mayor crecimiento económico.

Primero planteamos un juego dinámico Norte-Sur donde es esencial la dinámica de las especies naturales. Un gran número

de aspectos medioambientales han sido tratados como juegos diferenciales: problemas de contaminación transfronteriza (Dockner y Van Long, 1993; Benchekroun y Van Long, 1988); explotación conjunta de los recursos naturales, (Benhabib y Radner, 1992; Sorger, 1988). El crecimiento económico y la biodiversidad también pueden analizarse utilizando esta técnica, distinguiendo cuando los agentes cooperan y cuando no cooperan. En Cabo y Martín-Herrán (1998), en un modelo simple con productividad constante, se analizan las soluciones *open-loop* del juego con un horizonte temporal finito; en este artículo, los resultados muestran un período de crecimiento seguido por otro de estancamiento. Estos resultados nos llevan a plantear un juego con un horizonte temporal infinito, considerando además una transferencia de parte del capital del Norte al Sur, destinada a la conservación de la biodiversidad en esta última región.

El juego dinámico que planteamos en este trabajo se basa en Galor (1986); sin embargo, este autor no considera ningún tema relacionado con el medio ambiente. El Norte utiliza un tipo de bien «natural» como input productivo. Este bien se produce en el Sur, utilizando especies naturales y trabajo como inputs productivos. Además, el Norte se preocupa de la «evolución de las especies naturales en el Sur», y por ello acepta transferir una parte de su capital al Sur para conseguir una mejor conservación de la biodiversidad y garantizar su crecimiento económico futuro. Consideramos dos posibles escenarios en relación al proceso de transferencia de capital desde el Norte al Sur, que conducen a una mejora tecnológica o a una mejora de las capacidades máximas de las especies naturales del ecosistema, y permiten la aparición de un crecimiento endógeno: la nueva tecnología puede implicar una mayor productividad, lo que supone el uso de una menor cantidad de especies naturales para producir el mismo bien intermedio «natural»; o bien, el capital transferido puede destinarse a incrementar la población máxima de cada especie que puede ser sostenida por el ecosistema. En ambos casos se produce un crecimiento sostenible, permitiendo una mejor conservación de la biodiversidad. Usando la teoría de juegos diferenciales, este artículo analiza la posibilidad y optimalidad de un crecimiento económico sostenible en un modelo de comercio Norte-Sur, considerando el efecto del crecimiento económico sobre la dinámica de los *stocks* de las especies naturales consideradas. Al contrario de lo que se podría esperar, si parte de los beneficios del Norte se usan en «una mejora medioambiental», en vez de invertir en incrementar el capital productivo, la preocupación por el medio ambiente conduce a mayores niveles de crecimiento económico.

El resto del artículo se organiza como sigue. El siguiente apartado describe las economías del Norte y el Sur, presentando dos escenarios diferentes en lo relativo al progreso tecnológico. La complejidad del sistema dinámico obtenido a partir de las condiciones necesarias de optimalidad requiere el uso de métodos numéricos (véase, por ejemplo, Judd, 1998). En el tercer apartado presentamos los resultados numéricos obtenidos en lo que respecta al crecimiento económico y a la conservación de la biodiversidad, comparando los dos escenarios de crecimiento endógeno planteados. El último apartado del trabajo recoge las conclusiones derivadas del estudio y de la comparación de los dos escenarios considerados.

2. El modelo

En este apartado planteamos un modelo de comercio Norte-Sur, basado en Galor (1986), pero teniendo en cuenta dos posibles escenarios en relación al proceso de transferencia de capital desde el Norte al Sur. En el primero, que denominamos escenario AK, consideramos que las transferencias de capital del Norte al Sur inducen una mejora tecnológica en esta última región, lo que permite producir un bien intermedio «natural» utilizando una cantidad menor de recursos naturales. En el segundo, que denominamos escenario de capacidades máximas variables, las transferencias de capital del Norte se dedican a incrementar las capacidades máximas de las dos especies naturales representativas consideradas en el ecosistema del Sur. Por capacidad máxima de una especie se entiende la población máxima a la que puede llegar una especie en un ecosistema.

El Norte

Suponemos que el Norte produce un único bien, que puede consumirse o invertirse, a través de una función de producción de coeficientes fijos:

$$y(t) = min\,[aR(t), bK(t); zL_N(t)], \qquad a > 0, b > 1, z > 0;$$

donde $y(t)$, $R(t)$, $K(t)$ y $L_N(t)$ son el output producido en t, y las cantidades de bien intermedio «natural», capital y trabajo, respectivamente.

En el Norte se considera una oferta laboral de tipo Lewis, de tal forma, que aunque la fuerza laboral del Norte es fija, $\bar{L}$, y en el instante inicial se encuentra en pleno empleo, hay una oferta ilimitada de trabajadores del Sur que están dispuestos a emigrar al Norte, a un salario real dado, $\bar{w}$, (en términos de consumo). Una vez que el Sur ha determinado el esfuerzo de extracción de cada una de las especies que utiliza en su proceso productivo, el mercado fija el precio del bien intermedio «natural», $p\,(t)$. Por lo tanto, el único factor restrictivo en el proceso de producción del Norte es el *stock* de capital, y la función de producción puede expresarse como:

$$y(t) = bK(t). \qquad [1]$$

El trabajo empleado por el Norte y la cantidad de bien intermedio «natural» importado desde el Sur son:

$$L_N(t) = bK(t)/z, \quad R(t) = bK(t)/a \qquad [2]$$

Tras pagar el trabajo y el bien intermedio «natural», el Norte eligiendo su tasa de ahorro, $s(t)$, decide la proporción de los rendimientos del capital que se dedican a consumir o a ahorrar. Esta región al menos consume $\bar{w}\bar{L}$, y su consumo viene dado por:

$$c_N(t) = [y(t) - \bar{w}L_N(t) - p(t)R(t)]\,(1 - s(t)) + \bar{w}\bar{L}, \qquad [3]$$

o, en términos del *stock* de capital, $K(t)$:

$$c_N(t) = bK(t)\,[1 - \theta - p(t)/a]\,(1 - s(t)) + \bar{w}\bar{L};\ \text{con}\ \theta = \bar{w}/z. \qquad [4]$$

El Norte está dispuesto a realizar transferencias de capital al Sur, ya que inducen crecimiento económico y beneficios medioambientales. Así, de todo lo que ahorra, una parte, $1 - d_1$, la dedica a inversión en esta región, aumentando su *stock* de capital, entendiendo que éste último incluye tanto capital físico como intelectual, mientras que otra parte, d_1, la asigna a procesos de *I+D*, que mejoran la tecnología o la capacidad de los ecosistemas en el Sur. Las siguientes ecuaciones diferenciales describen la dinámica del capital:

$$\begin{aligned} \dot{K}(t) &= K(t)\,\delta(t)\,s(t)\,(1 - d_1), \\ \dot{H}(t) &= K(t)\,\delta(t)\,s(t)\,d_1, \end{aligned} \qquad [5]$$

donde H denota la parte de capital dedicado a mejorar la tecnología del Sur, y $\delta(t) = b\,[1 - \theta - p(t)/a]$.

El Sur

Por su parte, el Sur produce el bien intermedio «natural», utilizando trabajo para extraer recursos naturales de dos especies naturales diferentes. El Sur debe decidir si utiliza sólo una o ambas especies, y el esfuerzo de extracción de cada una, $E_i\,(t)$, $i = 1, 2$, para producir el bien, $R(t)$. Este output solamente puede utilizarse como un factor en el proceso de producción del Norte. Suponemos dos escenarios diferentes para obtener $R(t)$, dependiendo del proceso tecnológico: el escenario *AK* y el escenario de capacidades máximas variables.

Escenario AK

En este escenario, la productividad del trabajo es una función de H, la cantidad de capital transferido desde el Norte. La relación es lineal y presenta rendimientos constantes a escala, $\gamma(H(t)) = \gamma H(t)$, $\gamma > 0$. Por [5], y al considerar d_1 constante, esta última función se puede reescribir en términos de $K(t)$; $\gamma(K(t)) = \alpha(d_1)\,K(t)$, donde $\alpha(d_1) = \gamma d_1 / (1 - d_1)$.

El trabajo utilizado en la extracción de las dos especies naturales,

$$L_S(t) = \beta\,[E_1(t)\,x_1(t) + E_2(t)\,x_2(t)],\ \beta > 0, \qquad [6]$$

depende positivamente de ambos esfuerzos de extracción, $E_i(t)$, y de los *stocks* de ambas especies, $x_i(t)$.

La función de producción puede expresarse como:

$$R(t) = \alpha(d_1)\,K(t)\,[E_1(t)\,x_1(t) + E_2(t)\,x_2(t)] \,/\, \Phi(x_1(t), x_2(t)), \qquad [7]$$

donde $\alpha(d_1)\,K(t) \,/\, \Phi(x_1(t), x_2(t))$ puede interpretarse como la productividad, que es uniforme entre las especies. Asumimos economías de escala y suponemos que $\Phi(x_1(t), x_2(t))$ depende negativamente de $x_i(t)$. Así, cuanto menor son los *stocks* de ambas especies, menor es la productividad.

La oferta del bien intermedio «natural» efectuada por el Sur, [7], iguala siempre la demanda del Norte, $bK(t)/a$, de donde se obtiene el esfuerzo de extracción de la especie II como una función del de la especie I:

$$\begin{aligned} E_2(t) &= f_{AK}(E_1(t), x_1(t), x_2(t)) = \\ &[b\Phi(x_1(t), x_2(t)) - E_1(t)\,x_1(t)\,a] \,/\, [\alpha(d_1)\,a x_2(t)] \end{aligned} \qquad [8]$$

Dada esta relación entre los esfuerzos, para que una no sea negativa, la otra tiene que estar por debajo de una cota superior. Estas cotas superiores vienen dadas por:

$$\begin{aligned} E^{AK}_{1\,max}(t) &= b\Phi(x_1(t), x_2(t)) \,/\, [\alpha(d_1)\,a x_1(t)], \\ E^{AK}_{2\,max}(t) &= b\Phi(x_1(t), x_2(t)) \,/\, [\alpha(d_1)\,a x_2(t)]. \end{aligned} \qquad [9]$$

El Sur exporta el bien intermedio «natural» al Norte, quien paga una cantidad $p(t)R(t)$. Las empresas del Sur reciben $p(t)R(t)$ y, por tanto, el consumo del Sur está dado por:

$$c_S(t) = p(t)\,R(t). \qquad [10]$$

Se supone competencia perfecta en el Sur, por lo que los ingresos igualan a los salarios, $p(t)R(t) = \bar{w}L_S(t)$. Así, una vez que el Sur fija el esfuerzo de extracción de la especie I, por [8] se tiene el esfuerzo de extracción de la especie II y, dados $x_1(t)$, $x_2(t)$, el mercado establece el precio:

$$p(t) = \bar{w}L_S(t) \,/\, R(t) = \bar{w}\beta\,\Phi(x_1(t), x_2(t)) \,/\, [\alpha(d_1)\,K(t)]. \qquad [11]$$

Este precio tiene que ser positivo y menor que aquél que permite al Norte consumir al menos su nivel de subsistencia, $\bar{w}\bar{L}$. Así, hay una cota superior para este precio, dado por aquél que iguala $\delta(t)$ a cero, $p_{max} = a\,(1-\theta)$.

Una buena elección para la función $\Phi(x_1(t), x_2(t))$, que garantiza el cumplimiento de las propiedades establecidas anteriormente, es:

$$\Phi(x_1(t), x_2(t)) = (2 - x_1(t) - x_2(t))\,a\,(1-\theta) \,/\, (2\,\bar{w}\beta). \qquad [12]$$

Es esencial la consideración de la evolución temporal de los *stocks* de ambas especies, que viene descrita por las siguientes ecuaciones diferenciales (veáse Clark, 1990), y que constituye una gran diferencia con respecto a otros trabajos:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= rx_1(t)(1 - x_1(t)) - qE_1(t)x_1(t), \\ \dot{x}_2(t) &= rx_2(t)(1 - 2x_2(t)) - qE_2(t)x_2(t). \end{aligned} \qquad [13]$$

El primer término de cada ecuación diferencial corresponde al supuesto de un modelo de crecimiento logístico para la evolución de la población del *stock* de ambas especies. La constante r denota la tasa intrínseca de crecimiento; las capacidades máximas medioambientales o niveles de saturación se suponen 1 y 1/2, para las especies I y II, respectivamente. El segundo término representa la extracción. Seguimos la hipótesis del esfuerzo por unidad extraída y suponemos que este último es proporcional al nivel de *stock:* $qE_i(t)x_i(t)$, donde $E_i(t)$ denota el esfuerzo y q es una constante, denominada el coeficiente de extracción. Se supone que la tasa intrínseca de crecimiento, r, y el coeficiente de extracción, q, son idénticos para ambas especies. Sin embargo, ya que consideramos que la capacidad máxima de la especie I es el doble que la de la especie II, la

GRAFICO 1

FUNCION LOGISTICA Y FUNCION DE EXTRACCION DE LAS ESPECIES
Escenario AK

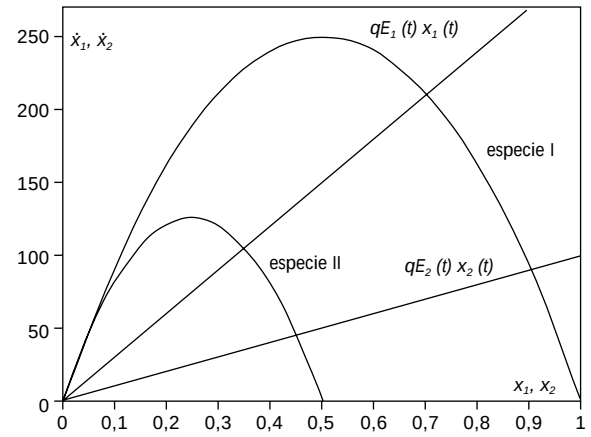
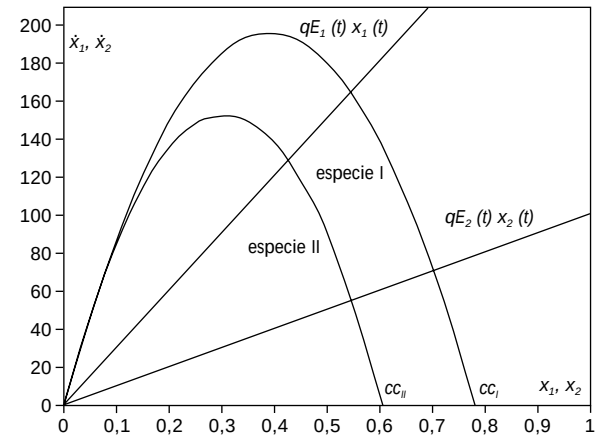


GRAFICO 2

FUNCION LOGISTICA Y FUNCION DE EXTRACCION DE LAS ESPECIES
Escenario CMV



tasa de crecimiento para I es mayor que para II, como muestra el Gráfico 1. En él se recogen la función logística para las especies I y II con capacidades máximas dadas por 1 y 1/2, respectivamente, así como la función de extracción para cada una de ellas.

Escenario de capacidades máximas variables (CMV)

En este escenario, la productividad del trabajo no es una función de *H*, la cantidad de capital transferido desde el Norte. Por el contrario, las transferencias, en este caso, afectan directamente a la capacidad máxima de ambas especies. Como $H(t)/K(t)$ es constante, las capacidades máximas para las especies I y II dependen positivamente de $K(t)$ y d_1:

$$exp\,(-1/[\alpha\,(d_1)\,K\,(t)]);\; exp\,(-2/[\alpha\,(d_1)\,K\,(t)]).$$

En este caso, la función de producción puede expresarse como:

$$R(t) = [E_1\,(t)\,x_1\,(t) + E_2\,(t)\,x_2\,(t)]/\Phi\,(x_1\,(t), x_2\,(t)), \qquad [14]$$

donde la productividad está ahora dada por $1/\Phi(x_1(t), x_2\,(t))$. La función $\Phi(x_1(t), x_2\,(t))$ tiene la misma forma que en el escenario *AK*.

La expresión de $R(t)$ en [14] lleva a una nueva expresión para el esfuerzo de extracción de la especie II como función del de la especie I:

$$E_2\,(t) = f_{VC}\,(E_1\,(t), x_1(t), x_2\,(t), \mathrm{K}\,(t)) = \\ = [b\Phi\,(x_1\,(t), x_2\,(t))\,K\,(t) - E_1\,(t)\,x_1\,(t)\,a]/[ax_2\,(t)]. \qquad [15]$$

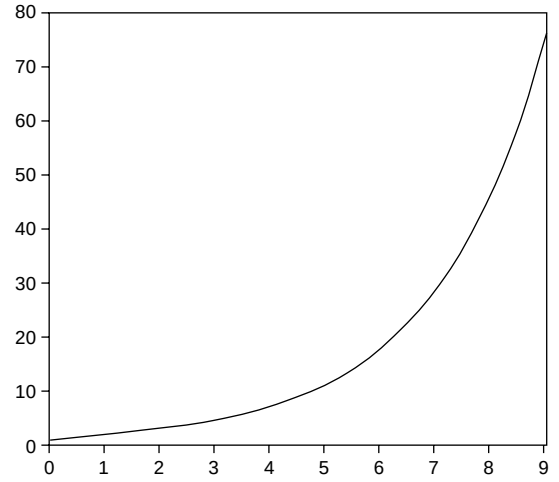
Dada esta relación entre los esfuerzos, para que uno no sea negativo, el otro debe estar por debajo de un umbral. Esto implica dos cotas superiores:

$$E^{VC}_{1\,max} = b\Phi(x_1(t), x_2(t))\,\mathrm{K}(t)/[ax_1],\; E^{VC}_{2\,max} = \\ = b\Phi(x_1\,(t), x_2\,(t))\,\mathrm{K}(t)/[ax_2]. \qquad [16]$$

La expresión del consumo del Sur es igual que en el escenario *AK*, $c_S(t) = p(t)R(t)$. Suponiendo competencia perfecta, el mercado puede, de nuevo, establecer el precio del bien intermedio «natural» que produce el Sur:

GRAFICO 3

CRECIMIENTO MONOTONO DEL *STOCK* DE CAPITAL Escenario AK



$$p(t) = \bar{w} L_S(t) / R(t) = \bar{w} \beta \Phi (x_1(t), x_2(t)) \qquad [17]$$

Este precio toma valores comprendidos entre cero y $p_{max} = a\,(1 - \theta)$.

Las ecuaciones diferenciales que definen la evolución del *stock* de las dos especies, incorporan el supuesto de capacidades máximas variables:

$$\dot{x}_1(t) = r x_1(t)(1 - x_1(t)\ exp\ (1/[\alpha\,(d_1)\,K\,(t)])) - q E_1(t) x_1(t), \qquad [18]$$
$$\dot{x}_2(t) = r x_2(t)(1 - x_2(t)\ exp\ (2/[\alpha\,(d_1)\,K\,(t)])) - q E_2(t) x_2(t).$$

Las capacidades máximas medioambientales para ambas especies crecen con $\alpha\,(d_1)\,K\,(t)$, pero no lo hacen indefinidamente, sino que convergen hacia *1* según $K\,(t)$ aumenta. En el Gráfico 2 se representan las funciones logísticas para las especies I y II, cuyas capacidades máximas dependen positivamente del *stock* de capital, además de las funciones de extracción para dichas especies.

Una vez establecidas las funciones que definen los consumos de ambas regiones, la dinámica de los *stocks* de las dos especies naturales, así como los esfuerzos de extracción de éstas, bajo los dos escenarios considerados, podemos establecer los problemas de optimización del Norte y del Sur. En ambos escenarios el problema se formula como un juego diferencial, en el que el Norte decide cuánto invertir, mientras que el Sur elige la tasa de esfuerzo para la especie *I*, $E_1\,(t)$ y, por las expresiones [9] y [16], la tasa de esfuerzo para la especie II. Ambas regiones buscan maximizar su flujo de consumo descontado.

En el escenario *AK*, el Norte accede a transferir una parte, d_1, de su capital al Sur con la intención de conseguir tecnologías más ecológicas. En este caso, el problema de optimización del Norte y del Sur puede expresarse:

$$\max_{s(t)} W_N = \max_{s(t)} \int_0^\infty e^{-pt} c_N(t)\ dt$$
$$\max_{E_1(t)} W_S = \max_{E_1(t)} \int_0^\infty e^{-pt} c_s(t)\ dt \qquad [19]$$

s.a.: $\dot{K}(t) = \delta(t) K(t) s(t) (1 - d_1),\ K(0) = K_0,$
$\dot{x}_1(t) = r x_1(t)(1 - x_1(t)) - q E_1(t) x_1(t),\ x_1(0) = x_{10},$
$\dot{x}_2(t) = r x_2(t)(1 - 2x_2(t)) - q f_{AK}(E_1(t), x_1(t), x_2(t))\, x_2(t), x_2(0) = x_{20},$
$0 \le s(t) \le 1,\ K_0 \ge 1, 0 < x_{10} \le 1,\ 0 < x_{20} \le 1/2,$

donde ρ denota la tasa de descuento y K_0, x_{10}, y x_{20} son los valores iniciales de los *stocks* de capital, especies I y II, respectivamente, que pertenecen a los rangos admisibles.

Cuando se considera el escenario de capacidades máximas variables, el Norte transfiere una parte, d_1, de su capital al Sur con el objetivo de incrementar las capacidades máximas de ambas especies. Así, aunque no aumenta la productividad, como en el escenario *AK*, es factible una mayor producción, ya que son mayores los *stocks* de las especies que puede sostener el ecosistema del Sur. Bajo este escenario, los problemas de optimización del Norte y del Sur se pueden expresar como:

$$\max_{s(t)} W_N = \max_{s(t)} \int_0^\infty e^{-pt} c_N(t)\ dt$$
$$\max_{E_1(t)} W_S = \max_{E_1(t)} \int_0^\infty e^{-pt} c_s(t)\ dt \qquad [20]$$

GRAFICO 4

FLUCTUACION DEL *STOCK* DE LA ESPECIE I
Escenario AK

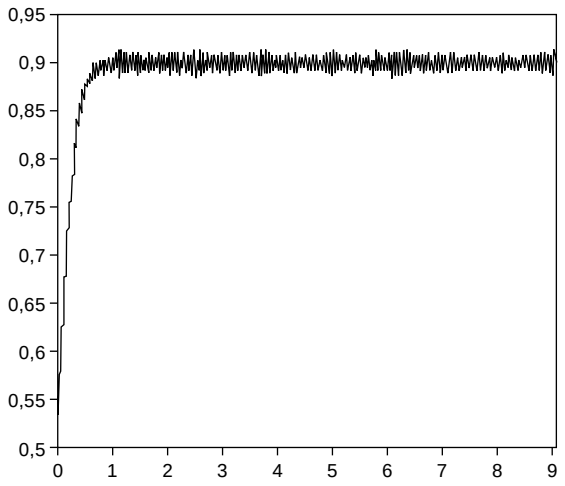
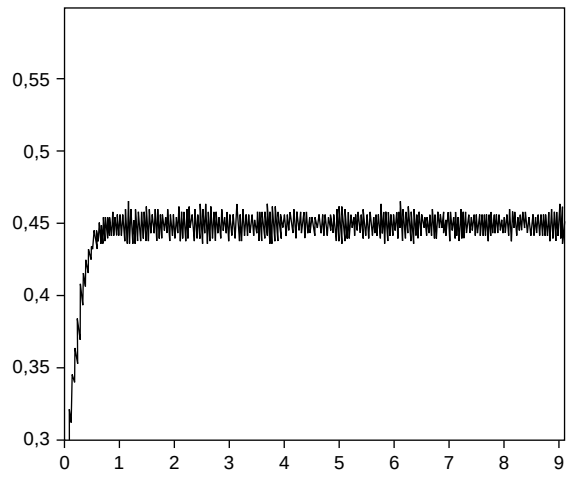


GRAFICO 5

FLUCTUACION DEL *STOCK* DE LA ESPECIE II
Escenario AK



s.a.: $K(t) = \delta(t)\, K(t)\, s(t)\, (1 - d_1)$,

$\dot{x}_1(t) = r x_1(t)\, (1 - x_1(t)\, exp\, (1/[\alpha\, (d_1)\, K(t)])) - q E_1(t)\, x_1(t)$,

$\dot{x}_2(t) = r x_2(t)\, (1 - x_2(t)\, exp\, (2/[\alpha\, (d_1)\, \dot{K}(t)])) - q f_{VC}(E_1(t), x_1(t)$,

$x_2(t), K(t))\, x_2(t), 0 \leq s(t) \leq 1,\ K(0) = K_0 \geq 1$,

$0 < x_1(0) = x_{10} \leq exp\, (-1/[\alpha\, (d_1)\, K_0]),\ 0 < x_2(0) =$

$x_{20} \leq \exp\, (-2/[\alpha\, (d_1)\, K_0])$.

3. Resultados numéricos

En ninguno de los dos escenarios planteados se han podido encontrar soluciones analíticas del sistema dinámico derivado de las condiciones necesarias de optimalidad para el juego diferencial. Por esta razón se ha llevado a cabo una integración numérica, con el fin de determinar el comportamiento de las soluciones. Los experimentos numéricos se han efectuado utilizando la rutina *ode23* de MATLAB, que integra sistemas de ecuaciones diferenciales con condiciones iniciales dadas.

Nuestro objetivo es encontrar condiciones bajo las cuales aparezca un crecimiento económico sostenido, pero asegurando que la evolución de los *stocks* de las especies es tal que ninguna de ellas se extingue. El análisis de la dinámica de los *stocks* de ambas especies, junto con las tasas de esfuerzo óptimas, establece un *trade-off* entre la tasa intrínseca de crecimiento, r, y la parte de capital que el Norte transfiere al Sur, dedicado a mejoras tecnológicas en esta última región, d_1, para garantizar la no extinción de las especies naturales. Cuanto menor sea la tasa intrínseca de crecimiento, mayor deben ser las transferencias desde el Norte hacia el Sur para asegurar que las especies naturales no están en peligro de extinción. En todos los experimentos numéricos se han elegido valores de r y d_1 suficientemente grandes, de forma que tiene lugar crecimiento económico y las especies naturales no se extinguen.

Escenario AK

Los resultados numéricos para el escenario *AK* muestran que el *stock* de capital crece monótonamente (véase Gráfico 3), mientras que los *stocks* de las especies oscilan alrededor de una curva con pendiente positiva, seguida de una línea horizontal (véanse Gráficos 4 y 5). La fluctuación de los *stocks* de las espe-

CUADRO 1

RESULTADOS NUMERICOS
Escenario AK

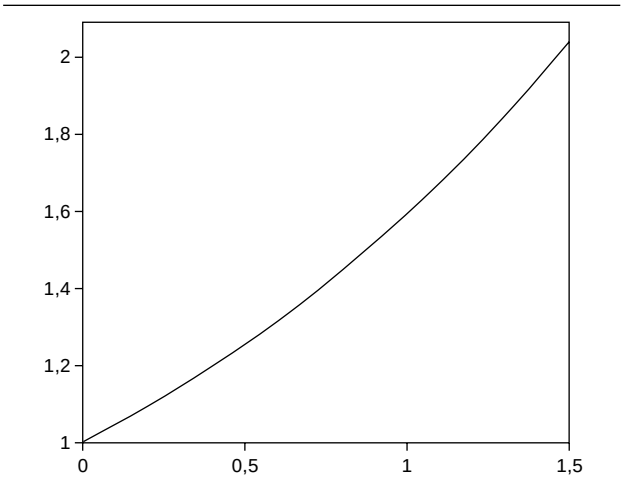
$K_0 = 1$; $x_{10} = 0{,}5$; $x_{20} = 0{,}3$			K	x_1^*	x_2^*
$d_1 = 3/10$;	$r = 156{,}26$;	$\alpha(d_1) = 4{,}28$	2,5745	0,987	0,494
$d_1 = 1/2$;	$r = 156{,}26$;	$\alpha(d_1) = 10$	1,9945	0,9947	0,4974
$d_1 = 1/2$;	$r = 250$;	$\alpha(d_1) = 10$	1,9947	0,9967	0,4983
$d_1 = 1/2$;	$r = 128{,}74$;	$\alpha(d_1) = 10$	1,9943	0,9938	0,4966

cies viene determinada por la expresión de la tasa óptima de esfuerzo para la especie I. Esta última es una función definida a trozos, que puede tomar el valor cero o el máximo posible, E_{1max}^{AK}, dado por [9]. Por la relación que liga la tasa de esfuerzo para la especie II con la correspondiente para la especie I, establecida en [8], se tiene que si la tasa de esfuerzo para la especie I es nula, entonces es máxima para la especie II, y viceversa. Así, cuando los *stocks* de las especies fluctúan, hay un intercambio continuo entre las tasas de esfuerzo máximo y nulo, y de una especie a la otra. Puede probarse fácilmente que los niveles estables alcanzados por los *stocks* de ambas especies en cada caso (véanse Gráficos 4 y 5) son menores que sus capacidades máximas, pero mayores que los alcanzados cuando las tasas de esfuerzo son máximas.

El Cuadro 1 presenta los resultados numéricos para este escenario, suponiendo diferentes valores de r y d_1, pero suficientemente grandes como para que los *stocks* de las especies naturales no se anulen, y éstas no se extingan. Estamos interesados en el efecto que tiene un aumento de la parte de capital transferido del Norte al Sur sobre los *stocks* finales de las especies naturales. En particular, esperamos que un mayor d_1 implique mayores *stocks* de las especies, pero menor crecimiento del *stock* del capital. También se estudia cómo influyen los cambios en d_1 en los *stocks* de las tres variables consideradas, para distintos valores de r. En la segunda columna se muestra el valor del *stock* de capital al final del intervalo de integración, y por x_1^*, x_2^* denotamos los *stocks* de los niveles estables para las especies I y II, respectivamente.

GRAFICO 6

CRECIMIENTO MONOTONO
DEL *STOCK* DE CAPITAL
Escenario CMV



El Cuadro 1 muestra los efectos esperados de los incrementos de d_1, para r dados; esto es, mayores valores de x_1^* y x_2^*, pero menores valores del *stock* de capital final. Así, las transferencias de capital desde el Norte al Sur, para alcanzar una tecnología que mejore la productividad de los recursos naturales en el Sur, permiten un crecimiento sostenible en ambos países. Sin embargo, cuanto mayor sea la parte dedicada a procesos de I+D, menor es el crecimiento económico. Este hecho establece un *trade-off* entre crecimiento económico y conservación del *stock* de las especies naturales. Valores altos de d_1 implican unos niveles altos de los *stocks* de las especies naturales, pero un crecimiento económico bajo. Lo contrario sucede para valores bajos de d_1. Así, aunque un menor d_1 da lugar a un mayor crecimiento del *stock* del capital, también hace más probable la extinción de una o ambas especies. Cuando el Norte elige la parte d_1 que transfiere al Sur, está contraponiendo crecimiento económico frente a conservación de la biodiversidad.

Por otra parte, los aumentos en la tasa intrínseca de crecimiento, r, fijado d_1, implican valores más elevados para todas los niveles finales considerados. Notemos que $\alpha(d_1)$ es una función

GRAFICO 7

FLUCTUACION DEL *STOCK* DE LA ESPECIE I
Escenario CMV

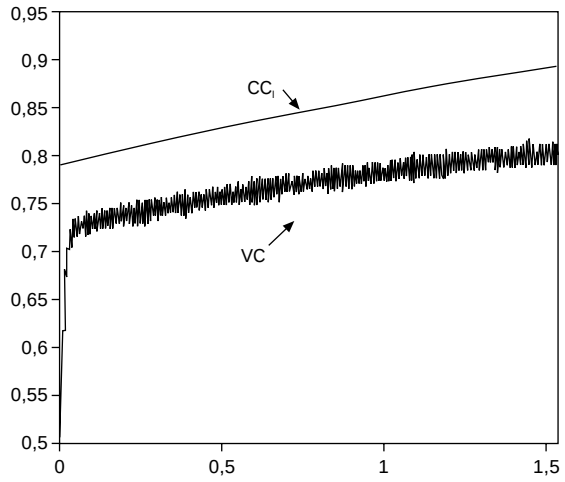
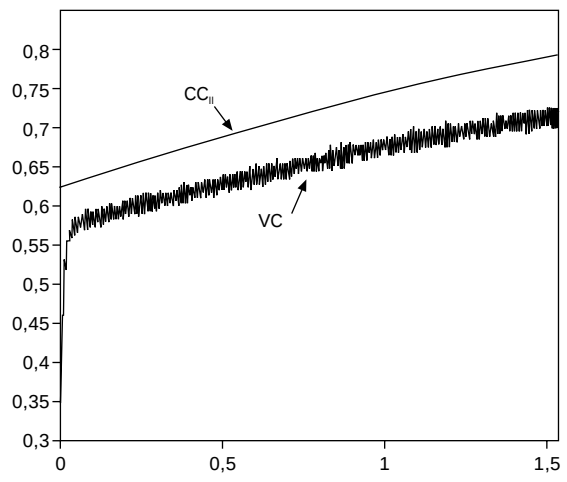


GRAFICO 8

FLUCTUACION DEL *STOCK* DE LA ESPECIE II
Escenario CMV



creciente de d_1. Además, puede probarse que si r decrece y $\alpha(d_1)$ aumenta en la misma proporción, no cambian los niveles estables de los *stocks* de ambas especies. Este hecho confirma la existencia del *trade-off*, ya mencionado, entre la tasa intrínseca de crecimiento y la tasa de capital transferido desde el Norte al Sur. El comportamiento cualitativo de todas las variables permanece invariable para todos los experimentos numéricos llevados a cabo para diferentes condiciones iniciales de los *stocks*.

Escenario de capacidades máximas variables (CMV)

En este apartado se recogen los resultados obtenidos con los experimentos numéricos, para el escenario de capacidades máximas variables. La trayectoria óptima del capital para este escenario se muestra en el Gráfico 6, que como en el escenario *AK*, es una curva que crece continuamente durante todo el intervalo temporal. Los *stocks* de las especies naturales crecen hacia sus estados estacionarios, donde la tasa óptima de esfuerzo para la especie I es cero y máxima, E_{1max}^{VC}, intermitentemente. Como sucedía en el caso *AK* si el esfuerzo de extracción para la especie I es nulo, es máximo para la especie II, y viceversa. En este escenario, la tasa de esfuerzo máximo y las capacidades máximas crecen con el *stock* de capital, al contrario que en el escenario *AK* donde eran valores constantes.

En los Gráficos 7 y 8 las curvas denotadas por VC muestran un crecimiento monótono de los niveles estables alcanzados por los *stocks* de las especies naturales. Ambas figuras ilustran, después de un corto período, el comportamiento fluctuante de las especies I y II alrededor de una tendencia, menor y paralela a la curva estrictamente creciente que describe la evolución de sus capacidades máximas, denotadas por cc_I y cc_{II} , respectivamente.

El Cuadro 2 presenta los resultados numéricos para diferentes valores de r y d_1; como en la especificación *AK*. Aquí $\tilde{x}_1$ y $\tilde{x}_2$ denotan los valores de la tendencia y cc_I y cc_{II} las capacidades máximas para las especies I y II, respectivamente. Todos estos valores se calculan al final del horizonte temporal. Este cuadro muestra las mismas características cualitativas que las descritas en el escenario *AK*. Primero, cuanto mayor son los valores de d_1, menor es el *stock* final del capital, pero mayores son $\tilde{x}_1$ y

CUADRO 2

RESULTADOS NUMERICOS
Escenario CMV

$K_0 = 1$; $x_{10} = 0{,}5$; $x_{20} = 0{,}3$			K	$\tilde{x}_1$	cc_I	$\tilde{x}_2$	cc_{II}
$d_1 = 3/10$;	$r = 156{,}26$;	$\alpha(d_1) = 4{,}28$	2,0077	0,8	0,8902	0,715	0,7926
$d_1 = 1/2$;	$r = 156{,}26$;	$\alpha(d_1) = 10$	1,8324	0,913	0,9468	0,865	0,8966
$d_1 = 1/2$;	$r = 250$;	$\alpha(d_1) = 10$	1,8521	0,9295	0,9474	0,881	0,8976
$d_1 = 1/2$;	$r = 128{,}74$;	$\alpha(d_1) = 10$	1,8189	0,902	0,9463	0,8535	0,8958

$\tilde{x}_2$. Segundo, cuanto más grande es r mayores son los valores de todas las variables de estado y más corto es el intervalo de tiempo que tardan los *stocks* de las especies en alcanzar la tendencia.

La comparación de los Cuadros 1 y 2 permite subrayar dos resultados importantes. Primero, un aumento de la parte del capital transferido del Norte al Sur, d_1, para un valor fijo de la tasa intrínseca de crecimiento, r, tiene el mismo efecto en ambos escenarios. El *stock* de capital alcanza un valor menor, mientras que los *stocks* de ambas especies son mayores, expresados bien por sus estados estacionarios o bien por sus valores de tendencia, para los escenarios *AK* y de capacidades máximas variables, respectivamente. Sin embargo, en términos relativos, podemos establecer que la caída del *stock* del capital es 2,6 veces mayor para el modelo *AK*. Por el contrario, el aumento de los *stocks* de las especies, de nuevo en términos relativos, es mucho mayor para el escenario de capacidades máximas variables; en particular, 18 y 30 veces mayor para las especies I y II, respectivamente.

En segundo lugar, consideramos el efecto de un incremento de la tasa intrínseca de crecimiento, r, permaneciendo fijo d_1. De nuevo las características cualitativas no cambian de un escenario a otro. Bajo esta hipótesis, todas las variables de estado alcanzan valores mayores. Además, en términos relativos podemos decir que todas las variables crecen más para el escenario de capacidades máximas variables que para el *AK*. Sin embargo, el aumento del *stock* de capital para el escenario de capacidades máximas variables es 107 veces el del *AK*, mientras que los incrementos de los *stocks* de las especies son 9 y 10 veces los del *AK*. Esta importante diferencia en términos relativos se obtiene, de nuevo, cuando, para un d_1 fijo, consideramos una caída de la tasa intrínseca de crecimiento.

Otras simulaciones numéricas, con valores iniciales para los *stocks* de las especies más pequeños, requieren tasas intrínsecas de crecimiento mayores para garantizar la conservación de las especies. Los resultados de estas simulaciones presentan diferencias en términos relativos similares a las expuestas anteriormente.

Resumiendo los resultados establecidos, tenemos que un mayor valor de d_1 tiene una mejor respuesta en el escenario de capacidades máximas variables. En esta situación, el capital cae en una cantidad menor que en el escenario *AK*, y entonces los *stocks* de las especies, x_1 y x_2, crecen más que en el otro proceso de transferencia del capital. Además, cuando crece la tasa intrínseca de crecimiento, r, todas las variables relevantes, *stocks* de capital y de las especies, muestran un mejor comportamiento en el escenario de capacidades máximas variables que en el *AK*.

Podemos concluir que cuando el Norte decide transferir capital hacia el Sur, éste debe concentrarse en aumentar las capacidades máximas de los *stocks* de ambas especies; esto es, permitir unas mejores condiciones de vida de la especie en el ecosistema. Si el Norte elige este tipo de transferencia tecnológica, mejora el comportamiento de los *stocks* del capital y de las especies más que cuando el capital transferido se dedica a mejorar la tecnología del Sur, implicando una mayor productividad en el proceso productivo del Sur.

4. Conclusiones

En este trabajo hemos estudiado un modelo de comercio Norte-Sur que incorpora, por un lado, la dinámica del *stock* de dos especies naturales representativas y, por otro lado, un proceso de transferencia de conocimiento del Norte al Sur. Más concretamente, se han considerado dos escenarios posibles para las transferencias de capital del Norte al Sur. En el primer escenario, escenario *AK*, consideramos que la parte del capital

que el Norte transfiere al Sur afecta a la productividad de esta segunda región, de forma que produce la misma cantidad del bien intermedio «natural» utilizando menor cantidad de recursos naturales. Por lo tanto, las tasas de extracción de las especies naturales son inferiores, y los ecosistemas de éstas mejor conservados. En el segundo escenario, de capacidades máximas variables, el Norte dedica parte de su capital a aumentar las capacidades máximas de las dos especies naturales del ecosistema del Sur.

El objetivo del trabajo ha sido analizar la relación entre comercio Norte-Sur, crecimiento económico y conservación de la biodiversidad, estudiando el comportamiento de las soluciones de un juego diferencial entre el Norte y el Sur. Se han buscado y encontrado condiciones bajo las cuales está garantizada la existencia de crecimiento económico sostenido, sin que lleve aparejada la extinción de alguna de las especies naturales. Se derivan numéricamente trayectorias óptimas, tanto para el *stock* de capital como para los *stocks* de ambas especies naturales, que muestran un crecimiento indefinido del capital en todo el horizonte temporal considerado, junto a un comportamiento fluctuante de los *stocks* de las especies alrededor de un valor constante o de una tendencia creciente, según se considere el escenario *AK* o el de capacidades máximas variables, respectivamente.

A la hora de comparar los resultados relativos al crecimiento del capital y a la conservación de la biodiversidad del Sur, según el tipo de transferencia de capital elegida por el Norte, hemos obtenido los siguientes resultados. En el escenario *AK*, la velocidad de convergencia hacia el nivel estable alrededor del cual oscilan los stocks de las especies naturales, crece con la tasa intrínseca de crecimiento de la población de las mismas. Por lo que se refiere a la parte del capital transferido del Norte al Sur, existe un *trade-off* entre crecimiento económico y conservación de niveles importantes de los *stocks* de las especies. El primero se consigue con transferencias pequeñas desde el Norte, mientras que los segundos están asociados a valores altos de transferencias de capital.

En el caso del escenario de capacidades máximas variables, el comportamiento de los *stocks* del capital y de las especies naturales es incluso mejor que bajo el escenario *AK*. En términos relativos, se prueba que los aumentos de los stocks de las variables relevantes son muy superiores en el caso del escenario de capacidades máximas variables. De esta forma, se puede concluir que con vistas a alcanzar un crecimiento económico preservando la biodiversidad del Sur, es mejor que el Norte dedique parte de su capital a procesos que aumenten la capacidad máxima de las especies naturales del ecosistema, frente a transferencias de capital que mejoren la productividad del proceso de producción del bien intermedio de carácter «natural» en el Sur.

Referencias bibliográficas

[1] AGNION, P. y HOWITT, P. (1998): *Endogenous Growth Theory*. MIT Press, Cambridge, Massachussetts.

[2] AYRES, R. U.; KNEESE, A. V. (1969): «Production, Consumption and Externalities», *American Economic Review*, junio, páginas 282-297. Existe una versión en castellano en *Economía del Medio Ambiente*, GALLEGO GREDILLA, J. A., Madrid, IEF, 1974, páginas 203-239.

[3] BAYOUMI, T.; COE, D.T. y HELPMAN, E. (1999): «R&D Spillovers and Global Growth», *Journal of International Economics* 47, páginas 399-428.

[4] BENCHEKROUN, H. y VAN LONG, N. (1998): «Efficiency Inducing Taxation for Polluting Oligopolists», *Journal of Public Economics* 70, páginas 325-342.

[5] BENHABIB, J. y RADNER, R. (1992): «The Joint Exploitation of a Productive Asset: A Game-theoretic Approach», *Economic Theory* 2, 1992, páginas 155-190.

[6] BRANDER, J.A. y TAYLOR, M.S.(1998): «Open Access Renewable Resources: Trade and Trade Policy in a Two-country Model», *Journal of International Economics 44*, páginas 181-209.

[7] CABO, F. y MARTIN-HERRAN, G. (1998): «Biodiversity: A North-South Trade Differential Game», en proceso de evaluación. Presentado en el 1998 Annual Meeting of the Society for Economic Dynamics, Philadelphia, Pennsylvania y en el VIII International Symposium on Dynamic Games and Applications, Maastricht, Holanda.

[8] COE, D.T. y HELPMAN, E. (1995): «International R&D Spillovers», *European Economic Review* 39, páginas 859-887.

[9] CHICHILNISKY, G. (1993): «North-South Trade and the Dynamics of Renewable Resources», *Structural Change and Economic Dynamics* 4, 1993, páginas 219-248.

[10] CHICHILNISKY, G. (1994): «North-South Trade and the Global Environment», *American Economic Review* 84, (4), 1994, páginas 851-874.

[11] CLARK, C. W. (1990): *Mathematical Bioeconomics. The Optimal Management of Renewable Resources*, John Wiley & Sons, Nueva York.

[12] DOCKNER, E. J. y VAN LONG, N. (1993): «International Pollution Control: Cooperative versus Noncooperative Strategies», *Journal of Environmental Economics and Management* 24, páginas 13-29.

[13] GALOR, O. (1986): «Global Dynamic Ineficiency in the Absence of International Policy Coordination: A North-South Case», *Journal of International Economics* 21, páginas 137-149.

[14] JUDD, K.L. (1998): *Numerical Methods in Economics*. MIT Press, Cambridge, Massachussetts.

[15] PEARCE, D.; BARBIER, E. y MARKANDYA, A. (1990): *Blueprint for a Green Economy*, Earthscan Publications, Londres, Reino Unido.

[16] SOLOW, R. M. (1993): «Sustainability: An Economist's Perspective» en R. DORFMAN y S. DORFMAN, eds., *Economics of the Environment: Selected Readings*, Norton, Nueva York, 3rd ed.

[17] SORGER, G. (1998): «Markov-perfect Nash Equilibria in a Class of Resource Games», *Economic Theory* 11, páginas 79-100.