



DOCUMENTO

ECOSISTEMAS: CONCEPTOS FUNDAMENTALES

*Unidad Conjunta CEPAL/PNUMA
de Desarrollo y Medio Ambiente*

A insuficiência de considerações ambientais na formulação de projetos de desenvolvimento na América Latina e no Caribe é notória, em especial nos anos recentes. Invariavelmente esta carência acaba por favorecer o desencadeamento de processos indesejáveis de destruição e degradação do ambiente, impossibilitando o alcance dos objetivos traçados e, em situações extremas, determinando o fracasso de tais projetos. No caso específico dos projetos de desenvolvimento agrosilvopastoril, a realidade é semelhante, o que reforça a necessidade de consolidação de certos princípios fundamentais da ciência ecológica.

El ecosistema

Definición

En la literatura hay diversas definiciones de ecosistema. La de Nava, Armijo y Gastó es práctica y clara, por lo que se adopta en este trabajo.¹ Para dichos autores el ecosistema es un conjunto de componentes bióticos (vivos) y abióticos (inertes) conectados o relacionados de tal manera que constituyen un todo. La conexión entre los componentes implica transferencia de materia, energía e información. La de los dos primeros elementos es relativamente fácil de visualizar: por ejemplo, el flujo de energía solar a través de las plantas, los herbívoros, los carnívoros y los descomponedores. No sucede lo mismo con la transferencia de información, que es un concepto más complicado. La información se entiende aquí como el orden u organización de la materia y la energía en el ecosistema. Un ejemplo de transferencia de información entre los componentes de un ecosistema es el intercambio genético entre individuos de una misma especie. Este mecanismo permite el desarrollo de dos procesos esenciales en la naturaleza: la evolución y la especiación. Otro ejemplo útil es el siguiente. Un bosque tropical lluvioso tiene mayor diversidad y complejidad y, por ende, mayor contenido de información que una plantación forestal de una sola especie. Si se construyera un modelo que simulara la productividad total de ambos ecosistemas, la parte relativa a la plantación forestal sería mucho más simple y requeriría de menos unidades byte de información en un computador que la correspondiente al bosque tropical.

El ecosistema como modelo

El concepto de ecosistema es útil en la práctica en cuanto se le concibe como un modelo que incluye los tres elementos de la definición adoptada: componentes bióticos y abióticos, que se relacionan unos con otros y constituyen una unidad o un todo.

El ecosistema así entendido puede ser de distintos tamaños. Es posible concebir un potrero, un predio, una represa, una cuenca hidrográfica, una provincia, un país, un conjunto de países y hasta el planeta en su conjunto como modelos y estudiarlos como ecosistemas. El tamaño mínimo de un ecosistema es aquel que permite la permanencia de los elementos básicos que lo constituyen.²

En la comprensión del ecosistema como un modelo es importante considerar que ninguno es completamente independiente. Todos están conectados con otros sistemas por medio del intercambio de materia, energía e información.³

Entre los distintos tipos de modelo planteados para el ecosistema resultan particularmente útiles los llamados de "caja negra". Según éstos el ecosistema semeja una caja a la cual entran distintos estímulos (entradas o inputs) y salen diversas respuestas (salidas o outputs).⁴ Las entradas y salidas del ecosistema adoptan la forma de materia, energía e información. La última es un componente de los estímulos y las respuestas, por cuanto

¹NAVA, R. ARMIJO, R. y GASTÓ, J. *Ecosistema, la unidad de la naturaleza y el hombre*. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Serie de Recursos Naturales, Saltillo, México, 1979.

²GASTÓ, J. Bases ecológicas para la modernización de la agricultura, en SUNKEL, O. y GLIGO, N. (comps.), *Estilos de desarrollo y medio ambiente en América Latina*. Fondo de Cultura Económica, Lecturas núm. 36, México, 1980.

³GASTÓ, J. Op. cit.

⁴NAVA, R. ARMIJO, R. y GASTÓ, J. Op. cit.

la materia y la energía que entran y salen del sistema tienen cierto grado de organización o contenido de información.

Para ilustrar los modelos de caja negra conviene dar el ejemplo de un cultivo de maíz. En este caso los estímulos serían la radiación solar, el agua de la lluvia y el riego, y todos los insumos proporcionados por el hombre (fertilizantes, plaguicidas, etc.). La principal respuesta de este agrosistema sería el maíz (grano y forraje). Sin embargo, puede haber otras respuestas menos evidentes, como los nutrientes que se pierden por lixiviación, las partículas de suelo que se pierden por erosión, etc.

Dentro de la caja negra hay dos atributos fundamentales que definen el estado de un ecosistema en un momento determinado. Uno es la arquitectura o aspecto anatomo-morfológico del ecosistema, vale decir, cuáles son sus componentes bióticos y abióticos, y cómo se organizan en el espacio. El otro es el funcionamiento del ecosistema, su fisiología, o cómo ocurren el transporte y la transformación de materia, energía e información.⁵ ¿Cuál es la relación entre estos dos atributos? El funcionamiento del ecosistema está determinado por su arquitectura. De esta forma, las respuestas del ecosistema dependen de su arquitectura y de los estímulos recibidos.

Sucesiones ecológicas

En ecología era común considerar a los estados maduros o el clímax del ecosistema como fases estáticas, en las que los distintos componentes se encontraban en un equilibrio perfecto. También el de sucesiones se veía como un proceso determinístico (no probabilístico). En él, los ecosistemas evolucionarían gradualmente con el paso del tiempo, desde estados pioneros hasta estados clímax, pasando por diversas etapas intermedias. Así, cualquier perturbación natural (erupciones volcánicas, deslizamientos de tierra, huracanes, etc.) o antrópica (incendios antrópicos, pastoreo, madereo, etc.) se veía como un accidente que desviaba el ecosistema de su marcha inexorable hacia el clímax, o bien que destruía este último. En años recientes ha surgido un nuevo paradigma ecológico que plantea las sucesiones como un proceso probabilístico que pretende incorporar las perturbaciones a la comprensión de la dinámica de los ecosistemas. Ha surgido así o concepto de *régimen de perturbación*, definido como la distribución de las perturbaciones en el espacio y en el tiempo.⁶ Dicho régimen está caracterizado por ciertos parámetros, como área, distribución espacial, frecuencia y predictibilidad de cada clase o tipo de perturbación (por ejemplo incendios, deslizamientos de tierra, etc.).⁷ El conocimiento de estos parámetros es de gran importancia para entender la dinámica de los ecosistemas en un área determinada y debería considerarse en la planificación del uso de los recursos. En América Latina hay estudios de la dinámica de los ecosistemas en función de perturbaciones reiteradas. Entre ellos cabe mencionar los que relacionan la dinámica de los bosques del sur de Chile con la ocurrencia de deslizamientos

⁵NAVA, R. ARMIJO, R. y GASTÓ, J. Op. cit.

⁶PICKETT S.T.A. y WHITE P.S., Natural Disturbance and Patch Dynamics: an introduction, en S.T.A. PICKETT y P. S. WHITE (eds.). *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics*. Academic Press, Nueva York, 1985.

⁷PICKETT S.T.A. y WHITE P.S. Op. cit.

⁸VEBLEN, T.T. y ASHTON, D.H. Catastrophic Influences on the Vegetation of the Valdivian Andes, Chile, en *Vegetation*, núm. 36, 1978, pp. 149-167; VEBLEN, T.T.; DONOSO, C.; SCHLEGEL F.M. y ESCOBAR, R.B. Forest Dynamics in South-Central Chile, en *Journal of Biogeography*, núm. 8, 1981, pp. 211-247, y VEBLEN, T.T. Stand Dynamics in Chilean Nothofagus Forests, en PICKETT S.T.A. y WHITE, P.S. (eds.). *The Ecology of Natural Disturbance...*, Op. cit., pp. 35-51.

de tierra ocasionados por terremotos⁸ y los de los Andes Norpatagónicos de Argentina en que se incluyen perturbaciones por incendios.

En años recientes, se considera que los estados más evolucionados del ecosistema se encuentran en equilibrio dinámico, por lo que resulta más apropiado denominarlos ecosistemas maduros o en condición estable (steady state), en lugar de tratarlos como si estuvieran en clímax.

Estabilidad y resiliencia

No todas las perturbaciones alteran los parámetros del ecosistema. Dicho de otra forma, los sistemas ecológicos tienen cierta capacidad para persistir a pesar de las perturbaciones externas. Para definir esta capacidad del ecosistema se han propuesto los siguientes términos: estabilidad, resistencia y resiliencia. Los dos primeros se refieren a la capacidad del ecosistema de “absorber” ciertas perturbaciones y permanecer inalterado. Así, la estabilidad de un bosque abierto de latifoliadas ante un incendio de cierta intensidad es mayor que la de un bosque denso de coníferas. Resiliencia, en cambio, es la capacidad del ecosistema de fluctuar dentro de ciertos límites y volver a su estado original después de una perturbación. Si la magnitud de ésta excede esos límites, el ecosistema no es capaz de retornar a su condición anterior y en consecuencia se degrada hacia estados sucesionales más pioneros. Los límites de resiliencia son diferentes para los distintos ecosistemas; igual ocurre con la velocidad de recuperación. Por ejemplo, aunque una pradera situada en una zona húmeda de suelos profundos se someta a pastoreo intenso, la composición y biomasa originales se pueden recuperar prontamente luego de un período de rezago. Por el contrario, si una pradera rala, en una zona semiárida con suelos delgados, se pastorea con igual carga, con el tiempo se puede desencadenar un proceso erosivo, llegándose a un ecosistema con un suelo más delgado, de menor productividad. En este caso, la probable recuperación del ecosistema involucraría costosas labores de conservación del suelo y de la pradera, además de que tomaría un largo tiempo.

Productividad versus cosecha

Los ecosistemas reciben una serie de estímulos (radiación solar, agua, nutrientes, etc.) y son capaces de responder aumentando la biomasa de las diferentes poblaciones animales y vegetales. A este aumento de biomasa se le llama producción, o productividad si se expresa en forma anual (normalmente como gramos por m² o toneladas por hectárea). La producción es el resultado de un proceso complejo de transformación de materia, energía e información en el ecosistema. Al aumento de biomasa se opone un proceso de disminución (por mortalidad y descomposición),

denominado respiración del ecosistema. La productividad total de éste se denomina productividad bruta. Si a este valor se resta la respiración, se obtiene la productividad neta. Así, por ejemplo, en un ecosistema maduro la productividad bruta puede ser alta, pero ésta es igualada por la respiración, por lo que la productividad neta oscila entonces en torno a valores cercanos a cero, y la biomasa total se mantiene constante. En un ecosistema pionero, la respiración es muy baja y la productividad neta resulta alta, con la consecuente acumulación de biomasa. Ésta es justamente una de las razones por las cuales el hombre hace agricultura manteniendo ecosistemas pioneros. Además, los sistemas agrícolas están concebidos para que gran parte de la productividad sea directamente aprovechable por el hombre. Por el contrario, en un ecosistema maduro y diverso (como un bosque tropical), sólo un porcentaje pequeño de la productividad total es utilizable por el hombre.

Interesa examinar ahora cuál es la relación entre productividad y cosecha, entendiendo por ésta el retiro que hace el hombre en un momento dado de una parte de la biomasa del ecosistema. Es fácil visualizar dicha relación cuando se trata de cultivos anuales. En este caso, normalmente la cosecha corresponde a la productividad. Así, en un cultivo de maíz se producen y se cosechan 10 toneladas de grano por ha/año. No obstante, en la explotación de muchos recursos, tales como los bosques naturales, la cosecha ha superado enormemente a la productividad natural del ecosistema. De esta manera se cosecha no sólo la productividad anual, sino la biomasa y el suelo desarrollados durante siglos o milenios. Esto es lo que se ha definido como cosecha ecosistémica⁹, que implica la disminución de la base de recursos y de la productividad del ecosistema. El manejo de los bosques naturales, los mares y otros recursos con el propósito de obtener una cosecha permanente en el tiempo exige que el ecosistema se considere como un capital; cada cierto tiempo (de un año hasta 20) se retira de ese capital la productividad acumulada durante el período en que el ecosistema no sufrió deterioro. Así, por ejemplo, si determinada extensión de bosques naturales tiene una productividad de 8 m³ de madera aprovechable por ha/año, el bosque se puede dividir en diez parcelas. De cada una es posible obtener 80 m³/ha cada diez años, lo que equivale a la productividad acumulada en dicho período. Puesto que existen diez parcelas, se pueden cosechar en forma sostenida 80 m³/ha año en un décimo de la superficie total, sino que el bosque se degrade. En el mismo ejemplo, si la superficie total manejada fuera de 200 ha, podrían conseguirse 1600 m³ al año de cada parcela de 20 ha. Es necesario aclarar que en este ejemplo el volumen total de madera del bosque ("el capital") sería de unos 500 m³ por hectárea.

Ecosistemas artificiales

Definición

Con base en Gastó¹⁰ es posible definir de manera simplificada la artificialización como la transformación de un ecosistema luego

⁹GLIGO, N. *Agricultura y medio ambiente en América Latina*. Editora Universitaria Centroamericana (EDUCA), San José de Costa Rica, 1986.

¹⁰Véase NAVA, R. ARMIJO, R. y GASTÓ, J. Op. cit.

¹¹GLIGO, N. Op. cit.

de aplicar cierto trabajo. Cualquier aprovechamiento silvoagropecuario significa, en mayor o menor medida, artificializar el ecosistema.¹¹ Estos ecosistemas transformados para obtener una producción silvoagropecuaria constituyen los *agrosistemas*.

Un concepto importante en el estudio de la transformación de ecosistemas es el grado de artificialización, que correspondería a la intensidad de transformación de un ecosistema natural. Se tiene así una serie continua que va desde los ecosistemas no transformados por el hombre (por ejemplo, un bosque virgen o la cumbre de una montaña inexplorada), los ecosistemas de baja artificialización (por ejemplo, praderas naturales destinadas al pastoreo, o bosques naturales con un manejo de selección), los ecosistemas de mediana artificialización (terrenos de cultivo de secano, por ejemplo) hasta los ecosistemas de un alto grado de artificialización, como un invernadero, verbigracia. Otros sistemas creados por el hombre, tales como las grandes ciudades, corresponderían también a ecosistemas de un alto grado de artificialización cuyo funcionamiento depende por completo de enormes cantidades de materia, energía e información que el hombre agrega.

El modelo simple de caja negra permite entender claramente el proceso de transformación de los ecosistemas. El objetivo fundamental de la artificialización es modificar la respuesta del sistema. Por ejemplo, hacer que uno, que naturalmente tendría una producción diversificada, produzca grandes cantidades de un solo producto de consumo humano o transable en el mercado (cereales, carne, fibras, madera, etc.). Para ello es necesario transformar el funcionamiento del sistema, lo que se logra modificando su arquitectura. Para mantener ésta y el funcionamiento creados por el hombre es necesaria la adición permanente de estímulos, tales como agua de riego, fertilizantes, plaguicidas, etc. Cuanto más artificial sea el sistema, menor será su estabilidad y resiliencia (ante las sequías o ante el ataque de plagas, por ejemplo) y por tanto mayor deberá ser el aporte de estímulos. Los agrosistemas muy artificializados dependen mucho del hombre, y si no se le adicionan los estímulos necesarios, en las cantidades y en los momentos determinados, la producción falla.

El modelo de caja negra tiene otra consecuencia práctica para el manejo de los ecosistemas. El aumento de la productividad de un agrosistema se puede lograr mediante: a) la introducción de cambios en la arquitectura del sistema; b) la adición de estímulos, y c) la combinación de cambios en arquitectura y adición de estímulos. Normalmente, los cambios en la arquitectura requieren mayores inversiones iniciales pero son más permanentes. Un ejemplo práctico de ello es que la productividad de una pradera puede lograrse mediante fertilizaciones periódicas o bien plantando una estrata abierta de árboles leguminosos que reduzcan la lixiviación de nutrientes y aumenten los aportes de nitrógeno (mediante bacterias nitrificantes). En este segundo caso se ha modificado la arquitectura del sistema, lo cual permite aumentar la productividad en forma permanente.

¿Existe una artificialización óptima?

La supervivencia y el desarrollo de la sociedad humana requieren

la transformación de vastos ecosistemas a fin de producir alimentos, fibras, madera, minerales, etc., así como para permitir el asentamiento de la población. Desde los inicios de la agricultura hay ejemplos de la artificialización exitosa de determinados ecosistemas, como los cultivos en andenes o terrazas en los Andes de Perú y Bolivia, o las chinampas en México, que corresponden a ecosistemas con un alto grado de transformación. Por otro lado, en casi todos los países de América Latina hay casos desastrosos al cultivar terrenos de aptitud forestal, en vez de haber optado por un grado de artificialización menor (por ejemplo, manejo del bosque). Por esta razón, cuando se trate de planificar el uso de los recursos silvoagropecuarios será preciso resolver dos cuestiones fundamentales: a) cuál es el grado de artificialización adecuado en cada ecosistema, y b) cuál es el proceso más adecuado para realizar determinada artificialización.¹² En cuanto a lo primero no existen principios o "recetas" absolutos; a las consideraciones ecológicas habrá que agregar criterios económicos y sociales. Sin embargo, un criterio general es que en terrenos de alta productividad y escasas limitaciones (por ejemplo, suelos con capacidad de uso I y II) la artificialización debe ser alta y la adición de aportes se justificará plenamente. En el otro extremo, en terrenos de grandes limitaciones de uso (clases VII y VIII) en general se debe mantener el ecosistema con un bajo grado de artificialización.

¹²GLIGO, N. Op. cit.

Cabe comentar que la investigación y el desarrollo de "paquetes tecnológicos" se ha basado mayoritariamente en sistemas de producción con un alto grado de artificialización. De esta manera se sabe bastante de cultivos intensivos en zonas de riego y de plantaciones forestales, pero la información para el manejo de bosques y praderas naturales es aún muy incompleta. Por esta razón, el manejo de los ecosistemas con limitaciones de uso, que normalmente abarcan un área mucho mayor que los terrenos de alta productividad, constituye un desafío importante que requiere una considerable cuota de innovación. En este caso es fundamental, además, aprovechar la experiencia de las comunidades campesinas. Muchas veces éstas han heredado sistemas milenarios de aprovechamiento, como ocurre en las terrazas de los Andes y en las chinampas mexicanas.

Oferta ambiental

Se entenderá como oferta ambiental la capacidad actual y potencial de los ecosistemas para rendir flujos alternativos de bienes y servicios económicos. La oferta ambiental es muy variable, según la complejidad y la diversidad de los ecosistemas. Así, por ejemplo, la de los bosques tropicales lluviosos es muy diversificada. De ellos se pueden extraer productos alimenticios (carnes de animales silvestres, aceites comestibles, frutos, etc.), productos químicos (aceites esenciales, resinas, etc.), además de madera, fibras, especímenes animales vivos y otros productos, todos objeto de transacción en los mercados. Con prácticas de manejo adecuadas es posible aprovechar esta oferta en una perspectiva de sustentabilidad de largo plazo. En el otro extremo, los sistemas muy poco diversificados,

como los cultivos, tienen una oferta ambiental de muy baja diversidad. Así, una pradera artificial destinada al pastoreo intensivo entrega fundamentalmente tres tipos de productos: carne, leche y cueros.

Adicionalmente, otros bienes y servicios también forman parte de esta oferta ambiental, aunque por lo común no son objeto de transacción; no todos son valorables y, cuando lo son, por lo general se debe recurrir a métodos indirectos y a aproximaciones. Tal ocurre con diversas capacidades características de los ecosistemas poco artificializados. Por ejemplo, la de "producir" agua de cierta calidad; controlar fenómenos como la erosión, las inundaciones, etc.; la de ofrecer belleza natural y oportunidades de recreación, además de enriquecer el patrimonio cultural, así como conservar un germoplasma que con el tiempo podría ser útil para el hombre.

Sustentabilidad ambiental

Sin duda, cualquier estrategia de desarrollo ha de ser sustentable físicamente en el mediano y en el largo plazos.¹³ En términos ecológicos, la sustentabilidad de un ecosistema es su capacidad de mantenerse estable en el tiempo, lo que se logra si los parámetros de volumen, tasas de cambio y tasas de circulación se mantienen constantes o fluctúan en torno a valores promedio.

La sustentabilidad ecológica se alcanza espontáneamente en la naturaleza cuando los ecosistemas llegan a un estado maduro o de clímax. En el caso de sistemas artificializados en distinto grado, se logra dicha sustentabilidad cuando el hombre modifica adecuadamente la arquitectura del ecosistema y asegura aportes externos de materia, energía e información que equilibran las entradas y salidas del sistema, lo que permite su permanencia en el tiempo. No hay sustentabilidad cuando las salidas de materia y energía son mayores que las entradas. Este permanente desajuste negativo termina en el deterioro o destrucción del ecosistema.¹⁴

Pasar de la sustentabilidad ecológica a la ambiental exige que en la concepción de los proyectos se incluyan explícitamente el tiempo y elementos tecnológicos y financieros.

La dimensión temporal de la estabilidad de un agrosistema adquiere especial relevancia si se considera cuán frecuentes son los procesos de deterioro lento y gradual. Así, en una perspectiva de corto o mediano plazos, podrían parecer sustentables diversos agrosistemas que en realidad no lo son. Casos de deterioro como éstos se dan, por ejemplo, en la erosión laminar de suelos cultivados y en la degradación paulatina de la composición botánica de pastizales naturales.¹⁵

La consideración de las tecnologías tiene importancia en cuanto a la factibilidad técnica de la sustentabilidad: interesa tanto que haya oferta de tecnologías adecuadas como que exista la capacidad profesional e institucional de aplicarlas. El elemento financiero tiene que ver con la capacidad de movilizar los medios que posibiliten el acceso a los recursos energéticos y materiales que permitan compensar las salidas del sistema. Estas consideraciones hacen posible pasar del concepto de sustentabilidad ecológica al de sustentabilidad ambiental.

¹³GLIGO, N. *Factores y políticas para la sustentabilidad ambiental del desarrollo agrícola*, documento de la División Conjunta CEPAL/FAO presentado en la Reunión sobre Estrategias de Desarrollo Agrorural con Participación Campesina, que se celebró en Santiago de Chile del 24 al 27 de noviembre de 1987.

¹⁴GLIGO, N. *Factores y políticas...* Op. cit.

¹⁵GLIGO, N. *Agricultura y medio ambiente...* Op. cit.

Este texto foi extraído do documento "La dimensión ambiental en proyectos de desarrollo agrícola" elaborado para o projeto CEPAL/PNUMA FP/9101-87-93, denominado "Cooperación técnica para la integración de consideraciones ambientales en la planificación del desarrollo en América Latina y el Caribe - Fase II". Seus autores são Francisco Brzovic, Antonio Lara e José Leyton, consultores da Unidade Conjunta CEPAL/PNUMA. Foi publicado originalmente na revista *Comércio Exterior*, do México.