

PRINCIPIOS GENERALES SOBRE MANEJO DE ECOSISTEMAS

Manuel Maass

Centro de Investigaciones en Ecosistemas, UNAM, Campus Morelia, A.P. 27-3 Morelia, Michoacán, 50890
Correo-e: <mailto:maass@oikos.unam.mx>

La incorporación del enfoque sistémico en la ecología, ha dado nuevas herramientas conceptuales y metodológicas al problema de entender, estudiar, conservar, utilizar y restaurar a la naturaleza. Un ejemplo claro es el concepto de ecosistemas, que fue tomando forma en el transcurso de la última mitad del siglo XX, hasta convertirse, hoy en día, en un concepto clave en la teoría ecológica (Cherrett 1989). Importantes programas de investigación de corte internacional llevan implícito el concepto de ecosistemas, tales como el Long Term Ecological Research Program (Gosz 1996), el Geosphere and Biosphere Program (Walker and Steffen 1996) y más recientemente, el Millenium Ecosystem Assesment (Reid 2000). El propósito de este apartado es describir, de manera general, los principios del manejo de ecosistemas como una herramienta de uso y conservación de los recursos forestales. Se iniciará haciendo una breve reflexión sobre el predicamento ambiental en el que se encuentra la humanidad, para establecer el contexto general en el que se da la necesidad de conservar a los ecosistemas naturales. Posteriormente se mencionará el concepto de ecosistema, describiendo sus componentes y propiedades. Se hará una pequeña discusión sobre la naturaleza no teleológica de los ecosistemas. Le seguirán tres secciones en las que se abordarán los aspectos funcionales del ecosistema, comenzando por los procesos hidrológicos, siguiendo con los aspectos energéticos y concluyendo con la dinámica biogeoquímica de los mismos. Una breve mención sobre el concepto de servicios ambientales ayudará a redondear el concepto sistémico de la naturaleza y de sus recursos. Finalmente, en las últimas tres secciones se abordaran los aspectos de manejo, discutiendo la necesidad de buscar sistemas de producción sustentables, describiendo los elementos del protocolo de manejo de ecosistemas y mencionando las bondades de utilizar las cuencas hidrográficas como unidades de manejo.

El dilema ambiental

Por el simple hecho de estar vivos, todos los organismos que habitan este planeta tienen la capacidad de transformar su ambiente. Esta capacidad varía enormemente entre las diferentes especies, dependiendo de múltiples factores tales como su tamaño, distribución, abundancia, tasa de reproducción y metabolismo, entre otros. En la mayoría, el impacto de su desarrollo se restringe a escalas espaciales y temporales relativamente pequeñas. Sin embargo hay especies ampliamente distribuidas y capaces de transformar grandes extensiones de terreno.

El hombre, desde sus orígenes hace más de tres millones de años, ha tenido la capacidad de transformar su ambiente a escala muy por encima de cualquier otro organismo del planeta. Inicialmente, con herramientas como el fuego, fue capaz de modificar más allá de su entorno inmediato. Conforme fue desarrollándose cultural y etnológicamente, su impacto en el medio aumentó considerablemente. El desarrollo de la agricultura, hace más de diez mil años, le permitió expandir sus actividades, transformando regiones completas. Con la revolución industrial, hace 200 años, el hombre logró un desarrollo tecnológico tal que el impacto de sus actividades ha alcanzado escalas globales.

No fue sino hasta muy recientemente que el hombre comenzó a preocuparse sobre el impacto de sus transformaciones en el ambiente. Desde muy temprano en la historia, existía la percepción de que la naturaleza no sólo era capaz de absorber cualquier tipo de perturbación, sino que además se constituía en un enemigo a vencer. Transformar a la naturaleza y doblegarla a los caprichos del hombre se consideraba un signo de desarrollo económico y social (Jordan 1998). Sin embargo, poco a poco nos hemos dado cuenta que hay un límite en la capacidad que tiene la naturaleza para absorber dichos cambios. La desaparición de especies ha sido una de las primeras evidencias a este respecto. El deterioro ambiental a escala global, documentado recientemente, es una evidencia más del problema.

Se reconocen como cambios globales aquellas transformaciones que alteran las capas de fluidos de la tierra (océanos y/o atmósfera) y que, por lo tanto, se experimentan a escala planetaria (Vitousek 1992). Tal es el caso de los cambios en la composición de la atmósfera y el cambio climático. Así también se consideran las transformaciones del ambiente que ocurren en sitios muy localizados, pero tan ampliamente distribuidos que constituyen un cambio a nivel global. Los cambios en el uso del suelo, la pérdida de la biodiversidad, la erosión de los suelos y la introducción de especies exóticas son ejemplos de lo último.

Otra evidencia clara que nos permite apreciar el impacto de nuestras actividades sobre la naturaleza, es nuestra inquietante incapacidad para resolver lo que se denomina genéricamente como problemas ambientales. Al parecer estos, más que resolverse, se agravan día con día. Y lo que sucede es que al atacar asuntos como la contaminación atmosférica, la pérdida de fertilidad de los suelos, la extinción de especies o el cambio climático, en realidad estamos atacando los síntomas (Ehrlich y Ehrlich 1991). La raíz del problema radica en que estamos alterando los procesos que mantienen el sistema de soporte de la vida del planeta y con ello estamos reduciendo su capacidad para mantener a los seres humanos. En otras palabras, la economía de la humanidad descansa en diversos servicios que otorgan gratuitamente los ecosistemas naturales, los cuales estamos desmantelando sin ninguna consideración (Ehrlich y Ehrlich 1991).

El concepto sistema de soporte de vida viene de la industria espacial y se define como todos aquellos equipos, rutinas, mecanismos y procesos, que mantienen el medio ambiente de una nave en condiciones que permitan conservar la vida de sus tripulantes. Utilizando la analogía del planeta Tierra como una nave espacial, el sistema de soporte de vida de la Tierra está armado precisamente por todos aquellos procesos que se dan en los ecosistemas naturales y que conocemos como servicios ambientales (Odum 1983). Estos servicios que da el ecosistema son muy variados e incluyen procesos como el mantenimiento de una mezcla benigna de gases en la atmósfera, la moderación del clima, la regulación del ciclo hidrológico, la generación y preservación de suelo fértil, el reciclaje de materiales, el control de plagas y enfermedades, la polinización de cultivos, el suministro de recursos naturales y el mantenimiento de la biodiversidad (Daily *et al.* 1997).

Es importante recalcar que los servicios ecosistémicos son importantes, entre otros aspectos, porque operan a gran escala; la tecnología no los puede reemplazar; se deterioran como resultado de la acción humana y de manera global; requieren de un gran número de especies para operar y, además, los servicios que se pierden por el daño de los ecosistemas son más valiosos que las ganancias que se obtienen mediante las actividades que los alteran (Daily *et al.* 1997).

Ahora bien, si los ecosistemas naturales constituyen el sistema de soporte de vida del planeta, y es precisamente su acelerada degradación lo que está generando la severa crisis ambiental en la que nos encontramos, se vuelve imprescindible:

- 1) frenar el deterioro de los ecosistemas naturales;
- 2) restaurar los ecosistemas ya deteriorados, y
- 3) diseñar sistemas productivos que imiten lo mejor posible a los ecosistemas naturales.

Componentes y propiedades de los ecosistemas

Desde principios del siglo pasado los naturalistas reconocían que la naturaleza estaba estructurada conformando grupos de plantas y animales. Sin embargo el término ecosistema fue propuesto por Tansley hasta 1935, quien enfatizó que la distribución de especies y su ensamblaje estaban fuertemente influidos por el ambiente asociado, y por tanto la comunidad biótica constituía una unidad integral junto con el ambiente físico (Golley 1993). En sus orígenes, el concepto no fue bien recibido por la comunidad de biólogos, quienes cuestionaban el carácter teleológico (es decir, vinculado al cumplimiento de un propósito final) que parecía dársele al ecosistema. Como se verá más adelante, esa visión “superorganísmica” de los ecosistemas ha sido desechada por completo.

A diferencia del enfoque analítico y reduccionista que predominó en el pensamiento ecológico del siglo pasado, el enfoque sistémico parte del axioma de que “el todo es más que la suma de sus partes” por lo que propone que el estudio y manejo de la naturaleza debe hacerse en conjunto y no como la suma de sus componentes individuales. Esto tiene implicaciones importantes cuando uno intenta entender, usar, conservar o recuperar a la naturaleza y sus recursos. Por ejemplo, más que en poblaciones y comunidades, los ecólogos de ecosistemas centran su atención en el ecosistema completo, y así, al atacar los problemas de conservación, en vez de parques zoológicos o jardines botánicos proponen el establecimiento de reservas naturales. Al buscar la recuperación de un ecosistema, más que reforestar buscan restaurar los procesos funcionales. El problema de manejar los recursos naturales no se reduce a la utilización de unas cuantas especies, sino al ecosistema en su conjunto, incluyendo los servicios ambientales que este ofrece a la sociedad. Más que la obtención de una alta productividad y rendimiento agrícola, debe buscarse una cosecha sustentable y con bajo impacto en el ambiente.

La mejor manera de definir un ecosistema es describiendo sus características y propiedades (Maass y Martínez-Yrizar 1990). En primer lugar, hay que pensar en los ecosistemas como sistemas, esto es, en un conjunto de elementos, componentes o unidades relacionadas entre sí. Cada uno de sus componentes puede estar en diferentes estados o situaciones; el estado seleccionado del sistema, en un momento dado, es producto de las interacciones que se dan entre los componentes.

Los componentes del ecosistema son tanto bióticos como abióticos. Los componentes bióticos incluyen organismos vivos como las plantas, los animales, los hongos y los microorganismos del suelo (figura 1). Los componentes abióticos pueden ser de origen orgánico, como la capa de hojarasca que se acumula en la superficie del suelo (mantillo) y la materia orgánica incorporada en los agregados del suelo. De igual forma, los componentes abióticos incluyen elementos no orgánicos, como las partículas de suelo mineral, las gotas de lluvia, el viento y los nutrientes del suelo.

Cuando se estudia un ecosistema no se analiza cada uno de sus componentes por separado, sino más bien el sistema en su conjunto, analizando las interacciones que se dan entre componentes, e identificando aquellos mecanismos o procesos que controlan al sistema. Los dispositivos de control incluyen mecanismos de retroalimentación positivos y negativos. Los mecanismos de retroalimentación positiva son aquellos que sacan al ecosistema del estado particular en el que se encuentra, por ejemplo una lluvia, la caída de un árbol o la ocurrencia de una sequía. Los mecanismos de retroalimentación negativa son aquellos que tienden a regresar al ecosistema al estado previo a la perturbación, por ejemplo, los mecanismos de restauración que se disparan después de un incendio, la evaporación del agua del suelo después de una lluvia o la formación de suelo nuevo que compensa aquél que se pierde por erosión.

Los ecosistemas están estructurados jerárquicamente, esto es, un ecosistema es parte de un ecosistema mayor que lo contiene y a su vez está conformado por varios subsistemas. Por lo mismo, los procesos funcionales del ecosistema operan a diferentes escalas espaciales y temporales (figura 2). Así por ejemplo, existen procesos como la descomposición microbiana, que se da a escalas de milésimas de milímetro y en cuestión de minutos; procesos de caída de árboles que se dan a escalas de varios metros cuadrados y en períodos de varios años; inundaciones que ocurren con períodos de retorno de décadas y que afectan a cientos de hectáreas y erupciones volcánicas que ocurren en escalas geológicas de miles de años y que pueden tener impactos a nivel global.

Figura 1.- Modelo conceptual de un ecosistema (modificado de Aber y Melillo 1991).

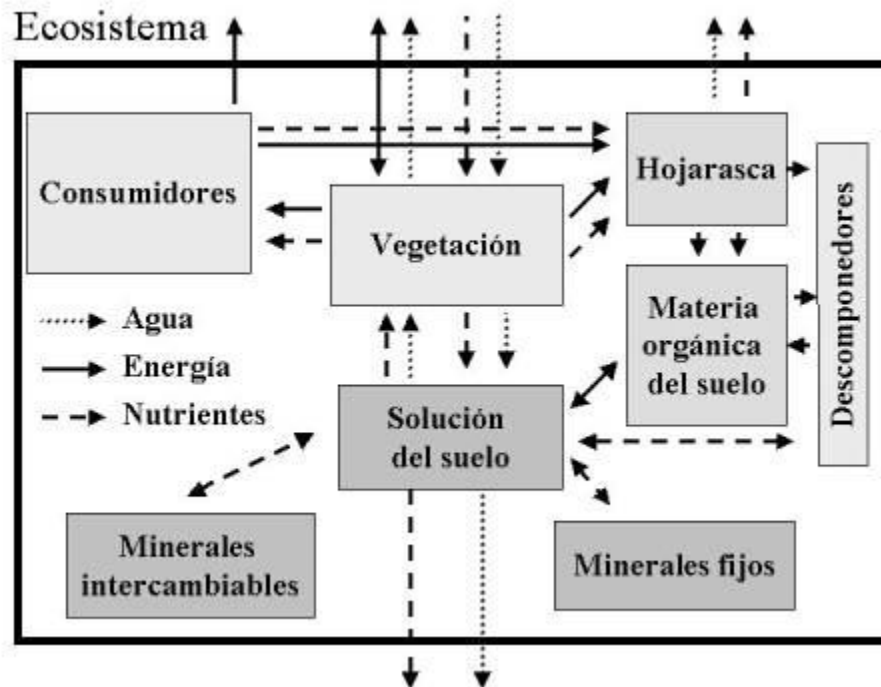
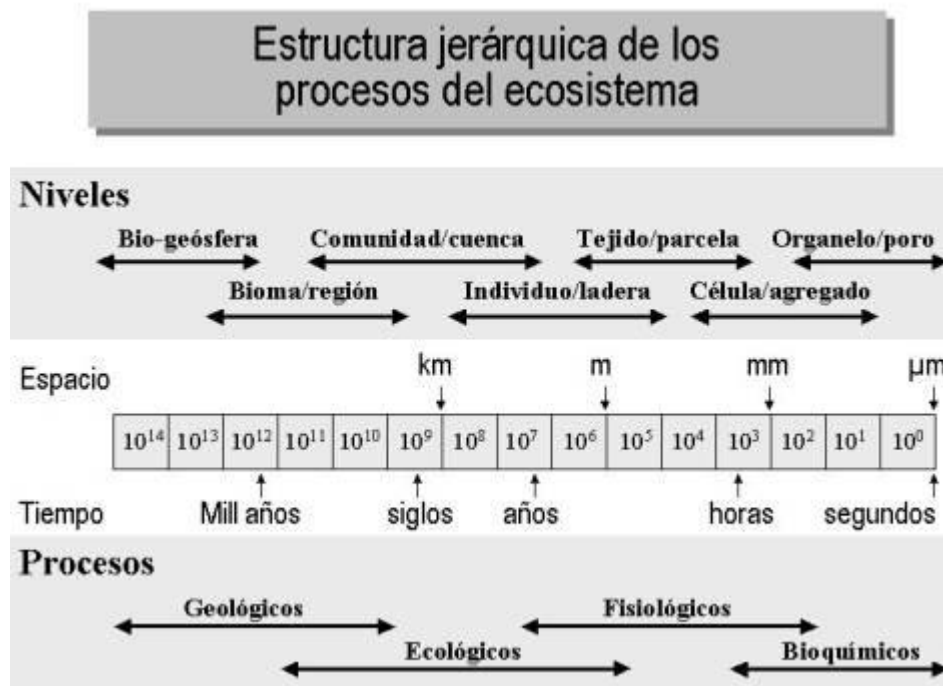


Figura 2. Carácter jerárquico de los procesos que se dan en la naturaleza



Este carácter jerárquico y multiescalar de los procesos del ecosistema hace imposible establecer límites precisos sobre dónde acaba uno y empieza el otro. Más bien existe un continuo de componentes y procesos interrelacionados que se intercalan a diferentes escalas espaciales y temporales. Cuando uno trabaja con un ecosistema, delimita sus fronteras de manera un tanto arbitraria, dependiendo de los objetivos e intereses particulares. Una vez definida la escala espacial y temporal a la que se trabajará, debe reconocerse que en realidad se trata de un subsistema de un ecosistema mayor que lo contiene, por lo que éste recibe influencias y,

a su vez, tiene influencia sobre el sistema mayor. Esto es, los ecosistemas están abiertos a la entrada de materia, energía e información por parte de su entorno inmediato.

Los ecosistemas no son ambientes uniformes y estáticos sino más bien diversos y dinámicos. Lo que se aprecia como homogéneo y estático a una escala, se torna muy heterogéneo y cambiante en otra. Por ejemplo, un tipo de suelo nos parecerá relativamente homogéneo si analizamos una hectárea de terreno, pero si el estudio lo hacemos a escala de kilómetros cuadrados, nos daremos cuenta que existen una gran variedad de suelos con orígenes y propiedades marcadamente distintas. De igual forma, si analizamos la composición de especies de árboles en un bosque durante una década, difícilmente veremos cambios significativos, sin embargo, un análisis del registro palinológico (de polen) en sedimentos lacustres, mostrará que han ocurrido cambios importantes en la composición de especies de la vegetación en lapsos de miles de años.

Finalmente, es importante enfatizar que los ecosistemas tienen propiedades emergentes, es decir, atributos funcionales que se adquieren circunstancialmente, como producto de la interacción conjunta de sus componentes y procesos. Por ejemplo, la capacidad que tiene un ecosistema para resistir los embates de un huracán o de recuperarse después de un incendio, no es producto de una sola especie o proceso particular, sino del conjunto.

Las comunidades bióticas, los ecosistemas y los socioecosistemas

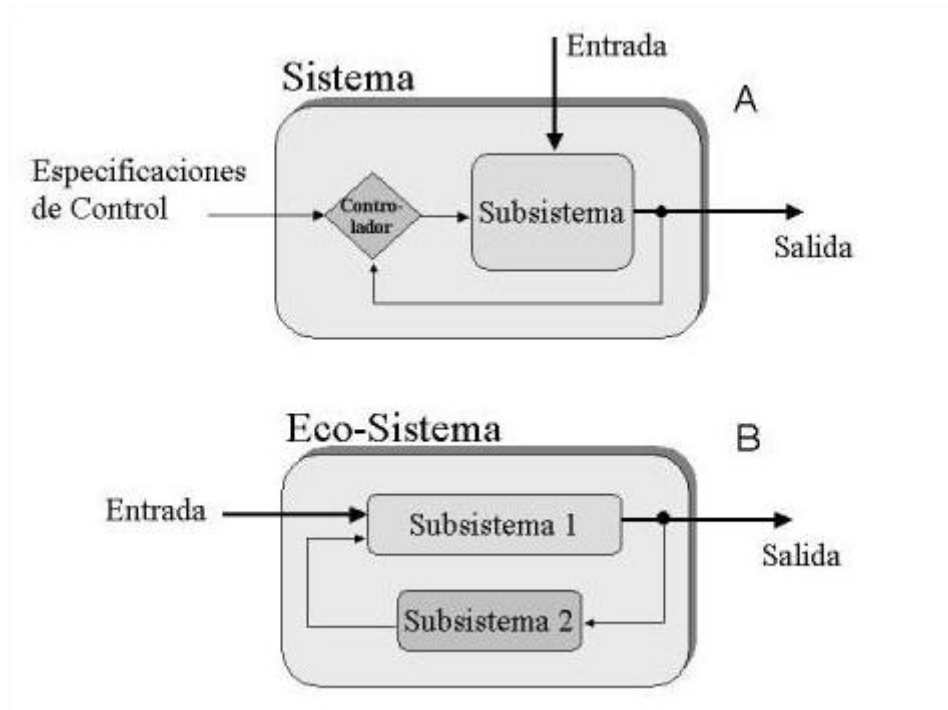
En un intento por reconocer patrones estructurales en la naturaleza, los ecólogos tradicionales describen a los sistemas naturales como comunidades bióticas conformadas por la integración de diferentes poblaciones conviviendo en un tiempo y espacio determinados. Estas poblaciones, a su vez, están conformadas por individuos de la misma especie. Este concepto de comunidad biótica, fuertemente centrado en el componente biológico de la naturaleza, contrasta con el concepto sistémico y más funcional del ecosistema, en donde los componentes abióticos son una parte integral del sistema, y por tanto más que simples parámetros que imponen restricciones a la distribución y abundancia de las poblaciones.

Como mencionamos anteriormente, los ecosistemas naturales no son sistemas teleológicos, esto es, no están estructurados ni funcionan siguiendo un plan, diseño u objetivo predeterminado por algún controlador central (Patten y Odum 1981). Más bien cada componente, biótico o abiótico, tiene propiedades y características que determinan su particular forma de interactuar con el resto de los componentes del sistema. La estructura y el funcionamiento del ecosistema son producto del intrincado acoplamiento de los componentes que, de manera simultánea, ocurren en un espacio y tiempo dados (figura 3).

Durante millones de años, se han ido acoplando componentes bióticos y abióticos, en diferentes lugares y a diferentes escalas, conformando los ecosistemas que conocemos hoy en día. Así por ejemplo, tenemos ecosistemas altamente diversos y productivos en las zonas tropicales del planeta; ecosistemas muy simples y poco productivos en las zonas polares; ecosistemas muy dinámicos en los ríos y ecosistemas fuertemente estacionales en las zonas templadas. Muchos de estos ecosistemas tienen componentes y procesos similares, pero también tienen componentes y procesos muy particulares, que les confieren características y propiedades únicas a cada tipo particular.

La especie humana ha desarrollado habilidades tecnológicas que le permiten transformar los ecosistemas naturales de manera sin precedente en la historia del planeta, por lo que no se trata de un componente más en el ecosistema. A diferencia del resto de las especies el hombre, al transformar un ecosistema, generalmente lo hace con un propósito, lo que le confiere un carácter claramente teleológico. Esto es, tanto los componentes como los procesos funcionales del ecosistema transformado son manipulados a fin de lograr un estado deseado del sistema. De esta forma los ecosistemas pasan de ser sistemas naturales a ser socioecosistemas con una diversidad de variantes: ambientes urbanos, campos de cultivo, plantaciones forestales, y hasta campos de golf y jardines, entre otros. La semejanza de estos ecosistemas artificiales con el sistema natural del que se derivaron, puede variar enormemente. Mientras mayor semejanza exista entre la estructura y el funcionamiento de un ecosistema artificial y el ecosistema natural del cual se originó, menor será el costo económico y ambiental de su mantenimiento.

Figura 3.- Mecanismos de retroalimentación en un sistema



A) Sistema en el que existen especificaciones de control y un controlador central (sistema teleológico).

B) Ecosistema, en el que existe un subsistema secundario compuesto de múltiples mecanismos de retroalimentación que, en conjunto, controlan al sistema completo (no existe un controlador central).

Fuente: modificado de Patten y Odum (1981).

Dinámica hidrológica del ecosistema

El agua es un compuesto abundante, esencial e indispensable para la vida. Sus propiedades físicas y químicas, tales como su alto calor específico, su alto coeficiente dieléctrico, su carácter bipolar, sus altos puntos de ebullición y de congelamiento, su alta cohesividad, entre otros, hacen del agua uno de los compuestos químicos más versátiles de la naturaleza.

El funcionamiento de los ecosistemas resulta controlado, en gran medida, por su flujo hidrológico. Este es una especie de sistema circulatorio del ecosistema, pues disueltos en el agua viajan nutrientes de un componente a otro. Además, el movimiento de agua en el sistema consume enormes cantidades de la energía disponible. Es por ello que la disponibilidad de agua es uno de los factores más determinantes en la capacidad productiva de los ecosistemas.

La fuente principal de agua para un ecosistema terrestre es la precipitación pluvial. Tanto su cantidad anual como su distribución a lo largo del año determinan los patrones fenológicos y productivos del ecosistema. El patrón de humedad atmosférica, aunque de menor magnitud en términos de lo que representa la cantidad de agua que aporta al sistema, también juega un papel relevante al controlar las tasas y demandas de evapotranspiración por parte de la vegetación.

No toda el agua de lluvia llega a infiltrarse en el suelo, ya que una parte importante es interceptada por el dosel de la vegetación y el mantillo. Esta agua interceptada, que puede llegar a representar una buena proporción (en ocasiones más del 50%) del agua que se precipita, regresa a la atmósfera en forma de vapor de agua. El grado de interceptación (captación) depende de factores biológicos como la densidad del follaje, el índice de área foliar, la forma de las copas de los árboles, y el tamaño y forma de las hojas. Asimismo, factores meteorológicos como

baja intensidad de la lluvia, altas temperaturas del aire y fuertes vientos pueden incrementar enormemente la interceptación.

El agua que cruza el dosel o escurre por los troncos llega al suelo modificada, en su composición química y en su energía. Por un lado, el agua de lluvia lava el dosel acarreando partículas de polvo y lixiviados de las hojas hacia el suelo. Además, el paso por el dosel modifica el tamaño y velocidad de las gotas de agua y por tanto su energía cinética. Esto es importante pues no obstante que la energía cinética de las gotas de agua es muy pequeña, es lo suficientemente fuerte como para romper los agregados del suelo. Cuando esto sucede las partículas de suelo tapan los microporos, generando una costra impermeable al paso del agua. Al no infiltrarse, el agua viaja por la superficie del suelo generando escorrentía que lo erosiona. La presencia de mantillo sobre el suelo absorbe esta energía cinética de las gotas de agua, cancelando su efecto erosivo. Así es que, bajo condiciones naturales, el agua se infiltra normalmente a menos que la intensidad de la lluvia rebase las tasas de infiltración, lo cual ocurre durante fuertes tormentas.

El agua que alcanza a cruzar la barrera superficial del suelo es percolada hacia horizontes más profundos y aquella que no es retenida en la matriz del suelo, sale del ecosistema por diversas rutas dependiendo de la topografía del terreno y su conductividad hidráulica. Como la porosidad del suelo es mayor cerca de la superficie, el agua sub-superficial viaja más rápidamente pendiente abajo. El agua que sigue una vía más profunda recarga los mantos acuíferos y tarda más tiempo en volver a aparecer en escena.

No toda el agua que se infiltra viaja horizontes más profundos, hasta salir del ecosistema. Una buena parte se almacena en el suelo, dependiendo de la textura y su contenido de materia orgánica. El agua almacenada en el suelo representa la fuente hídrica más importante para las plantas. Suelos arcillosos y con altos contenidos de materia orgánica almacenan más agua que los arenosos y bajos en materia orgánica. Sin embargo es importante resaltar que los suelos con texturas muy finas retienen fuertemente el agua; tanto así, que puede ser difícil para las plantas acceder a ese recurso (Brady 1974).

El agua almacenada en el suelo es absorbida por las plantas, lo cual acarrea elementos minerales a sus tallos y hojas. El agua finalmente es expulsada por los estomas mediante el proceso de transpiración. Las pérdidas de agua por transpiración pueden representar la vía más importante de salida de agua del ecosistema. Esto generalmente sucede más intensamente en climas subhúmedos con altas temperaturas. Como veremos más adelante, la transpiración es uno de los procesos que consume mayor energía en los ecosistemas. En ecosistemas sin limitaciones de agua, como los bosques tropicales húmedos, la evapotranspiración puede consumir entre el 75% y 90% del total de la energía disponible. En ecosistemas subhúmedos, las tasas de evapotranspiración están muy por debajo de las que potencialmente se podrían alcanzar, considerando a la energía disponible para el proceso.

Balance de energía, productividad y dinámica trófica del ecosistema

La fuente principal de energía de los ecosistemas es el Sol. La radiación solar no solamente alimenta el proceso de fotosíntesis, sino que además calienta el ambiente y mantiene en movimiento al aire y al agua en sus diferentes estados. En algunos ecosistemas la incorporación de materia orgánica en forma de fragmentos de plantas o desechos de animales constituye también una fuente importante de energía. Tal es el caso de los ríos, algunos lagos y los fondos marinos, que dependen de esta fuente de energía para mantener a sus comunidades de heterótrofos.

No toda la radiación solar que llega al ecosistema es utilizada por el mismo. Una importante proporción se refleja y se pierde de regreso a la atmósfera sin ser aprovechada. El albedo, como se conoce a este proceso, depende de las características de la superficie del ecosistema, particularmente de su color. Los suelos oscuros tienen menor albedo que los suelos claros, y un ecosistema nevado alcanza un albedo superior al 90%. Las nubes reducen significativamente la entrada de radiación solar al ecosistema pues poseen altos porcentajes de albedo (Oke 1978).

Del total de energía solar que llega a incorporarse al ecosistema, denominado radiación neta, una gran proporción (más del 80%) se consume en calentar el aire (flujos de calor sensible) y/o en evaporar el agua (flujos de calor latente, figura 4).

En ecosistemas acuáticos o con alta disponibilidad de agua, como los bosques tropicales húmedos, los flujos de calor latente predominan sobre los flujos de calor sensible. En el caso de los ecosistemas más áridos, los flujos de calor sensible son los dominantes (figura 5).

Los flujos de calor en el suelo constituyen entre un 10% y 20% de la energía disponible. Durante el día el suelo se calienta y durante la noche éste irradia el calor de regreso a la atmósfera. Estos flujos de calor son claves en la dinámica funcional del ecosistema, pues controlan el ambiente térmico del suelo, sitio de una gran actividad microbiana.

Figura 4. Componentes del balance energético de un ecosistema. Los porcentajes representan las proporciones de los diferentes flujos, los cuales varían entre ecosistemas

Balance energético en un ecosistema

$$\begin{array}{c}
 Q^* = \underbrace{Q_H + Q_E}_{80-90\%} + \underbrace{Q_G}_{10-20\%} + \underbrace{Q_{Ph} + Q_M}_{<2\%} \\
 100\%
 \end{array}$$

Q^* = Radiación neta
 Q_H = Flujos de calor sensible
 Q_E = Flujos de calor latente
 Q_G = Flujos de calor en el suelo
 Q_{Ph} = Fotosíntesis
 Q_M = Metabolismo

Figura 5. Relación entre los flujos de calor sensible (QH) y los flujos de calor latente (QE) para diferentes ambientes naturales

Cociente de Bowen: $\beta = \frac{QH}{QE}$

Cobertura	β
Mares tropicales	0.1
Selvas húmedas	0.1 - 0.3
Bosques templados	0.4 - 0.8
Zonas áridas	2.0 - 6.0
Desiertos	10

Menos del 2% de la radiación neta es fijada fotosintéticamente por las plantas u organismos fotosintéticos. No obstante esta proporción tan pequeña, en comparación con los flujos antes mencionados, la energía fijada por

esta vía constituye la principal fuente de alimento para el resto de los organismos del ecosistema. Una parte de esta energía fijada, que se denomina productividad primaria bruta, es consumida por los propios organismos fotosintéticos para mantener su metabolismo. El resto es almacenada en sus tejidos o biomasa y constituye lo que se denomina como productividad primaria neta, de la cual dependen los organismos no fotosintéticos del ecosistema (*i.e.* los heterótrofos).

Tanto los desechos de los organismos como sus restos después de morir, terminan incorporándose al suelo o a los lechos lacustres o marinos, constituyéndose así en la fuente principal de energía para una gran diversidad de microorganismos. Estos descomponedores, como se les conoce colectivamente, constituyen redes tróficas que llegan a ser, incluso, más complejas que las que se aprecian con especies menores por encima del suelo.

En última instancia, toda esta energía fijada fotosintéticamente es consumida por los organismos del ecosistema y regresada a la atmósfera en forma de calor metabólico. Sin embargo, no toda la energía regresa a la misma velocidad, ya sea porque se almacena como biomasa, o porque se deposita en forma de materia orgánica del suelo. Los almacenes de energía por estas vías pueden ser cuantiosos y varían dependiendo de los ecosistemas. Por ejemplo, en ecosistemas fríos como la tundra, el almacén más importante de energía lo representa la materia orgánica edáfica, mientras que en ecosistemas tropicales húmedos el principal almacén se halla en la biomasa por encima del suelo (tallos, troncos, ramas y hojas).

Ciclos biogeoquímicos

Además de agua y energía, los componentes del ecosistema almacenan e intercambian materiales en una gran diversidad de tipos, formas y composiciones químicas. Éstos incluyen desde formas iónicas simples, tales como el amonio, el calcio y los sulfatos, hasta complejos compuestos orgánicos como: los alcaloides, los carbohidratos y las proteínas. Estos materiales pueden estar en forma libre y moverse disueltos o suspendidos en el agua y el aire. O bien, pueden formar parte de grandes complejos o agregados, ya sean orgánicos (organismos completos o sus partes) o inorgánicos (rocas, suelo o fracciones de éstos) (Schlesinger 1991).

La fuente principal de los elementos minerales, que circulan en el ecosistema, es el basamento o substrato geológico sobre el cual éste se desarrolla. A través de procesos físicos, químicos y biológicos el substrato se intemperiza, liberando elementos minerales al suelo. El tipo y la cantidad de los minerales liberados depende de factores como su composición química, su textura, los ciclos de humedecimiento y secado, la dinámica térmica, los tipos de organismos presentes, etc. Hay substratos jóvenes y muy ricos que liberan una gran cantidad de elementos minerales, como el material de arrastre que se acumula en los valles aluviales o las cenizas volcánicas. También hay substratos viejos y muy pobres que prácticamente no liberan elementos minerales, como las arenas del desierto, o los suelos fuertemente intemperizados de algunas partes del Amazonas (Jordan 1985).

Aunque en mucho menor cantidad que los procesos relacionados con la intemperie, la lluvia también incorpora elementos minerales al ecosistema. Su importancia relativa depende del grado de fertilidad del suelo. En suelos pobres, por ejemplo, la lluvia constituye una importante fuente de elementos minerales para el ecosistema. Para el caso de los ecosistemas acuáticos, la mayor cantidad de nutrientes ingresa al sistema vía el agua y los materiales arrastrados por sus afluentes.

Las plantas absorben elementos minerales del suelo a través del torrente de evapotranspiración. Esto es, si las plantas no transpiran, no se alimentan. Es por ello que hay una correlación positiva entre la transpiración del ecosistema y su productividad. Las plantas también incorporan materiales, particularmente carbono y oxígeno, mediante un intercambio gaseoso con la atmósfera a través de los estomas. Sin embargo, cuando las plantas del ecosistema se encuentran bajo estrés hídrico, cierran sus estomas como una estrategia para evitar la pérdida de agua por transpiración, pero con ello no sólo disminuyen la entrada de nutrientes vía absorción, sino también aquellos que ingresan por intercambio gaseoso.

Las plantas liberan minerales a través del intercambio gaseoso, pero también por lixiviados o exudados de las raíces. Sin embargo, la vía más importante la constituye la caída de hojas y la mortandad de raíces finas. En

ecosistemas con poca fertilidad en el suelo, y particularmente para el caso de elementos como el nitrógeno y el fósforo, las plantas mueven elementos minerales de sus tejidos viejos y senescentes hacia los tallos o las hojas jóvenes. Este mecanismo de reciclaje dentro de la planta, conocido como translocación de nutrientes, constituye un importante ahorro en su economía energética y nutricional (Aerts 1996).

Año con año el suelo recibe grandes cantidades de materia orgánica proveniente de la caída de hojarasca y la producción de raíces finas. Todo ese material constituye el alimento de una infinidad de organismos del suelo, desde pequeños vertebrados, hasta hongos y bacterias, pasando por insectos, nemátodos, moluscos y muchos otros. Finalmente, todo este material es descompuesto hasta formas más simples de minerales, por lo que al proceso se le conoce como mineralización y en su mayoría está controlado por los microbios.

A semejanza de lo que se expuso líneas arriba respecto de la energía, en algunos ecosistemas como los bosques tropicales húmedos del Amazonas, el almacén más importante de elementos minerales es la biomasa vegetal. Sin embargo, comúnmente es el suelo el principal banco o almacén de minerales en el ecosistema. En el suelo, no todos los minerales están igualmente accesibles o disponibles para el resto de los componentes del ecosistema. Los más móviles son aquéllos que se encuentran disueltos en el agua edáfica, estando más accesibles para ser absorbidos por las plantas, pero también para ser arrastrados a horizontes más profundos y fuera del alcance del sistema radicular. De los diferentes componentes del suelo, las superficies de las partículas más finas (humus y arcillas) constituyen los almacenes más importantes. Como estas superficies están cargadas eléctricamente, los nutrientes en forma iónica se adhieren a estos coloides, lo que evita su arrastre (o lixiviación). Sin embargo, las raíces y los microorganismos del suelo son capaces de extraer estos nutrientes adheridos eléctricamente a las partículas del suelo. También están los nutrientes inmovilizados por los microbios, o almacenados en los tejidos de organismos que sólo están disponibles para las plantas una vez que éstos mueren y los liberan a la solución del suelo. Finalmente hay elementos minerales que forman parte estructural de componentes muy resistentes a la intemperización y mineralización, que, aunque están presentes en el ecosistema, se encuentran muy poco disponibles.

A diferencia del carbono, el hidrógeno y el oxígeno, que son relativamente abundantes y disponibles para las plantas en forma de agua y bióxido de carbono, el nitrógeno y el fósforo son muy escasos, lo cual limita la productividad del ecosistema. El nitrógeno es abundante en la atmósfera, pero en una forma química que las plantas no pueden asimilar. Las bacterias del género *Rhizobium* son capaces de transformar el nitrógeno en forma disponible para las plantas y son las responsables de una buena parte del nitrógeno que circula en los ecosistemas. El fósforo es muy poco abundante en el suelo y, cuando está presente, se encuentra fuertemente fijado o atrapado químicamente, por lo que tampoco está muy disponible para las plantas. Sin embargo hay microorganismos, como los hongos, capaces de extraer este fósforo. Muchas raíces han generado asociaciones simbióticas con bacterias (nódulos) y hongos (micorrizas), lo que les permite tener más fácil acceso al nitrógeno y al fósforo (Aber y Melillo 1991).

Los diferentes componentes del ecosistema se hallan acoplados tan eficientemente que, a través de sus interacciones y procesos, mantienen una cerrada dinámica de elementos minerales, particularmente de nitrógeno y fósforo, estableciendo lo que se conoce como los ciclos biogeoquímicos. Este reciclaje constituye una propiedad emergente que opera a nivel de todo el ecosistema, y le confiere una gran estabilidad.

Servicios ambientales que proporcionan los ecosistemas naturales

El hombre, como todas las especies, obtiene materiales y recursos energéticos de la naturaleza para llevar a cabo sus actividades. Sin embargo, a diferencia del resto de los organismos del planeta, la especie humana ha desarrollado tecnologías que le permiten apropiarse de una enorme cantidad de recursos (y usualmente con gran rapidez), al punto que muchos de ellos se han agotado por completo. Se ha calculado que el hombre utiliza un 40% de la productividad primaria neta del planeta, y un equivalente de los recursos hídricos disponibles (Vitousek *et al.* 1986, Postel *et al.* 1996). Se ha documentado la desaparición de un gran número de especies como resultado de la sobreexplotación de sus poblaciones. Sin embargo, la causa más seria de extinción de especies no es una acción directa producto de la captura y extracción de los organismos, sino más bien una consecuencia de la destrucción de sus ámbitos naturales. Más aún, varios autores coinciden en aseverar que más que un problema de escasez de recursos naturales, el problema es la disminución en la

calidad de vida de la gente, lo que está determinando las necesidades de conservación de la naturaleza (Jordan 1995). El argumento es que, como mencionamos al comienzo del escrito, al transformar los ecosistemas naturales se pierden también servicios ambientales esenciales para el mantenimiento del sistema de soporte de vida del planeta. Así, por ejemplo, la calidad, la cantidad y la temporalidad del agua que llega cuenca abajo, dependen de una infinidad de procesos funcionales que se dan en el ecosistema, por lo que si este es modificado, se altera el recurso hidrológico que brinda.

Se ha clasificado a los servicios ecosistémicos en categorías como: de provisión, de regulación, culturales y de soporte. Los servicios de provisión son aquellos bienes tangibles, recursos finitos aunque renovables, de apropiación directa, que se pueden medir, cuantificar e incluso poner precio. Tal es el caso del agua que extraemos de un pozo, las nueces que colectamos de un nogal, o el suelo en el que cultivamos (Daily *et al.* 1997).

Además de los servicios de provisión directa, los ecosistemas en su conjunto nos proveen de mecanismos de regulación de la naturaleza que benefician al entorno en el que se desarrolla la población humana. Se trata de propiedades emergentes de los ecosistemas, tales como el control de inundaciones, la resistencia a los ciclos e incendios, y el control del albedo (Daily *et al.* 1997)

También están los bienes intangibles cuya importancia surge de la percepción individual o colectiva de su existencia. Estos servicios que dependen fuertemente del contexto cultural, son fuentes de inspiración para el espíritu humano. Aunque es muy difícil, y en ocasiones imposible, asignarles un precio, son fácilmente identificables, como por ejemplo, la belleza escénica de un cuerpo de agua (arroyos, cascadas, humedales, piletas u otros), el aire fresco y limpio, el olor a tierra mojada después de una lluvia o la sombra de un ahuehuete milenario.

Finalmente, están una larga lista de servicios ambientales, poco conocidos y entendidos, pero sumamente importantes pues dan soporte al resto de los servicios (culturales, de regulación y de provisión). Se trata de los procesos ecológicos básicos que mantienen al ecosistema funcionando. Estos servicios no necesariamente tienen un beneficio directamente tangible por la sociedad, pero de manera indirecta le resultan sumamente beneficiosos. Estamos hablando de procesos hidrológicos, como el acarreo de nutrientes y el transporte de materiales, la retención y almacenamiento de nutrientes en el suelo, la regulación de poblaciones de plantas, animales, hongos y otros, y el mantenimiento de una concentración de gases favorable en la atmósfera.

El concepto de servicios ambientales incorpora una nueva perspectiva al problema del manejo de recursos naturales. Estando los procesos ecológicos tan vinculados unos con otros, el manejo de la naturaleza, sus recursos y sus servicios debe hacerse de manera integrada. Asimismo, al reconocer que los procesos ecológicos son en realidad servicios que benefician al hombre, la tarea de conservarlos y manejarlos adecuadamente se hace más fácil, pues es claro el beneficio que ello conlleva. Los economistas consideran que la mejor manera de conservarlos es dándoles un valor que les permita incorporarlos al mercado. Sin embargo, eso no ha sido fácil, sobre todo cuando se trata de los servicios culturales y de sostén. Una alternativa ha sido crear incentivos económicos y subsidios para proteger dichos servicios, tales como los bonos de carbón y el pago por conservar áreas con vegetación natural.

El paradigma de la sustentabilidad

Ante el severo deterioro del ambiente, que ha rebasado las escalas locales y regionales alcanzando niveles globales, se han cuestionado seriamente los modelos de desarrollo económico actuales. En la búsqueda de modelos alternativos que permitan un desarrollo socioeconómico más respetuoso del medio ambiente, en los últimos años se ha ido conformando un nuevo paradigma, conocido como desarrollo sustentable. En esencia, este nuevo paradigma consiste en otorgarles la misma importancia a los aspectos sociales y ecológicos, que a la que se le da a los aspectos económicos a la hora de diseñar las metas, políticas y estrategias de desarrollo de un país o una región (Holling 1993).

Los sistemas productivos bajo un esquema de desarrollo sustentable, deben ser económicamente rentables, socialmente aceptables y ecológicamente viables. El problema es que no resulta fácil maximizar tres variables. Por ejemplo, al intentar lograr la sustentabilidad ecológica de un proceso productivo, frecuentemente los costos de producción aumentan y los rendimientos disminuyen, haciéndolo menos rentable. Ante la existencia de estos antagonismos, la sustentabilidad se antoja como algo utópico. Es por ello que inicialmente lo que se busca es que haya un equilibrio entre los tres componentes, sociales, económicos y ecológicos de los procesos productivos. Una vez logrado este equilibrio se busca mejorar el sistema incrementando de manera simultánea los tres aspectos, a fin de acercarse a la sustentabilidad (Maass 1999).

Un aspecto central en la búsqueda de la sustentabilidad es definir una referencia apropiada de sustentabilidad, así como un criterio para evaluar qué tanto se acerca uno a dicha referencia. El problema se complica pues las referencias y criterios de sustentabilidad económica, no concuerdan con las referencias y criterios de la sustentabilidad social, y éstas con las de ecología. Es por ello que cada componente de la sustentabilidad debe evaluarse en sus propios términos, y la comparación debe hacerse en términos relativos, más que absolutos. Así por ejemplo, si un sistema productivo dado es 90% rentable en términos económicos, pero tan sólo 30% viable en términos ecológicos, se deberá buscar la manera de mejorar la viabilidad ecológica, aún a expensas de la rentabilidad económica. El resultado es un sistema más equilibrado en sus componentes y por tanto más cercano a la sustentabilidad.

Si el deterioro de los ecosistemas naturales es la causa raíz de la problemática ambiental que estamos viviendo, son precisamente los ecosistemas naturales la referencia obligada de sustentabilidad ecológica. Sin embargo no siempre es fácil definir dicha referencia, ya sea porque poco se entiende sobre la estructura y el funcionamiento del ecosistema original, o porque simplemente el deterioro del ambiente es tan extenso que prácticamente ya no existe tal ecosistema.

Existe una gran variedad de parámetros y procesos del ecosistema que se pueden utilizar como criterios de sustentabilidad ecológica. Desde una perspectiva ecosistémica, los flujos de entrada y salida de energía y materiales del sistema son buenos indicadores pues resumen el metabolismo del ecosistema. Así por ejemplo, un sistema productivo con pérdidas de suelo por erosión muy superiores a las tasas que normalmente ocurren en un ecosistema natural, será indicación de que el sistema se está deteriorando y por tanto será poco sustentable. Implementar prácticas de conservación de suelo disminuirá dichas pérdidas, acercando al sistema a la sustentabilidad ecológica.

Dado que los procesos ecológicos se dan a diferentes escalas espaciales y temporales, también surge la inquietud sobre la escala a la que se debe evaluar y buscar la sustentabilidad. Desde una perspectiva sistémica, la sustentabilidad debe medirse a una escala espacial y temporal inmediatamente por encima de aquella a la que se quiere lograr la sustentabilidad (Maass 1999). Esto es, si se quiere lograr la sustentabilidad de una parcela agrícola, se debe trabajar a escala del ejido o de la región completa, y de igual forma, si se quiere lograr una sustentabilidad regional, se debe trabajar a escalas nacionales. A fin de cuentas la sustentabilidad es un problema que debe operar a escalas globales.

El manejo de ecosistemas (explotación, conservación y restauración ecológica)

El hombre, al apropiarse de los recursos que la naturaleza le brinda, cambia el estado de algunos de los componentes del ecosistema. Dadas las relaciones funcionales que ocurren entre los diferentes componentes, al cambiar el estado de uno de ellos se afecta, en mayor o menor grado, al resto de los componentes del sistema. Frecuentemente el impacto de las actividades humanas no se ve de manera inmediata. Más aún, algunas veces el impacto se da en lugares muy distantes al sitio en donde se efectuó la actividad humana. Esto dificulta asociar un impacto en el ambiente con su fenómeno causal.

La respuesta de un ecosistema a la intervención humana varía enormemente dependiendo de la intensidad, la frecuencia y el área afectada por la perturbación (Jordan 1985). Así, por ejemplo, no es lo mismo tumar árboles con un hacha que derribarlos con un bulldózer. Tampoco tendrá el mismo impacto un incendio que

ocurre cada 20 años que una quema año tras año. Asimismo, la respuesta del ecosistema a una transformación de unos cuantos metros cuadrados será muy diferente a la de una deforestación de cientos de hectáreas.

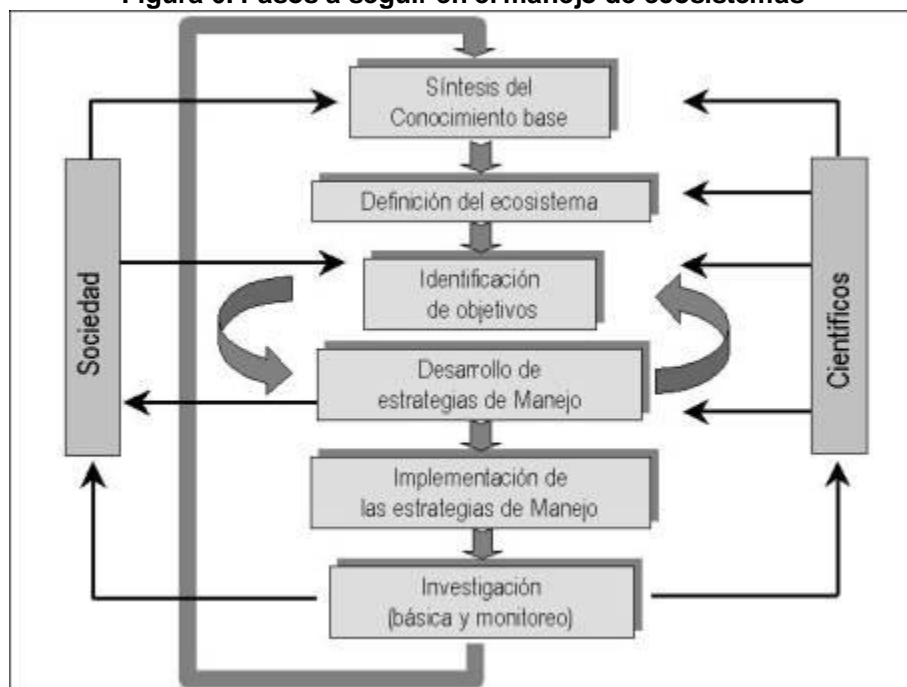
No todos los ecosistemas tienen la misma vulnerabilidad a la intervención humana. Una misma perturbación tendrá un efecto muy diferente bajo condiciones de clima, topografía, suelo y vegetación diferentes. Así, por ejemplo, la pérdida de cobertura vegetal tendrá un impacto menor en una zona plana que en una zona con pendiente pronunciada, pues en esta última la erosión será mucho más acelerada. De igual forma, un suelo con agregados estables, resistirá mejor a la compactación por el paso de la maquinaria agrícola, que un suelo sin agregados.

Es importante distinguir entre la resistencia y la resiliencia de un ecosistema (Holling 1973). La primera hace referencia a la capacidad que éste tiene para absorber los efectos de una perturbación. La resiliencia, en cambio, se refiere a la capacidad que tiene el ecosistema para regresar lo más posible a su estado previo a la perturbación. Por ejemplo, la gruesa corteza de los pinos les permite resistir al fuego, mientras que la capacidad de rebrote de algunas especies es más bien una propiedad de resiliencia. La estabilidad de un ecosistema es el resultado de estas dos propiedades. Ante perturbaciones de baja magnitud, el ecosistema generalmente se recupera sin muchos problemas. Sin embargo, ante eventos de gran magnitud, la recuperación del sistema se vuelve más difícil. En algunos casos la transformación del ecosistema es de tal severidad que, aún cesando la perturbación, éste ya no regresa a un estado similar al original.

La ecología enfocada a ecosistemas está aportando herramientas conceptuales muy útiles para disminuir el impacto negativo de las actividades humanas sobre los ecosistemas naturales. Estos principios, que de manera muy resumida han sido discutidos en el presente trabajo, están ayudando a encontrar formas más sustentables de manejar a los ecosistemas, ya sea para explotar sus recursos y servicios, o para restaurarlos o mantenerlos como sitios de conservación. Christensen *et al.* (1996) definieron el manejo de ecosistemas como «el manejo guiado por metas explícitas, ejecutado mediante políticas, protocolos y prácticas específicas, y adaptable mediante un monitoreo e investigación científica basada en nuestro mejor entendimiento de las interacciones y procesos ecológicos necesarios, para mantener la composición, estructura y funcionamiento del ecosistema».

Stanford y Poole (1996), proponen que un programa de manejo debiera comenzar con una evaluación y síntesis del conocimiento base sobre los procesos que estructuran y mantienen funcionando al ecosistema (figura 6).

Figura 6. Pasos a seguir en el manejo de ecosistemas



Las flechas gruesas marcan la secuencia, las flechas delgadas indican flujos de información
Fuente: modificado de Stanford y Pool (1996).

Esta primera fase permite definir el ecosistema, identificando claramente qué procesos ecológicos y qué componentes del ecosistema son los más relevantes en el control y/o mantenimiento de la integridad estructural y funcional del mismo. Asimismo, permite establecer las escalas espaciales y temporales en las que se dan estos procesos funcionales. La definición de objetivos permite desarrollar una estrategia de manejo para alcanzarlos, en la cual, mediante un proceso iterativo con los diferentes sectores sociales involucrados, tanto objetivos como estrategias se afinan hasta lograr un esquema consensuado con la población y, por tanto, con mayor factibilidad de implementación exitosa.

Es importante enfatizar que la complejidad de los ecosistemas, aunada al hecho de que aún se sabe poco sobre su funcionamiento y exacerbado todo ello con la amenaza del cambio global, hace que normalmente se trabaje bajo condiciones de alta incertidumbre. Esto es, los esquemas de manejo se elaboran sin tener plena certeza sobre los posibles impactos que éstos tendrán en el ecosistema. Es por ello que el impacto de un programa de manejo en el corto mediano y largo plazo debe ser evaluado continuamente, a fin de corregir cualquier desviación generada, ya sea por una mala implementación o por la aparición de efectos no previstos. Al incorporar un proceso de investigación y monitoreo en los esquemas de manejo de ecosistemas, se establece un mecanismo que permite retroalimentar el proceso de manejo en su fase inicial. Este mecanismo, de adaptar el esquema de manejo a las nuevas condiciones, se conoce como «manejo adaptativo» (Holling 1978, Walters 1986).

Un elemento central en el proceso de manejo de ecosistemas es el de identificar claramente el objetivo de manejo. Para ello, es de suma importancia incorporar a los diferentes sectores sociales en el proceso de identificación de objetivos, en un ejercicio participativo. No sólo aquéllos que participan directamente en el programa de manejo, sino también aquéllos que tienen injerencia o que se ven afectados indirectamente por el proceso.

Bondades y limitaciones del uso de cuencas hidrográficas como unidades de manejo integrado de ecosistemas

El agua es, y ha sido, un determinante importante en los procesos de desarrollo económico y social en prácticamente todo el mundo. Su apropiación y consumo se ha regulado desde los inicios de la civilización misma. Desde tiempos de los sumerios, el hombre ha reconocido a las cuencas hidrográficas como unidades de manejo del agua. Sin embargo, no fue sino hasta que se empezó a entender la naturaleza del agua en el contexto del ecosistema, que se detectó la necesidad de ver su manejo de manera integrada con el resto de los recursos naturales. Es por ello que la utilización de cuencas hidrográficas, como unidades de manejo integrado de recursos naturales, es un fenómeno relativamente reciente.

Siguiendo las leyes de la física, el agua drena siguiendo la topografía del terreno. Una cuenca hidrográfica es una superficie de terreno definida por el patrón de escurrimiento del agua. Se trata de una especie de embudo natural, cuyos bordes lo constituyen los vértices de las montañas, o parte-aguas, y la salida del río o arroyo constituye la boca. Una cuenca hidrográfica puede ser tan pequeña como la palma de la mano, o tan grande como un continente completo (figura 7).

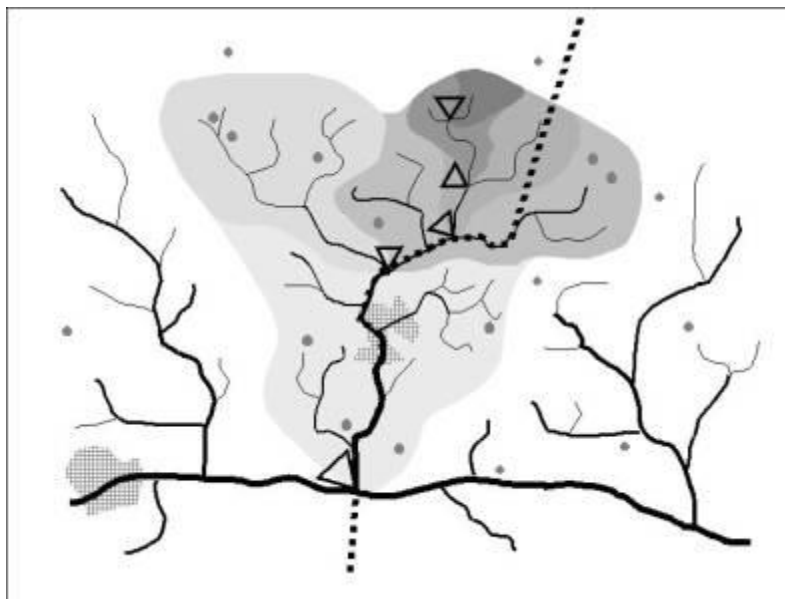
Al ser definidas las cuencas con base en un patrón de movimiento del agua, éstas constituyen unidades funcionales, pues la superficie de terreno que conforma la cuenca está ligada por la dinámica hidrológica que se da en ella. El impacto de una acción de manejo tenderá a contenerse dentro de la cuenca, y lo que se lleve a cabo en la parte alta, tendrá repercusiones en la parte baja.

Las cuencas también se consideran como unidades integrales pues, como ya mencionamos, tanto los procesos biogeoquímicos como los flujos de energía en el ecosistema están controlados por la dinámica hidrológica del ecosistema. Al estar los flujos de agua íntimamente ligados a la topografía de la cuenca, ésta se constituye como una unidad de manejo integrado de ecosistemas. Asimismo las cuencas, al tener límites bien definidos, se constituyen como unidades de manejo mejor acotadas.

Teniendo las cuencas hidrográficas un punto definido de salida, su uso como unidades de manejo hace más fácil la tarea de evaluar el impacto de las acciones de manejo en el ecosistema, así como la de compensar o mitigar estos impactos en el ambiente. Así por ejemplo, un vertedor en la boca de la cuenca nos permitirá monitorear los sedimentos en suspensión como una medida de la erosión del sistema, y una represa captadora de sedimentos en dicha salida de la cuenca puede aminorar el impacto de la erosión fuera de la cuenca.

Las cuencas están estructuradas jerárquica-mente. Esto es: una cuenca está conformada por subcuencas y es, a su vez, parte de una cuenca mayor. La estructura jerárquica de la cuenca permite establecer un esquema de manejo igualmente jerárquico. Por ejemplo: se pueden establecer políticas de manejo generales a nivel de toda la cuenca, y políticas particulares a nivel de subcuenca (figura 7).

Figura 7. Estructura jerárquica de una cuenca hidrográfica



Se pueden establecer sistemas de medición (triángulos) en diferentes puntos dependiendo de qué sección de la cuenca se quiere monitorear. Los círculos pequeños representan poblados y las manchas cuadradas representan ciudades. La línea punteada representa un límite político (e.g. fronteras estatales).

Es importante reconocer que en ocasiones no es fácil definir una cuenca, particularmente en sitios con muy poca pendiente. También hay que tener en cuenta que no siempre la cuenca superficial concuerda con la cuenca subterránea, aspecto que se debe tomar en cuenta a la hora de definir el área de influencia de la cuenca.

Es importante reconocer que los límites de una cuenca rara vez coinciden con los límites políticos, por lo que el éxito de la implementación de un manejo integrado de cuencas dependerá, en gran medida, de la conciliación tanto de los intereses de los diferentes usuarios de la cuenca, como de las políticas de manejo impuestas en cada sección de la misma. La incorporación del concepto de "acción participativa" en el protocolo de manejo de ecosistemas está ayudando a lidiar con este problema.

Resumen

La transformación de los ecosistemas naturales y con ello, el deterioro de los servicios ecológicos que nos ofrecen, se ha identificado como la causa raíz de la severa crisis ambiental que vive el planeta. Cada vez es

más claro que la cantidad y la calidad de los recursos que el hombre se apropia de la naturaleza, depende de una gran diversidad de procesos ecológicos íntimamente relacionados que ocurren en el ecosistema. De igual forma, estos procesos del ecosistema, que operan a diferentes escalas espaciales y temporales, se ven afectados por los procesos de apropiación de los recursos. El entendimiento de estas dos relaciones funcionales es indispensable si se quiere propugnar por una apropiación sustentable de los recursos naturales, pues ello ayuda a definir qué elementos del ecosistema se tienen que manejar, a qué escalas espaciales y temporales debe operar y qué criterios de manejo deben guiar las acciones. La complejidad de los sistemas ecológicos y nuestro limitado entendimiento de los mismos, aunados a la baja capacidad de predicción que se tiene sobre la evolución de los procesos socioeconómicos, y exacerbado todo esto con la amenaza del cambio global, nos obliga a reconocer que se trabaja bajo condiciones de alta incertidumbre. El protocolo para el manejo integrado de ecosistemas, que incluye el concepto de "manejo adaptativo", está dando elementos muy útiles para tratar los problemas de manejo bajo tales condiciones de incertidumbre. Siendo el agua un elemento integrador de los procesos ecológicos en el ecosistema, y estando las cuencas hidrográficas definidas bajo criterios estrictamente funcionales, éstas últimas se han constituido como excelentes unidades de manejo integral de recursos naturales.

Reconocimientos

Este trabajo es una contribución del Grupo "Cuencas" del Centro de Investigaciones en Ecosistemas de la UNAM, quien ha recibido apoyo técnico por parte de Raúl Ahedo, Heberto Ferreira y Salvador Araiza, así como apoyo financiero por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, en México. El presente texto se benefició de los comentarios de Óscar Sánchez y de un revisor anónimo.

Bibliografía

- Aber, J.D. y J.M. Melillo 1991. *Terrestrial Ecosystems*. Saunders C. Pu., Philadelphia, USA. 430 pp.
- Aerts, R. 1996. Nutrient resorption from senescing leaves of perennials: are there general patterns? *Journal of Ecology* 84:597-608.
- Brady, N. 1974. *The Nature and Properties of Soils*. Mc. Millan. NY, 639 pp.
- Cherrett, J.M. (Ed) 1989. *Ecological Concepts: The contribution of Ecology to an Understanding of the Natural World*. Blackwell, Oxford.
- Christensen, N.L., A.N. Bartuska, J.H. Brown, S. Carpenter, C. D'Antonio, R. Francis, J.F. Franklin, J.A. MacMahon, R.F. Noss, D.J. Parsons, C.H. Peterson, M.G. Turner y R.G. Woodmansee 1996. The report of the Ecological Society of America Committee on the scientific basis for ecosystem management. *Ecological Applications* 6(3):665-691.
- Daily, G.C., S. Alexander, P. Ehrlich, L. Goulder, J. Lubchenco, P.A. Matson, H. Mooney, S. Postel, S.T. Schneider, D. Tilman and G.M. Woodwell 1997. Ecosystem Services: Benefits supplied to human societies by natural ecosystems. *Issues in Ecology* No. 2. 16 pp.
- Ehrlich, P. R. and A. H. Ehrlich 1991. *Healing the Planet*. Addison Wesley, N. Y., 366 pp.
- Golley, F.B. 1993. *A History of the Ecosystem Concept in Ecology*. Yale University Press, New Haven. 254 pp.
- Gosz, J. R. 1996. International long-term ecological research: priorities and opportunities. *TREE* 11: 444.

- Holling, C.S. 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4:1-23.
- Holling, C.S. 1993. New Science and New Investments for a Sustainable Biosphere. In: R. Constanza, C. Folke, M. Hammer y A.M. Jansson (Eds.) *Investing in Natural Capital: Why, What and How?* Solomons Press.
- Holling, C.S. (Ed). 1978. *Adaptive Environmental Assessment and Management* . Wiley, London.
- Jordan, C.F. 1985. *Nutrient Cycling in Tropical Forest Ecosystems* . John Wiley & Sons. 190 pp.
- Jordan, C.F. 1995. *Conservation: Replacing Quantity with Quality as a Goal for Global Management*. John Wiley and Sons. 340 pp.
- Jordan, C.F. 1998. *Working with Nature: Resource Management for Sustainability* . Harwood Academic. The Netherlands. 171 pp.
- Maass, J.M. y A. Martínez-Yrizar 1990. Los Ecosistemas: definición, origen e importancia del concepto. *Ciencias* (Núm. Esp.). 4: 10-20.
- Maass, J.M. 1999. Criterios ecológicos en el manejo sustentable de los suelos. En *Conservación y restauración de suelos* . C. Sibe, H. Rodarte, G. Toledo, J. Echevers y C. Oleschko (Eds.). PUMA/UNAM. Pp: 337-360.
- Odum, E.P. 1983 *Basic Ecology* . Saunders, Philadelphia. 613 pp.
- Oke, T.R. 1978. *Boundary Layer Climates* . Methuen and Co. Ltd, Londres. 372.
- Osmond C.B., O Björkman y D.J. Anderson 1980. *Physiological Processes in Plant Ecology*. Springer-Verlag, N.Y.
- Patten, B.C. y E. Odum 1981. The cybernetic nature of ecosystems. *American Naturalist* 118:886-895.
- Postel, S.L., G.C. Daily and P.R. Ehrlich 1996. Human appropriation of renewable freshwater. *Science* 271:785-788.
- Reid, W. 2000. Ecosystem Data to Guide Hard Choices. *Issues in Science and Technology* : 16(3):37-44.
- Schlesinger, W.H. 1991. *Biogeochemistry: an Analysis of Global Change* . Academic Press, N.Y. 443 pp.
- Stanford, J.A. y G.C. Poole 1996. A protocol for ecosystem management. *Ecological Applications* 6(3):741-744.
- Vitousek, P.M. 1992. Global environmental change: An introduction. *Annual Review of Ecology and Systematics* 23: 1-14.
- Vitousek, P.M., , P. R. Ehrlich, A. H. Ehrlich, y P. A. Matson 1986. Human Appropriation of the Products of Photosynthesis. *BioScience* 36(6): 368-73.
- Walker, B.H. y Steffen, W.L. (eds) 1996. *Global Change and Terrestrial Ecosystems* . IGBP Book Series No. 2. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 637 pp.
- Walters, C.J. 1986. *Adaptive Management of Renewable Resources* . McGraw-Hill, New York.