

LA ESCASEZ ECOLÓGICA COMO PROBLEMA DE LA ECONOMÍA AMBIENTAL. PROPUESTA DE UN MODELO DE UTILIZACIÓN DE LA TIERRA APLICADO A LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DEL CAPITAL NATURAL

Díaz, Darío E.*

Resumen. El presente artículo tiene como objetivo describir las principales características de los activos naturales de los ecosistemas mediante el desarrollo de un modelo matemático de utilización de la tierra en competencia aplicado a los ecosistemas, es decir, cómo diferentes actividades humanas compiten por el uso de los activos naturales de los ecosistemas. El modelo básico considera un desarrollo irreversible del paisaje. La tierra que se convierte y se desarrolla tiene un valor de mercado y la tasa de apreciación de la tierra en espera de desarrollo debe ser igual al costo de oportunidad de la inversión en tierras, que incluye un ajuste por la relación entre el valor de los servicios ecosistémicos y el valor de capital de la tierra desarrollada (es decir, la transformada en áreas urbanizadas o destinadas a otros usos humanos). El modelo se extiende al caso de la conversión continua del paisaje ecológico a lo largo del tiempo, considerando los costos en la pérdida de servicios ecosistémicos y de cualquier ganancia de capital de los aumentos en el valor de la tierra no convertida, es decir, aquella que no se ha modificado su estado natural original para adaptarla a un propósito o uso humano específico.

Palabras Clave: Paisaje ecológico; Activo natural; Valoración de Servicios Ecosistémicos.

* Instituto Provincial de Estadística y Censos de la Provincia de Misiones (IPEC), Argentina y Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Argentina.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3171-647X>

Contacto: drdarioezequieldiaz@gmail.com

ECOLOGICAL SCARCITY AS AN ENVIRONMENTAL ECONOMICS ISSUE: A PROPOSAL FOR A LAND USE MODEL APPLIED TO THE ECOSYSTEM SERVICES OF NATURAL CAPITAL

Abstract. This article aims to describe the main characteristics of natural ecosystem assets by developing a competing land use mathematical model applied to ecosystems, that is, how different human activities compete for the use of assets. natural ecosystems. The basic model considers an irreversible development of the landscape. Land that is converted and developed has a market value, and the rate of appreciation for land awaiting development must equal the opportunity cost of the land investment, which includes an adjustment for the ratio of land value ecosystem services and capital value of developed land (i.e., land converted to urbanized areas or designated for other human uses). The model is extended to the case of continued conversion of the ecological landscape over time, considering the costs of the loss of ecosystem services and any capital gains from increases in the value of unconverted land, that is, that that its original natural state has not been modified to adapt it to a specific human purpose or use.

Keywords: Ecological landscape; Natural asset; Valuation of Ecosystem Services.

Original recibido el 08/03/2022

Aceptado para su publicación el 26/06/2023

1. Introducción

Los modelos integrados de economía-ecosistema han comenzado a examinar la transformación humana de un paisaje ecológico a través de la conversión del uso de la tierra, dejando la tierra residual para los procesos ecológicos y el hábitat para las especies, como en Brock y Xepapadeas (2002), Eichner y Pethig (2006), Finnoff, Strong y Tschirhart (2008) y Tschirhart (2000).

Pero mientras que estos modelos integrados se centran en modelar los complejos procesos ecológicos y los efectos de retroalimentación sobre múltiples servicios ecosistémicos que surgen a través de la conversión de la tierra, el enfoque en el presente artículo es adoptar un modelo de cambio de uso de la tierra. Tales modelos de uso competitivo de la tierra se han empleado en muchos contextos para analizar la asignación de la tierra entre usos alternativos (Amacher, Ollikainen y Koskela, 2009; Barbier y Burgess, 1997; Barbier, Damania y Léonard, 2010; Benhin y Barbier, 2001; Crocker, 2005; Hartwick, van Long y Tian, 2001). Al aplicar modelos de utilización de la tierra en competencia a los ecosistemas, el punto de partida es la suposición de que la cantidad de un paisaje ecológico que se conserva debe competir con otros activos en la cartera de propietarios de riqueza en la economía.

El artículo está estructurado de la siguiente manera. En primer lugar, se describe a la escasez ecológica como un problema de la economía ambiental. Se proporciona la justificación para el tratamiento de los ecosistemas como activos naturales, donde la conceptualización de la escasez ecológica hace foco en la pérdida de la miríada de contribuciones que los ecosistemas hacen al bienestar humano, o servicios ecosistémicos, ya que estos sistemas naturales se explotan para el uso humano y la actividad económica¹. En segundo lugar, se profundiza en cómo se pueden considerar los ecosistemas como activos económicos. Se explora la relación entre los ecosistemas, su estructura y funciones y los servicios ecológicos que generan y que contribuyen al bienestar humano, para sentar las bases de cómo se pueden adaptar y aplicar modelos competitivos de uso de la tierra en la economía para modelar ecosistemas como activos naturales. Es decir, los enfoques o metodologías que permiten asignar y gestionar el uso de la tierra de manera eficiente desde una perspectiva económica².

1 La escasez ecológica se refiere a la falta o insuficiencia de los servicios ecosistémicos necesarios para el bienestar humano. Los servicios ecosistémicos son los beneficios que los ecosistemas proporcionan a las personas, como el suministro de agua limpia, la regulación del clima, la polinización de cultivos, la provisión de alimentos y materiales, entre otros. La conceptualización de la escasez ecológica en este sentido implica que los ecosistemas son considerados activos naturales, es decir, recursos valiosos que brindan una amplia gama de contribuciones al bienestar humano. Estos ecosistemas son explotados y utilizados por los seres humanos para satisfacer sus necesidades y actividades económicas. Sin embargo, debido a la sobreexplotación, la degradación ambiental y la pérdida de biodiversidad, los ecosistemas pueden llegar a un punto en el que no puedan proporcionar suficientes servicios ecosistémicos para satisfacer la demanda humana. Esto crea una escasez ecológica, donde los beneficios y servicios que antes eran abundantes se vuelven limitados, lo que afecta el bienestar y la calidad de vida de las personas.

2 En el contexto del tratamiento de los ecosistemas como activos económicos, los modelos competitivos de uso de la tierra en economía buscan optimizar la asignación de los recursos naturales y los servicios ecosistémicos de acuerdo con su valor económico. Esto implica considerar las diferentes opciones de uso de la tierra, como la agricultura, la silvicultura, la conservación, la minería, entre otros y evaluar su rentabilidad económica y su impacto en el bienestar humano.

2. La escasez ecológica como problema de la economía ambiental

Uno de los problemas más críticos que enfrenta la humanidad hoy en día es la rápida desaparición y degradación de muchos ecosistemas en todo el mundo. La pregunta clave es: ¿cómo podemos los humanos permitir el uso excesivo y la destrucción continua de la naturaleza, que es tan esencial para la vida y valiosa? Una respuesta pertinente es: estamos usando capital natural porque es valioso; la razón por la que estamos perdiendo capital natural es que es gratis.

Tal respuesta transmite una visión económica importante del problema global de la pérdida ambiental: la unidad básica de la naturaleza, el ecosistema, es una forma especial de riqueza, que podemos considerar como un stock de capital natural. Los seres humanos dependen y utilizan este capital natural para una amplia gama de beneficios importantes, incluido el soporte vital. Por lo tanto, nuestra riqueza ecológica es extremadamente valiosa. Pero a diferencia de las habilidades, la educación, las máquinas, las herramientas y otros tipos de humanos y capital hecho por el hombre, no tenemos que fabricar y acumular nuestra dotación de activos naturales. Alguien se podría preguntar: ¿por qué no acumular activos naturales? La afirmación de que no acumulamos activos naturales se basa en el hecho de que los recursos naturales y los ecosistemas no son bienes que se pueden producir o acumular de la misma manera que otros tipos de activos, como habilidades, educación, máquinas o herramientas.

Hay varias razones por las cuales no es posible acumular activos naturales de la misma manera que acumulamos otros tipos de riqueza. La primera es la naturaleza renovable y los límites físicos, por lo que, a diferencia de los activos fabricados por el ser humano, como las máquinas o las herramientas, los recursos naturales son limitados y están sujetos a procesos de regeneración natural. La capacidad de la Tierra para regenerar recursos y mantener los servicios ecosistémicos tiene límites físicos. Si se extraen o utilizan en exceso, no pueden ser simplemente acumulados sin consecuencias negativas, como la degradación de los ecosistemas y la pérdida de biodiversidad. La segunda se trata de las interconexiones y dependencia, puesto que los ecosistemas son sistemas complejos en los que los diferentes elementos están interconectados. La salud y el funcionamiento adecuado de un ecosistema dependen de la preservación de su integridad y diversidad. Acumular un solo componente de un ecosistema sin tener en cuenta el equilibrio y la interdependencia con otros componentes puede conducir a desequilibrios ecológicos y disminución de los servicios ecosistémicos. Por último, otra razón es el valor intrínseco y la ética ambiental: los activos naturales no solo tienen valor para los seres humanos en términos de los beneficios que proporcionan, sino que también tienen un valor intrínseco en sí mismos. Los ecosistemas y las especies tienen derecho a existir y a mantener su propia integridad y biodiversidad. La ética ambiental reconoce que debemos tratar a la naturaleza con respeto y no considerarla simplemente como un recurso a ser acumulado o explotado sin límites.

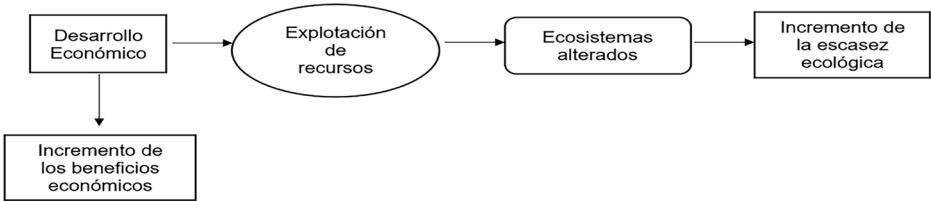
Por estas razones, en lugar de acumular activos naturales, es fundamental adoptar un enfoque de gestión sostenible que valore y preserve los recursos naturales y los ecosistemas. Esto implica reconocer el capital natural como una forma especial de riqueza y asegurar que su uso sea responsable y equitativo, evitando su

sobreexplotación y degradación. Además, es necesario implementar prácticas de conservación, restauración y uso sostenible de los recursos naturales para garantizar la supervivencia y el bienestar de las generaciones presentes y futuras.

Se sabe que la naturaleza nos ha proporcionado ecosistemas y sus beneficios de forma gratuita. No obstante, tal vez porque este capital nos ha sido proporcionado libremente, los humanos hemos tendido a verlo como ilimitado, abundante y siempre disponible para nuestro uso, explotación y conversión³. El concepto de ecosistema como capital natural puede ayudarnos a analizar el comportamiento económico que ha llevado al uso excesivo de tanta riqueza ecológica. Si podemos entender mejor este comportamiento, entonces tal vez también podamos encontrar formas de administrar y mejorar lo que queda de nuestra dotación natural.

La escasez ecológica surge a través de una compensación fundamental en nuestro uso del medio ambiente natural. Esta compensación se puede representar en un diagrama simple.

Figura 1. Trade-off de la escasez ecológica



Fuente: Elaboración propia.

El desarrollo económico depende de la explotación de los recursos naturales para obtener materias primas e insumos energéticos, así como para abordar la gestión de la contaminación y los desechos generados por la actividad humana. Este proceso de explotación y uso del medio ambiente puede tener como consecuencia la alteración de los ecosistemas. Sin embargo, el desarrollo económico también está asociado con un aumento en la producción y consumo de bienes y servicios humanos, los cuales pueden contribuir al bienestar general de las personas. Se entiende por ecosistemas a los sistemas que involucran la interacción de plantas, animales y otros organismos

³ En el contexto mencionado, la conversión se refiere al proceso mediante el cual los ecosistemas naturales, como la tierra, el agua y otros recursos naturales, se transforman o se utilizan para fines humanos, como la urbanización, la agricultura, la minería u otras actividades económicas. La conversión de la tierra implica cambios en el uso del suelo, donde áreas naturales, como bosques, humedales o praderas, se transforman en áreas urbanas, agrícolas o industriales. Este proceso implica la eliminación o degradación de los ecosistemas naturales y puede tener impactos significativos en la biodiversidad, los servicios ecosistémicos y el equilibrio ambiental. La conversión del agua se refiere a la alteración o modificación de los sistemas acuáticos, como ríos, lagos o humedales, para satisfacer las necesidades humanas, como la construcción de represas, la canalización de ríos, la extracción excesiva de agua o la contaminación. Estas acciones pueden tener consecuencias negativas en la calidad y disponibilidad del agua, así como en los ecosistemas acuáticos y las especies que dependen de ellos.

La conversión también puede aplicarse a otros recursos naturales, como la conversión de bosques en plantaciones forestales, la conversión de áreas naturales en áreas de extracción minera o la conversión de áreas marinas en zonas de acuicultura.

con su entorno físico en la naturaleza. Estos sistemas desempeñan un papel fundamental al brindar una amplia gama de contribuciones al bienestar humano. Por ejemplo, los ecosistemas proporcionan paisajes estéticos para la recreación, mantienen especies beneficiosas, controlan la erosión del suelo y brindan protección contra inundaciones o tormentas, entre otros beneficios. Estos beneficios, conocidos como servicios ecosistémicos, son vitales para el funcionamiento y la calidad de vida de las sociedades humanas.

Sin embargo, el desarrollo económico ha dado lugar a la alteración y destrucción de los ecosistemas, lo que a su vez tiene un impacto negativo en la provisión de estos servicios ecosistémicos. La pérdida de estos beneficios ecológicos, como resultado de la actividad humana, es lo que se conoce como escasez ecológica creciente. En otras palabras, la disminución de los servicios ecosistémicos debido al desarrollo económico representa una escasez cada vez mayor de los recursos naturales y las funciones que los ecosistemas proporcionan para mantener nuestro bienestar y la salud del planeta.

El desarrollo económico no puede continuar sin explotar los recursos naturales para obtener materias primas e insumos energéticos o utilizar el medio ambiente para asimilar la contaminación y otros subproductos de desecho. En el lado positivo, el desarrollo económico también conduce a un aumento de la producción y el consumo de bienes y servicios hechos por el hombre. Como estos bienes y servicios contribuyen al bienestar humano general; pueden considerarse los "beneficios económicos" del desarrollo. Sin embargo, la explotación y el uso del medio natural por parte de los seres humanos para la asimilación de materias primas, energía y residuos también conduce a la alteración de los ecosistemas, que son los sistemas de interacción de la biota con su entorno físico que se encuentran en toda la naturaleza. La alteración y destrucción de los ecosistemas afecta, a su vez, sus diversas contribuciones al bienestar humano, como el uso de paisajes estéticos para la recreación, el mantenimiento de especies beneficiosas, el control de la erosión, la protección contra inundaciones o tormentas, etc. La pérdida de estos "beneficios ecológicos", o servicios ecosistémicos, como consecuencia del desarrollo económico es lo que constituye una creciente escasez ecológica.

Una vez que comenzamos a ver la escasez ecológica como un problema económico, no es difícil ver los ecosistemas como activos naturales. Debido a que los ecosistemas generan servicios que contribuyen al bienestar humano, pueden considerarse una forma de riqueza. La disyuntiva del incremento de los beneficios económicos frente al aumento de la escasez ecológica se trata realmente de una compensación entre diferentes activos. Por un lado, estamos creando riqueza económica; por el otro, estamos sacrificando nuestra "riqueza ecológica" disponible para hacerlo.

La literatura reciente sobre servicios ecológicos también implica que los ecosistemas son activos que producen un flujo de bienes y servicios beneficiosos a lo largo del tiempo, aunque no se trate específicamente la conceptualización de la escasez ecológica (Daily, 1997; Daily, Söderqvist y Aniyar, 2000; Environmental Protection Agency, 2009; Polasky y Segerson, 2009; TEEB, 2009).

3. Servicios ecosistémicos y paisajes ecológicos

El concepto de ecosistema es un paradigma, una estructura intelectual *a priori*, una forma específica de mirar la naturaleza. En otras palabras, el ecosistema es la unidad básica fundamental con la que debemos tratar para pensar cómo funciona el medio ambiente para sustentar la vida, incluidos los humanos (Odum, 1975). En consecuencia, si se quiere caracterizar el medio ambiente como un “bien natural”, entonces tiene sentido comenzar con esta “unidad básica fundamental” que es la “manera específica de ver la naturaleza” de los ecologistas.

A Tansley (1935) se le atribuye la primera definición del ecosistema como un "sistema", en el sentido de que incluye un conjunto de organismos que interactúan con su entorno físico asociado en un lugar específico (O'Neill, 2001; Pickett y Cadenasso, 2002). Por lo tanto, dentro de su área o ubicación prescrita, un ecosistema comprende su entorno abiótico (no vivo) y los grupos bióticos (vivos) de especies o comunidades de plantas y animales. Los componentes bióticos y abióticos y las interacciones entre ellos, a menudo se conocen como la estructura del ecosistema. Dos funciones ecosistémicas importantes se llevan a cabo en cada ecosistema: el ciclo biogeoquímico y el flujo de energía.

3.1. Los ecosistemas como paisajes ecológicos

Si los ecosistemas son activos que producen un flujo de bienes y servicios beneficiosos a lo largo del tiempo, entonces necesitamos tener una unidad física de medida para representar este tipo de capital. Los ecosistemas son representados como paisajes ecológicos que generan un flujo de bienes y servicios beneficiosos a lo largo del tiempo. En el contexto de la toma de decisiones de políticas, como determinar qué cantidad de un ecosistema debe ser modificada en lugar de ser conservada o incluso restaurada para seguir produciendo flujos de bienes y servicios, es importante contar con una medida física que represente este tipo de capital.

No obstante, los ecologistas han señalado que el concepto de ecosistema es altamente multidimensional y difícil de definir o medir. Su amplio espectro abarca desde la biodiversidad y la evolución hasta el procesamiento de nutrientes y energía y desde escalas instantáneas hasta históricas, abarcando desde lo microbiano hasta lo biosférico (O'Neill, 2001; Pickett y Cadenasso, 2002).

La valoración relativa del uso de la tierra de dos tipos de ecosistemas, en lugar de su flujo total de energía relativa, podría determinar cómo los humanos perciben estas dos formas de riqueza competitivas. Esto sugiere que una variable de *stock* que podría servir como unidad física para representar un ecosistema como un activo natural es su área de tierra. Los avances recientes en ecología del paisaje, por ejemplo, sugieren que la unidad básica de la mayoría de los procesos ecológicos es espacial y se encuentra relacionada con la tierra o paisaje ecológico, que define los límites del sistema (O'Neill, 2001; Bockstael, 1996; Perry, 2002; Pickett y Cadenasso, 2002; Turner, 2005).

No obstante, es importante abordar las críticas planteadas por algunos expertos. Es cierto que la tierra tiene un valor de mercado, mientras que otros recursos naturales o servicios ambientales mencionados en este texto, como la biodiversidad, no lo

tienen de la misma manera. En el campo de la economía ambiental, se proponen métodos basados en el valor de uso indirecto para abordar esta cuestión y valorar adecuadamente los servicios ambientales proporcionados por los ecosistemas.

Los ecosistemas son complejos y multidimensionales, lo que dificulta su definición y medición (O'Neill, 2001; Pickett y Cadenasso, 2002). La valoración relativa del uso de la tierra puede influir en cómo se percibe la riqueza de diferentes tipos de ecosistemas. Sin embargo, es importante reconocer que la valoración económica de los servicios ambientales va más allá del valor de mercado de la tierra y se basa en métodos que capturan el valor de uso indirecto proporcionado por los ecosistemas.

Dicha medición física es especialmente importante al considerar una decisión de política básica, como la cantidad de un ecosistema que debe convertirse o desarrollarse en lugar de conservarse o incluso restaurarse para continuar produciendo flujos de bienes y servicios. Pero como han señalado los ecologistas, el concepto de ecosistema es altamente multidimensional y difícil de definir o medir (O'Neill, 2001; Pickett y Cadenasso, 2002).

El principal problema es que el uso del ecosistema como idea central invita a una amplia variedad de enfoques, desde la biodiversidad, pasando por la evolución, hasta el procesamiento de nutrientes y energía, desde instantáneo hasta histórico y desde microbiano hasta biosférico. El valor relativo del uso de la tierra de dos tipos de ecosistemas, en lugar de su flujo de energía total relativo, podría determinar cómo los humanos ven estas dos formas competitivas de riqueza. Esto sugiere que la variable de *stock* que podría servir como una unidad física para representar un ecosistema como un activo natural es su área de tierra. Los desarrollos recientes en ecología del paisaje, por ejemplo, sugieren que la unidad básica de la mayoría de los procesos ecológicos es espacial y es sinónimo de la tierra o paisaje ecológico que define el límite del sistema (O'Neill, 2001; Bockstael, 1996; Perry, 2002; Pickett y Cadenasso, 2002; Turner, 2005).

3.2. Asignación de paisajes ecológicos entre usos competitivos

Si los ecosistemas y los servicios que generan pueden asociarse con el paisaje ecológico⁴ que define estos sistemas, entonces no solo podemos representar estos ecosistemas como activos naturales, sino también desarrollar formas de determinar si vale la pena aferrarse o conservar estos activos en comparación con agotarlos o convertirlos/modificarlos. Por ejemplo, supongamos que el flujo de servicios ecosistémicos en cualquier período de tiempo t , se puede cuantificar y que podemos medir lo que cada individuo está dispuesto a pagar por que se le proporcionen estos servicios. Si sumamos, o agregamos, la disposición a pagar por parte de todos los individuos que se benefician en cada período de los servicios ecosistémicos,

⁴ Se denomina paisaje ecológico a la representación física y espacial de los ecosistemas y su interacción con el entorno natural. Es la combinación de elementos naturales, como la vegetación, el suelo, el agua y los procesos ecológicos, que forman un sistema interconectado y dinámico. El paisaje ecológico proporciona un marco visual y funcional para comprender la estructura y la función de los ecosistemas, así como su relación con el entorno circundante. En el contexto del presente artículo el paisaje ecológico se utiliza como un término que relaciona los ecosistemas con su entorno físico, permitiendo una representación más completa de estos sistemas naturales. Al asociar los ecosistemas con el paisaje ecológico, se pueden evaluar y determinar los beneficios y servicios que brindan, lo que ayuda a tomar decisiones informadas sobre si es más valioso conservarlos o agotarlos para otros fines.

tendremos una cantidad monetaria, llámese B_t , que indica los beneficios sociales en el período de tiempo dado t de esos servicios. Habrá un flujo de tales beneficios generados por los servicios de los ecosistemas, desde el presente y en el futuro. Debido a que la sociedad está tomando una decisión hoy sobre si preservar o no los ecosistemas, queremos considerar el flujo de beneficios de estos servicios, neto de los costos de mantenimiento de los ecosistemas naturales, en términos de su valor presente. Para ello, cualquier flujo de beneficios netos futuros se descuenta en equivalentes de valor presente neto (VAN). En esencia, estamos tratando a los ecosistemas naturales como un tipo especial de activo de capital, una especie de "riqueza natural", que, al igual que cualquier otro activo o inversión en una economía, es capaz de generar un flujo actual y futuro de ingresos o beneficios. Es decir, independientemente de si existe o no un mercado para los bienes y servicios producidos por los ecosistemas, su valor social debe ser igual al VAN descontado de estos flujos (por ende, se debe utilizar la tasa social de descuento). Antes de continuar, es importante aclarar que cuando se hace referencia a los ecosistemas naturales como un "tipo especial de activo de capital", se está utilizando la metáfora de capital para resaltar su valor y la capacidad de generar beneficios y servicios. Sin embargo, es importante aclarar que la característica "especial" de los ecosistemas naturales radica en su naturaleza intrínsecamente única y no reemplazable. Al considerar a los ecosistemas como activos de capital, no se pretende reducirlos a una mera sustitución de la naturaleza por capital financiero. En cambio, se reconoce que los ecosistemas poseen cualidades y atributos que los hacen únicos y esenciales para el bienestar humano y el funcionamiento de los sistemas naturales. La metáfora de capital se utiliza para resaltar su valor económico y la importancia de gestionarlos adecuadamente. Es fundamental comprender que los ecosistemas naturales no son sustituibles por completo por otros tipos de capital, como el financiero o el humano. La riqueza natural, en su forma de ecosistemas, brinda una serie de beneficios y servicios que no pueden ser replicados de la misma manera por otros activos. Por lo tanto, al considerar el valor social de los ecosistemas, se busca capturar su importancia única y asegurar su gestión sostenible para el beneficio presente y futuro de la sociedad.

Retomando la explicación de en la asignación de paisajes ecológicos entre usos competitivos, es clave afirmar que, en comparación con los activos económicos o financieros convencionales, los activos ambientales están sujetos a problemas especiales de medición⁵. En primer lugar, los ecosistemas son una forma inusual de capital. Al igual que con todas las formas de capital, proporcionan un flujo de servicios. Pero cómo ocurre esto en los ecosistemas es único. Como hemos visto, los ecosistemas comprenden el ambiente abiótico (no vivo) y los grupos bióticos (vivos) de especies de plantas y animales llamadas comunidades. Cuando estos dos componentes de los ecosistemas interactúan, proporcionan un flujo de servicios diversos que benefician a los seres humanos. Por lo tanto, es la producción

5 Se entiende por activos ambientales a los componentes y sistemas naturales que proporcionan una variedad de servicios y beneficios a la sociedad. Estos activos incluyen los ecosistemas en su conjunto, junto con sus componentes bióticos (organismos vivos) y abióticos (elementos no vivos del entorno). Los ecosistemas y sus servicios ecosistémicos se consideran activos ambientales porque generan flujos de beneficios o servicios que contribuyen al bienestar humano

ecológica de servicios ecosistémicos a partir de la estructura y funciones de estos sistemas lo que es la característica clave de estos activos "naturales" (Barbier y Heal, 2006; National Research Council (NRC), 2005; Polasky y Segerson, 2009). Si un ecosistema se deja relativamente intacto, entonces los servicios de flujo de la estructura y las funciones del ecosistema están disponibles en cantidades que no se ven afectadas por la velocidad a la que se utilizan. Aunque al igual que otros activos en la economía, un ecosistema puede aumentarse⁶ mediante la inversión, como a través de actividades de restauración, los ecosistemas también pueden agotarse o degradarse, por ejemplo, a través de la destrucción del hábitat, la conversión de la tierra, los impactos de la contaminación, etc.

Es importante destacar que, si bien es cierto que en cualquier economía una inversión puede generar un flujo de beneficios único, en el caso de los ecosistemas, este flujo se distingue por su naturaleza particular y su relación con la estructura y funciones de dichos sistemas. A diferencia de otras inversiones económicas, donde el flujo de beneficios puede depender principalmente de los insumos y procesos internos, los ecosistemas ofrecen servicios ecosistémicos que emergen de la interacción compleja entre los componentes abióticos y bióticos.

Esta interacción da lugar a un flujo diverso y multifacético de servicios que benefician a los seres humanos. En un ecosistema que se mantiene relativamente intacto, los servicios ecosistémicos fluyen en cantidades que no se ven afectadas por la velocidad de uso. Esto se debe a que los ecosistemas funcionan de manera resiliente y pueden regenerar y proporcionar servicios continuos a lo largo del tiempo. Sin embargo, al igual que otros activos, los ecosistemas también pueden agotarse o degradarse debido a factores como la destrucción del hábitat, la conversión de la tierra o los impactos de la contaminación. Estas acciones humanas pueden comprometer la capacidad de los ecosistemas para mantener y generar servicios ecosistémicos, lo que a su vez afecta el flujo de beneficios asociado.

En segundo lugar, mientras que los servicios de la mayoría de los activos en una economía se comercializan, los beneficios derivados de las funciones reguladoras y de hábitat de los ecosistemas generalmente no lo son. Si la disposición agregada a pagar por estos beneficios, *Bt*, no se revela a través de los resultados del mercado, entonces la gestión eficiente de dichos servicios ecosistémicos requiere métodos explícitos para medir este valor privado social. De hecho, el hecho de no considerar los valores proporcionados por los servicios ecosistémicos clave en las decisiones actuales de política y gestión es una de las principales razones de la desaparición generalizada de muchos ecosistemas y hábitats en todo el mundo (Millennium Ecosystem Assessment (MEA), 2005).

⁶ Aunque es cierto que los ecosistemas en sí mismos no pueden aumentar o disminuir en términos de su tamaño o extensión física, el término "aumentar" se utiliza aquí en el sentido de mejorar o fortalecer las características y funciones de un ecosistema determinado. Cuando mencionamos que un ecosistema puede aumentarse mediante la inversión o actividades de restauración, nos referimos a acciones que se pueden llevar a cabo para mejorar la salud, la biodiversidad y el funcionamiento de un ecosistema particular. Estas acciones pueden incluir la restauración de hábitats degradados, la reintroducción de especies clave, la gestión sostenible de recursos naturales, la reducción de la contaminación, entre otras medidas que promuevan la resiliencia y la capacidad de los ecosistemas para proporcionar servicios ecosistémicos

La expansión global de las poblaciones humanas y la actividad económica es una causa importante de esta desaparición, debido, entre otras cosas, al aumento de la demanda de tierras, la contaminación o la sobreexplotación de los recursos. El hecho de no medir explícitamente la disposición agregada a pagar por servicios ecológicos que de otro modo no serían comercializados exacerba estos problemas, ya que los beneficios de estos servicios están infravalorados (en términos de valor económico) y pueden conducir a una conversión excesiva de la tierra, la fragmentación del hábitat, el abastecimiento, la recolección, el uso del agua y la contaminación causada por la actividad económica comercial emprendida por los seres humanos.

La figura 2 ilustra la dificultad que plantean los desafíos anteriores para la gestión óptima de los paisajes ecológicos. En esta figura, se utiliza el ejemplo de la conversión de un área de paisaje costero X a un desarrollo comercial. En la Figura 2, los beneficios sociales marginales de los servicios ecológicos en cualquier momento t están representados por la línea MB_t para un ecosistema X de un área determinada \bar{A} . A los efectos de la ilustración, se supone que esta línea tiene una pendiente descendente, lo que implica que, por cada kilómetro cuadrado adicional de área de paisaje costero, A , preservada en su estado original, se generarán más beneficios de servicios ecosistémicos, pero en una cantidad decreciente⁷. Tenga en cuenta que es sencillo determinar la disposición agregada a pagar por los beneficios de estos servicios, B_t , a partir de esta línea; es simplemente el área bajo la línea MB_t . Si no hay otro uso para el paisaje ecológico, entonces los costos de oportunidad de mantenerlo son cero y B_t está en su tamaño máximo cuando todo el ecosistema costero se mantiene en su tamaño de área terrestre original \bar{A} . Por lo tanto, la decisión de gestión de los ecosistemas es simple; el paisaje costero debe preservarse completamente y permitirse que proporcione todo su flujo de servicios a perpetuidad. Sin embargo, las presiones demográficas y de desarrollo económico en muchas áreas del mundo generalmente significan que el costo de oportunidad de mantener el paisaje costero no es cero.

La decisión de gestión de ecosistemas debe considerar estos usos de desarrollo alternativo del paisaje costero, que deben incluirse en la Figura 2. Por ejemplo, supongamos que los beneficios sociales marginales de convertir la tierra del ecosistema para estas opciones de desarrollo ahora están representados por una nueva línea MB_t^D (implica que por cada kilómetro cuadrado adicional de área de paisaje costero preservada en su estado original, se generan más beneficios de servicios ecosistémicos en una cantidad cada vez mayor; ésta pendiente creciente refleja la idea de rendimientos marginales crecientes de los servicios ecológicos, debido a efectos sinérgicos y funciones ecológicas clave⁸). El uso eficiente de la

7 El beneficio marginal es el que se agrega o añade cuando consumimos una unidad más de un bien o servicio (en este caso consumimos más servicios ecosistémicos y por ende la satisfacción de la sociedad es menor). La pendiente es decreciente porque a medida que se consumen más unidades, la satisfacción que entrega una unidad más es cada vez más pequeña.

8 Los efectos sinérgicos se refieren que a medida que se preserva un área más grande de un ecosistema costero, se pueden generar interacciones positivas entre los componentes bióticos y abióticos del ecosistema, lo que conduce a un aumento en los servicios ecosistémicos. Por ejemplo, la preservación de un mayor número de hábitats naturales puede promover la diversidad biológica y los procesos de autorregulación, lo que resulta en una mayor productividad y estabilidad del

tierra ahora requiere que $\bar{A}-A_t$ del paisaje costero se convierta para el desarrollo dejando A_t del ecosistema original intacto. Ambos resultados discutidos hasta ahora asumen que la disposición a pagar por los beneficios marginales derivados de los servicios de los ecosistemas costeros, MB_t , se mide o valora explícitamente. Pero si este no es el caso, entonces es probable que estos flujos no comercializados sean ignorados en la decisión sobre el uso de la tierra. Sólo se tendrán en cuenta los beneficios marginales de los productos comercializados por MB_t^D derivados de las actividades de desarrollo económico costero y, como se indica en la figura, esto implica que toda la zona del ecosistema A_t se convertirá para el desarrollo.

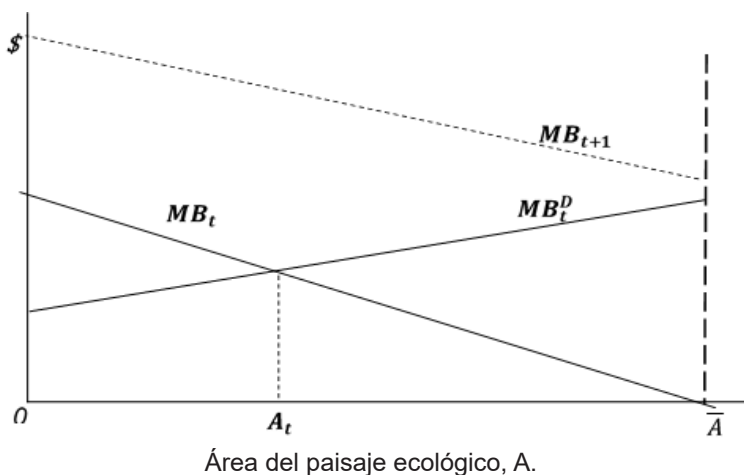
Otro problema es la incertidumbre sobre los valores futuros del paisaje costero. Es posible, por ejemplo, que los beneficios de los servicios de los ecosistemas sean mayores en el futuro a medida que se disponga de más información científica con el tiempo⁹. Por ejemplo, supongamos que en el período posterior $t+1$ se descubre que el valor de los servicios ecosistémicos costeros es en realidad mucho mayor¹⁰, de modo que los beneficios marginales de estos servicios, MB_{t+1} , en términos de valor presente ahora están representados por la línea punteada de la Figura 2. Si los beneficios marginales del valor presente del desarrollo de las zonas costeras en el futuro se mantienen prácticamente sin cambios, es decir, $MB_t^D \approx M_{(t+1)}^D$, entonces, como indica la figura, los beneficios futuros de los servicios ecosistémicos superan estos costos y el paisaje ecológico debe restaurarse a su área original \bar{A} , asumiendo, por supuesto, que es técnicamente factible y no excesivamente costoso hacerlo.

ecosistema. Las funciones ecológicas clave se relaciona con lo siguiente: al preservar un área más extensa de un paisaje costero, se conservan las funciones ecológicas clave que son fundamentales para el suministro de servicios ecosistémicos. Estas funciones pueden incluir la protección contra inundaciones, la filtración del agua, la captura y almacenamiento de carbono y la provisión de hábitats para especies clave. Cuanto más extenso sea el paisaje costero preservado, mayor será la capacidad del ecosistema para desempeñar estas funciones y proporcionar servicios valiosos.

9 Hay que tener en cuenta que no solo se vincula con la ciencia el valor presente del *stock* de capital natural que pretende medir la economía ambiental, la cuestión es definir el costo de oportunidad, es decir la tasa de descuento a utilizar y como opera la tasa en el descuento sobre el flujo de fondos (hay descuentos parabólicos, en dos tramos con tasas diferentes y otras definidas con evaluación multicriterio).

10 O bien la tasa de descuento intergeneracional se considera más baja. En el presente artículo, no se profundizan cuestiones relacionadas a la tasa de descuento, como ser quién la define, cómo se toman las decisiones sobre las generaciones futuras, entre otros elementos.

Figura 2. Conversión del paisaje ecológico al desarrollo



Fuente: Elaboración propia.

Desafortunadamente, al tomar decisiones de desarrollo hoy en día, a menudo no sabemos que, en el futuro, el valor de los servicios de los ecosistemas superará los beneficios para el desarrollo (donde las estimaciones de trabajos sobre cambio climático ayudan a esclarecer, como por ejemplo Belfiori y Rabassa (2021)). Nuestro ejemplo simple muestra que, si ya hemos tomado la decisión hoy de convertir $\bar{A}-A_t$ en el área del paisaje ecológico, entonces tendremos que revertir esta decisión en el período futuro y restaurar el ecosistema costero original.

Tener en cuenta los valores futuros de los servicios ecosistémicos es aún más complicado si el desarrollo actual conduce a la pérdida irreversible del paisaje ecológico o, equivalentemente, la restauración ecológica del paisaje es prohibitivamente costosa. Como señalan Krutilla y Fischer (1975) si los activos ambientales se agotan irreversiblemente, su valor aumentará en relación con el valor de otros activos económicos reproducibles y acumulados. Tal escenario es probable para ecosistemas únicos y sus paisajes que están en suministro fijo y son difíciles de sustituir o restaurar, lo que implica que los servicios beneficiosos proporcionados por sus funciones reguladoras y de hábitat disminuirán con el tiempo a medida que estos activos se conviertan o degraden. Por lo tanto, cualquier decisión hoy en día que conduzca a una conversión irreversible impone un costo de usuario a las personas (de la generación futura) que enfrentan un valor de escasez creciente de futuros beneficios del ecosistema como consecuencia¹¹.

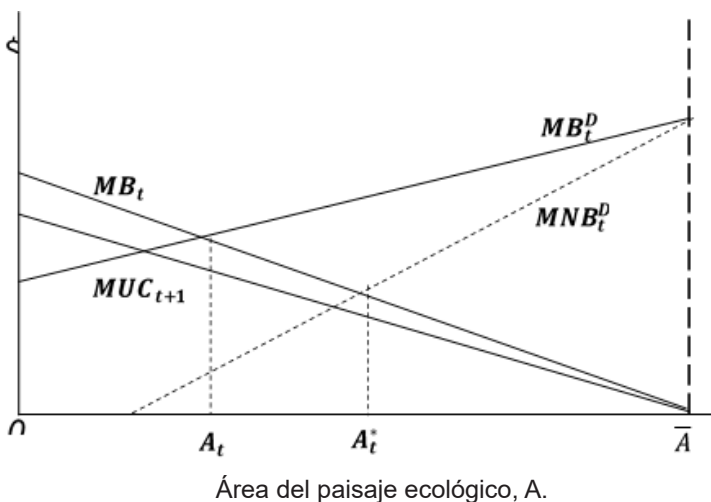
¹¹ Es importante destacar que, si bien en este contexto se hace referencia a los servicios ecosistémicos como beneficios utilizados por las personas, no se pretende equiparar los recursos naturales con bienes muebles durables que se degradan por el uso. La naturaleza y los recursos naturales no se pueden reducir simplemente a la noción de bienes materiales que se consumen o degradan en el proceso de uso. La diferenciación fundamental entre la naturaleza como un bien y los recursos naturales radica en la idea de que los ecosistemas y sus componentes son sistemas complejos, interdependientes y dinámicos. Los ecosistemas no son simplemente objetos de consumo, sino entidades vivas que brindan una amplia gama de servicios esenciales para el bienestar humano y el funcionamiento de los sistemas socioeconómicos. Además, la naturaleza y los

Éste costo para el usuario debe ser parte de un análisis de costo-beneficio de una propuesta de desarrollo, pero rara vez se considera en las decisiones reales de desarrollo del paisaje ecológico. La Figura 3 ilustra el problema adicional de medición derivado de la conversión irreversible de los activos fijos de los ecosistemas. Como en el ejemplo original de la Figura 2, si solo se consideran los beneficios actuales, MB_t y los costos de oportunidad, MB_t^D , de mantener el ecosistema original, entonces se convertiría hoy una cantidad $\bar{A}-A_t$ del área de paisaje ecológico. Pero supongamos que la pérdida de servicios ecosistémicos costeros derivada de la conversión de $\bar{A}-A_t$ hace que el valor de estos servicios aumente. Sin embargo, si la conversión del ecosistema es irreversible, entonces el área del paisaje ecológico permanece en A_t en el período de tiempo $t + 1$. La disminución resultante en el bienestar de los individuos en el futuro es el costo para el usuario de la pérdida irreversible de los servicios de los ecosistemas costeros y marinos debido a la conversión actual. En la Figura 3, el costo marginal de desarrollo para el usuario, medido en términos de valor presente, se representa como la línea recta MUC_{t+1} , que es cero cuando se conserva todo el paisaje ecológico, pero aumenta a medida que se convierte más tierra costera. La decisión correcta sobre el uso de la tierra debe tener en cuenta este costo adicional de la conversión irreversible del ecosistema debido a la expansión del desarrollo de la zona costera en la actualidad. Deduciendo el costo marginal para el usuario de MB_t^D se obtienen los beneficios marginales netos de la opción de desarrollo, MNB_t^D . Esta última (siempre desde el punto de vista de la economía ambiental) es la medida adecuada de los costos de oportunidad de mantener el paisaje ecológico y equipararlo con los beneficios sociales marginales de los servicios ecosistémicos determina la asignación intertemporalmente óptima del paisaje. Sólo $\bar{A}-A_t^*$ de la zona del ecosistema costero debe convertirse para el desarrollo, dejando A_t^* del ecosistema costero original sin perturbaciones.

recursos naturales poseen características únicas, como su suministro fijo y su capacidad limitada de sustitución o restauración en el caso de pérdidas irreversibles. Esto implica que las decisiones que conduzcan a la conversión o degradación irreversible de los activos ambientales imponen costos a largo plazo a medida que los beneficios futuros del ecosistema se vuelven escasos.

Por lo tanto, en este contexto, se hace referencia a los servicios ecosistémicos y su valoración como una forma de reconocer y considerar los beneficios proporcionados por la naturaleza en las decisiones de gestión y desarrollo. No se pretende reducir la naturaleza a la categoría de un bien mueble durable, sino resaltar su importancia y los impactos a largo plazo de las decisiones que afectan a los ecosistemas y sus servicios.

Figura 3. Conversión irreversible del paisaje ecológico al desarrollo



Fuente: Elaboración propia.

Otro problema de la conversión irreversible del paisaje ecológico es que puede aumentar el riesgo de colapso ecológico. Los ecosistemas tienden a mostrar no convexidades manifestadas a través de interacciones de retroalimentación positiva, lo que implica la presencia de umbrales ecológicos¹². Es decir, grandes choques o perturbaciones sostenidas de los ecosistemas pueden poner en marcha una serie de interacciones que pueden romper los umbrales ecológicos que hacen que los sistemas "cambien" de un estado funcional a otro. Aunque es posible bajo ciertas condiciones que el sistema se recupere a su estado original, bajo otras condiciones el cambio podría ser permanente. Por lo tanto, como señalan Dasgupta y Mäler, "si se infligiera un gran daño a un ecosistema cuya capacidad de funcionar está condicionada a que esté por encima de algún nivel umbral (en tamaño, composición o lo que sea), la consecuencia sería irreversible" (2003). La incapacidad de un ecosistema para recuperarse, o volver, a su estado original es esencialmente lo que implica un colapso ecológico. Cada vez más, los ecologistas han identificado la conversión del paisaje ecológico como un tipo de "gran daño" irreversible que puede aumentar la amenaza de colapso del ecosistema (Busing y White, 1993; Dobson, Lodge y Alder, 2006; Lotze, Lenihan y Bourque, 2006; Peterson, Allen y Holling, 1998; Turner, Romme, Gardner, O'Neill y Kratz, 1993).

4. Un modelo básico de activo natural

En este apartado se describen con profundidad las propiedades de los activos naturales de los ecosistemas mediante el desarrollo de un modelo matemático de utilización de la tierra en competencia aplicado a los ecosistemas. Como se dijo anteriormente, si se desea visualizar los ecosistemas como activos económicos, entonces es útil tener una medida de esta riqueza ecológica.

Se sugiere que, al adoptar el paisaje ecológico, o área terrestre, como la unidad

¹² Ver por ejemplo Batabayal, Kahn y O'Neil (2003); Dasgupta y Mäler (2003); Elmqvist, Folke, y Nyström (2003); Holling (1973); Levin (1999); Scheffer, Carpenter, Foley, Folke y Walker (2001).

básica, modelar un ecosistema como un activo natural es relativamente sencillo. Aquí, también se muestra cómo este enfoque facilita la aplicación de modelos de uso de la tierra en competencia al problema de si conservar o desarrollar o no el área restante de un ecosistema. Los modelos integrados de economía-ecosistema en economía también han comenzado a examinar la transformación humana de un paisaje ecológico a través de la conversión del uso de la tierra, dejando la tierra residual para los procesos ecológicos y el hábitat para las especies. Pero mientras que estos modelos integrados se centran en modelar los complejos procesos ecológicos y los efectos de retroalimentación sobre múltiples servicios ecosistémicos que surgen a través de la conversión de la tierra, el enfoque aquí es adoptar un modelo mucho más simple de cambio de uso de la tierra.

Tales modelos de uso competitivo de la tierra se han empleado en muchos contextos para analizar la asignación de la tierra entre usos alternativos¹³. Al aplicar modelos de competencia por el uso de la tierra versus los ecosistemas naturales, el punto de partida es la suposición de que la cantidad de un paisaje ecológico que se conserva debe competir con otros activos en la cartera de propietarios de riqueza en la economía. El área de paisaje restante produce un flujo de servicios ecosistémicos, que tienen valor, pero no se comercializan.

La primera versión del modelo básico considera un desarrollo irreversible del paisaje. La tierra que se convierte y se desarrolla tiene un valor de mercado y la tasa de apreciación de la tierra en espera de desarrollo debe ser igual al costo de oportunidad de la inversión en tierras, que incluiría un ajuste por la relación entre el valor de los servicios ecosistémicos y el valor de capital de la tierra desarrollada. Este modelo básico se extiende al caso de la conversión continua del paisaje ecológico a lo largo del tiempo, teniendo en cuenta los costos de conversión de la tierra y cualquier ganancia de capital de los aumentos en el valor de la tierra no convertida. El modelo se resuelve para mostrar las condiciones bajo las cuales se conserva una cantidad positiva de tierra del ecosistema en lugar de convertirla en uso comercial.

Finalmente, el modelo básico examina el caso de una posible transición ecológica, por la cual se hace tecnológicamente factible restaurar la tierra desarrollada como paisaje ecológico, lo que lleva a una nueva fase de uso de la tierra en la que se aplican estos modelos en áreas como la planificación territorial, la gestión de recursos naturales, la evaluación de impacto ambiental y la economía ambiental. Algunos de los contextos en los que se han implementado estos modelos son: a) la Planificación territorial, donde los modelos de uso competitivo de la tierra son utilizados por planificadores urbanos y regionales para evaluar diferentes escenarios de desarrollo y determinar la asignación óptima de la tierra para usos residenciales, comerciales, industriales, agrícolas y de conservación; b) gestión de recursos naturales, donde modelos son aplicados en la gestión de recursos naturales, como bosques, áreas protegidas y zonas costeras, para evaluar los impactos de diferentes opciones de uso de la tierra y tomar decisiones informadas sobre conservación, extracción de recursos o actividades recreativas. c) evaluación de impacto ambiental, donde en el contexto de la evaluación de impacto ambiental, los modelos de uso competitivo de la tierra son utilizados para prever los posibles cambios en el uso de la tierra debido a proyectos de desarrollo, como infraestructuras, minería o energías renovables y evaluar sus implicaciones en términos de pérdida de hábitat, fragmentación del paisaje y servicios ecosistémicos; por último, d) la economía ambiental, donde estos modelos son empleados por investigadores y economistas ambientales para analizar los *trade-offs* entre diferentes usos de la tierra y evaluar la eficiencia económica de la asignación de recursos naturales. También se utilizan para estudiar el valor económico de los servicios ecosistémicos y su relación con el uso de la tierra.

produce la restauración ecológica.

4.1. Paisaje ecológico

Para ilustrar aún más las propiedades de los activos naturales de los ecosistemas, consideramos el problema más simple del desarrollo único de todo un paisaje ecológico para un uso comercial alternativo. Tal modelo resulta tener propiedades muy similares a las de los primeros modelos económicos de tierras en espera de desarrollo que podrían tener un uso o ingresos provisionales (Arnott y Lewis, 1979; Shoup, 1970) o tierras forestales que se talan una vez para la madera, pero que también producen beneficios no maderables mientras tanto (Hartman, 1976). Sea el área de paisaje inicial de un ecosistema A_0 . Si el paisaje está completamente convertido y desarrollado en su uso más alto y mejor en algún momento futuro t , entonces su valor, expresado en términos de la renta óptima de la tierra desarrollada¹⁴ en ese momento, es $R_{(t)}$. Suponemos que la tierra desarrollada es inicialmente escasa en la economía, tal vez debido a una población grande y creciente en relación con la cantidad de tierra disponible y por lo tanto el valor de arrendamiento de la tierra desarrollada aumenta con el tiempo, es decir, $R'_{(t)} > 0$. Pero a medida que se produce una conversión de tierras cada vez mayor en toda la economía y debido a que inicialmente se utiliza primero la tierra de mejor calidad para el desarrollo, $R''_{(t)} < 0$. Además, hasta que el paisaje ecológico se convierta en el momento t , produce un flujo de servicios ecosistémicos o beneficios. Denote el valor de estos beneficios en cada período de tiempo i como $B_{(i)}$, que comienzan durante el período actual 0 y terminan en el momento del desarrollo t . De ello se deduce que el valor actual del paisaje en el tiempo 0 es

$$(3.1) \quad V(t) = \text{Max}_t \left[R(t)e^{-rt} + \int_0^t B(i)e^{-ri} di \right]$$

La fecha óptima de desarrollo, t , se determina como

$$(3.2) \quad e^{-rt} [R'(t) - rR(t) + B(t)] = 0 \rightarrow R'(t) + B(t) = rR(t)$$

En la ecuación (3.2) $R'_{(t)} + B_{(t)}$ representa la ganancia de retrasar el desarrollo un período. Incluye el aumento en el valor de arrendamiento de la tierra desarrollada más los beneficios adicionales del ecosistema durante ese período de retraso. El término $rR_{(t)}$ representa el costo de retrasar el desarrollo. El valor de la tierra, si se vende en el período t , podría invertirse para obtener un ingreso por intereses. La tasa de interés promedio de otros activos en la economía es claramente clave para el costo de oportunidad de retrasar el desarrollo otro período. Una tasa de interés más alta significa que es costoso retrasarla, mientras que la tasa de interés más baja

¹⁴ En el contexto de este modelo, el término “tierra desarrollada” se refiere a la porción del paisaje ecológico original que ha sido convertida y utilizada para un uso comercial alternativo. Cuando hablamos de desarrollar la tierra, nos referimos a transformarla de su estado natural en un estado modificado para cumplir con ciertos fines económicos o comerciales. En el caso del modelo presentado, el desarrollo de la tierra implica su conversión completa y utilización para un uso comercial que se considera el más alto y mejor en términos de rentabilidad económica en un momento futuro específico. Esta conversión puede implicar actividades como construcción de infraestructuras, urbanización, agricultura intensiva u otros usos económicos que generen ingresos o beneficios.

tiene el efecto contrario. Por lo tanto, aunque muy básica, la condición (3.2) muestra cómo los rendimientos de aferrarse a los ecosistemas como un activo natural se pueden comparar con la tasa de rendimiento de otros activos en la economía. La condición (3.2) también se puede escribir de la manera más familiar

$$(3.3) \quad \frac{R'(t)}{R(t)} = r - \frac{B(t)}{R(t)}$$

El desarrollo debe tener lugar cuando la tasa de cambio del valor de desarrollo de la tierra, $R'(t)/R(t)$, es igual a la tasa de interés, r , menos la relación entre los flujos de beneficios del ecosistema por período de tiempo del paisaje ecológico y el valor de desarrollo de la tierra. Dado que la tasa de crecimiento del valor de arrendamiento de la tierra desarrollada es inicialmente alta, pero disminuye con el tiempo, la condición (3.3) indica que la tasa de interés neta o efectiva es clave para la decisión de posponer o no el desarrollo un período adicional. Con beneficios positivos para el ecosistema, $B(t)/R(t) > 0$, la tasa de interés efectiva es menor que la tasa de mercado, lo que implica que el paisaje ecológico debe desarrollarse cuando la tasa de crecimiento en su valor es menor que r y por lo tanto el desarrollo debe retrasarse. Por lo tanto, los beneficios de los ecosistemas son de importancia crítica para la decisión óptima de desarrollo del paisaje. Cuando los beneficios son grandes, el desarrollo puede no ser óptimo en absoluto ¹⁵. Primero, como $B(t) \rightarrow \infty$, entonces el problema (3.1) es convexo y no hay una condición factible de primer orden para el momento óptimo para el desarrollo. Sin embargo, los beneficios de los ecosistemas no tienen que ser tan grandes para que el desarrollo se retrase indefinidamente. A partir de (3.2), si $R'(t) + B(t) > rR(t)$ para todo t , entonces las ganancias de retrasar el desarrollo siempre superan los costos y el paisaje ecológico no debe desarrollarse. Finalmente, si existe una solución para el momento óptimo para el desarrollo, también debe satisfacer la condición de segundo orden $R''(t) + B'(t) < rR'(t)$. Si los beneficios de los ecosistemas aumentan rápidamente con el tiempo, tal vez porque el rápido desarrollo en otras partes de la economía ha hecho que tales servicios ecosistémicos sean escasos, entonces esta condición podría no cumplirse y no hay solución para (3.1). Una vez más, el desarrollo del paisaje ecológico no debería ocurrir.

Por lo tanto, valorar los servicios de los ecosistemas, así como los cambios en este valor a lo largo del tiempo, es importante para determinar el momento óptimo para desarrollar el paisaje ecológico, así como si el desarrollo debe tener lugar o no en cualquier momento. Como indica la condición (3.3), el hecho de no valorar en absoluto los beneficios de los ecosistemas equivale a suponer que los ecosistemas no son activos naturales (o bien, que no son sustituibles por capital). Su único valor

¹⁵ El desarrollo de la tierra debe ocurrir cuando la tasa de cambio del valor del desarrollo de la tierra es igual a la tasa de interés, menos la proporción entre los beneficios que se obtienen del ecosistema por período de tiempo y el valor de desarrollo de la tierra. En otras palabras, para decidir si se debe desarrollar la tierra o no, se compara cómo está cambiando su valor con la tasa de interés. Si el valor de desarrollo de la tierra está creciendo más rápido que la tasa de interés, entonces es beneficioso desarrollarla. Sin embargo, también se considera la relación entre los beneficios que se obtienen del ecosistema y el valor de desarrollo de la tierra. Si los beneficios del ecosistema son altos en comparación con el valor de desarrollo de la tierra, puede ser más óptimo posponer el desarrollo.

es como fuente potencial de suelo urbanizable y la decisión de desarrollo depende únicamente de comparar el crecimiento del valor del arrendamiento con la tasa de interés del mercado. El desarrollo ecológico del paisaje tendrá lugar demasiado pronto, si es que se produce.

4.2. Conversión continua de un paisaje ecológico

Aunque el paisaje ecológico de un ecosistema podría convertirse completamente a través del desarrollo único, un escenario más probable es que el paisaje esté sujeto a una conversión continua pero irreversible a la tierra utilizada en actividades de desarrollo económico. Aquí, se demuestra que este problema se puede analizar fácilmente mediante el empleo de un modelo de competencia en la utilización de la tierra, que se ha utilizado en muchos contextos para analizar la asignación de la misma entre usos alternativos (Amacher, Ollikainen y Koskela, 2009; Barbier y Burgess, 1997; Barbier, Damania y Léonard, 2010; Benhin y Barbier, 2001; Crocker, 2005; Hartwick, van Long y Tian, 2001).

En la siguiente versión del problema, se supone que la decisión de conversión de tierras es efectivamente irreversible porque, una vez que el paisaje ecológico se convierte en otro uso de la tierra, el costo de restaurar el paisaje es técnicamente inviable o prohibitivamente costoso en relación con los beneficios ecosistémicos obtenidos. Más adelante en esta sección, esta condición se modifica para permitir la posibilidad de una futura restauración del paisaje ecológico. Sea $A_{(t)}$ el área del paisaje de un ecosistema en el tiempo t y $A_{(0)}=A_0$ es el área paisajística inicial. Si $c_{(t)}$ es el área de paisaje ecológico convertida en cada período en una actividad de desarrollo, entonces

$$(3.4) \quad A(t) = A_0 - \int_0^t c(s)ds \text{ and } \dot{A} = -c(t)$$

De ello se deduce que, si $D_{(t)}$ es el área de uso del suelo en la actividad de desarrollo y $D_{(0)} = D_0$ es el área de suelo urbanizada inicial, entonces

$$(3.5) \quad D(t) = D_0 + \int_0^t c(s)ds \text{ and } \dot{D} = c(t)$$

El ecosistema produce un flujo de bienes y servicios, o beneficios, que varían en todo el paisaje. Sea $B(A_{(t)})$ el flujo periódico de servicios ecosistémicos del área de paisaje restante. Estos beneficios varían de forma no lineal en todo el panorama, de modo que $\partial B(\partial A_{(t)}) > 0$, $(\partial^2 B)/\partial A_{(t)}^2 < 0$. La tierra desarrollada también es heterogénea en calidad. Sea R la renta periódica asociada a la tierra urbanizada. Si la decisión de conversión es racional, entonces la tierra de mayor calidad se asigna primero al desarrollo y la renta diferencial variará con la calidad de la tierra; es decir, hay rendimientos marginales decrecientes (renta) al aumento en el stock de tierras desarrolladas, $R(D_{(t)})$, $\partial R/\partial D_{(t)} > 0$, $\partial^2 R/\partial D_{(t)}^2 < 0$. Sin embargo, las condiciones (3.4) y (3.5) indican que $D_{(t)} = D_0 + A_0 - A_{(t)}$. Esta última expresión implica a su vez que las rentas de la tierra desarrollada pueden reescribirse como $R(A_{(t)})$, $\partial R/\partial t < 0$. Si C son los costos de conversión, entonces más conversión horizontal aumenta estos

costos, es decir, $C(c_{(t)}), \partial C / \partial c_{(t)} > 0, \partial^2 C / \partial c_{(t)}^2 > 0$. También se supone que $C_{(0)} = C'_{(0)} = 0$. El tomador de decisiones que determina el uso del paisaje puede maximizar el valor presente de los rendimientos netos de la tierra, V , eligiendo niveles óptimos de tierra para convertir, $c_{(t)}$

$$(3.6) \quad \text{Max } V_{c(t)} = \int_0^{\infty} [R(D) - C(c) + B(A)] e^{-rt} dt$$

sujeto a (3.4) y (3.5). Sin embargo, si se utiliza las sustituciones sugeridas anteriormente en la expresión de alquiler de tierras desarrolladas, entonces el valor actual Hamiltoniano del problema es

$$H = R(A) - C(c) + B(A) - \mu c$$

Donde μ es el valor sombra del paisaje ecológico¹⁶. Dos de las condiciones de primer orden del problema son

$$(3.7) \quad \frac{\partial H}{\partial c} = 0 \rightarrow \mu = -C'(c)$$

$$(3.8) \quad -\frac{\partial H}{\partial A} = \dot{\mu} - r\mu \rightarrow \dot{\mu} = r\mu - B'(A) - R'(A).$$

Combinando (3.7) y (3.8) se obtiene

$$(3.9) \quad \begin{aligned} -B'(A) - R'(A) &= \dot{\mu} + rC_c \rightarrow -R'(A) - rC'(c) \\ &= R'(D) - rC'(c) = B(A) + \dot{\mu} \end{aligned}$$

Donde $-R'_A = R'_D$ es la renta periódica anual derivada del uso de la tierra desarrollada. La condición (3.9) indica que, a lo largo del camino óptimo de conversión del paisaje, los rendimientos de los dos usos de la tierra en competencia deben ser iguales.

¹⁶ El término "valor sombra" se utiliza en economía para referirse al valor económico de un recurso o bien que no se comercializa en el mercado. Es el valor implícito o indirecto que tiene un recurso en función de los beneficios o servicios que proporciona. En el contexto del paisaje ecológico mencionado, el "valor sombra del paisaje ecológico" se refiere al valor económico de los servicios ecosistémicos o beneficios que se obtienen del paisaje, pero que no se intercambian en el mercado. Estos servicios ecosistémicos pueden incluir la purificación del agua, la protección contra inundaciones, la polinización de cultivos, el hábitat para especies, entre otros. El valor sombra del paisaje ecológico refleja la importancia económica de estos servicios no comerciales y se tiene en cuenta al tomar decisiones sobre el desarrollo de la tierra. Se compara con el valor de desarrollo de la tierra para evaluar si es más beneficioso conservar el paisaje ecológico y mantener los servicios ecosistémicos o desarrollar la tierra para otros usos económicos.

Los beneficios marginales del desarrollo menos los costes de conversión $R'(D) - rC'(c)$ deben ser iguales al beneficio marginal de aferrarse al paisaje ecológico $B'(A) + \mu$. Nótese que (3.9) también se puede reescribir como

$$-\mu(t) = \frac{R'(D)}{r} - \frac{B'(A)+\mu}{r} = C'(c)$$

La diferencia entre el valor marginal capitalizado de la tierra desarrollada y la tierra retenida como paisaje ecológico es el costo marginal de convertir el paisaje. Denote P como el "precio", o valor de capital, de la tierra que está asociada con cada uno de estos respectivos valores de uso de la tierra capitalizados, entonces

$$(3.10) \quad \frac{R'(D)}{r} - \frac{B'(A)+\mu}{r} = P(D(t)) - P(A(t)) = C'(c)$$

La diferencia en los precios de la tierra entre la tierra desarrollada y la ecológica es el costo marginal de convertir una unidad del paisaje ecológico en tierra desarrollada. En el estado estacionario a largo plazo, $A = \mu = 0$. De (3.4) y (3.7) se desprende que tanto la conversión del paisaje como el valor marginal de una unidad adicional de paisaje ecosistémico se acercan a cero asintóticamente, es decir,

$$c = 0 \text{ y } \lim_{t \rightarrow \infty} \mu(t) = C_c(0) = 0$$

La brecha entre los precios de la tierra desaparecerá, $P(D(t)) = P(A(t))$ y el área de paisaje del ecosistema convergerá a un nivel de estado estacionario A^* . Suponga que el área de paisaje ecológico inicial es grande $A_{(0)} > A^*$. Desde (3.7), a lo largo de la ruta de transición al estado estacionario a largo plazo, el valor marginal de una unidad adicional de paisaje ecosistémico es negativo $\mu < 0$. Inicialmente, la conversión óptima del paisaje c es muy grande, lo que refleja el hecho de que la tierra desarrollada es relativamente escasa en comparación con el paisaje ecológico y esencialmente valorada como una "reserva" para ser convertida en tierra desarrollada. Pero debido a que el área inicial del paisaje es grande, el valor marginal de los servicios ecosistémicos de ese paisaje $B'(A)$ es muy bajo, mientras que la renta marginal obtenida del uso de la tierra desarrollada $R'(D)$ es extremadamente alta. El resultado es que el valor en la sombra del paisaje ecológico $\mu(t)$ está aumentando con el tiempo. De hecho, dado que $A_{(0)} > A^*$, a lo largo del camino óptimo hasta que se alcanza el estado estacionario, $\mu(t)$ continúa subiendo y c bajando. Formalmente, a partir de la condición necesaria (3.7)

$$(3.11) \quad \partial \mu = -C''(c) \partial c \rightarrow \frac{\partial c}{\partial \mu} = -\frac{1}{C''(c)} < 0$$

lo que implica que (3.4) se puede escribir como $A = -c(\mu)$ y confirma que, a medida que el valor de sombra del paisaje ecológico se vuelve menos negativo con el tiempo, la conversión óptima de la tierra cae. La pendiente del sendero óptimo es

$$(3.12) \quad \frac{\partial \mu}{\partial A} = \frac{\dot{\mu}}{\dot{A}} = \frac{r\mu - B'(A) - R'(A)}{-c(\mu)} < 0$$

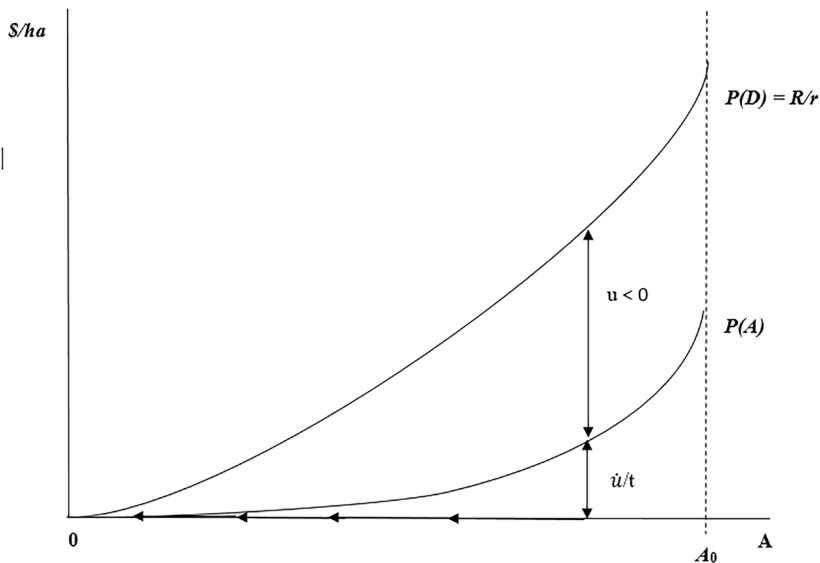
lo que verifica que, aunque inicialmente el paisaje ecológico es muy grande, a medida que avanza la conversión de tierras y A cae, el valor de sombra del paisaje se vuelve menos negativo. El camino óptimo para la conversión del paisaje ecológico se representa en la Figura 4.

Sin embargo, como se discutió anteriormente, el problema para el tomador de decisiones que determina el uso del paisaje es que los mercados no tienen en cuenta el valor de los servicios ecosistémicos de no mercado, por lo que típicamente $B'(A) = 0$ en la mayoría de las decisiones de uso de la tierra. Si ese es el caso, el único valor del paisaje ecológico es como una "reserva" de tierra desarrollada. La tierra se desarrollará hasta que a la larga todo el paisaje se convierta $A^* = 0$ y $D^* = A_0$ y el valor capitalizado de la tierra sea cero,

$$R' \frac{D^*}{r} = \frac{\dot{\mu}}{r} = P(D^*) = 0$$

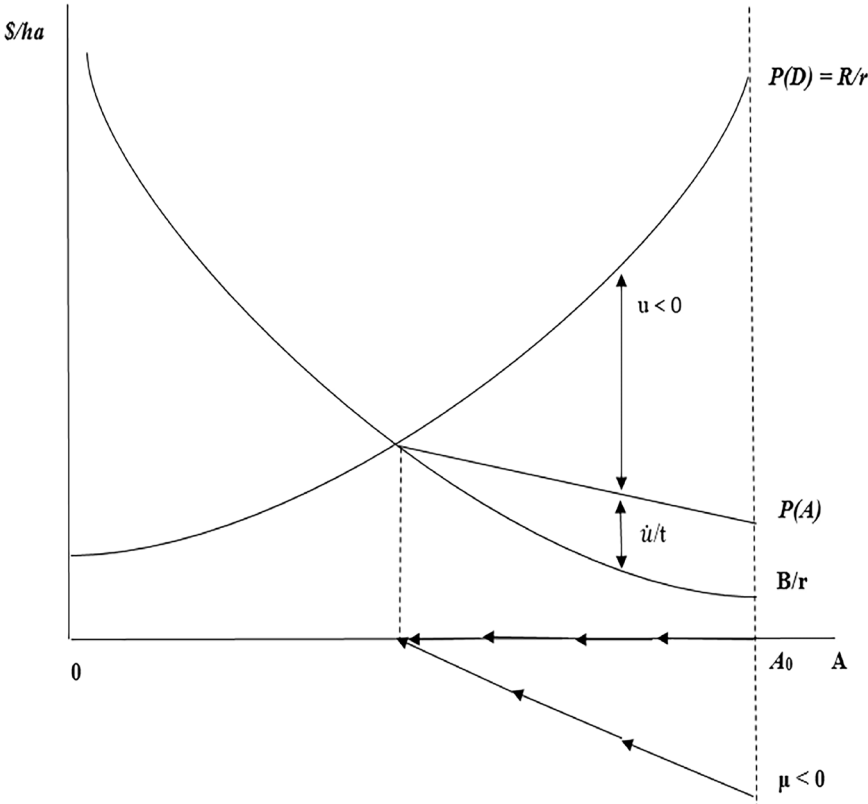
este resultado se muestra en la Figura 5.

Figura 4. Conversión óptima del paisaje en el modelo básico



Fuente: Elaboración propia

Figura 5. Conversión del paisaje cuando los servicios ecosistémicos son ignorados



Fuente: Elaboración propia.

5. Conclusión

Este artículo utilizó un modelo de competencia de utilización de la tierra para desarrollar el análisis de un ecosistema como un activo natural. Se desarrollaron dos versiones de este modelo básico de activos naturales de un paisaje ecológico. La primera versión consideró un desarrollo irreversible del paisaje por una sola vez. Este modelo mostró que los beneficios del ecosistema son de importancia crítica para la decisión óptima de transformación del paisaje. Si estos beneficios son lo suficientemente grandes, es posible que el desarrollo no sea óptimo en absoluto. Además, si los beneficios de los ecosistemas aumentan rápidamente con el tiempo, tal vez porque la conversión acumulativa de los ecosistemas a lo largo de una economía ha hecho que sus servicios sean más escasos, entonces no debería ocurrir la transformación del paisaje ecológico. Este modelo básico respalda que la valoración de los servicios ecosistémicos, así como los cambios en este valor a lo largo del tiempo, no solo influye en el momento óptimo para modificar el paisaje

ecológico, sino que también determina si la transformación debe llevarse a cabo o no. Si bien el paisaje de un ecosistema puede convertirse por completo mediante una sola transformación, un escenario más probable es que el paisaje esté sujeto a una conversión continua pero irreversible en tierras utilizadas en actividades económicas.

La segunda versión del modelo básico de activos naturales explora este problema con más detalle. Una vez más, tener en cuenta los servicios de los ecosistemas resulta crucial para la decisión de modificar o conservar el paisaje ecológico restante. Dado que los mercados no tienen en cuenta el valor de muchos servicios ecosistémicos no comerciales, es muy probable que los responsables de la formulación de políticas también ignoren este valor. Como resultado, el paisaje ecológico restante será considerado únicamente como una "reserva" de tierra ya desarrollada, lo que implicará que la transformación del paisaje para el desarrollo continuará hasta que todo el paisaje se haya convertido a largo plazo. Incluso si solo se consideran unos pocos beneficios de los servicios ecosistémicos, la conversión óptima del paisaje a largo plazo será excesiva. Sin embargo, incluso si los beneficios de los ecosistemas son relativamente pequeños a corto plazo, posiblemente debido a la abundancia inicial de hábitats y ecosistemas naturales, la valoración adecuada de estos beneficios puede conducir eventualmente a una transición ecológica. Es decir, a medida que avanza la transformación y desaparece el paisaje ecológico, la escasez ecológica asegura que los servicios de los ecosistemas se vuelvan más valiosos con el tiempo.

Referencias bibliográficas

- Amacher, G., Ollikainen, M. y Koskela, E. (2009). *Economics of Forest Resources*. Cambridge, EEUU: MIT Press.
- Arnott, R. y Lewis, F. (1979). The transition of land to urban use. *Journal of Political Economy*, (87), 161-169.
- Barbier, E. y Burgess, J. C. (1997). The economics of tropical forest land use options. *Land Economics*, (73), 174-195.
- Barbier, E. y Heal, G. (2006). *Valuing ecosystem services*. The Economist' Voice 3. www.bepress.com/ev/vol3/iss3/art2
- Barbier, E., Damania, R. y Léonard, D. (2010). The forest transition: towards a more comprehensive theoretical framework. *Land Use Policy*, (27), 98-107.
- Batabayal, A., Kahn, J. y O'Neil, R. (2003). On the scarcity value of ecosystem services. *Journal of Environmental Economics and Management*, (46), 334-352.
- Belfiori, M. y Rabassa, M. (2021). *The Economics of Climate Change in Argentina*. Buenos Aires, Argentina: Springer.

- Benhin, J. K. y Barbier, E. B. (2001). Agricultural and Resource Economics Review. *The effects of the structural adjustment program on deforestation in Ghana*, (30), 66-80.
- Bockstael, N. (1996). Modeling economics and ecology: the importance of a spatial perspective. *American Journal of Agricultural Economics*, (78), 1168-1180.
- Brock, W. y Xepapadeas, A. (2002). Optimal ecosystem management when species compete for limiting resources. *Journal of Environmental Economics and Management*, (44), 189-220.
- Busing, R. y White, P. (1993). Effects of area on old-growth forest attributes: implications for equilibrium landscape concept. *Landscape Ecology*, (8), 119-126.
- Crocker, T. (2005). Markets for conserving biodiversity habitat: principles and practice. En Shogren, J., *Species at Risk: Using Economic Incentives to Shelter Endangered Species on Private Lands* (pp. 191-215). Austin, EEUU: University of Texas Press.
- Daily, G. (1997). *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington, EEUU: Island Press.
- Daily, G., Söderqvist, S. y Aniyar, S. (2000). The value of nature and the nature of value. *Science*, (289), 395-396.
- Dasgupta, P. y Mäler, K. (2003). The economics of non-convex ecosystems: an introduction. *Environmental and Resource Economics*, 502(26), 499-525.
- Dobson, A., Lodge, D. y Alder, J. (2006). Habitat loss, trophic collapse, and the decline of ecosystem services. *Ecology*, (87), 1915-1924.
- Eichner, T. y Pethig, R. (2006). Economic land use, ecosystem services and microfunded species dynamics. *Journal of Environmental Economics and Management*, (52), 707-720.
- Elmqvist, T., Folke, C. y Nyström, M. (2003). Response diversity, ecosystem change, and resilience. *Frontier in Ecology and the Environment*, 488-494.
- Environmental Protection Agency. (2009). Valuing the Protection of Ecological Systems and Services. *A Report of the EPA Science Advisory Board*. Washington, EEUU: EPA.
- Finnoff, D., Strong, A. y Tschirhart, J. (2008). A bioeconomic model of cattle stocking on rangeland threatened by invasive plants and nitrogen deposition. *American Journal of Agricultural Economics*, 1074-1090.
- Hartman, R. (1976). The harvesting decision when the standing forest has value. *Economic Inquiry*, (14), 52-58.

- Hartwick, J., van Long, N. y Tian, H. (2001). Deforestation and development in a small open economy. *Journal of Environmental Economics and Management*, (41), 235-251.
- Holling, C. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecological Systems*, (4), 1-23.
- Krutilla, J. y Fischer, A. (1975). *The Economics of Natural Environments: Studies in the Valuation of Commodity and Amenity Resources*. Washington, EEUU: Resources for the Future.
- Levin, S. (1999). *Fragile Dominion: Complexity and the Commons*. Reading, MA: Perseus Books.
- Lotze, H., Lenihan, H. y Bourque, B. (2006). Depletion, degradation and recovery potential of estuaries and coastal seas. *Science*, (312), 1806-1809.
- Millennium Ecosystem Assessment (MEA). (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends*. Washington, EEUU: Island Press.
- National Research Council (NRC). (2005). *Valuing Ecosystem Services: Toward Better Environmental Decision Making*. Washington, EEUU: The National Academies Press.
- Odum, E. P. (1975). *Ecology*. Nueva York, EEUU: Holt Rinehart and Winston.
- O'Neill, R. (2001). Is it time to bury the ecosystem concept? (With full military honors, of course!). *Ecology*, (82), 3275-3284.
- Perry, G. (2002). Landscapes, space and equilibrium: shifting viewpoints. *Progress in Physical Geography*(26), 339-359.
- Peterson, G., Allen, C. y Holling, C. (1998). Ecological resilience, biodiversity and scale. *Ecosystems*, (1), 6-18.
- Pickett, S. y Cadenasso, M. (2002). Landscape ecology: spatial heterogeneity in ecological systems. *Science*, (269), 331-334.
- Polasky, S. y Segerson, K. (2009). Integrating ecology and economics in the study of ecosystem services: some lessons learned. *Annual Review of Resource Economics*, 1, 409-434.
- Scheffer, M., Carpenter, J., Foley, J., Folke, C., yWalker, B. (2001). *Nature*, (413), 591-596.
- Shoup, D. (1970). The optimal timing of urban land development. *Papers of the Regional Science Association*, (25), 33-44.
- Tansley, T. (1935). The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology*,

(16), 291-310.

TEEB. (2009). *The Economics of Ecosystems and Biodiversity*. Bonn, Alemania: TEEB-UNEP.

Tschirhart, J. (2000). General equilibrium of an ecosystem. *Journal of Theoretical Biology*, (203), 13-32.

Turner, M. (2005). Landscape ecology: what is the state of the science? *Annual Reviews of Ecological and Evolutionary Systems*, (36), 319-344.

Turner, M., Romme, W., Gardner, R., O'Neill, R., yKratz, T. (1993). A revised concept of landscape equilibrium: disturbance and stability on scaled landscapes. *Landscape Ecology*, (8), 213-227.